

2024

3^{as} Jornadas de Luso - Españolas de Hidrografía

En Cádiz
9, 10 y 11
de Octubre



ACTAS

3^{as} Jornadas de
**Luso - Españolas
de Hidrografía**

En Cádiz
**9, 10 y 11
de Octubre**

Edita:



© Autor y editor, 2024

ISBN 978-84-9828-998-5

Depósito legal 359-2024

Fecha de edición: octubre de 2024

Maqueta: Imprenta Instituto Hidrográfico de la Marina

ÍNDICE

Comisiones

- De honor
- Organizadora
- Científica

Patrocinadores

Introducción

- Capitán de Navío Comandante Director del Instituto Hidrográfico de la Marina:
Salvador Espinosa González-Llanos
- Rector Magnífico de la Universidad de Cádiz y Presidente de la Fundación CEI-MAR:
Casimiro Mantell Serrano

Ponencias por temas

- Hidrografía
- Cartografía
- Seguridad en la navegación
- Oceanografía
- Geología marina
- Química del medio ambiente
- Contaminación
- Tecnología del mar
- Infraestructura de datos geoespaciales marítimos
- Arqueología subacuática
- Economía azul

COMISIONES

COMISIÓN DE HONOR

Ministra de Defensa, Margarita Robles Fernández
Ministro de Transportes y Movilidad Sostenible, Oscar Puente Santiago
Ministra de Ciencia, Innovación y Universidades, Diana Morant Ripoll
Ministra de Educación, Formación Profesional y Deportes, Pilar Alegría Contente
Ministro de Industria y Turismo, Jordi Hereu Boher
Ministro de Agricultura, Pesca y Alimentación, Luis Planas Puchades
Presidente del Parlamento de Andalucía, Jesús Aguirre Muñóz
Subdelegada del Gobierno en Cádiz, Blanca del Pilar Flores Cueto
Delegada del Gobierno de la Junta de Andalucía en Cádiz, Mercedes Colombo Roquette
Alcalde de Cádiz, Bruno García de León
Alcalde de Chiclana de la Frontera, José María Román Guerrero
Alcalde de Chipiona, Luis Mario Aparcero Fernández
Alcalde de Sevilla, José Luis Sanz Ruiz
Alcalde de Algeciras, José Ignacio Landaluce Calleja
Almirante Jefe de Estado Mayor de la Armada, Almirante Antonio Piñeiro Sánchez
Almirante de la Flota, Almirante Eugenio Díaz del Río Jaúdenes
Almirante de Acción Marítima, Vicealmirante Victoriano Gilabert Agote
Director General del Instituto Hidrográfico de la Marinha de Portugal, Contralmirante Joao Paulo Ramalho Marreiros
Almirante Director de Enseñanza Naval, Contralmirante Ramón Pablo Fernández Borra
Rector Magnífico de la Universidad de Cádiz, Casimiro Mantell Serrano.
Rector de la Universidad de Cantabria, Ángel Pazos Carro
Rector de la Universidad de Málaga, Teodomiro López Navarrete
Rector de la Universidad de Granada, Pedro Mercado Pacheco
Rector de la Universidad del Algarve de Portugal, Paulo Águas
Rector de la Universidad de Magdalena de Colombia, Pablo Vera Salazar
Rector de la Universidad de Las Palmas, Lluís Serra Majem
Rector de la Universidad Politécnica de Madrid, Guillermo Cisneros Pérez
Presidenta del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Eloísa Del Pino Matute.
Presidente de Puertos del Estado, Álvaro Rodríguez Dapena
Presidenta de la Autoridad Portuaria de la Bahía de Cádiz, Teófila Martínez Saiz.
Comandante del Instituto Hidrográfico de la Marina y Director de la Escuela de Hidrografía, Capitán de Navío Salvador Espinosa González-Llanos.
Director del Instituto Geográfico Nacional, Lorenzo García Asencio.
Director del Sistema de Observación Costera de las Islas Baleares, Joaquín Tintoré Subirana.
Directora del Instituto Español de Oceanografía, María del Carmen García Martínez
Director del Real Instituto y Observatorio de la Armada, Capitán de Navío Antonio Ángel Pazos García
Director del Centro Cartográfico y Fotográfico del Ejército del Aire, Coronel Miguel Ángel Tobías Fernández
Director del Centro Geográfico del Ejército de Tierra, Coronel José Luis Sánchez Tello

COMISIÓN ORGANIZADORA

IHM, ARMADA

Antonio Castañeda Pozo
Celso Casal Domínguez
José María Bustamante Calabuig (Presidente)
Luis Javier Gómez Saavedra
Manuel Cendán Fernández

IH, MARINHA

Franco Leitão
José Mesquita Onofre
Lurdes Carneiro
Maria Melo
Zélia Cardoso

CEIMAR

Carla Cabeza Lozano
Carmen Garrido Pérez
Eva Mena Medina
Nathalie Mejía Castillo

UCA

Blanca Román Aguilera
Lecia Rodríguez Fernández
Paula Cantero Reguera

COMISIÓN CIENTÍFICA

IHM, ARMADA

Alberto Fernández Ros
Alejandro Ortega Felipe
Ana Lacida Coto
Antonio Morales Téllez
Antonio Román Pérez Quijano
Bernardo Olivas Flores
Carlos José González Mejías
Francisco Javier Salazar Martín
Gabriel Zambrana Domínguez
José Antonio Terrón Tejero
José María Bustamante Calabuig
Juan Francisco Farrona Marín
Luis Carlos Figueirido Filgueira
Luis Javier Gómez Saavedra
Luis Manuel Rusillo Díaz-Obregón
Manuel Rodríguez Cerdeira
Marcos Larrad Revuelto
María Antonia Navarro Pérez
Maria Luisa Ruiz Medina
Miguel Ángel Romero Vázquez
Miguel Gallego Veiga
Oscar Ortega Pérez
Pablo Sánchez Gámez
Pedro Romero Márquez

Pedro Herraiz Fernández
Raúl Quevedo Pérez
Rebeca María Cope De los Mozos
Samuel Méndez Trinidad
Santiago Rubén Díaz Portillo
Silvia Costa González

ESCUELA DE HIDROGRAFÍA «ALEJANDRO MALASPINA», ARMADA

José Manuel Quijano De Benito
José Ramón Torres García
Juan Antonio Rengel Ortega
Ricardo Pita Rodríguez

IH, MARINHA

Anabela Campos Oliveira
Aurora Rodrigues Bizarro
Carla Palma
Carlos Santos Fernandes
João Delgado Vicente
Joaquim Pombo
José Paulo Pinto
Luís Quaresma dos Santos
Luísa Lamas
Mónica Ribeiro
Reis Vieira
Rui Quartau
Sandra Moreira
Telmo Geraldés Dias

CEIMAR

Alexandra Teodosio
Antonio Tovar Sánchez
Carmen Garrido Pérez
Enrique Moreno Ostos
John Alexander Taborda Giraldo
Julio De la Rosa Álamos
Manuel Manchado Campañas
María Isabel Saez Casado
María Reyes Sánchez Herrera
Marina Delgado Fernández

UCA

Felipe Cerezo Andreo
Javier Benavente González
Jesús Gómez Enri
Manuel Arcila Garrido
Manuel Berrocoso Domínguez
Manuel Bethencourt Núñez
Miguel Bruno Mejías
Rafael Mañanes Salinas
Tomás Fernández Momblant
Vanessa Durán Grados

PATROCINADORES



INTRODUCCIÓN

Es la primera vez que se celebran en España las Jornadas Luso Españolas de Hidrografía, y como no podía ser de otra forma, en Cádiz, sede del Instituto Hidrográfico de la Marina desde hace algo más de 80 años. La ciudad de Cádiz es un referente imprescindible en la Historia de la cartografía náutica. Baste decir que dio nombre durante más de 120 años al origen de las longitudes de las cartas náuticas españolas - el meridiano de Cádiz -, o que por sus calles pasearon figuras tan ilustres como Jorge Juan, Antonio de Ulloa, Vicente Tofiño, Felipe Bauzá y tantos otros; o bien que durante la Guerra de la Independencia se trasladó desde Madrid a Cádiz, concretamente a la Casa de la Camorra en la calle Obispo Arbolí, para que sus valiosos fondos no cayeran en manos de las tropas invasoras.

Desde hace muchos años, el IHM y nuestro homólogo portugués, el IHPT, mantienen una estrecha relación; relación que se ha intensificado en los últimos años todavía más con la apertura de espacios de colaboración técnica, la publicación conjunta de la cartografía náutica en las zonas fronterizas del Miño y el Guadiana, la ejecución de campañas conjuntas con nuevas tecnologías, el fomento del intercambio de personal en unidades hidrográficas y en nuestras escuelas, y aunando esfuerzos en proyectos de interés común en el ámbito internacional. Es en este contexto de colaboración donde nace la idea de organizar juntos estas terceras Jornadas Luso Españolas.

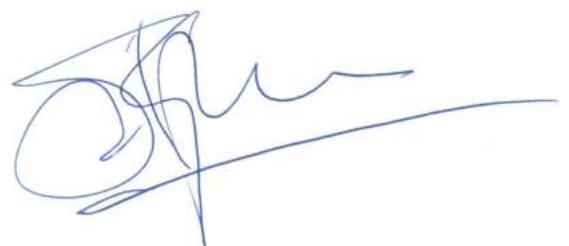
En esta ocasión contamos con dos nuevos coorganizadores de auténtico lujo, la Universidad de Cádiz y la Fundación CEI-MAR, que muy amablemente aceptaron el desafío desde el principio y se sumaron al reto. Su participación permite abrir las jornadas a un mayor número de investigadores y darle así al evento un gran empujón, ya que son vanguardia en muchas disciplinas relacionadas con el conocimiento del medio marino. Espero que sea el principio de una idea que cuaje y solidifique para que se repita en futuras ediciones, tanto en aquí en España como en Portugal.

El objetivo principal de la disciplina de la hidrografía ha sido y sigue siendo garantizar la seguridad del tráfico marítimo. Más del 80% del comercio internacional se transporta por mar. Este dato por sí solo justifica seguir avanzando en el mejor conocimiento del lecho marino, tanto en precisión como en resolución, y muy particularmente en las aguas más costeras de las vías marítimas, espacio natural de la hidrografía.

Pero la hidrografía tiene cada vez más aplicaciones, más allá de la carta náutica. El desarrollo de nuevas tecnologías en los últimos años abre la puerta a acceder a los detalles del fondo marino a una resolución impensable hace pocos años, como podremos comprobar a la vista de algunas de las aproximadamente 80 ponencias de este Libro de Actas. Y esta posibilidad constituye una auténtica autopista para mejorar los resultados de muchas actividades marítimas diferentes a la hidrografía (investigación, pesca, ordenamiento y monitorización de los espacios marinos, explotación racional de recursos naturales, oceanografía, estudios del cambio climático y tantas otras).

No en vano, el lema de la organización hidrográfica internacional para este año es “información hidrográfica: mejorando la seguridad y la eficiencia de las actividades marinas”. Este es esencialmente el enfoque que le hemos querido dar a este Congreso.

El CN. Comandante-Director



Salvador Espinosa González-Llanos

Siempre el mar

Portugal y España están unidas por la cultura, por la historia, por la tierra... y también por el mar. Son muchas las conexiones, muchos los puentes y los proyectos compartidos. Una realidad que se refuerza cuando sumamos el potencial de nuestras universidades y centros de investigación.

De este espíritu y de esta realidad nace el compromiso compartido para, entre los institutos luso y español de hidrografía, el Campus de Excelencia Internacional Global del Mar (CEI-Mar) y la Universidad de Cádiz, organizar las 3ª Jornadas Luso-Española de Hidrografía. Un esfuerzo común en un ámbito de conocimiento especializado cuya mejor recompensa es, sin duda, esta publicación que tiene entre sus manos y que recoge por escrito las aportaciones científicas en disciplinas tan relevantes como la cartografía, la oceanografía, la sostenibilidad de nuestros mares, las tecnologías del mar, la hidrografía o la química del medioambiente marino, entre otras.

La colaboración y compromiso de la Universidad de Cádiz con la organización de estas 3ª Jornadas Luso-Españolas de Hidrografía forma parte de nuestra estrategia de impulso de la Economía Azul como base para un desarrollo inteligente, sostenible e integral basado en el conocimiento y la innovación. Una estrategia que es posible liderar desde el sur del sur y que requiere del compromiso y la determinación de todos los sectores implicados para aprovechar equilibradamente los múltiples activos de nuestro ecosistema mar.

La UCA es la universidad del mar. La elevada especialización en el ámbito de los estudios marino-marítimos es, sin duda, una de nuestras singularidades más relevantes. Los rankings internacionales así lo confirman, situando a nuestra Universidad entre las 150 mejores del mundo oceanografía. Una fortaleza que nos ha conducido, sumando esfuerzos y sinergias, a liderar la alianza de la Universidad Europea de los Mares (SEA-EU) y el CEI-Mar, campus de excelencia internacional que ha contado desde un primer momento con la colaboración del Instituto Español de Hidrografía.

Universidad de Cádiz e Instituto Hidrográfico de la Marina nos volvemos a unir de nuevo para reimpulsar a cada paso esta estrategia compartida para construir juntos y desde el mar nuestro futuro común como sociedad. Como decía el gran poeta portugués Fernando Pessoa, poniendo todo lo que somos en lo mínimo que hagamos, porque en el centro de lo que somos y de lo que queremos ser en un futuro está siempre el mar.

Casimiro Mantell Serrano
Universidad de Cádiz
Rector

PONENCIAS POR TEMAS

An aerial photograph of a tropical island. The water is a vibrant turquoise, transitioning to a deeper blue further out. A large, lush green island dominates the center, featuring a marina filled with numerous white yachts and motorboats. To the left, a smaller island has several buildings and a sandy beach. In the foreground, a narrow, crescent-shaped beach is visible, bordered by dense green vegetation. The overall scene is idyllic and scenic.

H I D R O G R A F Í A

Superficie de Referencia Vertical para Hidrografía (SRVH). Un hito en la Hidrografía española.

Autores: S. Costa (1), J. M. Quijano (1) y C. J. González (1)

(1) Instituto Hidrográfico de la Marina (IHM). scosgon@mde.es

Resumen: El Cero hidrográfico es la referencia vertical, sobre la que se miden las profundidades y las alturas de todo accidente geográfico que vele en bajamar. En España, el IHM, ha desarrollado la SRVH que se define como la superficie continua que materializa el datum de referencia vertical de la cartografía náutica oficial de todas las aguas de jurisdicción española, y que representa en cada punto del terreno, la separación entre el elipsoide WGS84 o geoide EGM-08 REDNAP, y el cero hidrográfico. Su principal aplicación es la referencia vertical de los levantamientos batimétricos tanto por el IHM como organismos y empresas privadas, y su empleo en obras marítimas y estudios oceanográficos en el litoral.

Sus principales beneficios son: la continuidad espacial del cero hidrográfico sin depender de interpolaciones, la independencia de registros de mareógrafos en los levantamientos batimétricos, la interoperabilidad entre productos topográficos e hidrográficos, la obtención de la marea en tiempo real e in situ, entre otros...

Palabras clave: batimetría, cero hidrográfico, elipsoide, mareas, referencia vertical.

1. INTRODUCCIÓN

En este artículo se pretende explicar, cómo se hace la reducción de sondas de la carta a su referencia vertical, el Cero Hidrográfico (CH), y cómo ha evolucionado este proceso gracias a la mejora en la precisión en altura de los datos GNSS, y a la materialización de la Superficie de Referencia Vertical Hidrográfica que ha permitido relacionar “sin costuras” los datos marítimos y terrestres. Esto además nos permite obtener unos beneficios claros en multitud de aplicaciones como veremos.

Merece la pena empezar por conocer el amparo normativo. El R.D. 1071/2007 de 27 de julio por el que se regula el sistema geodésico de referencia oficial en España indica:

Artículo 4. Sistema de Referencia Altimétrico.

1. Se tomará como referencia de altitudes los registros del nivel medio del mar en Alicante para la Península y las referencias mareográficas locales para cada una de las islas. Los orígenes de las referencias altimétricas serán definidos y publicados por la Dirección General del Instituto Geográfico Nacional (IGN).

2. El sistema está materializado por las líneas de la Red de Nivelación de Alta Precisión.

3. El datum hidrográfico al que están referidas las sondas, cero hidrográfico, será definido y publicado por el Instituto Hidrográfico de la Marina (IHM) y representará la referencia altimétrica para la cartografía náutica básica.

El Cero hidrográfico (CH) o Datum de la carta náutica es el plano de referencia vertical sobre el que se

miden, las profundidades y las alturas de todo accidente geográfico que vele en bajamar. Representa «el lugar geométrico de los puntos de mínima altura predecible de la mar sobre la superficie terrestre en condiciones meteorológicas medias y bajo cualquier combinación de condiciones astronómicas». La Organización Hidrográfica Internacional (OHI) recomienda, en su Resolución 3/1919, el empleo de la Mayor Bajamar Astronómica (Lowest Astronomical Tide, (LAT)) como referencia vertical para la cartografía náutica.

2. ANTECEDENTES

Tradicionalmente, los levantamientos hidrográficos utilizaban el sistema clásico de reducción de sondas a partir de los datos de los marea proporcionados por los mareógrafos instalados en la costa. La reducción de sondas al datum de la carta, utilizando el sistema clásico, consiste en restar a la sonda obtenida en tiempo real, la marea en el mismo instante temporal registrada por el mareógrafo de referencia y reducida al CH (Fig. 1 y 2).

$$S_r = S_o + C - O - M$$

S_r = sonda reducida; S_o = sonda obtenida;

C = calado ecosonda; O = altura de ola;

M = altura de marea

Fig. 1. Ecuación de la obtención de la sonda reducida por el método clásico.

Cada CH es local y calculado como un valor independiente del resto de CCHH, y queda únicamente ligado a su hito de referencia independiente de los CCHH adyacentes.

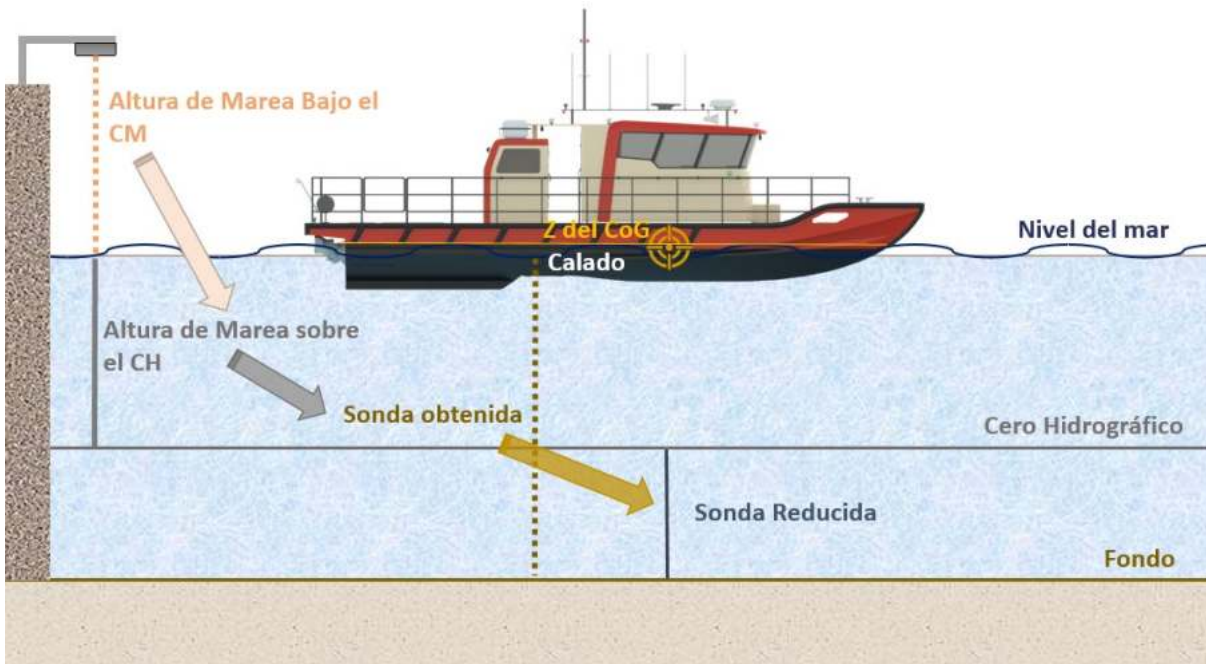


Fig. 2. Esquema de reducción de sondas por el método clásico (fuente: IHM)

En áreas de levantamiento grandes, hay que instalar varios mareógrafos y la reducción de mareas se realiza por una aproximación de media ponderada, dando más peso (inversamente proporcional a la distancia) a los datos del mareógrafo más cercanos.

3. DESARROLLO

Las mejoras que recientemente se han logrado en el cálculo de altura elipsoidal con técnicas GNSS han supuesto que muchos servicios hidrográficos, entre ellos España, hayan desarrollado modelos de altura elipsoidal del cero hidrográfico (AECH) en las aguas de su jurisdicción. El resultado ha sido la materialización de la Superficie de Referencia Vertical Hidrográfica Española (SRVH) (Fig. 3). Son dos superficies, una de altura elipsoidal referida al ETRS89 (usos hidrográficos) y otra de altura ortométrica referida al geoide EGM 08- REDNAP.

Una vez validados los resultados, se prevé la publicación de la SRVH oficial en 2024.

La metodología utilizada ha ahorrado largas y costosas observaciones en la mar. El cálculo de la SRVH se ha basado en la determinación del cero hidrográfico (LAT) en cada nodo (separación de nodos de 1'), a partir de datos de modelos hidrodinámicos y de reanálisis disponibles en la plataforma Copernicus (EU), ajustados con información geodésica del Instituto Geográfico Nacional (IGN) y con las alturas elipsoidales u ortométricas (dependiendo de si la referencia es el ETRS 89 o el EGM08-REDNAP), de los ceros hidrográficos disponibles en la base de datos de mareas del IHM. Los detalles de la metodología y el análisis de los resultados se muestran en los estudios de González et al. (2021).

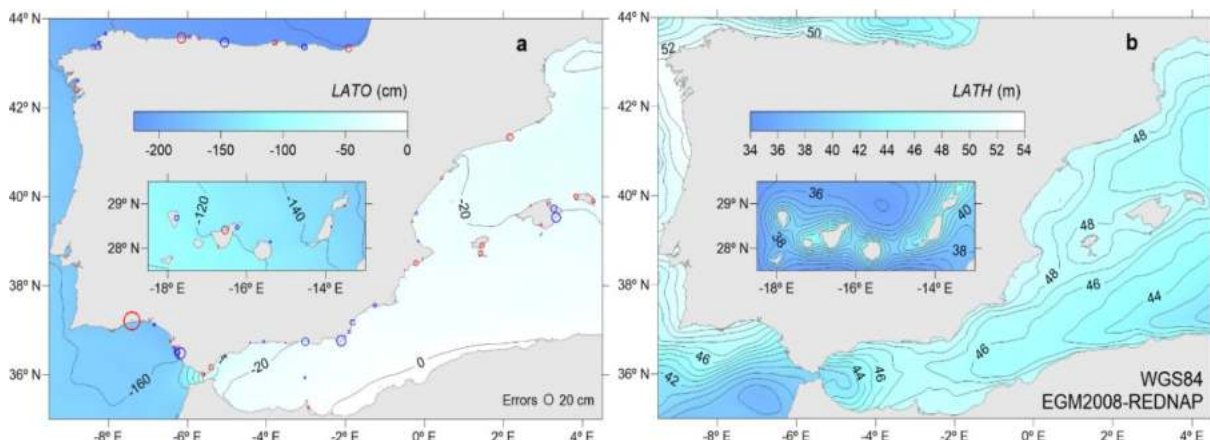


Fig. 3. SRVH referida al Geoide (izquierda) y al elipsoide (derecha). Fuente: IHM.

En la actualidad, el método de reducción de sondas se basa en el empleo de equipos GNSS con recepción de

correcciones RTK para el cálculo de la marea en tiempo real en la ubicación del buque (Fig. 4 y 5).

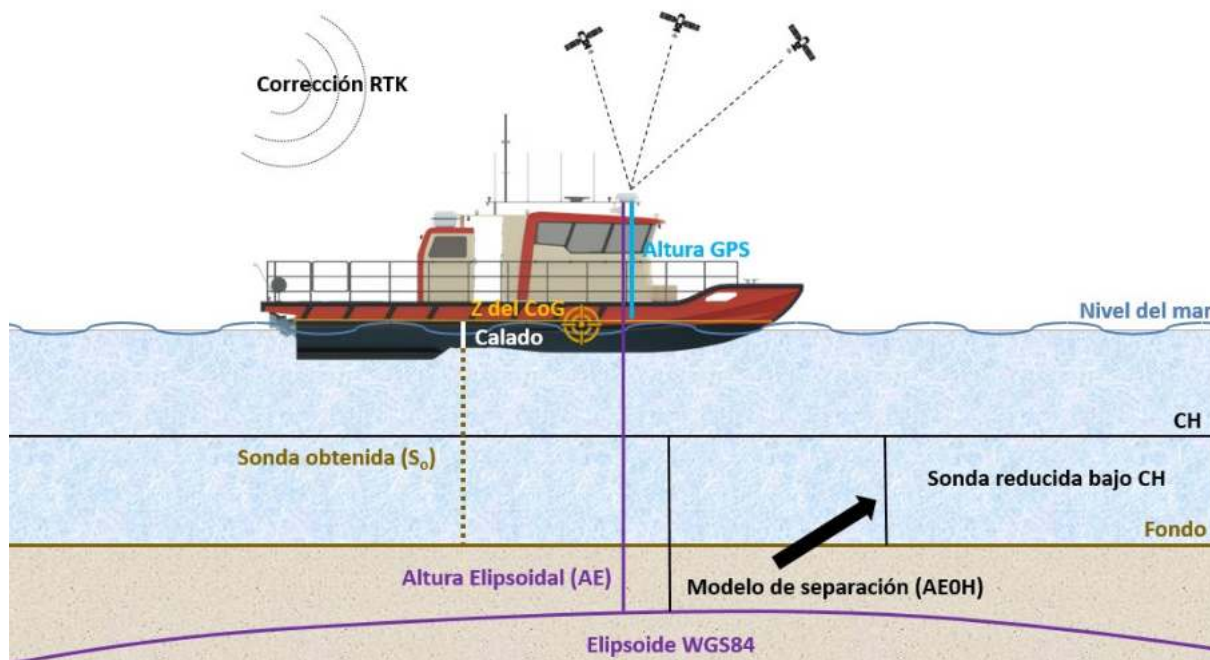


Fig. 4. Esquema de reducción de sondas por el método del GNSS.

$$S_r = S_o + C - AE + h + AEOH$$

S_r = sonda reducida; S_o = sonda obtenida;

C = calado ecosonda; AE = altura elipsoidal;

h = altura de antena del GNSS;

$AEOH$ = altura elipsoidal del CH;

Fig. 5. Ecuación de la obtención de la sonda reducida por el método GNSS.

Para su correcto empleo, será necesaria una interpolación a 1 segundo del modelo de partida, para suavizar las diferencias entre AEOH de nodos adyacentes.

4. RESULTADOS

El empleo de la SRVH beneficia en los siguientes aspectos:

- Tener en una única superficie unívoca de referencia vertical que proporciona la continuidad espacial del cero hidrográfico tanto en costa como en aguas profundas. Esta referencia es permanente en el tiempo, no sujeta a cambios.
- Determinación de CCHH en puertos o litoral donde históricamente no se han instalado mareógrafos.
- Simplificar los trabajos hidrográficos, ya que elimina la instalación y empleo de mareógrafos.
- Emplear una referencia común para las alturas terrestres y las profundidades, y por tanto construir modelos continuos coherentes en las zonas de interfase tierra-mar.

- Aumenta la precisión de los levantamientos ya que determina la altura de marea de la localización del propio buque en tiempo real. Anteriormente, al aplicar los datos del mareógrafo no tenían en cuenta la diferencia de marea entre la localización del mareógrafo y la del buque hidrográfico.

5. CONCLUSIONES

La mejora en precisión del cálculo de altura del nivel del mar con técnicas GNSS en tiempo real, y el desarrollo de la SRVH permiten, además de simplificar los trabajos hidrográficos, utilizar una referencia común para las alturas terrestres y las profundidades, lo que tiene múltiples aplicaciones según se describe en los puntos anteriores.

Para poner esta referencia a disposición, se publica en el IDE-IHM la SRVH para su visualización y descarga de dos superficies, una de altura elipsoidal (LATH de usos hidrográficos) y otra de altura ortométrica (LATO de usos costeros terrestres, tales como modelos de inundación, Salvamento Marítimo, estudios medioambientales, obra portuaria y similares), en la siguiente dirección:

<https://ideihm.covam.es/portal/>

REFERENCIAS

Artículos en revistas:

- González, C.J., Torres, J.A., Bernárdez, P. and Ramos R.J., 2021. Validation and application of model/reanalysis sea-level data to the establishment of the reference hydrographic Surface in Spanish waters. Journal of Operational Oceanography, DOI:

10.1080/1755876X.2021.1902681. Brink, H., e Allen, J. (1978). On the Effect of Bottom Friction on Barotropic Motion Over the Continental Shelf. *Journal of Physical. Oceanography*, 8, 919-922.

Quijano, JM., Costa, Silvia, Gonzalez, C.J. (2023). La Superficie de referencia vertical hidrográfica española, una revolución en el cero hidrográfico. *Revista General de Marina*, Agosto-Septiembre, Tomo 285. pp 445-469. ISSN: 2530-2361. NIPO: 083-15-014-9.

Congresos:

Espinosa S, TorresJR, Carlos González, C.J, Quijano JM (2018) Elaboración de una superficie de referencia hidrográfica en las aguas españolas. Aplicaciones cartográficas y en sistemas de información geográfica. VI Congreso Nacional de I+D en Defensa y Seguridad, 2018

González C.J., Torres JR, Quijano JM (2022) ‘Collateral benefits’ from the development of the Spanish Vertical Reference Surface for Hydrography: deepening into the knowledge on sea-level changes. 7ª Jornadas luso-españolas de Ingeniería Hidrográfica, 2022.

La Militarización del Fondo Marino: Estrategias y Riesgos para la Seguridad Global

Autores: E. Rodríguez-Díaz (1), R. García Llave (1), J.I. Alcaide (1)

(1) Universidad de Cádiz (UCA). emilio.rodriguez@uca.es

Resumen: Este estudio analiza la creciente militarización del fondo marino, destacando las estrategias utilizadas y los riesgos que representan para la seguridad internacional y la gobernanza marítima. Se examinan las tácticas de guerra submarina, el uso de tecnología avanzada y las operaciones encubiertas para controlar recursos estratégicos. El impacto de estas actividades en la seguridad global se evalúa en el contexto de conflictos geopolíticos recientes, identificando las principales estrategias y tecnologías empleadas. Se enfatiza la necesidad de un marco regulatorio internacional y una mayor colaboración entre naciones para abordar estos desafíos emergentes.

Palabras clave: amenazas híbridas, operaciones militares encubiertas, seabed warfare, seguridad internacional, tecnología submarina

1. INTRODUCCIÓN

La militarización del fondo marino ha emergido como un área crítica de interés en el ámbito de la seguridad internacional, representando un nuevo frente en la geopolítica global (Treves, 1980). Este fenómeno, caracterizado por el despliegue de tecnologías avanzadas y la realización de operaciones encubiertas en las profundidades oceánicas, plantea desafíos significativos para la estabilidad global y la gobernanza marítima (Monaghan et al., 2023).

El control y la explotación de recursos submarinos y estratégicos se han convertido en objetivos primordiales para diversas naciones, lo que ha llevado a una carrera tecnológica y militar en este nuevo teatro de operaciones (Monaghan et al., 2023). La creciente importancia del fondo marino en la proyección de poder nacional ha intensificado las tensiones geopolíticas y ha suscitado preocupaciones sobre la seguridad de infraestructuras críticas submarinas (Clark, 2016).

Este escenario emergente plantea interrogantes fundamentales sobre la capacidad de los marcos legales y regulatorios existentes para abordar los desafíos de seguridad en el dominio

submarino. La Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar (UNCLOS), aunque proporciona un marco general para las actividades marítimas, no aborda específicamente las complejidades de la militarización del fondo marino (Portelli, E., 2021).

Además, es importante destacar que estos desarrollos tienen implicaciones significativas para el campo de la hidrografía. La cartografía precisa del fondo

marino y el conocimiento detallado de las características submarinas se vuelven cruciales tanto para las operaciones militares como para la protección de infraestructuras críticas, subrayando la importancia de los avances en técnicas hidrográficas en este contexto geopolítico emergente.

2. DESARROLLO

La investigación se centra en el análisis de las principales estrategias y tecnologías utilizadas en la militarización del fondo marino. Entre estas se incluye el despliegue de submarinos no tripulados (UUVs) para misiones de reconocimiento y sabotaje. Estos vehículos autónomos pueden operar durante largos períodos sin detección, recopilando inteligencia o manipulando infraestructuras submarinas (O'Rourke, 2023).

Otra estrategia clave es la utilización de sensores avanzados para la detección y seguimiento de actividades submarinas. Estos sistemas, que incluyen arrays de hidrófonos y sensores magnéticos, permiten una vigilancia continua de vastas áreas del fondo marino. Paralelamente, se ha observado un desarrollo significativo en sistemas de comunicación subacuáticos para coordinar operaciones encubiertas. Las tecnologías de comunicación acústica y óptica están evolucionando rápidamente, permitiendo una coordinación más eficaz de las actividades submarinas.

Un aspecto crítico de esta militarización es la manipulación y protección de infraestructuras críticas como cables de comunicación submarinos y gasoductos (Yang, W., 2021). Esto incluye tanto la capacidad de dañar estas infraestructuras como de defenderlas contra ataques potenciales. Además, se ha

evidenciado un desarrollo de armas submarinas avanzadas, incluyendo minas inteligentes y torpedos de largo alcance, capaces de operar en aguas profundas y amenazar activos submarinos.

En el contexto de estos desarrollos tecnológicos, se examina cómo estas estrategias se han aplicado en conflictos geopolíticos recientes, evaluando su impacto en la seguridad regional y global. Además, se analiza la evolución de las capacidades de proyección de poder de diversas naciones a través de sus actividades en el fondo marino (French Ministry of Armed Forces, 2022).

La militarización del fondo marino también tiene implicaciones significativas para la exploración y explotación de recursos naturales submarinos. Las disputas territoriales en áreas como el Mar de China Meridional se ven exacerbadas por la presencia de tecnologías militares submarinas, complicando aún más las ya tensas relaciones diplomáticas (Bueger & Edmunds, 2020).

3. RESULTADOS

El estudio revela una intensificación significativa de las actividades militares en el fondo marino, con implicaciones de gran alcance para la seguridad internacional. Se ha observado un aumento en el desarrollo y despliegue de tecnologías submarinas avanzadas por parte de potencias militares (UK Ministry of Defence, 2022). Esto incluye no solo vehículos submarinos no tripulados, sino también sistemas de vigilancia y comunicación cada vez más sofisticados.

Paralelamente, se ha identificado una creciente conciencia de que las infraestructuras críticas incluyen componentes submarinos vitales, como cables de comunicación y gasoductos (Sunak, 2017). Estos activos, fundamentales para la economía global y la seguridad nacional, son cada vez más vulnerables a ataques y sabotajes. Los incidentes recientes han demostrado la facilidad relativa con la que estos sistemas pueden ser dañados o manipulados (Papadimitriou & Klonari, 2023).

Un hallazgo preocupante es la falta de un marco regulatorio internacional adecuado para abordar los desafíos emergentes en este ámbito (Portelli, E., 2021). Las leyes y tratados existentes no están equipados para manejar las complejidades de la guerra submarina moderna. Además, se ha identificado el potencial de escalada de conflictos debido a la naturaleza encubierta de las operaciones submarinas (Bueger & Edmunds, 2020). La dificultad de atribuir acciones

específicas a actores estatales aumenta el riesgo de malentendidos y escaladas involuntarias.

Otro aspecto significativo es el impacto ambiental de las actividades militares submarinas, incluyendo la perturbación de ecosistemas marinos sensibles y la introducción de contaminación acústica.

Es crucial entender que las infraestructuras críticas no se limitan a instalaciones terrestres. Los componentes submarinos, a menudo invisibles, pero igualmente vitales, incluyen cables de fibra óptica submarinos que transportan el 95% del tráfico de internet global (Davenport, 2015), gasoductos y oleoductos submarinos fundamentales para el suministro energético, sistemas de monitoreo oceánico para la detección temprana de tsunamis y otros fenómenos, e instalaciones de extracción de recursos submarinos.

Casos reales de sabotajes submarinos han demostrado la vulnerabilidad de estas infraestructuras críticas. En enero de 2022, el cable submarino de comunicaciones que conecta Tonga con Fiyi fue dañado, resaltando la vulnerabilidad de estas infraestructuras críticas (BBC News, 2022b). En septiembre de 2022, los gasoductos Nord Stream 1 y 2 en el Mar Báltico sufrieron explosiones subacuáticas, interrumpiendo el suministro de gas natural de Rusia a Europa (The Guardian, 2022). En octubre de 2022, el cable submarino de comunicaciones Shetland-Islands Feroe, cerca de Noruega, fue cortado, afectando las comunicaciones en la región (BBC News, 2022a). En noviembre de 2023, un gasoducto submarino y un cable de telecomunicaciones entre Finlandia y Estonia sufrieron daños, posiblemente debido a "actividad externa" (Euronews, 2023).

En respuesta a estas amenazas, varios países han desarrollado unidades especializadas para la protección de infraestructuras críticas submarinas. Francia ha establecido la "Stratégie ministérielle de maîtrise des fonds marins" en 2022 (French Ministry of Armed Forces, 2022). El Reino Unido ha creado una unidad especializada dentro de la Royal Navy para la protección de cables submarinos y otras infraestructuras críticas (UK Ministry of Defence, 2022). Estados Unidos ha reforzado sus capacidades de guerra submarina, incluyendo la protección de infraestructuras críticas (O'Rourke, 2024). Rusia ha desarrollado unidades navales especializadas en operaciones submarinas profundas (Nakamura, 2023). Aunque los detalles específicos no están disponibles públicamente, hay un consenso entre los expertos en que China está dedicando recursos

significativos al avance de sus tecnologías submarinas, incluyendo aquellas destinadas a operaciones en aguas profundas (Business Insider, 2024). Noruega ha aumentado la vigilancia y protección de sus infraestructuras submarinas, especialmente después de los incidentes en el Mar del Norte (Bueger & Edmunds, 2020).

Estos desarrollos subrayan la creciente importancia estratégica del dominio submarino y la necesidad de una cooperación internacional más estrecha para garantizar la seguridad de las infraestructuras críticas submarinas.

CONCLUSIONES

La militarización del fondo marino representa un desafío emergente y complejo para la seguridad global. Las conclusiones del estudio subrayan:

1. La necesidad urgente de desarrollar un marco regulatorio internacional robusto y adaptable para abordar las actividades militares submarinas. Este marco debe equilibrar los intereses de seguridad nacional con la necesidad de preservar la estabilidad global y proteger el medio ambiente marino.
2. La importancia de fomentar la colaboración internacional en la investigación y monitoreo de actividades en el fondo marino. Esto podría incluir la creación de mecanismos de intercambio de información y la realización de ejercicios conjuntos de protección de infraestructuras submarinas.
3. La necesidad de invertir en nuevas tecnologías de detección y defensa para proteger infraestructuras críticas submarinas. Esto incluye el desarrollo de sistemas de vigilancia más avanzados y la implementación de medidas de resiliencia en las propias infraestructuras.
4. La importancia de la transparencia y la cooperación entre naciones para mitigar los riesgos de conflicto y malentendidos en este nuevo teatro de operaciones. Se deben establecer canales de comunicación claros y protocolos de desescalada para evitar incidentes que puedan llevar a conflictos más amplios.
5. La necesidad de considerar el impacto ambiental de las actividades militares submarinas y desarrollar prácticas que minimicen el daño a los ecosistemas marinos.
6. La importancia de educar y concienciar a la comunidad internacional sobre la criticidad de las infraestructuras submarinas y los riesgos asociados con su militarización.

Estas conclusiones enfatizan la urgencia de una acción coordinada a nivel internacional para garantizar la estabilidad y la seguridad en el dominio submarino. La militarización del fondo marino no es solo un desafío militar, sino también un problema de gobernanza global que requiere soluciones innovadoras y colaborativas.

REFERENCIAS

Artículos de revistas:

- Yang, W. (2021). Protecting Submarine Cables From Physical Damage Under Investment Law. *Ocean Development & International Law*, 52(2), 93–112.
<https://doi.org/10.1080/00908320.2020.1869446>
- Bueger, C., & Edmunds, T. (2020). Blue crime: Conceptualising transnational organised crime at sea. *Marine Policy*, 119, 104067.
<https://doi.org/10.1016/j.marpol.2020.104067>
- Clark, B. (2016). Undersea cables and the future of submarine competition. *Bulletin of the Atomic Scientists*, 72(4), 234–237.
<https://doi.org/10.1080/00963402.2016.1195636>
- Davenport, T. (2015). Submarine Cables, Cybersecurity and International Law: *An Intersectional Analysis*, 24 Cath. U. J. L. & Tech (2015).
<https://scholarship.law.edu/jlt/vol24/iss1/4>
- Papadimitriou, D., & Klonari, A. (2023). The geopolitical importance of submarine communication cables: A systematic literature review. *Marine Policy*, 147, 105372.
<https://doi.org/10.1016/j.marpol.2022.105372>
- Portelli, E. (2021). Protection of cables and pipelines submarines. IMO International Maritime Institute.
<https://imli.org/wp-content/uploads/2021/09/Emma-Portelli-Bonnici-Maritime-Legislation-Drafting-Project-Explanat...pdf>
- Treves, T. (1980). Military Installations, Structures, and Devices on the Seabed. *American Journal of International Law*, 74(4), 808–857.
<https://doi.org/10.2307/2201025>

Reports:

French Ministry of Armed Forces. (2022). French seabed strategy. https://www.archives.defense.gouv.fr/content/download/636001/10511909/file/20220214_FRENCH%20SEABED%20STRATEGY.pdf

Monaghan, S., Svendsen, O., Darrah, M., Arnold, E. (2023) NATO's Role in Protecting Critical Undersea Infrastructure. Center for Strategies and International Studies. https://csis-website-prod.s3.amazonaws.com/s3fs-public/2023-12/231219_Monaghan_NATO_CUI.pdf?VersionId=6Usacn9I00IKjF6t4s4XhehMIVROp74W

Nakamura, H., (2023). The Enemy Below: Fighting against Russia's Hybrid Underwater Warfare. Center for Maritime Strategy. <https://centerformaritimestrategy.org/publication/s/the-enemy-below-fighting-against-russias-hybrid-underwater-warfare/>

O'Rourke, R. (2024). Navy Large Unmanned Surface and Undersea Vehicles: Background and Issues for Congress. Congressional Research Service. <https://sgp.fas.org/crs/weapons/R45757.pdf>

Sunak, R. (2017). Undersea cables: Indispensable, insecure. Policy Exchange. <https://policyexchange.org.uk/publication/undersea-cables-indispensable-insecure/>

UK Ministry of Defence. (2022). UK National Strategy for Maritime Security. <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/630880c5e90e0729d9ab15fc/national-strategy-for-maritime-security-web-version.pdf>

Noticias:

BBC News. (2022a, October 20). Damaged cable leaves Shetland cut off from mainland. <https://www.bbc.com/news/uk-scotland-north-east-orkney-shetland-63326102>

BBC News. (2022b, January 18). Tonga tsunami: Communications cut after eruption. <https://www.bbc.com/news/world-asia-60034179>

Business Insider (2024, January 11) China is producing vast undersea maps for submarine warfare, report says. <https://www.businessinsider.com/china-produces-vast-undersea-maps-submarine-warfare-report-says-2024-1>

[produces-vast-undersea-maps-submarine-warfare-report-says-2024-1](https://www.businessinsider.com/china-produces-vast-undersea-maps-submarine-warfare-report-says-2024-1)

Euronews. (2023, October 10). Finland investigating possible sabotage of Baltic gas pipeline to Estonia. <https://www.euronews.com/2023/10/10/baltic-gas-pipeline-leak-likely-caused-by-external-activity-says-finlands-president>

The Guardian (2022, September 29). Nord Stream attacks highlight vulnerability of undersea pipelines to saboteurs. The Guardian. <https://www.theguardian.com/business/2022/sep/29/nord-stream-attacks-highlight-vulnerability-undersea-pipelines-west>

A aplicação de séries temporais de imagens de satélite na determinação da profundidade através de método de SDB

R. Santos (1)

(1) Divisão de Hidrografia do Instituto Hidrográfico - Marinha. ruben.santos@hidrografico.pt

Resumo: Este estudo visa avaliar a capacidade do algoritmo de *Stumpf* em estimar a profundidade numa região costeira. A área de estudo localizada em Setúbal, Portugal, possui características ambientais distintas entre as águas interiores e exteriores ao estuário do rio Sado, exigindo uma análise detalhada do desempenho do algoritmo em diferentes cenários. A metodologia utilizada baseia-se na técnica de Batimetria Derivada por Satélite (SDB), empregando diversas imagens multiespectrais dos satélites *Sentinel-2A* e dados batimétricos como referência. Neste estudo verificou-se a influência da utilização de diferentes bandas espectrais (Azul-Verde e Vermelho-Verde) na determinação da profundidade através do desempenho do algoritmo *Stumpf* em áreas com diferentes características ambientais. Neste estudo a utilização de curtas séries temporais apresentou uma boa correlação na região da Barra em oposição das restantes regiões no interior do estuário.

Palavras chave: Batimetria Derivada por Satélite, Algoritmo de *Stumpf*, Região Costeira, Série Temporal.

1. INTRODUÇÃO

A segurança da navegação depende em grande parte da cartografia precisa do fundo do mar. No entanto, a aquisição de dados acústicos, em áreas costeiras é extremamente demorada e dispendiosa. Resultando no desconhecimento de mais de 50% do fundo do mar em áreas costeiras, representando um risco significativo para a navegação e para atividades socioeconômicas marinhas (Santos e Quartau, 2020).

As áreas costeiras (Fig. 1) são particularmente vulneráveis a eventos extremos e aos impactos das alterações climáticas. A cartografia do fundo do mar é essencial para monitorizar essas alterações e desenvolver estratégias de adaptação eficazes.



Fig. 1. Localização da área de estudo. As áreas cobertas pelos levantamentos hidrográficos (LH) estão representadas pelos polígonos a vermelho com o nome do LH.

Novas tecnologias e métodos como sensores de satélite têm dado um importante apoio à cartografia do fundo do mar em regiões costeiras. Os dados multiespectrais têm permitido cobrir vastas áreas de forma rápida e eficiente. A resolução espacial e temporal desses dados tem vindo a aumentar, permitindo explorar as mais valias de uma série temporal numa determinada região e se é possível melhorar os resultados da Batimetria Derivada por Satélite (SDB) utilizando dados num curto espaço temporal, considerando que o fundo não sofreu alterações significativas (Santos e Quarto, 2024).

Este trabalho tem como principal objetivo analisar os resultados SDB obtidos em 3 datas distintas, próximas da data de aquisição dos dados acústicos, combinado as bandas espectrais B3-B2 (Verde e Azul), B3-B1 (Verde e *Coastal*) e B3-B4 (Verde e Vermelho). Desta forma, é possível verificar as vantagens e limitações da combinação de distintas bandas espectrais no modelo de *Stumpf* (Stumpf *et al.*, 2003), para um ambiente tão exigente com águas interiores e exteriores do estuário do rio Sado (Fig. 1). Esta curta série temporal de SDB vai permitir concluir se é possível melhorar a incerteza da profundidade mediana, através da eliminação de *outliers* (Santos e Quartau, 2024).

2. DADOS E MÉTODOS

Neste trabalho foram utilizados dados batimétricos adquiridos em 6 levantamentos hidrográficos (LH) no interior e exterior do estuário do rio Sado (Fig. 1 - região da Barra, Outão, Antigo Cais, Canal In, Marina, TEPORSET - TOP). Estes dados foram obtidos durante o mês de abril de 2021, através de sondadores acústicos. As imagens adquiridas pelo satélite *Sentinel-2A*, com o nível de processamento L2A, foram selecionadas próximas da data de aquisição dos LHs, mais concretamente: 2021/03/15, 2021/04/04 e 2021/05/04, partindo do princípio que o fundo não sofreu alterações significativas, tendo em consideração a incerteza dos resultados do método utilizados (Stumpf *et al.*, 2003).

As marés modeladas para o marégrafo de Setúbal - Troia foram utilizadas para determinar a altura da maré nos instantes de aquisição das imagens de satélite, tal como para redução da profundidade à referência vertical nacional, o Zero Hidrográfico (ZH).

Pré-processamento dos dados:

A resolução espacial dos LH foi reduzida para 10.0 m, de forma a obter-se um valor de profundidade para cada pixel das bandas espectrais das imagens de

satélite. O método de interpolação utilizado para reamostrar as profundidades foi o bilinear através da biblioteca *gdal-wrap*. Este resultado *RASTER* foi convertido para uma *shapefile* de pontos através do programa *QGIS - Ferramentas de processamento - Píxeis raster para pontos*. Estes dados foram divididos em dados de calibração e de controlo de qualidade das SDBs. Em todos os LHs foram selecionados pontos entre os 0.0 e 15.0 m de profundidade.

O processamento das imagens foi realizado no programa SNAP da ESA (*European Spatial Agency*). Primeiro, a área de interesse foi selecionada em todas as imagens e as bandas espectrais com resolução espacial inferior a 10.0 m foram reamostradas, de forma a que todas as bandas apresentassem 10.0 m de resolução. Este processamento foi realizado através de *SNAP - RASTER - Geometric - resampling* e *SNAP - RASTER - subset*. As bandas selecionadas foram B1- 443 nm (resolução R= 60 m), B2 - 490 nm (R=10 m), B3 - 560 nm (R=10 m), B4 - 665 nm (R=10 m), B8 - 842 nm (R=20 m) e a área de interesse foi definida pelas coordenadas elipsoidais WGS84: 38.569, -9.00, 38.341, -8.594.

O efeito do brilho solar na superfície da água foi removido através da análise da banda B8 (Fig.2), onde se observou o brilho solar, de seguida escolheu-se as regiões com brilho solar e de maior profundidade, sem o efeito do fundo do mar (Fig. 2 - Polígonos);



Fig. 2. Banda espectral B8 (NIR) onde se observa o brilho solar na superfície da água; os polígonos representam as regiões selecionadas com brilho solar (Esq.). Imagem original RGB (centro). Imagem RGB sem brilho solar (DTO).

As reflectâncias da série temporal das imagens foram normalizadas através do método *Pseudo-Invariant Feature (PIF)*, através de *SNAP - Thematic Water Processing - Sen2Coral - Processing Modules - Radiometric Normalization PIF's processor*. A imagem utilizada como referência foi adquirida em 2021/04/04, selecionando-se as regiões, onde as reflectâncias devem permanecer inalteradas ao longo do tempo (PIF), tais como estradas e telhados.

Aplicou-se um filtro passa-baixo 3x3 a todas as bandas, de forma a reduzir o ruído entre píxeis.

A remoção da região de terra, nuvens e espuma branca foi realizada através de uma máscara determinada por: *SNAP - Thematic Water Processing*

- *Sen2Coral - Processing Modules - Land, Clouds White cap Mask*.

Estes dados foram inseridos no QGIS e através da ferramenta *Point Sampling Tool* foi criada uma tabela com as profundidades dos LHs e as reflectâncias das bandas B1, B2, B3, B4. Esta informação permitiu a determinação dos parâmetros da regressão linear do método de *Stumpf*. Este método está descrito em *Stumpf et al., (2003)* e Santos e Quartau (2020).

Estes parâmetros foram determinados combinando os dados dos LH por regiões, profundidades e bandas espectrais (B1, B2, B3 e B4). Desta forma, foi possível otimizar os parâmetros em relação ao melhor coeficiente de correlação. Na secção dos resultados estão descritas as parametrizações estudadas para as regiões Azul, Laranja e Verde. Após análise dos resultados SDB escolheram-se as melhores parametrizações, em função do coeficiente de correlação.

Estes parâmetros permitiram obter 9 SDBs para as 3 imagens de satélite, originando coeficientes de correlação para cada conjunto de dados de calibração e validação.

Por fim, aplicamos o filtro *Savitzky-Golay (savgol)* às 9 SDB, de forma a suavizar as profundidades entre píxeis da mesma SDB (Savitzky e Golay, 1964) e de seguida, aplicamos o algoritmo *Density-based spatial clustering of applications with noise (DBSCAN)* às 9 profundidades determinadas para a mesma posição do pixel, com o intuito de remover os *outliers* dos nossos dados (Ester *et al.*, 1996). Os dados que se encontrem a uma distância superior a 2.0 m em torno dos clusters foram considerados *outliers*.

A profundidade mediana foi determinada após a remoção dos *outliers* obtendo-se uma única SDB. Esta SDB foi comparada com as profundidades dos LHs, de forma a determinarmos os resíduos e o coeficiente de correlação entre SDB e LHs.

3. RESULTADOS

Na Fig. 3 está representado o resultado SDB obtido para as bandas espectrais B3 e B2, adquiridas em 2021/05/04, com uma altura de maré 2.39 m. Este resultado foi obtido com os parâmetros da regressão linear determinados com os dados selecionados dos LHs do interior do estuário entre as profundidades 0.0 e 8.0 m (região - Azul). O coeficiente da correlação linear de 0.75 foi obtido entre os dados de calibração e os obtidos pelo modelo, sendo o mais baixo em comparação com a região Laranja (bandas espectrais B3 e B2 com os dados da Barra entre as profundidades 0.0 e 20.0 m) e Verde (bandas espectrais B3 e B4 com dados da Barra até aos 20.0 m). O controlo de qualidade realizado entre as SDBs e os dados de controlo para cada LH revelou valores

iguais entre a região Azul e Laranja, sendo esses valores superiores à região Verde.

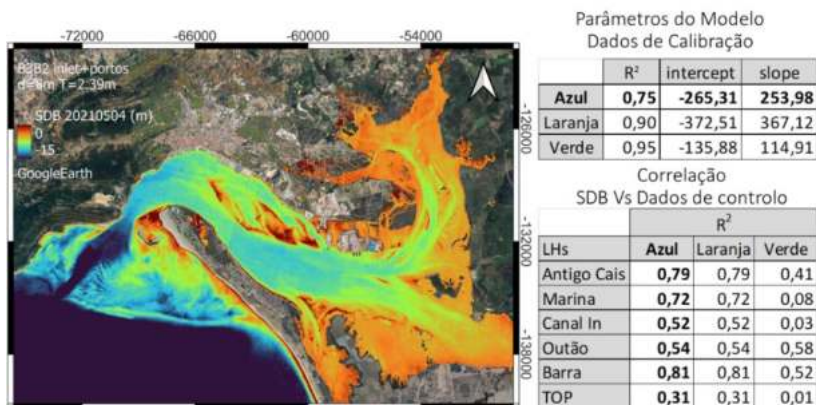


Fig. 3. O resultado SDB obtido com as bandas espectrais B3 e B2 adquiridas na data 2021/05/04. Tabela com os parâmetros da regressão linear (R^2) determinados com os dados de calibração, selecionados entre os 0 e os 8 m de profundidade para os LHs localizados no interior do estuário “Inlet+portos”. A altura da maré, no instante de aquisição da imagem correspondia a 2.39 m (T). Tabela com o R^2 , obtido entre as profundidades de cada LH e os SDBs. O negrito corresponde aos dados relativos ao SDB da figura.

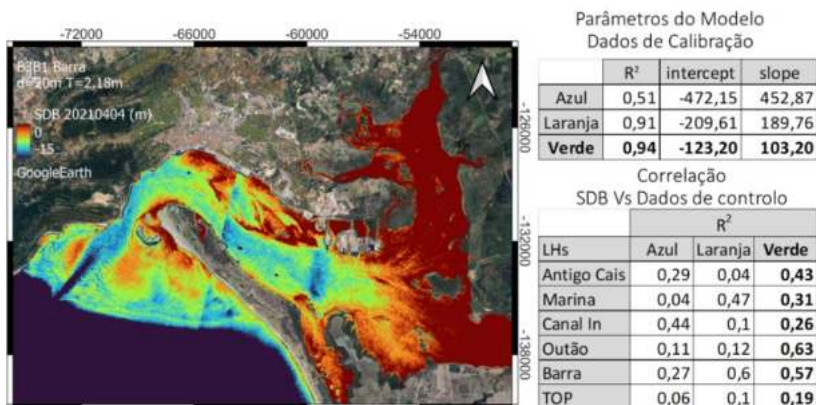


Fig. 4. O resultado SDB obtido com as bandas espectrais B3 e B1 adquiridas na data 2021/04/04. Tabela com os parâmetros da regressão linear (R^2) determinados com os dados de calibração, selecionados entre os 0 e os 20 m de profundidade para o LH na Barra. A altura da maré, no instante de aquisição da imagem correspondia a 2.18 m (T). Tabela com o R^2 , obtido entre as profundidades de cada LH e os SDBs. O negrito corresponde aos dados relativos ao SDB da figura

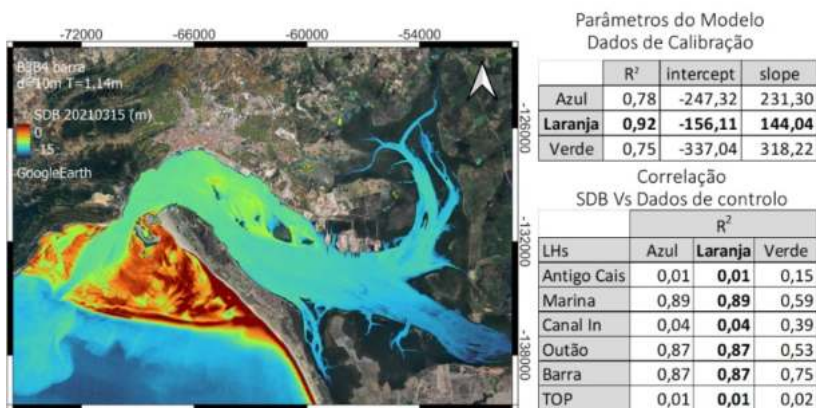


Fig. 5. O resultado SDB obtido com as bandas espectrais B3 e B4 adquiridas na data 2021/03/15. Tabela com os parâmetros da regressão linear (R^2) determinados com os dados de calibração, selecionados entre os 0 e os 10 m de profundidade para o LH na Barra. A altura da maré, no instante de aquisição da imagem correspondia a 1.14 m (T). Tabela com o R^2 , obtido entre as profundidades de cada LH e os SDBs. O negrito corresponde aos dados relativos ao SDB da figura

Na Fig. 4 estão os resultados para a imagem adquirida em 2021/04/04. A SDB nessa figura foi obtida com a combinação das bandas B3 e B1 e o modelo foi calibrado com dados adquiridos na Barra de Setúbal até à profundidade de 20 m. Durante a determinação dos parâmetros da regressão linear obtivemos um coeficiente de correlação de 0.94. Este valor foi o

mais elevado em relação à parametrização Azul (dados do LH da Barra até à profundidade de 20 m com a combinação das bandas B3 e B2) e laranja (dados do LH da Barra até à profundidade de 20 m e as bandas B3 e B4).

Quanto ao controlo de qualidade, entre as SDB e os LHs, observaram-se os melhores resultados na parametrização Verde, com a exceção do LH na “Marina” e no “Canal In” (Fig. 4).

Na Fig. 5 estão os resultados obtidos para a imagem adquirida em 2021/03/15. A SDB representada foi obtida com as bandas espectrais B3 e B4 e com os dados de calibração até à profundidade de 10 m do LH da região da Barra (região Laranja). A correlação deste modelo e os dados de calibração foi de 0.92.

O controlo de qualidade revelou excelentes resultados para as regiões da Barra, Outão e Marina.

A parametrização Azul também revelou bons resultados para os mesmos LHs, como se pode observar na Fig. 5.

Após a aplicação do filtro SavGol, do algoritmo DBSCAN e a determinação da profundidade mediana, obteve-se o melhor $R^2=0.86$ para o LH da Barra. Os restantes valores foram inferiores a 0.26.

4. CONCLUSÕES

Como conclusão deste trabalho pretende-se realçar a importância da combinação de diferentes bandas espectrais, com o intuito de otimização dos resultados em função das características físicas do meio ambiente. Dos vários resultados obtidos observou-se uma dificuldade generalizada para conseguir determinar as profundidades para toda a região de interesse, situação já notada em outras publicações (Santos e Quartau, 2020). Este facto deve-se às distintas características físicas inerentes à coluna de água e à cor do fundo marinho.

Atualmente a combinação das bandas B3-B2 é a mais utilizada com o modelo de *Stumpf* e de facto, também neste trabalho foi a que se adaptou melhor aos dois ambientes (externos e internos ao estuário), como se verifica na Fig. 3. No entanto, realça-se a necessidade de selecionar com cuidado as regiões dos dados de calibração, de forma aos parâmetros responderem corretamente às profundidades de uma vasta região. Por outro lado, a banda B1, com uma resolução

espacial de origem de 60.0 m, demonstra uma capacidade de determinação de profundidades superiores às restantes bandas, considerando uma região com pouca turbidez, como é o caso da Barra (Fig. 4). A banda espectral B3 (Fig. 5) revelou resultados com maior contraste das estruturas sedimentares existentes na região da Barra, onde surge de forma clara uma pluma à saída do rio (Fig. 5 - tons de azul claro).

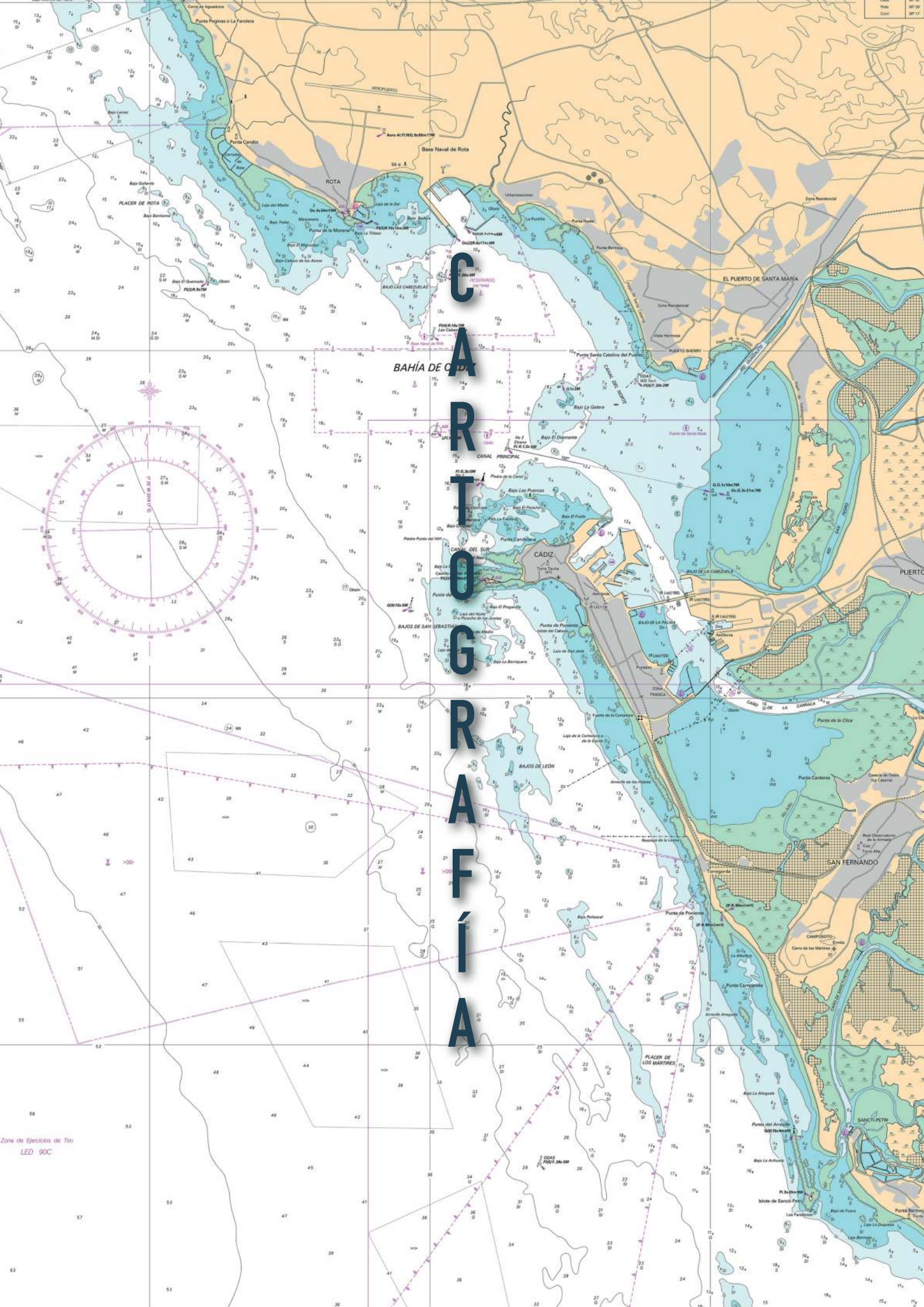
Por fim, a vantagem da utilização desta curta série temporal na determinação da profundidade mediana não é clara, tendo em consideração os resultados obtidos. Estes resultados apresentam uma boa correlação com o LH da Barra, sendo uma região onde aparentemente a turbidez é baixa ao longo da série temporal. No interior do estuário, onde a turbidez varia e é superior à barra, os resultados apresentam uma baixa correlação com os LHs. No entanto, verifica-se a necessidade de realizar um estudo sobre o motivo da degradação dos resultados e se possível, aumentar o número de imagens.

Agradecimentos

O autor agradece à disponibilidade dos dados Sentinel-2A e software: SNAP, QGIS, Anaconda - *Python* e às diversas bibliotecas gratuitas utilizadas neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Ester, M., Kriegel, H. P., Sander, J., & Xu, X. (1996). A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise. In *KDD-96 Proceedings* (Vol. 96, No. 34, pp. 226-231).
- Santos, R., & Quartau, R. (2020). Mapping the shallow water seabed of the Atlantic coastal regions through Satellite multispectral data. *Atas das 1.as Jornadas de Luso-Espanholas de Hidrografia*. Nov. de 2020.
- Santos, R., & Quartau, R. (2024). Predicting bathymetry in shallow regions using a machine learning model and a time series of PlanetScope images. *European Geosciences Union - Copernicus Meetings*. (No. EGU24-22165).
- Savitzky, A., & Golay, M. J. (1964). Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. *Analytical chemistry*, 36(8), 1627-1639.
- Stumpf, R.P., Holderied, K. and Sinclair, M. (2003). Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types. *Limnology and Oceanography*, 48.



CARTOGRAFÍA

BAHÍA DE CÁDIZ

CÁDIZ

SAN FERNANDO

SANCTI PETRI

Zona de Ejercicios de Tiro
LED 90C

Trabajos batimétricos con vehículos no tripulados: USV vs UAV

M. Bethencourt (1), L. Barbero (1), J. Callejo (1), P. Zarandona (1)

(1) Servicio de Drones, Instituto de Investigación Marina (INMAR) de la Universidad de Cádiz, Polígono del Río San Pedro s/n, 11510 Puerto Real. manuel.bethencourt@uca.es

Resumen: Este trabajo preliminar compara los resultados de una campaña batimétrica realizada en un caño de marea del Parque Natural Bahía de Cádiz utilizando distintos tipos de ecosondas desplegadas desde dos tipos de vehículos no tripulados. Se utilizó una sonda monohaz de doble frecuencia instalada a un vehículo aéreo no tripulado (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) y una sonda multihaz montada en un vehículo de superficie no tripulado (Unmanned Surface Vehicles, USV). Se discuten las ventajas y desventajas de ambos métodos y se presentan los resultados comparativos, destacando la precisión y cobertura obtenidas. Además, se analizan las implicaciones de estos métodos para futuras aplicaciones en el campo de la batimetría y la cartografía marina.

Palabras clave: batimetría, embarcaciones marinas no tripuladas, sistemas aéreos no tripulados.

RESUMEN

Este trabajo compara los resultados de una campaña batimétrica realizada en un caño de marea del Parque Natural Bahía de Cádiz utilizando dos tipos de ecosondas desplegadas desde dos tipos de vehículos no tripulados. Se utilizó una sonda monohaz de doble frecuencia (Singlebeam Echosounder, SBES) instalada a un vehículo aéreo no tripulado (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) y una sonda multihaz (Multibeam Sonar, MBS) montada en un vehículo de superficie no tripulado (Unmanned Surface Vehicles, USV). Se discuten las ventajas y desventajas de ambos métodos y se presentan los resultados comparativos, destacando la precisión y cobertura obtenidas. Además, se analizan las implicaciones de estos métodos para futuras aplicaciones en el campo de la batimetría y la cartografía marina.

1. INTRODUCCIÓN

La batimetría es una herramienta que estudia las profundidades marinas y la topografía del fondo, y es fundamental para la navegación, la ingeniería marítima y la investigación oceanográfica. En sus inicios, las técnicas batimétricas dependían de métodos manuales como el uso de plomadas y cables, que eran laboriosos y ofrecían datos limitados. La introducción de las ecosondas revolucionó este campo, permitiendo la medición precisa de profundidades mediante ondas acústicas.

El avance de la tecnología ha supuesto la llegada de equipos de navegación más efectivos y asequibles, incluyendo sistemas de posicionamiento global (Global Positioning System, GPS), los sistemas globales de navegación por satélite (Global Navigation Satellite System, GNSS) y unidades de medición inercial (Inertial Measurement Unit, IMU), así como de sistemas de comunicación inalámbricos cada vez más potentes. Estos avances tecnológicos en electrónica y comunicaciones han permitido el

desarrollo y la expansión de vehículos no tripulados, tanto marinos como submarinos (Bethencourt, 2022), y más recientemente, aéreos (Barbero y López Ramírez, 2022), que han comenzado a desempeñar un papel cada vez más significativo en la exploración del medio marino y las costas. Los vehículos de superficie no tripulados (USV) y los *drones* (UAV) representan una evolución significativa, proporcionando nuevas capacidades para la recolección de datos en entornos acuáticos desafiantes. Los USV, diseñados para operar de manera autónoma sobre la superficie del agua, ofrecen ventajas como la localización precisa y la transmisión de datos en tiempo real, superando las limitaciones de los vehículos submarinos operados remotamente (ROV, Remotely Operated Vehicles) y de los vehículos submarinos autónomos (AUV, Autonomous Underwater Vehicles) que operan bajo el agua (Liu et al., 2016). Por otro lado, los UAV, han demostrado ser efectivos en diversos tipos de misiones para la investigación marina. Frente a las embarcaciones y aeronaves tripuladas, los USV y UAV pueden llegar a realizar misiones sin riesgo para los operadores y a un menor coste de operación. Su bajo peso y dimensiones compactas les otorgan mayor maniobrabilidad y capacidad de despliegue en zonas de difícil acceso, como aguas poco profundas o constreñidas geográficamente, áreas ribereñas y costeras, donde los vehículos más grandes no pueden operar de manera efectiva.

El tipo de misiones que pueden realizar es muy variado, incluyendo levantamientos batimétricos en zonas inaccesibles. En este trabajo se establece una comparación entre ambos tipos de vehículos a la hora de realizar una batimetría en aguas someras del Río San Pedro (Puerto Real, Cádiz), Figura 1. No pretende ser un análisis comparativo entre las sondas SBES y MBS donde numerosos autores han realizado trabajos comparativos en escenarios específicos (Parnum et al., 2009)

2. DESARROLLO

Se realizaron dos tipos de levantamientos batimétricos en el Río San Pedro, un caño de marea que en la zona de trabajo presentaba 150 metros de ancho entre orillas en el momento en el que se realizaron las medidas. El polígono de trabajo, cercano al pantalán de ensayos de la Universidad de Cádiz, consistió en un rectángulo aproximado de 125 m de ancho por 150 m de largo, con una superficie aproximada de 18.75 Ha, evitando en la orilla sur las embarcaciones fondeadas y en la norte la zona intermareal más somera.



Fig. 1. USV y UAV operando en el Río San Pedro.

En esta zona se realizaron:

1. Levantamiento con USV y sonda multihaz: Se empleó un catamarán de 2 m de eslora modelo Otter Pro de Maritime Robotics que incorporaba una sonda multihaz NORBIT iWBMS. La frecuencia elegida fue de 200 KHz. La navegación longitudinal se realizó a lo largo de 20 calles paralelas a las orillas del caño separadas 6 m con un ángulo de apertura de 90°, garantizando una cobertura completa del fondo marino. La sonda multihaz, capaz de medir la profundidad en múltiples puntos simultáneamente, permitió obtener una representación detallada y continua del fondo del caño (Figura 2). Estos datos fueron posteriormente procesados en gabinete.



Fig. 2. Imagen superpuesta sobre Google Earth del polígono de trabajo (trazo amarillo). En mapa de colores se observan los resultados de la batimetría multihaz realizada por el USV. (a) indica la ubicación de sondas estaciones de control, y (b) una zona que no fue sondada debido a la presencia de una embarcación fondeada durante la operación.

2. Levantamiento con UAV y sonda monohaz: Se empleó un cuadricóptero modelo Matrice 300 RTK de DJI, al que se le acopló una ecosonda bifrecuencia EchoLogger ECT D052S arrastrada por cable. Los vuelos se planificaron para cubrir perfiles transversales al caño de marea (Figura 2), permitiendo la recolección de datos de profundidad a intervalos regulares. La sonda monohaz operó a 200 KHz proporcionando 1557 mediciones puntuales de la profundidad, las cuales se registraron y procesaron para generar perfiles del fondo y obtener un modelo de interpolación de las profundidades, Figura 3.

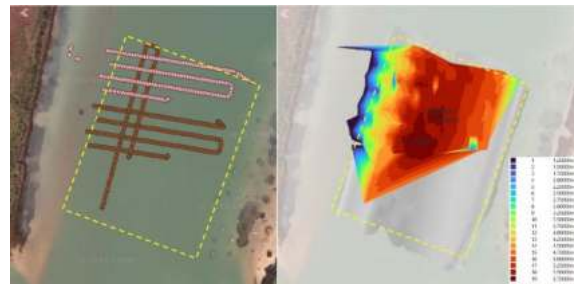


Fig. 3. Izquierda: imagen superpuesta sobre Google Earth del polígono de trabajo (trazo amarillo) y de los transectos realizados por el UAV. Derecha: modelo batimétrico resultado de la interpolación de los perfiles obtenidos con la sonda monohaz.

Ambos métodos requirieron la calibración de los datos de profundidad utilizando la velocidad del sonido en la columna de agua. Para esto, se utilizó un perfilador de velocidad AML Base X2 montado en el USV que, equipado con un winche, permitió descender la sonda a diversas profundidades para obtener los perfiles de velocidad. Esto evitó realizar

un segundo vuelo del UAV equipándolo, para el mismo cometido, con una sonda CastAway-CTD.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla I se muestran algunos parámetros empleados en las batimetrías, señalando en **negrita** la más ventajosa.

	USV+sonda	UAV+sonda
Coste equipos	183.000 €	28.000 €
Personal	2	1-2
Tiempo misión	33 min	20 min¹
Tiempo total ²	120 min	30 min
Cobertura	100%	líneas
Posprocesado	90 min	30 min
Logística	coche + carro	coche

Tab. I. Parámetros de comparación. Con fondo azul, valor más ventajoso. (¹No realizó perfiles de velocidad. ²Se refiere al tiempo empleado total en el montaje y desmontaje de la estación de control, la preparación del vehículo y la misión).

En la Figura 4 se muestran los perfiles batimétricos obtenidos con las dos sondas entre las mismas coordenadas. La comparativa de las batimetrías realizadas por ambas técnicas tanto en esta figura como en las Figuras 2 (inferior) y 3 (derecha) permite observar diferencias significativas en los datos obtenidos.

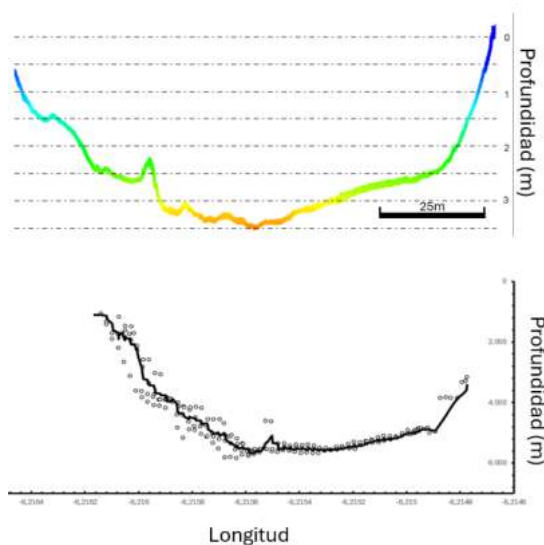


Fig. 4. Comparativa entre dos perfiles obtenidos con la sonda monohaz desplegada desde el UAV (arriba) con los datos batimétricos logrados con la sonda multihaz montada en el USV (abajo).

La combinación USV-multihaz (no transportable por el UAV por peso y dimensión) permitió obtener un modelo de muy alta resolución con una cobertura completa del fondo marino gracias al solape del 100% y a la capacidad de realizar correcciones de rumbo, cabeceo, balanceo y guiñada. Esto da como resultado una representación detallada y precisa del fondo marino, esencial para aplicaciones que requieren alta precisión. Sin embargo, si recurrimos a la Tabla I observamos que requiere una mayor logística para su

operación. Por otro lado, es más susceptible a problemas en aguas turbulentas. La complejidad del equipo y la necesidad de navegación precisa aumentan los costos, el tiempo de operación total y el personal requerido para su manejo.

Mientras que los datos recolectados por la sonda multihaz montada en USV proporcionó una representación más detallada y precisa de los fondos del caño de marea, la sonda monohaz ofreció una visión más general, adecuada para estudios preliminares o áreas de difícil acceso. Los perfiles transversales obtenidos con la combinación de la sonda monohaz montada en un UAV fueron útiles para una caracterización rápida del caño, si bien no se logró levantar el 40% del polígono planteado.

4. CONCLUSIONES

Este estudio demuestra que tanto los UAV como los USV son herramientas valiosas para la realización de batimetrías, cada uno con sus propias ventajas y limitaciones. Los UAV con sondas monohaz son ideales para levantamientos rápidos y en áreas inaccesibles, proporcionando datos útiles para evaluaciones preliminares y estudios en terrenos difíciles. Por otro lado, los USV con sondas multihaz son preferibles para estudios detallados que requieren alta resolución y cobertura completa, siendo esenciales para aplicaciones que demandan precisión y una representación exhaustiva del fondo marino.

La elección del vehículo y el equipo depende en gran medida de los objetivos específicos del levantamiento batimétrico y las condiciones del área de estudio. Para proyectos que requieren alta precisión y detalle, los USV con sondas multihaz son la opción óptima. Sin embargo, para levantamientos rápidos o en áreas donde el acceso es difícil, los UAV con sondas monohaz ofrecen una solución efectiva.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado en el proyecto del Ministerio de Innovación, Ciencia y Universidades “Vulnerability of littoral cultural heritage to environmental agents: impact of climate change - VOLICHE”, referencia: PID2020-117812RB-I00/AEI /10.13039/501100011033, y los Fondos Europeos de Desarrollo Regional (FEDER), EU, programa Interreg V-A España-Portugal (POCTEP) 2014–2020, a través del proyecto “KTTSeaDrones” (0622-KTTSEADRONES-5-E).

REFERENCIAS

Barbero, L. López-Ramírez, J.A. (2022). El uso de sistemas aéreos no tripulados en la investigación en zonas costeras. En: Conocimiento y transferencia de tecnología sobre sistemas de monitorización aéreos y acuáticos para el desarrollo transfronterizo de ciencias marinas y pesqueras. J.C. Gutiérrez Estrada e I. Pulido

Calvo (coord.) Ed. Ayuntamiento de Isla Cristina, Huelva. pp. 67-101.

Bethencourt, M. (2022). El uso de los vehículos marinos no tripulados en la gestión y la investigación de aguas marinas y continentales. En: Conocimiento y transferencia de tecnología sobre sistemas de monitorización aéreos y acuáticos para el desarrollo transfronterizo de ciencias marinas y pesqueras. J.C. Gutiérrez Estrada e I. Pulido Calvo (coord.) Ed. Ayuntamiento de Isla Cristina, Huelva. pp. 27-65.

Liu, Z., Zhang, Y., Yu, X., Yuan, C. (2016). Unmanned surface vehicles: An overview of developments and challenges. *Annual Reviews in Control*, 41, pp. 71-93.

Parnum, I, Siwabessy, P.K.W., Gavrilov, A.N., Parsons, M., A comparison of single beam and multibeam sonar systems in seafloor habitat mapping, *3rd International Conference & Exhibition on Underwater Acoustic Measurements: Technologies & Results*, Nafplion, Greece, 2009, June, pp. 155-162.

Batimetría derivada de satélite: ¿Cuándo y dónde podemos monitorizar el fondo costero?

I. Caballero (1), S. Viana (1), G. Navarro (1), D. García (1), R. P. Stumpf (2)

(1) Departamento de Ecología y Gestión Costera, Instituto de Ciencias Marinas de Andalucía (ICMAN), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Campus Universitario Río San Pedro, S/N, E-11510, Puerto Real (Cádiz), España. isabel.caballero@icman.csic.es

(2) National Centers for Coastal Ocean Science, NOAA National Ocean Service, East West Highway, 1305, Silver Spring, MD, 20910, USA.

Resumen: El objetivo del presente trabajo consiste en el desarrollo de una metodología para la generación de mapas batimétricos someros mediante el uso de los satélites Sentinel-2A/B. El marco estratégico establece e integra los diversos pasos a seguir, que cuenta con los últimos avances de la teledetección costera relativos a tres pilares fundamentales: la corrección de los efectos de la atmósfera, la corrección del impacto de la turbidez mediante el desarrollo de un algoritmo automatizado de múltiples escenas, y finalmente, la implementación de un modelo de conmutación o un algoritmo de IA capaz de optimizar la cartografía en todo el rango de profundidades. Para validar la consistencia y adecuación de las herramientas, se seleccionaron diversas áreas en EE.UU. y España. Los resultados demuestran que esta innovadora metodología produce batimetrías precisas a 10 m de resolución espacial, con errores medios de 1 m en profundidades de 0 a 25 m, con la principal ventaja de su precisión y portabilidad inmediata a otras zonas.

Palabras clave: corrección atmosférica, morfodinámica, Programa Copérnico, Sentinel-2, turbidez.

1. INTRODUCCIÓN

La batimetría somera es uno de los parámetros de mayor relevancia para monitorizar y evaluar los cambios en las zonas costeras, sirviendo de respaldo para muchas actividades. Asimismo, los mapas batimétricos de alta resolución son cruciales para comprender la resiliencia de las regiones costeras ante algunos de los impactos derivados del cambio climático (Beck et al., 2018). Sin embargo, obtener información continua, actualizada y precisa sigue siendo un gran reto, debido a las limitaciones logísticas, económicas y de accesibilidad, entre otros factores, que presentan los métodos tradicionales de medición. De esta manera, la teledetección está convirtiéndose en una herramienta alternativa de gran utilidad para el cartografiado de los fondos costeros, especialmente gracias al uso de satélites que ofrecen datos de libre acceso, además de una alta resolución espacial y temporal.

En las últimas décadas, un gran número de investigadores han desarrollado diferentes técnicas de batimetría derivada de satélite (SDB, de sus siglas en inglés), cada una con su propia precisión, limitaciones, mejoras y áreas de aplicación; muchas de las cuales pueden consultarse en artículos de revisión bibliográfica como Kutser et al. (2020). Autores como Golden et al. (2005) y Lyzenga et al. (2006) han desarrollado algoritmos obteniendo errores considerables, entre 2-3m para un rango de profundidades entre 0-15m en diversas áreas de estudio.

Otros autores han obtenido resultados más precisos como Xu et al. (2023). Sin embargo, todos estos modelos han sido aplicados en zonas de aguas claras, donde la mayoría de técnicas SDB funcionan de manera satisfactoria.

El desarrollo de metodologías para el cartografiado de los fondos costeros, regiones estratégicas de gran valor ambiental y socioeconómico, es una tarea urgente y prioritaria. La revisión del estado del arte en SDB indica que es crucial que se realicen más investigaciones mediante el uso de sensores ópticos. En particular, se establece indispensable el desarrollo de estrategias que aborden los problemas de la turbidez en los modelos, el factor más limitante a día de hoy, ya que reduce su alcance y su nivel operativo a zonas con aguas transparentes.

El Instituto de Ciencias Marinas de Andalucía (ICMAN-CSIC) ha desarrollado, en colaboración con la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica de EE. UU. (NOAA), una metodología semi-automática para la obtención de datos batimétricos someros en zonas con moderada turbidez. Para ello, se han utilizado datos provenientes de satélites e incluye una corrección combinada para los efectos ambientales atmosféricos y acuáticos. Este trabajo propone la primera técnica de teledetección que permite la estimación de SDB en entornos someros, moderadamente turbios y ópticamente complejos mediante datos proporcionados por los satélites Sentinel-2A/B.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Zonas de estudio

Para comprobar la validez del modelo batimétrico, se seleccionaron 15 zonas de estudio localizadas en la costa este de EE.UU. (Fig. 1), con distintas condiciones atmosféricas y de calidad del agua, así como diversos tipos de fondos bentónicos, desde aguas más transparentes en El Caribe hasta aguas turbias en la costa norte (ver listado de zonas en la Tab. i).



Fig. 1. Ubicación de las zonas de estudio. En la Tab. i se relacionan cada una de las zonas de control.

Adicionalmente, se seleccionaron dos zonas localizadas en España con el fin de demostrar el potencial y consistencia del modelo: Cala Millor en la isla de Mallorca y las Islas Cíes, Vao y Baiona en Galicia, al norte de la península Ibérica.

2.2 Datos de satélite

Se utilizaron imágenes Sentinel-2A/B del programa europeo de Observación de la Tierra Copérnico, por su alta resolución espacial (10-20-60m), mayor frecuencia temporal (5 días) y sus 13 bandas, las cuales operan desde el visible hasta el infrarrojo de onda corta (ESA, 2015). Se descargaron las imágenes de las regiones de estudio Level-1C del Copernicus Open Access Hub, con una precisión de geo-localización menor a 2 píxeles (20 m). Se utilizaron las bandas de cada imagen, en el rango del visible y del infrarrojo cercano y medio, remuestreadas a un tamaño de píxel de 10 m.

2.3 Datos in situ

Para la calibración y validación de los modelos SDB en las zonas seleccionadas en EE.UU., se usaron cartas de navegación y datos in situ procedentes de levantamientos batimétricos realizados por la NOAA en cada una de ellas. Se hizo uso de las cartas de navegación, (<https://www.charts.noaa.gov/>) seleccionando de 10 a 15 puntos de control para generar la regresión de calibración entre los datos de satélite y los datos de profundidad en metros. Por otro lado, los datos de LiDAR de alta resolución se utilizaron para la validación de la precisión de los productos SDB (<https://coast.noaa.gov/dataviewer/>).

En las zonas de estudio localizadas en España, se utilizaron los datos obtenidos mediante ecosonda

multihaz por el Sistema de Observación y Predicción Costera de las Islas Baleares (SOCIB) para Cala Millor. En Galicia, se usaron datos obtenidos con ecosonda monohaz suministrados por el Departamento de Xeociencias Mariñas e Ordenación do Territorio de la Universidad de Vigo.

2.4 Pre-procesamiento

Las imágenes Level-1C fueron procesadas para obtener datos Level-2 (Fig. 2) comparando varios procesadores para la corrección atmosférica (Sen2Cor, iCOR, POLYMER, C2RCC y ACOLITE). De los analizados, el modelo DSF (Dark Spectrum Fitting) de ACOLITE, desarrollado por el Royal Belgian Institute of Natural Sciences, fue el que mostró resultados más precisos y consistentes para corregir la interferencia atmosférica y generar mapas batimétricos en todas las regiones de estudio. ACOLITE también incluye su propio algoritmo de corrección del sunglint (Vanhellemont y Ruddick, 2021).

2.5 Modelo de batimetría derivada de satélite

El primer paso consiste en calcular dos modelos de relación logarítmica, de acuerdo a la Ecuación (1) (Stumpf et al., 2003). El primer modelo, SDB_{green}, que utiliza la relación entre la banda del azul (492 nm) y del verde (560 nm), genera batimetrías en profundidades de 0 hasta 30 m, sin embargo, tiene la desventaja de generar mucho ruido y sobreestimaciones en zonas someras. El segundo modelo, SDB_{red}, que relaciona la banda del azul (492 nm) y del rojo (665 nm), obtiene resultados mucho más favorables en zonas someras (profundidades < 6m). Estas ecuaciones están basadas en la ley de física óptica de Beer-Lambert, relacionando la absorción de dos bandas espectrales distintas y el decrecimiento exponencial de la luz con la profundidad (Stumpf et al., 2003).

$$SDB = m_1(pSDB - pSDB_0) \quad (1)$$

$$pSDB = \left(\frac{\ln(n\pi Rrs(\lambda_i))}{\ln(n\pi Rrs(\lambda_j))} \right) \quad (2)$$

La Ecuación (1) muestra la expresión para calcular la batimetría real, pSDB es un valor adimensional que se conoce como “batimetría relativa o pseudomodelo” y está definida en la Ecuación (2), pSDB₀ = m₀ / m₁ donde los valores m₀ y m₁ son constantes de calibración para transformar linealmente los resultados del modelo pSDB a la profundidad real, requiriendo alrededor de 10-15 puntos de control, λ_i corresponde a la banda azul, y λ_j se refiere a la banda verde o a la banda roja para obtener pSDB_{green} y pSDB_{red}, respectivamente. Finalmente, n es una constante igual a 1000, que junto con π, aseguran que los logaritmos de las reflectancias de ambas bandas sean positivos bajo cualquier condición.

El segundo paso es aplicar un algoritmo multi-escena para abordar la influencia de la calidad del agua sobre la precisión en los productos SDB. Este algoritmo corrige el impacto de la turbidez, seleccionando automáticamente píxel a píxel el más óptimo a lo largo de todas las imágenes, originando una sola imagen

compuesta con esta información para cada modelo (\max_pSDB_{green} , \max_pSDB_{red}). En promedio, se usaron entre 5 y 15 imágenes individuales, dependiendo de cada zona de estudio y aplicación.

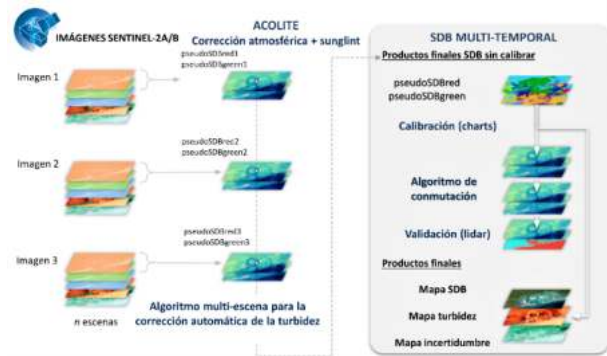


Fig. 2. Diagrama de flujo de SDB con los satélites Sentinel-2A/B.

En el siguiente paso se realiza una calibración vertical de los productos de batimetría relativa y para cada modelo (\max_pSDB_{green} , \max_pSDB_{red}) se obtiene la profundidad real mediante transformación lineal, determinando los valores de m_0 y m_1 (Ecuaciones 1 y 2). Finalmente, para combinar los modelos SDB_{green} y SDB_{red} , se implementa un algoritmo de conmutación automático. Dicho algoritmo permite mejorar el cartografiado en base a la sensibilidad de cada modelo en aguas profundas (SDB_{green}) y someras (SDB_{red}). Para una información más detallada sobre la metodología completa consultar Caballero y Stumpf (2023) y las referencias mencionadas en ese trabajo.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Inicialmente, se analizaron los resultados obtenidos con una sola imagen de Sentinel-2, aplicando el modelo con las Ecuaciones (1) y (2). En general, los resultados observados en todas las zonas muestran que el producto SDB tiene una alta influencia de la turbidez sobre la batimetría, poniendo en evidencia dos efectos muy característicos: sobreestimación de batimetrías someras y subestimación en mayores profundidades. La Fig. 3a y 3b muestra claramente el efecto de la turbidez en los productos SDB usando una sola imagen en Cape Lookout con $bias=-2.8\text{ m}$ y $MedAE=3\text{ m}$.

Al aplicar la metodología completa con el modelo multi-temporal, se observa cómo el producto final SDB genera resultados más precisos ($bias=-0.2\text{ m}$, $MedAE=0.4\text{ m}$), lo cual se aprecia en la distribución de los puntos alrededor de la línea 1:1 (Fig. 3c). En el histograma de residuales (Fig. 3d) se destaca la óptima precisión de los resultados, con mínimo sesgo respecto al uso de una imagen individual donde se observa el severo impacto de la turbidez presente en esa zona y el típico efecto de falso asomeramiento (Fig. 3b). Estos resultados se mantienen en todas las zonas evaluadas, demostrando que el impacto de la turbidez en los productos SDB no es aleatorio. Abordando su corrección en el modelo, se

reducen significativamente los errores de estimación vertical en los productos batimétricos.

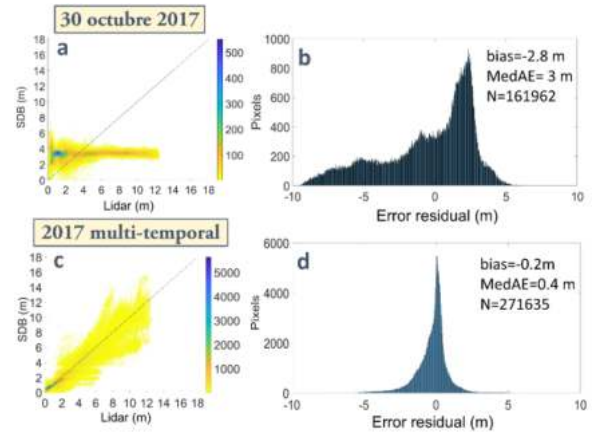


Fig. 3. Resultados de la región de Cape Lookout. a-b) Modelo SDB individual, c-d) Modelo SDB multi-imagenes utilizando 15 imágenes.

Los resultados al validar los datos SDB con los datos in situ (Tab. i) son consecuentes con los resultados obtenidos por otros autores en aguas claras (Dekker et al., 2011; Kutser et al., 2020), demostrando la consistencia y precisión de la metodología en zonas moderadamente turbias mediante el algoritmo multi-temporal sin la necesidad de una selección previa de las escenas óptimas para ser incorporadas al modelo y obteniendo errores MedAE de 0.3 a 1.34 m para profundidades de hasta 36 m.

Área de estudio	Año	Bias (m)	MedAE (m)	Prof. (m)
Buck	2018	0.19	0.6	0-22
Culebra	2018	0.41	0.98	0-20
Puerto Rico	2018	0.25	1.34	0-36
Dry Tortugas	2017	-0.15	0.22	0-6
Cayo Hueso	2016	0.05	0.22	0-6
Miami	2019	-0.16	0.62	0-25
West Palm Beach	2016	0.04	0.45	0-18
Joseph Bay	2017	0.1	0.3	0-12
Cape Lookout	2017	-0.2	0.4	0-13
Hatteras	2019	0.27	0.41	0-7
Oregon	2019	0.34	0.37	0-7
Nantucket	2018	0.22	0.87	0-20
Marthar's Vineyard	2018	-0.3	0.9	0-23
Cape Cod	2018	-0.14	1.2	0-22
Blue Hill	2018	0.23	0.68	0-10
Cala Millor (Mallorca)	2019	-0.04	0.73	0-12
Islas Cies (Galicia)	2021	1.28	1.22	0-13
Vao (Galicia)	2021	0.15	0.35	0-10
Baiona (Galicia)	2022	0.76	1.07	0-13

Tab. i. Estadísticos de validación de los datos SDB con respecto a los datos in situ.

En la Fig. 4 se observa cómo los datos de Sentinel-2 ofrecen una alternativa para completar la actual falta de información batimétrica en zonas someras, como este ejemplo en Florida y Mallorca, destacando así su potencial generando mapas SDB con mayor cobertura espacial que los datos in situ (Caballero y Stumpf, 2023;

Viaña-Borja et al., 2023). Estos resultados ilustran la aplicación práctica de SDB para su uso recursivo y para la identificación de cambios significativos tras eventos extremos, beneficiando así todas las actividades que requieran de frecuentes actualizaciones y mostrando valiosas implicaciones para avanzar en la gestión, monitorización y navegación costera a nivel mundial. Por otra parte, esta metodología integrada se encuentra en proceso de evaluación para diversas aplicaciones (nuevas rutas de navegación en Alaska, actualización de cartas náuticas, proyectos de reconocimiento y prospección, etc...) por distintos grupos de la NOAA gracias a la interfaz gráfica de uso interno *SatBathy*.

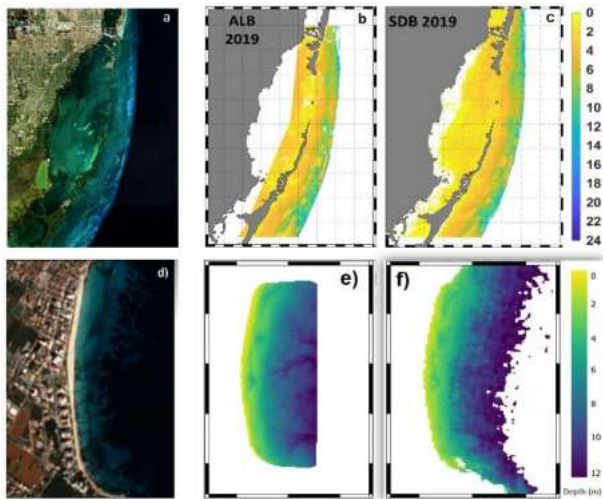


Fig. 4. Miami (EE. UU.): a) RGB, b) datos de alta resolución de lidar a 1 m, c) SDB. Cala Millor (España): d) RGB, e) datos de alta resolución a 1 m, f) SDB.

4. CONCLUSIONES

Esta investigación aporta una valiosa y efectiva metodología, incorporando los últimos avances en teledetección costera, para la generación de mapas batimétricos someros a 10 metros de resolución espacial mediante el uso de los satélites Sentinel-2A/B. En estudios recientes, ha demostrado ser una herramienta útil para la detección de cambios batimétricos después de eventos extremos, siendo de gran ayuda para los gestores interesados en planificar, diseñar y supervisar con mayor precisión proyectos costeros en entornos con características diversas y complejas. Cabe resaltar que el archivo público de Sentinel-2 permite analizar la variabilidad anual y los impactos de los eventos extremos de manera retrospectiva desde 2015. Asimismo, se podrá proyectar al futuro cualquier monitorización, pues los satélites Sentinel-2A y Sentinel-2B, junto con los nuevos Sentinel-2C y Sentinel-2D que se pondrán en órbita próximamente, seguirán ofreciendo información emergente y gratuita de nuestras costas durante las siguientes décadas.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido desarrollado gracias a la Ayuda CNS2023-143630 financiada por MICIN/AEI/

10.13039/501100011033 y por la Unión Europea NextGenerationEU/PRTR.

REFERENCIAS

- Adler-Golden, S.M., Acharya, P.A., Berk, A., Matthew, M. & Gorodetzky, D. (2005). Remote bathymetry of the littoral zone from AVIRIS LASH and QuickBird imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2(43).
- Beck, M. W., Losada, I. J., Menéndez, P., Reguero, B. G., Díaz-Simal, P. & Fernández, F. (2018). The global flood protection savings provided by coral reefs. *Nature Communications*, 9(1), 1-9.
- Caballero, I. & Stumpf, R. P. (2023). Confronting turbidity, the major challenge for satellite-derived coastal bathymetry. *Science of the Total Environment*, 870(161898).
- Dekker, A. G., Phinn, S. R., Anstee, J., Bissett, P., Brando, V. E., Casey, B. & Roelfsema, C. (2011). Intercomparison of shallow water bathymetry, hydro-optics, and benthos mapping techniques in Australian and Caribbean coastal environments. *Limnology & Oceanography*, 9(9), 396-425.
- European Space Agency (2015). Sentinel-2 User ESA Handbook, Paris.
- Kutser, T., Hedley, J., Giardino, C., Roelfsema, C. & Brando, V. E. (2020). Remote sensing of shallow waters: a 50-year retrospective and future directions. *Remote Sensing of Environment*, 240, 111619.
- Lyzenga, D.R., Malinas, N.P. & Tanis, F.J. (2006). Multispectral bathymetry using a simple physically based algorithm. *Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 44(8).
- Stumpf, R.P., Holderied, K. & Sinclair, M. (2003). Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types. *Limnology & Oceanography*, 48, 547-556.
- Vanhellemont, Q. & Ruddick, K. (2021). Atmospheric correction of Sentinel-3/OLCI data for mapping of suspended particulate matter and chlorophyll-a concentration in Belgian turbid coastal waters. *Remote Sensing of Environment*, 256, 112284.
- Viaña-Borja, S. P., Fernández-Mora, A., Stumpf, R. P., Navarro, G. & Caballero, I. (2023). Semi-automated bathymetry using Sentinel-2 for coastal monitoring in the Western Mediterranean. *Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 120(103328).
- Yan Xu, Bin Cao, Ruru Deng, Bincai Cao, Hui Liu & Jiayi Li. (2023). Bathymetry over broad geographic areas using optical high-spatial-resolution satellite remote sensing without in-situ data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 119.

Rendimiento de la Tecnología UAV-LiDAR en Marismas Mareales: Caso de Estudio en la Bahía de Cádiz

A. C. Curcio (1,4), G. Peralta (2), M. Aranda (3) y L. Barbero (1,4)

- (1) Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Cádiz, Puerto Real, España
- (2) Departamento de Biología, Universidad de Cádiz, Puerto Real, España
- (3) Tragsatec, Madrid, España
- (4) Servicio de Drones, Instituto Universitario de Investigación Marina (INMAR), Universidad de Cádiz, Puerto Real, España

andrea.curcio@uca.es

Resumen: Las marismas mareales son valiosos ecosistemas amenazados que presentan desafíos para su estudio debido a su difícil acceso y naturaleza. La tecnología LiDAR en vehículos aéreos no tripulados (UAV-LiDAR) ofrece una oportunidad prometedora para mejorar el conocimiento de estos hábitats complejos. Este trabajo examina el uso de UAV-LiDAR para obtener datos de alta resolución en marismas mareales y evalúa las configuraciones óptimas del sensor para recolectar datos confiables y de alta calidad. La técnica ha demostrado ser eficaz en la investigación costera, proporcionando productos espaciales de alta resolución y precisión. La correlación entre las mediciones UAV-LiDAR y los valores de campo alcanza un R^2 de hasta 0.94. La configuración de sensor UAV-LiDAR más confiable para aplicaciones en marismas mareales es la nadir-no-repetitiva, que ofrece el mejor equilibrio entre tamaño de conjunto de datos, resolución espacial y tiempo de procesamiento. A pesar de estos avances, se necesita más investigación para desarrollar modelos precisos de altura de dosel.

Palabras clave:

alta resolución, light detection and ranging (LiDAR), marismas mareales, modelos digitales, vehículos aéreos no tripulados (UAV).

1. INTRODUCCIÓN

Las marismas mareales ofrecen valiosos servicios ecológicos y ecosistémicos (Donatelli et al., 2018), pero actualmente enfrentan serias amenazas, como el aumento del nivel del mar causado por el cambio climático (Fagherazzi et al., 2020). Esto las pone en riesgo de inundación (Alizad et al., 2018), ya que los mecanismos naturales que mantienen su elevación pueden ser desestabilizados por eventos naturales y actividades humanas, complicando su capacidad de adaptación (Alizad et al., 2016).

Para asegurar la supervivencia de las marismas, se necesitan bases de datos de campo extensas y de alta calidad que permitan una modelización precisa (Fagherazzi et al., 2012). No obstante, el monitoreo in situ presenta desafíos debido a problemas de accesibilidad y perturbaciones en el ecosistema (Silvestri et al., 2003), lo que hace que las técnicas de teledetección (RS) sean fundamentales (Kuenzer et al., 2011). Sin embargo, las plataformas tradicionales de RS, como los satélites, tienen limitaciones en cuanto a resolución espectral, espacial y temporal (Hossain et al., 2014). Los vehículos aéreos no tripulados (UAV) ofrecen una solución al proporcionar datos de alta resolución, necesarios para una modelización ecológica eficiente y asequible.

La técnica de Light Detection and Ranging (LiDAR) tiene un gran potencial para monitorear marismas, ya que genera nubes de puntos 3D confiables que

permiten la modelización topográfica de alta resolución y la creación de modelos digitales precisos mediante la clasificación de estas nubes de puntos (Brock y Purkis, 2009). En las marismas, contar con datos de elevación precisos es crucial, ya que pequeñas variaciones pueden afectar significativamente la zonación de plantas y la biomasa (Suchrow y Jensen, 2010). No obstante, medir con precisión la elevación del suelo es un desafío debido a las superficies irregulares y la densa cobertura vegetal. El LiDAR puede detectar estructuras a pequeña escala, lo cual es esencial para monitorear entornos de dosel irregulares y heterogéneos como las marismas (Hladik et al., 2013).

El objetivo principal de este estudio es evaluar los beneficios y las desventajas del uso de UAV-LiDAR para crear modelos digitales precisos en hábitats de marisma. Se explora la capacidad del láser para penetrar en la vegetación y la precisión de las estimaciones de la altura del dosel utilizando varias configuraciones del sistema UAV-LiDAR. Nuestros hallazgos establecerán las condiciones para estandarizar la aplicación de la tecnología UAV en el estudio de marismas y proporcionarán los primeros datos para modelar las futuras respuestas de la Bahía de Cádiz ante escenarios de aumento del nivel del mar.

2. DESARROLLO

Debido a su configuración y ubicación, la Bahía de Cádiz es especialmente vulnerable al cambio

climático. Este humedal costero, uno entre los más meridionales de Europa, tiene muros de salinas en las elevaciones de la marisma alta, dejando los horizontes medio y bajo como los más representativos. La marisma baja está dominada por *Spartina maritima* y la media por *Sarcocornia* spp.

El UAV utilizado es un cuadricóptero DJI Matrice 300 RTK, que logra una precisión centimétrica en geoposicionamiento. Se implementaron los sensores DJI Zenmuse L1 y Micasense RedEdge MxDual. El L1 integra un módulo LiDAR Livox, una IMU de alta precisión y una cámara RGB, que colorea la nube de puntos LiDAR y permite crear ortomosaicos; admite escaneo repetitivo y no repetitivo, y captura datos en nadir u oblicuo. El sistema multiespectral Micasense RedEdge-MX Dual tiene 10 bandas que capturan datos desde el azul hasta el infrarrojo cercano.

Durante las campañas en septiembre y octubre de 2021, realizamos vuelos sobre áreas específicas variando la altura, el solape de vuelo y las configuraciones del sensor LiDAR para optimizar la precisión y el tiempo de procesamiento. Evaluamos el tiempo de vuelo, el tamaño de los datos, la precisión y la resolución espacial, modificando el modo de escaneo y la orientación del sensor L1.

Los datos crudos de LiDAR se convierten en una nube de puntos tridimensional utilizando su software específico. Para obtener modelos digitales precisos, se filtran los datos y se clasifica la nube de puntos. En hábitats de marisma, la clasificación automática es desafiante porque los atributos morfológicos de la vegetación y el suelo desnudo son similares. Para mejorar la clasificación, se genera una máscara de vegetación a partir del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) obtenido de datos multiespectrales. Al separar áreas con y sin vegetación, se asignan atributos a ambos ambientes por separado, mejorando la precisión de los modelos digitales. Se generan el Modelo Digital de Superficie (MDS), el Modelo Digital de Elevación (MDE) y el Modelo de Altura del Dosel (MAD), este último restando el MDE al MDS, todos a diferentes resoluciones.

Para evaluar la precisión, los resultados del UAV se compararon con 63 puntos de control en tierra (GCPs) medidos con dGPS. Se realizó una regresión lineal entre las mediciones del dGPS y los productos (nube de puntos y modelos digitales), usando el coeficiente de determinación (R^2) y el error cuadrático medio (RMSE). También se compararon los datos del UAV-LiDAR con los del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA), evaluando la resolución y precisión de los modelos digitales de ambos conjuntos de datos.

Para evaluar la capacidad del UAV-LiDAR para detectar cambios, realizamos un ensayo de calibración eliminando la vegetación en secciones seleccionadas y ejecutando misiones LiDAR antes y después. Las diferencias en elevación representaron

la altura del dosel, medida en campo como referencia. Comparamos tres tipos de productos antes y después de la eliminación: nubes de puntos, MDS y MAD. La bondad de ajuste se evaluó comparando los valores de campo con los obtenidos por cada método.

3. RESULTADOS

Las imágenes de la cámara del sensor UAV-LiDAR ofrecen una resolución de ortomosaico de hasta 2,78 cm/píxel, adecuada para el seguimiento de marismas. La conversión de datos crudos LiDAR a nube de puntos 3D georreferenciada tarda menos de 10 minutos. Este proceso duplica el tamaño de los datos, pero las tareas subsiguientes de filtración reducen el tamaño del conjunto en hasta un 43%. La resolución de los modelos digitales varía según la densidad de la nube de puntos y el espaciado de la cuadrícula seleccionado, alcanzando entre 2 y 9 cm/píxel en su valor más alto.

Debido a la rugosidad del dosel, que reduce la eficacia de penetración del láser, y la irregularidad del suelo, que contribuye a la dispersión de los retornos láser, tanto las superficies con vegetación como las sin ella mostraron espesores comparables en las nubes de puntos, dificultando su clasificación automática. Para abordar esta limitación, se utilizó un conjunto de datos multiespectrales, creando una máscara que permitió clasificar con mayor precisión las nubes de puntos según la distribución real de la vegetación.

Las nubes de puntos LiDAR mostraron buena precisión, incluso frente a los desafíos de las superficies de las marismas (Tab. i). El RMSE promedio fue aproximadamente 10 cm en todos los conjuntos de datos, indicando un error sistemático, probablemente debido a la densa vegetación. Este valor concuerda con estudios anteriores que atribuyen hasta 0,15 m de error debido a la limitación del láser para penetrar la vegetación densa (Alizad et al., 2020; Chassereau et al., 2011). Las mayores discrepancias entre las nubes de puntos LiDAR y los datos de campo se encontraron en áreas con *Sarcocornia*, sugiriendo que esta especie presenta los mayores desafíos para la penetración del LiDAR debido a sus densos arbustos que cubren la marisma como una alfombra. A pesar de esto, la regresión lineal mostró una excelente capacidad para relacionar los datos del UAV-LiDAR con los datos de campo (Tab. i).

Los productos del sistema L1 muestran un RMSE bajo, con precisión horizontal inferior a 1 cm, superando estudios previos que reportaban errores de hasta 5 cm (Kalacska et al., 2017; Long et al., 2016). Los modelos digitales de elevación exhibieron una alta correlación con los datos de campo, con un error medio de 7 cm, equivalente al 2.8% de la amplitud de las mareas, considerado insignificante en nuestra área (Tab. i). Sin embargo, los modelos de altura del dosel mostraron una correlación (R^2) baja con los datos de campo, posiblemente debido a errores en los MDS y MDE causados por la complejidad del terreno, la

Tab. i. Evaluación de la precisión de los productos del UAV-LiDAR. Incluye el error en horizontal para los ortomosaicos, y el error cuadrático medio (RMSE) y los valores de coeficiente de determinación (R^2) estimados para la elevación de las nubes de puntos y los modelos digitales.

Misión de la nube de puntos	Ortomosaicos		Nube de puntos		Modelos digitales de elevación		Modelo de altura del dosel	
	Error X (cm)	Error Y (cm)	RMSE (cm)	Valor R^2	RMSE (cm)	Valor R^2	RMSE (cm)	Valor R^2
Nadir, no-repetitivo	0.4 – 0.5	0.4	11.4	0.95	5.6 – 7.6	0.88 – 0.93	9.3 – 17.3	0.002 – 0.038
Nadir, repetitivo	0.3 – 0.5	0.3 – 0.4	12.8	0.97	6.4 – 9.9	0.86 – 0.97	15.5 – 18.3	0.029 – 0.043
Oblicuo, no-repetitivo	0.2	0.2	10.1	0.95	4.5 – 16.2	0.88 – 0.96	10.0 – 15.1	0.033 – 0.105
Oblicuo, repetitivo	0.2 – 0.4	0.2 – 0.4	11.4	0.96	3.7 – 6.6	0.95 – 0.97	11.0 – 16.4	0.061 – 0.172

precisión de las mediciones de campo, la interpolación y la resolución, que se propagan y amplifican en los MAD. Las subestimaciones en la altura del dosel en los MAD derivados del LiDAR podrían atribuirse también a una frecuencia de escaneo láser insuficiente para las velocidades de los drones, resultando en una falta de datos de copas de vegetación (Lin et al., 2019).

El vuelo oblicuo produce nubes de puntos más densas y productos de mayor resolución, pero requiere vuelos más largos y genera conjuntos de datos más grandes y pesados, aumentando el tiempo de procesamiento para los ortomosaicos. La precisión respecto al vuelo nadir es mínimamente diferente. Por lo tanto, se prefiere la configuración nadir por su adecuado nivel de detalle, conjuntos de datos más pequeños y tiempos de procesamiento reducidos. El modo de escaneo repetitivo incrementa la presencia de valores extremos que deben filtrarse para que los datos sean adecuados para el modelado, resultando en una disminución significativa en el número y densidad de puntos en comparación con el modo no repetitivo. El modo no repetitivo produce DEM más precisos con resolución más fina, mientras que el repetitivo requiere una resolución más gruesa para mejorar la precisión de los DEM.

La nube de puntos de PNOA tiene una densidad de 0,80 puntos/m², entre 400 y 2600 veces menor que los datos de nubes de puntos capturados por nuestro UAV-LiDAR. La resolución de los productos derivados es 4,4–18 m/píxel, siendo extremadamente pobre para aplicaciones ambientales de alta resolución (Fig. 1). A pesar de una correlación sólida con los valores de campo (R^2 0,885), aunque no tan fuerte como la del UAV-LiDAR, los datos PNOA-LiDAR mostraron un gran error en las elevaciones, subestimando las elevaciones en más de 1 m en el área (RMSE promedio de 1,36 m). Esto representa el 44–48% del rango medio de mareas de la zona, demasiado alto para un modelado de alta resolución del sistema.

Desde el ensayo de calibración, las nubes de puntos mostraron una buena correspondencia con las observaciones de campo, con errores de hasta 2 cm. Los MDS coincidieron en su mayoría con las mediciones in situ, aunque los errores de elevación

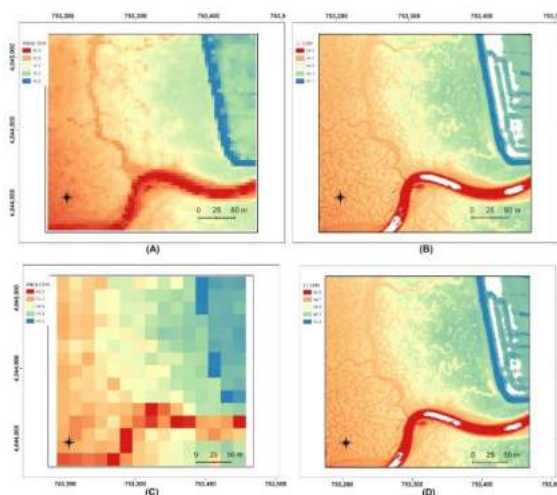


Fig. 1. Comparación de los productos PNOA-LiDAR y UAV-LiDAR. (A) PNOA-LiDAR MDS. (B) UAV-LiDAR MDS a 100 m. (C) PNOA-LiDAR MDE. (D) UAV-LiDAR MDE a 100 m. Se nota la gran diferencia de resolución entre los productos PNOA y UAV.

alcanzaron valores de 4 cm. En contraste, los MAD no mostraron una buena relación con las mediciones in situ, presentando errores de hasta 9 cm. Estos resultados indican que el UAV-LiDAR puede detectar cambios con precisión, especialmente en la fase de la nube de puntos, pero la interpolación puede introducir errores, afectando la precisión de los MAD incluso en áreas sin vegetación.

4. CONCLUSIONES

Este estudio destaca el potencial de los sensores UAV para estudiar marismas, entornos complejos y de difícil acceso, donde persisten desafíos de precisión. El UAV-LiDAR ofrece productos con alta resolución espacial. Nuestros resultados indican que la configuración óptima para estudios en marismas es el modo de escaneo no repetitivo con orientación nadir, proporcionando resultados de alta calidad con resolución fina, menores conjuntos de datos, y tiempos reducidos de vuelo y procesamiento. Sin embargo, mejorar la discriminación entre vegetación y suelo requiere datos multiespectrales. Aunque el LiDAR puede penetrar en la vegetación densa hasta cierto punto, persisten desafíos técnicos para generar modelos precisos de altura del dosel en marismas. La inexactitud de los MAD puede deberse a problemas de penetración y reflectancia en superficies naturales, además de desafíos en las mediciones de campo.

Comparado con los datos PNOA-LiDAR, nuestros datos UAV-LiDAR mejoran significativamente la precisión y la resolución espacial, siendo cruciales para investigaciones costeras que requieren alta resolución temporal y espacial. Estos resultados son fundamentales para planificar programas de seguimiento en marismas y otros hábitats costeros y continentales.

Agradecimientos

Los autores agradecen al servicio de drones de la Universidad de Cádiz por proporcionar los sistemas UAV utilizados en este estudio (<https://dron.uca.es/>).

REFERENCIAS

- Alizad, K., Hagen, S.C., Medeiros, S.C., Bilskie, M.v., Morris, J.T., Balthis, L., Buckel, C.A. (2018). Dynamic Responses and Implications to Coastal Wetlands and the Surrounding Regions under Sea Level Rise. *PLoS ONE*, 13, e0205176.
- Alizad, K., Hagen, S.C., Morris, J.T., Medeiros, S.C., Bilskie, M.v., Weishampel, J.F. (2016). Coastal Wetland Response to Sea-Level Rise in a Fluvial Estuarine System. *Earth's Future*, 4, 483–497.
- Alizad, K., Medeiros, S.C., Foster-Martinez, M.R., Hagen, S.C. (2020). Model Sensitivity to Topographic Uncertainty in Meso- And Microtidal Marshes. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13, 807–814.
- Brock, J.C., Purkis, S.J. (2009). The Emerging Role of Lidar Remote Sensing in Coastal Research and Resource Management. *Journal of Coastal Research*, 1, 1–5
- Chassereau, J.E., Bell, J.M., Torres, R. (2011). A Comparison of GPS and Lidar Salt Marsh DEMs. *Earth Surface Processes and Landforms*, 36, 1770–1775.
- Donatelli, C., Ganju, N.K., Zhang, X., Fagherazzi, S., Leonardi, N. (2018). Salt Marsh Loss Affects Tides and the Sediment Budget in Shallow Bays. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 123, 2647–2662.
- Fagherazzi, S., Kirwan, M.L., Mudd, S.M., Guntenspergen, G.R., Temmerman, S., D'Alpaos, A., van de Koppel, J., Rybczyk, J.M., Reyes, E., Craft, C., et al. (2012). Numerical Models of Salt Marsh Evolution: Ecological, Geomorphic, and Climatic Factors. *Reviews of Geophysics*, 50, 1–28.
- Fagherazzi, S., Mariotti, G., Leonardi, N., Canestrelli, A., Nardin, W., Kearney, W.S. (2020). Salt Marsh Dynamics in a Period of Accelerated Sea Level Rise. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 125, 1–31.
- Hladik, C., Schalles, J., Alber, M. (2013). Salt Marsh Elevation and Habitat Mapping Using Hyperspectral and LIDAR Data. *Remote Sensing of Environment*, 139, 318–330.
- Hossain, M.S., Bujang, J.S., Zakaria, M.H., Hashim, M. (2014). The Application of Remote Sensing to Seagrass Ecosystems: An Overview and Future Research Prospects. *International Journal of Remote Sensing*, 36, 61–113.
- Kalacska, M., Chmura, G.L., Lucanus, O., Bérubé, D., Arroyo-Mora, J.P. (2017). Structure from Motion Will Revolutionize Analyses of Tidal Wetland Landscapes. *Remote Sensing of Environment*, 199, 14–24.
- Kuenzer, C., Bluemel, A., Gebhardt, S., Quoc, T.V., Dech, S. (2011). Remote Sensing of Mangrove Ecosystems: A Review. *Remote Sensing*, 3(5), 878–928.
- Lin, Y.C., Cheng, Y.T., Zhou, T., Ravi, R., Hasheminasab, S.M., Flatt, J.E., Troy, C., Habib, A. (2019). Evaluation of UAV LiDAR for Mapping Coastal Environments. *Remote Sensing*, 11, 2893.
- Long, N., Millecamps, B., Guillot, B., Pouget, F., Bertin, X. (2016). Monitoring the Topography of a Dynamic Tidal Inlet Using UAV Imagery. *Remote Sensing*, 8, 387.
- Silvestri, S., Marani, M., Marani, A. (2003). Hyperspectral Remote Sensing of Salt Marsh Vegetation, Morphology and Soil Topography. *Physics and Chemistry of the Earth*, 28, 15–25.
- Suchrow, S., Jensen, K. (2010). Plant Species Responses to an Elevational Gradient in German North Sea Salt Marshes. *Wetlands*, 30, 735–746.

Evolución histórica de los ecosistemas costeros vegetados del Parque Natural Bahía de Cádiz, España

Autores: C. Rodríguez-Rojo (1), M. Aranda (2), G. Peralta (1).

- (1) Departamento de Biología, Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales, INMAR, Universidad de Cádiz, 11510 Puerto Real, España. conchi.rodriguez@uca.es
- (2) Tragsatec, Madrid, España.

Resumen: Los ecosistemas costeros vegetados proporcionan servicios ecosistémicos como la captura y enterramiento de CO₂ y la protección costera (Duarte et al., 2013). Sin embargo, están amenazados por las actividades humanas y el cambio climático, especialmente el aumento del nivel del mar, causando una gran pérdida y degradación en las últimas décadas (Bertram et al., 2021). La cartografía es una herramienta útil para entender y gestionar estos ecosistemas, permitiendo analizar su evolución temporal (Miraglia, 2019). El Parque Natural Bahía de Cádiz (PNBC) es un sistema natural excelente para elaborar mapas de evolución histórica de los ecosistemas costeros que lo componen. El presente trabajo emplea ortofotografías aéreas del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) y la herramienta QGIS para cartografiar hábitats costeros desde 1956 en el PNBC. Los resultados muestran cambios en la distribución de los hábitats intermareales y una pérdida significativa de la vegetación típica de los ecosistemas costeros que conforman el PNBC.

Palabras clave: Cartografía, Ecosistemas costeros, Evolución histórica, Parque Natural Bahía de Cádiz.

1. INTRODUCCIÓN

Las marismas y las praderas de fanerógamas marinas son un claro ejemplo de ecosistemas costeros vegetados altamente complejos, dinámicos y de alta productividad biológica (Fagherazzi et al., 2020; van der Wal y Pye, 2004). Estos ecosistemas ocupan la zona intermareal en costas de baja energía (Ivajnsič et al., 2018), influenciados por mareas y marejadas ciclónicas (Donatelli et al., 2018).

Valorados por sus numerosos servicios ecosistémicos, las marismas y praderas de fanerógamas marinas actúan como barreras naturales ante peligros costeros (Kirwan y Megonigal, 2013). Además, destacan por su capacidad para capturar y almacenar cantidades significativas de CO₂ (Duarte et al., 2013). Su protección es, por tanto, crucial (Adam, 2019).

Pese a su reconocida importancia, durante el siglo XX se ha perdido hasta el 70 % de las marismas mareales (Kingsford et al., 2016) y un 20 % de las praderas de fanerógamas marinas (Dunic et al., 2021). Esta pérdida y deterioro físico se deben principalmente a impactos derivados de actividades humanas y al cambio climático (Kingsford et al., 2016). Un efecto especialmente preocupante del cambio climático es el aumento del nivel medio del mar, que amenaza la supervivencia de las marismas (Reed, 1995).

Zona de estudio:

El Parque Natural Bahía de Cádiz (PNBC), situado al suroeste de la Península Ibérica (Fig. 1), contiene excelentes ejemplos de ecosistemas costeros vegetados. Específicamente, el área de la masa de

agua interior del PNBC cuenta con una abundante presencia de marismas naturales (1800 ha), llanuras fangosas (1500 ha) y praderas de fanerógamas marinas (1700 ha) y una compleja estructura de canales de marea.

Además de ser un espacio natural protegido a nivel nacional, el PNBC cuenta con diversas figuras de protección a escala regional e internacional. Entre otras, en 2002 fue incluido en la lista de Humedales de Importancia Internacional según la convención Ramsar, y pertenece a la red Natura 2000 (red de áreas de protegidas en Europa). <https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/temas/espacios-protegidos/red-natura-2000.html> (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico [MITECO] s.f.).



Figura 1: Ubicación del Parque Natural Bahía de Cádiz (izquierda) y delimitación de la zona de estudio para la elaboración de mapas de evolución histórica (derecha).

2. DESARROLLO

El uso de imágenes aéreas y Sistemas de Información Geográfica (SIG) es crucial para detectar cambios en el paisaje e indispensable para realizar estudios a largo plazo. Sin embargo, la antigüedad y calidad de las imágenes, y las condiciones atmosféricas y oceanográficas en zonas costeras, pueden dificultar su uso (Aranda et al., 2020). La cartografía es una herramienta útil para entender y gestionar de forma eficiente cualquier tipo de ecosistema. Además de proporcionar información actual, permite analizar la evolución histórica de un sistema e identificar patrones y tendencias en su dinámica (Miraglia, 2019).

El PNBC es un sistema natural excepcional para la investigación y elaboración de mapas de evolución histórica de ecosistemas costeros debido a sus características naturales y diversas figuras de protección. Para este trabajo, se ha realizado una revisión y recopilación de recursos disponibles, principalmente ortofotografías aéreas disponibles en el Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA). Para el PNBC se han obtenido un total de 14 vuelos correspondientes a diferentes años: 1956, 1978, 1984, 1990-1991, 1997-1998, 2002, 2004, 2006, 2008, 2010, 2013, 2016, 2019, 2022 (Fig. 2). Las ortofotografías de los primeros años del período de estudio (es decir, antes de la década de 2000) fueron georreferenciadas en un SIG, QGIS, mediante una función polinómica de segundo orden, utilizando al menos 12 puntos de control bien distribuidos en cada imagen.

A partir de estas imágenes, se han cartografiado los principales hábitats de interés en distintos momentos del pasado en condiciones de marea baja en días despejados. De este modo, ha resultado más sencillo identificar las características de los ecosistemas ubicados en el intermareal. No obstante, no todas las ortofotografías aéreas cumplían dicho requisito, por lo que ciertos mapas no han podido completarse y han de interpretarse con cautela. Concretamente, las ortofotografías correspondientes a los años 1997-1998 y 2002 han sido descartadas dadas las condiciones de marea alta en la zona de estudio (Fig. 2).



Figura 2: Secuencia de ortofotos aéreas disponibles en el PNOA para la zona de estudio.

Se ha establecido la misma clasificación para cada año con cinco capas temáticas diferenciando diferentes zonas y hábitats intermareales (Tab. i). Los mapas fueron desarrollados con una escala mínima de

1:500 con el fin de reducir los errores visuales en la superficie de cada elemento. No obstante, para reducir las incertidumbres espaciales y mejorar su definición, se verificaron en campo ciertas características establecidas en la Tab. i durante la elaboración de los mapas.

Capas temáticas	Descripción
Cauces naturales de agua	Cauce principal del río. Canales de distribución derivados directamente del canal principal y de canales secundarios.
Suelo desnudo	Zonas desarrolladas en áreas afectadas por las mareas, con predominio de sedimentos finos estabilizados o transportados por el agua.
Llano fangoso con vegetación	Plataformas fangosas poco profundas predominantes en la zona intermareal (zona por debajo del nivel de marea alta muerta). La vegetación predominante está asociada a praderas de fanerógamas marinas.
Marisma baja	Ecosistema costero en la zona intermareal costera inferior entre tierra y agua salada, que son inundadas diariamente entre la bajamar media y pleamar media.
Marisma media	Ecosistema costero en la zona intermareal costera superior entre tierra y agua salada, que son inundadas intermitentemente entre la pleamar media y pleamar viva media.

Tabla i: Clasificación aplicada a la zona de estudio por zona o hábitat del intermareal y definiciones breves.

3. RESULTADOS

La comparación de los mapas de hábitats intermareales que componen el PNBC durante los últimos 60 años (1956-2022) ha permitido el análisis de su evolución histórica. Esta evolución muestra cambios significativos en la distribución de ecosistemas costeros (principalmente marismas y praderas de fanerógamas marinas), pero sobre todo muestran una reducción y pérdida generalizada de la superficie ocupada por la vegetación típica de marismas y, en consecuencia, un aumento de la superficie del suelo desnudo.

Anterior a los años noventa se observa un importante aumento de modificaciones antrópicas en el noroeste del área de estudio, lo que supuso una pérdida de superficie de marisma que se transformó en zona urbana (Fig. 3), coincidiendo con el crecimiento y expansión de la población en la costa española (Aranda et al., 2020).

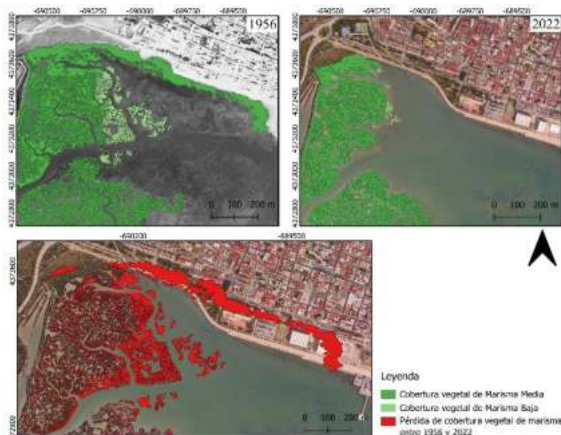


Figura 3: Cobertura vegetal de marisma en 1956 (arriba-izquierda), 2022 (arriba-derecha) y pérdida de cobertura vegetal entre 1956 y 2022 (abajo) al noroeste del PNBC.

Al norte, en los años ochenta, la expansión de la vegetación de marisma fue interrumpida por la construcción de espigones con el fin de adecuar la zona para una playa artificial (Fig. 4), siendo estas las últimas modificaciones antrópicas destacables debido a la clasificación del área como parque natural en 1989 (PORN, 2004).



Figura 4: Cobertura vegetal de Marisma Media y Baja en 1978 (arriba) y 2022 (abajo) al norte del PNBC.

Tanto en el lado oriental como occidental, la vegetación de marisma media y llano fangoso con vegetación ha sufrido cambios en su distribución. Sin embargo, la vegetación en la marisma baja prácticamente ha desaparecido en la mayoría de los hábitats característicos.

La zona más dinámica se ubica al sur, con variaciones notables en la marisma baja y llano fangoso con vegetación, especialmente entre 1956 y 2004, con una pérdida significativa de cobertura vegetal en la marisma baja después de 2004.

Estos cambios pueden deberse a la limitación impuesta por la presencia de salinas y modificaciones antrópicas en las zonas altas de las marismas, que dificultan la migración vertical de la vegetación. Además, la pérdida de hábitat está influenciada por la dificultad de las comunidades intermareales para

migrar tierra adentro en respuesta al aumento del nivel del mar.

A pesar de la tendencia negativa en la distribución de vegetación de las marismas y praderas de fanerógamas marinas, hay áreas donde la vegetación ha aumentado o se ha transformado (Fig. 5).

Sin embargo, no hay que olvidar que el cálculo de las áreas totales de estos hábitats está afectado por el estado del nivel de la marea en el momento de la fotografía.

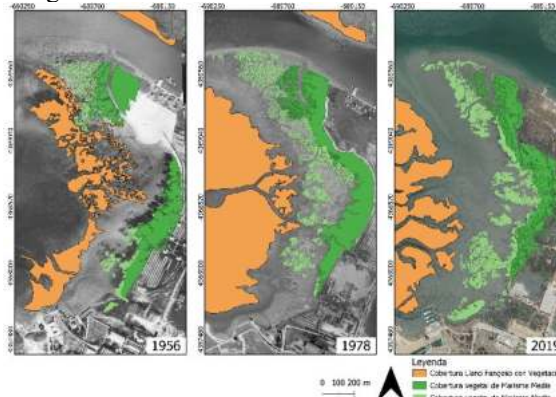


Figura 5: Cobertura de Llano Fangoso con vegetación y cobertura vegetal de Marisma Media y Baja en 1956 (izquierda), 1978 (centro) y 2019 (derecha) al este del PNBC.

4. CONCLUSIONES

El estudio de ecosistemas costeros vegetados ha permitido establecer una clasificación concreta a nivel de sistema, facilitando la evaluación del grado de conservación y evolución temporal de hábitats intermareales en el PNBC. Los mapas cartográficos evidencian una tendencia negativa generalizada en la vegetación típica de estos ecosistemas, atribuida a modificaciones antropogénicas y al aumento del nivel del mar, poniendo de manifiesto la regresión y vulnerabilidad de estos hábitats, que podría empeorar en los próximos años.

Los resultados confirman la pérdida y degradación de marismas y praderas de fanerógamas marinas del PNBC durante el siglo XX. Además, los resultados sugieren que los cambios producidos en uno de los subsistemas pueden influir en la distribución de los hábitats adyacentes, afectando a los servicios ecosistémicos que proporcionan como sistema.

La precisión alcanzada en los mapas cartográficos de vegetación ha permitido identificar debilidades al mapear ambientes costeros, resaltando la importancia de disponer de ortofotografías con una adecuada resolución y condiciones adecuadas tanto oceanográficas como climatológicas.

Finalmente, es esencial conservar y proteger estos hábitats frente a los desafíos ambientales actuales. El desarrollo de mapas de evolución histórica ofrece información ambiental complementaria, mejorando la toma de decisiones en la planificación urbana y territorial y la evaluación de la resiliencia de ecosistemas costeros protegidos como el PNBC, integrando datos históricos y actuales.

Agradecimientos

Este trabajo es parte del proyecto de I+D+i PID2021-123597OB-I00 (iBESBLUE) financiado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y por FEDER/UE <https://ibesblue.uca.es/>. También agradecer al INMAR por financiar la participación en estas jornadas.

REFERENCIAS

- Adam, P. (2019). Salt Marsh Restoration. *Coastal Wetlands: an Integrated Ecosystem Approach*, (Second Edition), 817-861.
- Aranda, M., Gracia, F.J., Peralta, G. (2020). Estuarine Mapping and Eco-Geomorphological Characterization for Potential Application in Conservation and Management: Three Study Cases along the Iberian Coast. *Applied Sciences*, 10(13), 4429.
- Bertram, C., Quaas, M., Reusch, T.B.H., Vafeidis, A. T., Wolff, C., Rickels, W. (2021). The blue carbon wealth of nations. *Nature Climate Change*, 11, 704–709.
- Donatelli, C., Ganju, N.K., Zhang, X., Fagherazzi, S., Leonardi, N. (2018). Salt Marsh Loss Affects Tides and the Sediment Budget in Shallow Bays. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 123(10) 2647–2662.
- Duarte, C. M., Losada, I. J., Hendriks, I. E., Mazarrasa, I., Marbà, N. (2013). The role of coastal plant communities for climate change mitigation and adaptation. *Nature Climate Change*, 3(11), 961-968.
- Dunic, J.C., Brown, C.J., Connolly, R.M., Turschwell, M.P., Côté, I.M. (2021). Long-term declines and recovery of meadow area across the world's seagrass bioregions. *Global Change Biology*, 27(17), 4096-4109.
- Fagherazzi, S., Mariotti, G., Leonardi, N., Canestrelli, A., Nardin, W., Kearney, W.S. (2020). Salt Marsh Dynamics in a Period of Accelerated Sea Level Rise. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 125(8).
- Ivajnsič, D., Kaligarič, M., Fantinato, E., Del Vecchio, S., Buffa, G. (2018). The fate of coastal habitats in the Venice Lagoon from the sea level rise perspective. *Applied Geography*, 98, 34-42.
- Kingsford, R.T., Basset, A., Jackson, L. (2016) Wetlands: Conservation's Poor Cousins. *Aquatic Conservation: Marine And Freshwater Ecosystems*, 26(5), 892–916.
- Kirwan, M., Megonigal, J. (2013). Tidal wetland stability in the face of human impacts and sea-level rise. *Nature*, 504, 53–60.
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (s.f.). Red Natura 2000. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. <https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/tema/espacios-prottegidos/red-natura-2000.html>
- Miraglia, M. (2019). Aplicaciones de la Cartografía Histórica y las Tecnologías de la Información Geográfica en la Historia Ambiental. *Revista de História Regional*, 24(1), 24-41.
- PORN (2004). ANEXO I Plan de Ordenación de los Recursos Naturales. Decreto 79/2004, de 24 de febrero, por el que se aprueban el Plan de Ordenación de los Recursos Naturales y el Plan Rector de Uso y Gestión del Parque Natural Bahía de Cádiz. 102 pp.
- Reed, D.J. (1995). The response of coastal marshes to sea-level rise: survival or submergence? *Earth Surface Processes and Landforms*, 20, 39-48.
- Van der Wal, D., Pye, K. (2004). Patterns, rates and possible causes of saltmarsh erosion in the Greater Thames area (UK). *Geomorphology*, 61(3–4), 373-391.

Cartografía geomorfológica de áreas marinas protegidas con *Benthic Terrain Modeler* (BTM). El caso de la ZEC Franja Marina Santiago – Valle Gran Rey, en el SO de La Gomera (Islas Canarias)

R. Jiménez-Romero (1), L.M. Fernández-Salas (1), M.J. Sánchez-García (2), L. Martín-García (3) y P. Martín-Sosa (3)

- (1) Instituto Español de Oceanografía (IEO, CSIC), Centro Oceanográfico de Cádiz. raul.jimenez@ieo.csic.es
- (2) Instituto de Oceanografía y Cambio Global, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.
- (3) Instituto Español de Oceanografía (IEO, CSIC), Centro Oceanográfico de Canarias.

Resumen: A partir de datos batimétricos adquiridos en el marco del proyecto ESMARES2 y durante los Estudios Ecocartográficos del Litoral Canario, se definen siete clases de morfologías en la zona de estudio con ayuda del BTM (*Benthic Terrain Modeler*): zona aplacerada; zona de pendiente suave; crestas suaves; crestas; altos morfológicos; depresiones; y pequeñas depresiones. La combinación de estas clases con las características hidrodinámicas, tectónicas y volcánicas de la zona permitió asociar las clases de morfologías con diferentes procesos que las originan. Destacan la presencia de ondas de arena, prodeltas y barrancos que ponen de manifiesto el carácter sedimentario del margen suroccidental de la isla de La Gomera.

Palabras clave: BTM, geomorfología, Islas Canarias, La Gomera, ZEC

1. INTRODUCCIÓN

La cartografía geomorfológica de los fondos marinos es uno de los primeros pasos para comenzar a comprender la variación espacial de los hábitats bentónicos y aplicar herramientas de planificación espacial marina (Harris y Baker, 2012). En este sentido, herramientas de clasificación semiautomática como el BTM (*Benthic Terrain Modeler*) (Wright et al., 2012) ofrecen la posibilidad de analizar grandes volúmenes de datos consumiendo menos tiempo que el cartografiado tradicional.

La Zona de Especial Conservación (ZEC) Franja marina Santiago – Valle Gran Rey se sitúa al suroeste de la isla de La Gomera (Islas Canarias) y cubre una extensión total de 131,4 km² que engloban los fondos de la plataforma insular y el talud superior hasta los 1330 m de profundidad (Fig. 1). Aunque la ZEC fue declarada como tal en septiembre de 2011, aún no se ha realizado un cartografiado de los hábitats bentónicos que permita adoptar las medidas de conservación necesarias, debido fundamentalmente a la falta de datos geofísicos y biológicos de la zona.

En los últimos años, gracias a la aplicación de la Directiva Marco de Estrategia Marina en aguas españolas, se está consiguiendo mejorar estas bases de datos. En este sentido, el objetivo de este trabajo es cartografiar la geomorfología de la ZEC Franja marina Santiago – Valle Gran Rey utilizando BTM para definir las clases de morfologías que servirán de base para comprender la variación espacial de los hábitats bentónicos.

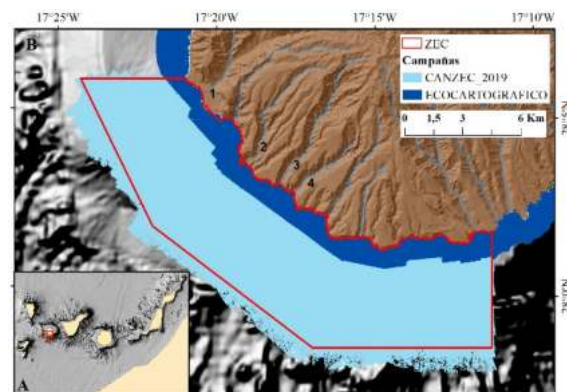


Fig. 1. Zona de estudio. A) Localización general de las islas Canarias. B) ZEC Franja marina Santiago-Valle Gran Rey encuadrada en rojo y coberturas batimétricas utilizadas en este trabajo. 1) Barranco de Arure; 2) Barranco de Igualea; 3) Barranco de la Rajita; 4) Barranco de la Negra. La batimetría de base se descargó de la plataforma EMODnet (European Marine Observation and Data Network), con resolución espacial de 115.

2. METODOLOGÍA

Los datos de batimetría utilizados en este trabajo se adquirieron con una ecosonda multihaz EM710 durante la campaña CANZEC_2019 (Fig 1B), realizada a bordo del buque oceanográfico Ángeles Alvariño. La batimetría se procesó utilizando el programa Caris HIPS & SIPS 11.4. Esta batimetría cubre desde la isóbata de 40 m hasta las zonas más profundas de la ZEC. Para completar la zona más somera, se han utilizado los datos de batimetría de los Estudios Ecocartográficos del Litoral Canario (MAGRAMA, 2002). Como resultado de la compilación de ambas batimetrías, se obtuvo un mosaico batimétrico con resolución espacial de 5 m que cubre la totalidad de la ZEC.

La cartografía morfológica de la ZEC se llevó a cabo utilizando el *Benthic Terrain Modeler* (BTM). El BTM es una herramienta del programa ArcGIS 10.8 que combina parámetros descriptivos del terreno, como la profundidad, la pendiente y el índice de posición batimétrica (BPI) para clasificar el fondo marino de acuerdo a una definición supervisada de morfologías del fondo marino. Los BPIs se calcularon para analizar el terreno a escala gruesa (factor de escala 1000 m) y a escala fina (factor de escala 50 m).

La casificación supervisada del BTM se basa en un diccionario definido por el usuario que establece los

valores límite inferior y superior de los parámetros utilizados (BPIs, pendiente y rango de profundidad). Esta clasificación se realiza en función de las características morfológicas de la zona de estudio y del criterio experto. La Tabla 1 presenta los límites aplicados en este estudio.

De esta manera, el BTM combina en un mapa las clases con atributos morfológicos distintos pero sin describir los procesos geológicos o biológicos implicados en su origen y evolución.

Tabla 1. Diccionario de clasificación para el BTM.

Zona	BPI grueso inferior	BPI grueso superior	BPI fino inferior	BPI fino superior	Pendiente inferior	Pendiente superior	Profundidad inferior	Profundidad superior
1 Zona aplacerada			-10	10		5		
2 Crestas			70					
3 Crestas suaves			10	70			-200	
4 Altos morfológicos	100							-400
5 Depresiones				-70				
6 Pequeñas depresiones			-70	-10			-200	
7 Zona pendiente suave					5	10		

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se definieron un total de siete clases de morfologías con el BTM (Fig. 2): zona aplacerada; zona de pendiente suave; altos morfológicos; crestas suaves; pequeñas depresiones; crestas; y depresiones. La combinación de estas clases con las características hidrodinámicas, tectónicas y volcánicas de la zona ha permitido asociar las clases morfológicas con diferentes geomorfologías según su origen.

Las zonas aplaceradas se relacionan principalmente con fondos de la plataforma insular de pendiente inferior a 5° en los que predomina la acomodación de sedimento.

Los fondos con pendiente suave (5°-10°) se identifican en la plataforma insular formando dos frentes a diferente profundidad. Uno más somero entre las isóbatas de 20 y 40 m, y otro más profundo entre los 120 y 150 m de profundidad. Estos fondos

se podrían relacionar con los *foresets* de cuñas sedimentarias formadas durante diferentes niveles del mar desde el último máximo glacial (Casalbore et al., 2017). En el talud también se identifican fondos con pendiente suave cubiertos por sedimentos.

Se identifican nueve altos morfológicos en el talud de la zona de estudio. Se podrían tratar o bien de conos volcánicos o bien domos y diques que han quedado expuestos tras los procesos de erosión. Ambas opciones podrían estar relacionadas con la última actividad volcánica registrada en la isla hace entre 4,6-2,8 millones de años, la cual fue responsable de actividad local en el centro y sur de La Gomera (Ancochea et al., 2006).

Las crestas suaves y las pequeñas depresiones se distribuyen por toda la plataforma insular. Estas morfologías se encuentran en la parte superior e inferior de las cuñas sedimentarias, asociadas al *topset* y *bottomset* de estas cuñas. También están presentes frente a la desembocadura de los principales barrancos de la zona de estudio (barrancos de Arure e

Iguala, barranco de la Rajita y barranco de la Negra) (Fig. 1) con una disposición perpendicular y paralela a costa, lo que indica que son ondulaciones y pequeños canales formados sobre los prodeltas que se generan frente a la desembocadura de los barrancos (Fernández-Salas et al., 2007). En el sector oriental, también aparece un conjunto de estas crestas suaves y pequeñas depresiones con disposición perpendicular a la costa y sin estar asociadas a ninguna desembocadura de barranco, por lo que se deduce que forman un campo de ondas impulsado por las corrientes que circulan por el fondo de la plataforma insular (De Falco et al., 2015).

Las crestas y depresiones se distribuyen principalmente por todo el talud, aunque se observan de forma dispersa en la plataforma interna del sector occidental y a lo largo de toda la plataforma externa. Las crestas de la plataforma interna se asocian principalmente a pequeños afloramientos rocosos. El resto de crestas y depresiones parecen estar relacionados con canales que conectan la plataforma con el talud y con barrancos submarinos que canalizan el flujo de sedimentos por medio de corrientes de turbidez desde la plataforma hacia las zonas profundas del talud (Krastel et al., 2001).

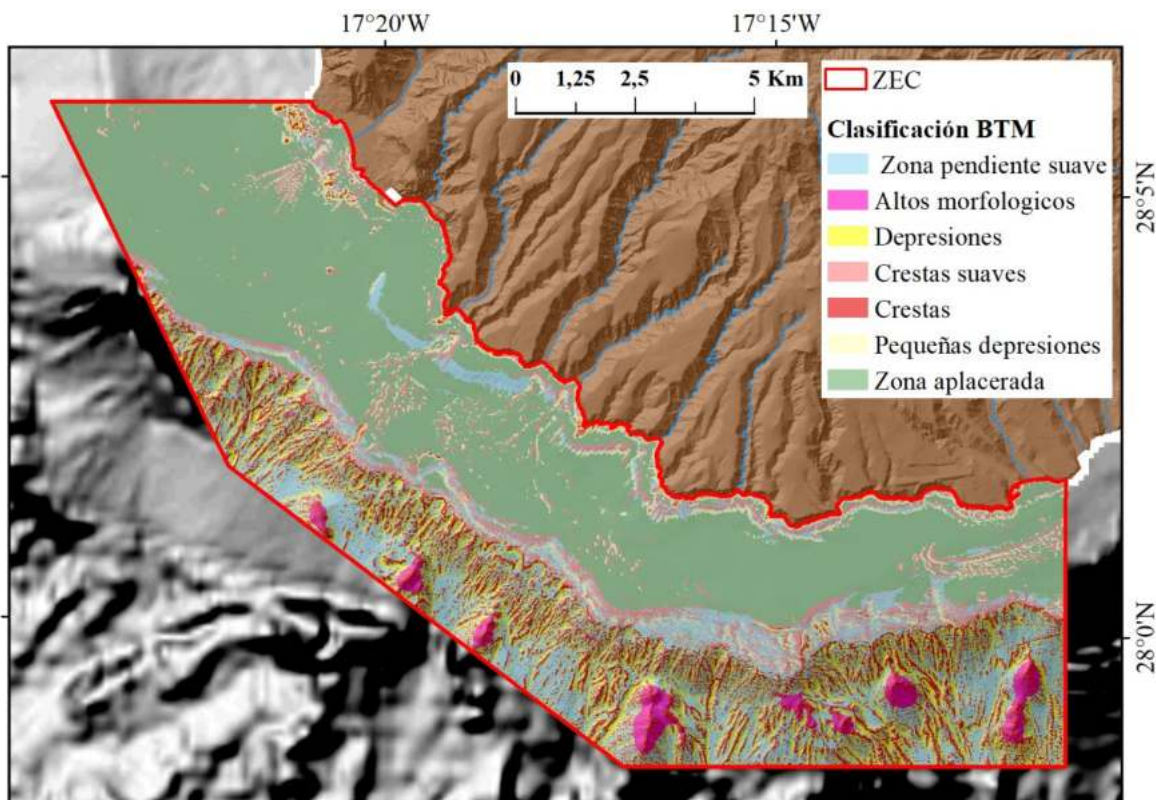


Fig. 2. Clasificación BTM de la zona de estudio. La batimetría de base se descargó de la plataforma EMODnet (European Marine Observation and Data Network), con resolución espacial de 115.

4. CONCLUSIONES

La zona de estudio está dominada por procesos sedimentarios, se identifican prodeltas frente a la desembocadura de los principales barrancos, campos de ondas asociados a las corrientes de fondo y barrancos submarinos que canalizan el flujo de sedimentos hasta las zonas profundas del talud.

El BTM permite clasificar el fondo marino según su morfología, apoyando el estudio de la geodiversidad y su influencia en la distribución de hábitats bentónicos. Esta herramienta es adecuada para analizar grandes volúmenes de datos, lo que la convierte en una herramienta eficaz para el estudio de hábitats en áreas marinas protegidas.

Es necesario apoyar este estudio con datos sedimentarios y sísmicos que permitan verificar el origen de las geomorfologías identificadas.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo del proyecto ESMARES2 del Instituto Español de Oceanografía (IEO-CSIC), en el marco de las tareas asignadas al IEO por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITERD) del Gobierno de España para la aplicación de la Directiva Marco de Estrategia Marina en aguas españolas. Agradecen también a la tripulación y técnicos a bordo del B/O Ángeles Alvariño su colaboración en el buen desarrollo de la campaña CANZEC_2019, de la cual provienen los datos.

REFERENCIAS

- Ancochea, E., Hernán, F., Huertas, M.J., Brändle, J.L., Herrera, R., (2006). A new chronostratigraphical and evolutionary model for La Gomera: implications for the overall evolution of the Canarian Archipelago. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 157, 271-293.
- Casalbore, D., Falese, F., Martorelli, E., Romagnoli, C., Chiocci, F. (2017). Submarine depositional terraces in the Tyrrhenian Sea as a proxy for paleo-sea level reconstruction: Problems and perspective. *Quaternary International*. 439, 169-180.
- De Falco, G., Budillon, F., Conforti, A., Di Bitetto, M., Di Martino, G., Innangi, S., Simeone, S., Tonielli, R., 2015. Sorted bedforms over transgressive deposits along the continental shelf of western Sardinia (Mediterranean Sea). *Marine Geology*. 359, 75-88.
- Fernández-Salas, L.M., Lobo, F.J., Sanz, J.L., Díaz-del-Río, V., García, M.C. y Moreno, I. (2007). Morphometric analysis and genetic implications of pro-deltaic sea-floor undulations in the northern Alboran Sea margin, western Mediterranean Basin. *Marine Geology*. 243: 31-56.
- Harris, P.T., y Baker, E.K. (2012). Why map benthic habitats? En: Harris P.T., Baker, E.K. (eds). *Seafloor geomorphology as benthic habitat*. Elsevier, Amsterdam, pp 3-22.
- Krastel, S., Schmincke, H.U. y Jacobs, C.L. (2001). Formation of submarine canyons on the flanks of the Canary Islands. *Geo-Marine Letters*. 20: 160-167.
- MAGRAMA. (2002). Estudio Ecocartográfico del litoral de La Gomera. Madrid, Secretaría de Estado de Aguas y Costas, Dirección General de Costas.
- Wright, D.J., Pendleton, M., Boulware, J., Walbridge, S., Gerlt, B., Eslinger, D., Sampson, D., and Huntley, E. 2012. ArcGIS Benthic Terrain Modeler (BTM), v. 3.0, Environmental Systems Research Institute, NOAA Coastal Services Center, Massachusetts Office of Coastal Zone Management.

Fotogrametría de alta resolución con medios aéreos no tripulados. Volcán Cumbre Vieja

Autores: M. Larrad y L. Rusillo (1).

(1) Instituto Hidrográfico de la Marina (IHM). mlarrev@fn.mde.es, lrusdia@fn.mde.es

Resumen: Los constantes cambios en las infraestructuras portuarias y por tanto línea de costa, demandan una rápida delimitación de la misma para así tener actualizada la carta náutica correspondiente. En numerosas ocasiones las imágenes que nos proporcionan los vuelos del Plan Nacional de Ortofotografías Aéreas (PNOA) e imágenes satelitales, se quedan anticuadas o con una insuficiente resolución espacial como para poder representar cartográficamente las entidades de interés.

En los últimos años el IHM (Instituto Hidrográfico de la Marina) ha adquirido tres drones aéreos con sus correspondientes sensores, cuya misión fundamental es acometer entre otros, estos trabajos cartográficos, aprovechando la facilidad de su despliegue y la resolución que nos proporcionan sus sensores.

La actualización de la línea de costa de la Isla de la Palma tras la erupción del Volcán Cumbre Vieja es un claro ejemplo de los resultados obtenidos con estos medios aéreos no tripulados

Palabras clave: dron, ortofotografía, línea de costa.

1. INTRODUCCIÓN

[La Ley 7/1986, de Ordenación de la Cartografía](#), que regula la Producción Cartográfica del Estado, ordena la formación y conservación de la cartografía náutica básica al IHM.

[El Real Decreto 1545/2007, de 23 de noviembre, por el que se regula el Sistema Cartográfico Nacional](#), atribuye al IHM la responsabilidad de la inscripción de la línea de Costa en el Registro Central de Cartografía.

Bajo este marco legal, y con la proliferación del empleo de equipos autónomos, el IHM ha adquirido varios sistemas aéreos pilotados remotamente comúnmente llamados drones aéreos. Estos equipos comerciales proporcionarán un mayor margen de maniobra a la hora de realizar ciertos trabajos y sus sistemas de procesado de la información facilitan los productos necesarios para poder editar la línea de costa y otras entidades geográficas de interés.

Así mismo, se encuentra en proceso de ampliar este tipo de unidades, con objeto de incorporar otros equipos al conjunto de los ya existentes en esta Unidad.

Las aplicaciones y operaciones de estos sistemas tienen por objetivo la obtención información geoespacial de diferentes playas y puertos, con fines

cartográficos, que permitirán la delimitación de la línea de costa de forma rápida y sencilla.

El IHM define la línea de costa como una línea doble, compuesta por la línea de la pleamar y la línea de la bajamar. La primera es la línea horizontal que queda determinada por el máximo avance de la marea hacia tierra y la segunda determinada por el Cero Hidrográfico o bajamar escorada.

Es importante entender que la representación o delimitación gráfica, tanto la línea de pleamar como la de bajamar, se basa en la fotointerpretación, pudiéndose automatizar en algunas ocasiones en las que la frontera tierra – mar es muy evidente.

De forma general, el Departamento de Producción Cartográfica del IHM, emplea la información geoespacial proporcionada por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) y de otros servicios cartográficos, para la representación de la línea de costa. Así mismo periódicamente y atendiendo al Plan de Producción Cartográfico, se solicitan vuelos fotogramétricos al Ejército del Aire y del Espacio (Fig.1), con el objetivo de disponer de ortoimágenes que nos permitan digitalizar la línea de costa de nuestras cartas náuticas. En este último caso, vuelos del Ejército del Aire, se especifican las horas de las capturas de las imágenes para hacerlas coincidir con el periodo de bajamar.



Fig. 1. Fuentes de información geoespacial con fines fotogramétricos: IGN, CECAF y drones del IHM (fuente: IHM)

Teniendo en cuenta que las imágenes que facilita el PNOA tienen una tasa de actualización cercana a los 3 años y que el CECAF (Centro Cartográfico y Fotográfico del Ejército del Aire y del Espacio), no siempre puede atender a nuestras solicitudes y demanda, por ello el IHM ha optado por la autonomía y la precisión que ofrecen los drones y sus sensores asociados.

Es una realidad la limitada cobertura y autonomía que ofrecen estos equipos de ala rotatoria y es por ello que próximamente, tenemos previsión comenzar a trabajar sistemas de ala fija que otorguen más capacidad de adquisición.

2. DESARROLLO

Desde la fecha en que se adquirió el primer equipo (septiembre del 2021) y una vez superadas y desarrolladas las pautas legales para poder operarlo, en el Departamento de Levantamientos del IHM comenzamos a escribir los diferentes procedimientos e [Instrucciones Permanentes de Hidrografía \(IPH\)](#), para documentar y dar soporte a esta nueva capacidad hidrográfica.

De forma resumida se citan los documentos básicos para poder desarrollar esta capacidad hidrográfica:

- Certificación de Aeronavegabilidad del dron.
- Estudio de Seguridad y Viabilidad genérico.
- Certificado de los operadores.
- Seguro de responsabilidad civil.
- Procedimientos Operativos del dron.
- Instrucciones sobre adquisición y procesado atendiendo a los productos deseados (escala, resolución, incertidumbres...).

En nuestra IPH se detalla el empleo de cada uno de los tres sensores que tenemos y que se pueden integrar en el dron, atendiendo a los objetivos perseguidos:

- Sensor fotogramétrico, para línea de costa.
- Sensor LiDAR, para perfiles de playa.
- Sensor multispectral, para productos derivados como la batimetría.

Centrándonos en los productos fotogramétricos, tras un periodo de formación teórico-práctico, hemos empezado a operar con estos equipos y a integrar la

información adquirida en el flujo de producción cartográfica.

En primer lugar, las operaciones de adquisición comienzan con una comprobación de las posibles restricciones del espacio aéreo a sobrevolar para no generar situaciones de riesgo o peligro. Una vez informadas las autoridades locales y de coordinación aéreas, se procede a la planificación de los vuelos.

Por norma general y con el objetivo de la comprobación de coherencia externa, se trabaja por bloques, es decir, cada vuelo adquiere la información de un polígono cerrado y entre diferentes polígonos se busca superposición.

Sobre el terreno se tomarán medidas con receptores GNSS (Global Navigation Satellite System) de puntos de apoyo y control, con el objetivo de ajustar el modelo u ortofoto. Estos puntos deben estar en las zonas periféricas y centrales del bloque. (Fig. 2)



Fig. 2. Puntos de apoyo en trabajos de Ayamonte. Fuente: IHM.

Una vez seleccionado el sensor, fijaremos la altura de vuelo que por lo general va a ser 100 metros. Esta altura nos permite tener siempre el dron a la vista y será más que suficiente para conseguir una resolución espacial cercana al centímetro por pixel.

Posteriormente ordenaremos la velocidad de vuelo que será la que determine el tiempo de la operación, buscando siempre vuelos no superiores a 30 minutos.

En cuanto al solape o superposición, va a depender de la orografía del terreno y sus características. Por norma general se opera con un solape frontal del 80 % y un solape lateral del 70 %, pudiéndose ampliar hasta un 90 % en ambos sentidos (Fig. 3).

Destacar la importancia del montaje de una estación base, próxima a la zona de trabajos con el fin de poder realizar un posprocesado de la posición de sensor.



Fig.3 Esquema de la planificación de un vuelo fotogramétrico.

Una vez revisado y comprobado el estado de la aeronave, los sensores y los datos introducidos en la planificación, se procede a iniciar la misión de vuelo.

El sensor fotográfico almacena en local las imágenes obtenidas, las cuales se deben descargar una vez finalizado el vuelo, a una estación de trabajo para que puedan ser procesadas con el software correspondiente.

Los pasos a seguir para obtener un modelo 2D y 3D sobre el que poder digitalizar entidades geográficas serían los siguientes:

- Geolocalizar las imágenes
- Seleccionar el tipo de sensor y sus parámetros de orientación.
- Aerotriangular el modelo mediante la identificación de puntos homólogos.
- Introducir puntos de apoyo y de control, para eliminar distorsiones y para chequear el modelo (Fig. 4).
- Generación del MDT y de la ortofotografía.

3. RESULTADOS

Como ejemplo de la capacidad que tiene el IHM para definir la línea de costa mediante medios aéreos no tripulados, vamos a mostrar los trabajos realizados en la Isla de La Palma, tras la erupción del Volcán Cumbre Vieja, próximo al municipio de Tazacorte (Fig.5 y Fig. 6).

El proceso de adquisición de estos trabajos no fue más allá de una mañana. Si bien es cierto el procesado fue algo más lento, llegando a emplearse 4 horas por cada vuelo de 30 minutos.

El primer paso fue materializar los puntos de apoyo, lo cual fue complicado por tratarse de una zona de acceso restringido. Por esta razón y por tratarse de una superficie muy homogénea (dificultad en identificar puntos homólogos), se empleó un solape tanto transversal como frontal del 90 %.



Fig.4 Personal midiendo puntos de apoyo.

Una vez planificada la misión a una altura de 100 metros y a una velocidad de 8 m/s, se efectuó el vuelo. Tras las tareas de procesado se pudo comprobar la bondad de los datos y la coherencia externa con la línea de costa existente no afectada por la colada.



Fig. 5. Delimitación de la colada norte del Volcán Cumbre Vieja en la Isla de La Palma. Fuente: IHM.

Cabe destacar que el vuelo se realizó haciéndolo coincidir con el momento de la bajamar, motivo por el cual se puede observar un pequeño desfase en la zona intermareal.



Fig. 6. Carta Náutica de la Isla de La Palma (ES400616).

4. CONCLUSIONES

Para garantizar la disponibilidad de una línea de costa actualizada en las cartas náuticas, es necesario disponer de imágenes recientes y de alta resolución. El empleo de drones para alcanzar dicho fin es una solución que está dando muy buenos resultados, tanto por la calidad de las imágenes, como por la facilidad de su uso y despliegue, así como por la precisión de datos geométricos obtenidos.

La actualización de la línea de costa de la Isla de La Palma es un claro ejemplo de un trabajo reciente que ha sido publicado en la nueva edición de la Carta Náutica de La Palma (ES 600414).

Agradecimientos

Agradecemos a todo el personal del Departamento de Levantamientos que ha contribuido a la redacción de los procedimientos y de la normativa necesaria para poder operar estos equipos. Mención muy especial a Luis Barbero, profesor de la Universidad de Cádiz, ha sido la persona que nos ha servido de punto de partida para crear esta nueva capacidad y sin su apoyo, habría sido mucho más difícil lograr este objetivo.

REFERENCIAS

Referencias legales:

Ley 7/1986, de 24 de enero, de Ordenación de la Cartografía.

Real Decreto 1545/2007, de 23 de noviembre, por el que se regula el Sistema Cartográfico Nacional.

IPH 801 Planeamiento, adquisición y procesado de información geoespacial obtenida mediante sistemas aéreos pilotados remotamente.

Publicaciones:

Berné Valero, J. L, Antequera Julián, A y Garrido Villén, N. (2014). GNSS. GPS: Fundamentos y aplicaciones en geomática. Universidad Politécnica de Valencia.

De La Puente Maroto, J. (2019), Geodesia con observación espacial. Teniente coronel, Profesor Departamento de Información Geoespacial de la Escuela de Guerra del E.T.

Mando de adiestramiento y doctrina del E.T (2007), EGE-VA-005, Fotogrametría.

Mando de adiestramiento y doctrina del E.T (2009), EGE-VA-004, Fotointerpretación.

Como pode o mapeamento da cobertura sedimentar contribuir para a elaboração dos produtos de cartografia hidrográfica?

R. Melo (1), A. Rodrigues (1,2), C. Monteiro (1), A.S. Saramago (1), C. Luz (1), L. Veiga (1) e C. Marques (1)

(1) Instituto Hidrográfico: Rua das Trinas, 49. – 1249-093 Lisboa. anaraquel.melo@hidrografico.pt

(2) Instituto Dom Luíz: Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

Abstract: Over the last 60 years, the Hydrographic Institute (IH) has accumulated a vast collection of geological and hydrographic information, acquired through surveys carried out with different purposes and equipment, covering diverse geographical and temporal spaces. The metadata from these campaigns and sediment samples, complemented by laboratory test metadata, enable proper management of this significant volume of geological information, providing immeasurable geostrategic benefits to IH's activities. To demonstrate the potential of the existing information, a cartographic product of the South Coast of Madeira Island will be presented, featuring sediment samples collected between 1992 and 2019 as part of the SEPLAT programme and other studies. Metadata played a crucial role in sorting the samples, and the selected geological information was integrated with the high-resolution bathymetric model. This new representation of the seabed enriches and strengthens the hydrographic cartography, serving as the basis for various territorial management instruments.

Keywords: cartografia hidrográfica, cobertura sedimentar, metadados, Madeira.

1. INTRODUÇÃO

O Instituto Hidrográfico (IH) enquanto entidade reguladora do exercício de atividades no âmbito da produção de Cartografia Hidrográfica, em território nacional (DL n.º 130/2019), está a desenvolver um produto de Cartografia Hidrográfica de Base (CHB) que tem por objeto a representação da morfologia e da natureza do fundo das zonas imersas e da região emersa adjacente, e que pretende, por um lado servir de apoio aos Instrumentos de Gestão Territorial (IGT) e, por outro lado, sustentar a atividade desenvolvida pela comunidade crescente de utilizadores de informação geoespacial, promovendo o crescimento económico do país nas mais diversas vertentes.

Na sua qualidade de unidade de investigação científica ligada às geociências marinhas, o IH tem sustentado, desde a sua criação, uma importante linha de atividade estratégica relacionada com o conhecimento e mapeamento dos depósitos sedimentares marinhos das zonas costeiras da margem portuguesa. Na zona continental, o programa SEPLAT promoveu, entre 1974 e 2010, a publicação das cartas sedimentológicas, baseadas na colheita, análise e representação cartográfica de mais de 12 000 amostras de sedimentos. Nas zonas mais profundas e nas margens insulares, o reconhecimento das características geológicas do fundo marinho tem vindo a ser realizado, de forma mais irregular, mas integrando dados e informações obtidas no âmbito da restante atividade hidrográfica.

Tendo em conta o volume significativo de dados multidisciplinares, adquiridos e arquivados ao longo de 60 anos de atividade, a natureza da sua missão e os

desenvolvimentos tecnológicos que atualmente permitem a elaboração de produtos cartográficos de elevada resolução e integrando informação com diferentes origens e formatos, o IH tem investido na recuperação, compilação e harmonização dos dados mais antigos e na sua conversão em novos produtos, enquadrados pelos seus deveres ao nível da Defesa, como Serviço Hidrográfico Nacional e Laboratório do Estado.

2. O PAPEL DOS METADADOS

2.1. Informação sedimentológica

Relativamente à informação sedimentológica, ainda em formato analógico, os dados de bordo e os resultados das análises laboratoriais foram inseridos em Base de Dados (BD) utilizando o *Laboratory Information Management System (LIMS) Nautilus*. No processo de recuperação e armazenamento de informação, os metadados referentes a campanhas e amostras foram verificados e validados, assegurando o necessário controlo de qualidade e integridade, eliminando-se dados incompletos, duplicados ou incorretos. Este procedimento, apresentado por Melo *et al.* (2016; 2020), garante a utilização dos metadados como a principal ferramenta de seleção de qualquer conjunto de informações ou resultados (dados) a utilizar nas mais diversas representações cartográficas.

2.2. Gestão da informação geológica

Perante a realidade do ambiente marinho, e tendo em vista a utilização dos dados para os fins cartográficos, é fundamental que o ciclo de vida dos dados sedimentológicos seja robusto, organizado e bem estruturado (Figura 1), permitindo ter uma visão

alargada e ponderada sobre os dados desde o seu planeamento, garantindo fiabilidade e qualidade da informação (Almeida *et al.*, 2020; Melo *et al.*, 2020).



Fig. 1. Modelo de gestão dos dados técnico-científicos (adaptado de Faundeen *et al.*, 2014).

Neste processo, os metadados das amostras de sedimentos, representativas da área a cartografar, uma vez validados e harmonizados, foram fulcrais no processo cartográfico. O modelo em pirâmide DIK (*Data, Information and Knowledge Model*) (Figura 2) reforça a importância de cada etapa do ciclo de vida dos dados, na sua natural transformação, desde o seu estado bruto até à etapa final do conhecimento.



Fig. 2. Modelo em pirâmide DIK aplicado a este trabalho.

3. OBJETIVO

O objetivo do presente trabalho foi construir um protótipo de produto cartográfico para duas áreas da Costa Sul da Ilha da Madeira, junto à Ponta do Pargo e Madalena do Mar (Figura 3).

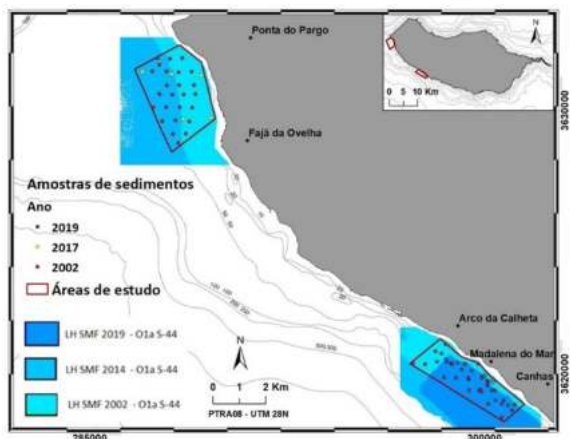


Fig. 3. Representação espacial da metainformação referente às áreas de estudo, com indicação do ano de colheita e aquisição. Áreas a azul representam as zonas sondadas com sistema multifeixe; amostras de sedimentos representadas com círculos.

Neste protótipo, para além da informação de base tradicionalmente representada em produtos hidrográficos (valores de profundidade, linhas isobatimétricas e elementos topográficos de interesse), se incluísse ainda informação geológica, nomeadamente a delimitação da camada de sedimentos efetuada a partir da interpretação geomorfológica e implantação de amostras de fundo, devidamente classificadas.

4. METODOLOGIA

Na fase inicial da produção de Cartografia Hidrográfica de Base da zona sul da Ilha da Madeira, foi compilada a informação batimétrica mais atualizada num modelo único, preservando, para cada local, a informação hidrográfica mais recente e de melhor resolução. A partir deste modelo consolidado, foram criados produtos de trabalho intermédios, para interpretação e análise (imagens RASTER de alta resolução - 4m, com diferentes níveis de exageração vertical e luminosidade). As grelhas de profundidade com resolução de 25m, foram complementadas com linhas isobatimétricas com os valores considerados adequados para os IGT, tendo em conta a sua distribuição e legibilidade à melhor escala dos mesmos.

Com suporte nos metadados (e.g. coordenadas, profundidade, data e parâmetros de análise), fez-se a interseção e seleção das amostras, extraídas da BD, usando as ferramentas da aplicação *ArcGIS Pro*. Em seguida, realizou-se uma segunda extração de informação, desta vez as classes texturais das 68 amostras de sedimentos, selecionadas anteriormente com base nos respetivos metadados. Para a classificação sedimentar foi adoptada a classificação de Shepard (1954).

A elaboração do mapa sedimentar iniciou-se com a criação do *layer* "Rocha", que mais não é do que a delimitação da camada sedimentar e serve de barreira à delimitação da distribuição espacial das várias classes sedimentares. O elemento "Rocha" foi produzido no *software ArcGIS Pro*, recorrendo às ferramentas de edição, essenciais à manipulação, criação e modificação dos dados geoespaciais. A vectorização desta camada, à escala 1:30 000, teve como base a interpretação do modelo batimétrico de alta resolução sobreposto à camada *Hillshade* deste modelo (Figura 4). A ferramenta *Hillshade* (*ArcGIS Pro*) facilita a visualização detalhada do relevo, em especial no que diz respeito à interpretação dos vários elementos morfológicos e, foi sobre esta *layer*, recorrendo à ferramenta de processamento "*Spline with Barriers*" (*ArcGIS Pro*) que se delimitaram os depósitos sedimentares. Esta ferramenta possui uma função de interpolação, usada para criar superfícies contínuas e suavizadas, da distribuição sedimentar a partir de pontos de amostragem de sedimentos, tendo em consideração a presença de barreiras naturais com influência na interpolação. Concretamente, é possível

ajustar a interpolação e garantir que a barreira não interrompe a superfície e reflete as complexidades e descontinuidades naturais do ambiente marinho.

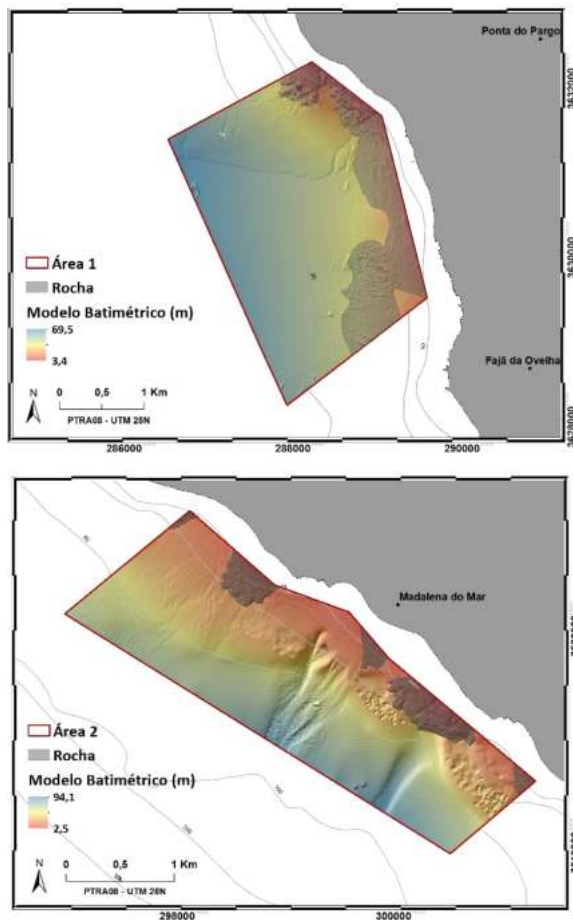


Fig. 4. Modelo batimétrico com hillshade e camada rocha (delimitada a cinza).

Concluído este estágio, foram aplicadas as ferramentas de edição às manchas sedimentares criadas, de forma a efetuar um ajustamento mais real, com o apoio da combinação do modelo batimétrico de alta resolução sobreposto à camada *Hillshade*, à semelhança de um dos passos anteriores. No processo decorreram erros topológicos que tiveram de ser corrigidos, com as ferramentas adequadas em SIG, sem comprometer a precisão e integridade dos dados.

As figuras 5 e 6 apresentam o mapeamento resultante deste trabalho, sendo possível avaliar o grande volume da informação que foi utilizada na elaboração do esboço de cartografia hidrográfica das duas áreas em estudo.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na era da informação, a reutilização de dados é um conceito crucial, pois a habilidade de recuperar, explorar e aplicar informações já existentes pode resultar numa economia considerável de recursos e incrementar avanços importantes ao nível do conhecimento científico, do ordenamento do território e do desenvolvimento das atividades

económicas e de Defesa. Exemplo prático desta necessidade está na origem do conceito deste produto de Cartografia Hidrográfica, em execução no Instituto Hidrográfico, a qual procura representar, com a melhor qualidade possível, as características morfológicas e geológicas do leito submarino.

Duas zonas da plataforma costeira da ilha da Madeira foram utilizadas como áreas piloto para testar a metodologia adoptada para o mapeamento sedimentar, realizado com o propósito final de alimentar a Cartografia Hidrográfica.

O IH possui um volume de dados considerável sobre a morfologia e sobre a natureza sedimentar, pelo que a sua reutilização conjunta, será crucial para os novos productos e promover a compreensão, proteção e gestão dos oceanos e dos recursos marinhos.

Acrescenta-se ainda que a reutilização de dados pré-existentes é uma prática poderosa, com benefícios significativos ao nível da gestão de recursos, inovação e desenvolvimento. Para o efeito, os metadados são a chave para a reutilização e partilha dos dados, dado que o volume disponível de dados é, muitas vezes, de tal dimensão que torna o seu manuseamento demasiado complexo. Este facto traz benefícios geoestratégicos imensuráveis à atividade do IH.

REFERENCIAS

- Almeida, S.; Nunes, P.; Veiga, L.; Borges, C.; Melo, R. (2020). Gestão de Campanhas no Hidrográfico+. *Actas 6as Jornadas de Engenharia Hidrográfica*, Lisboa pp. 426-429.
- Faundeen, J.L., Burley, T.E., Carlino, J.A., Govoni, D.L., Henkel, H.S., Holl, S.L., Hutchison, V.B., Martin, Elizabeth, Montgomery, E.T., Ladino, C.C., Tessler, Steven, and Zolly, L.S., 2013, The United States Geological Survey Science Data Lifecycle Model: U.S. Geological Survey Open-File Report 2013-1265, 4 p., <http://dx.doi.org/10.3133/ofr20131265>.
- Melo, R.; Rodrigues, A.; Saramago Santos, A.; Luz, C. (2020). A importância da metainformação na re(utilização) dos dados na cartografia sedimentar. *Actas 6as Jornadas de Engenharia Hidrográfica*, Lisboa pp. 442-445.
- Melo, R.; Santos, R.; Rodrigues, A. (2016). Recuperação dos registos de reflexão sísmica - modo analógico para o digital com a máquina fotográfica. *Actas 4as Jornadas de Engenharia Hidrográfica*, Lisboa pp. 385-388.
- Shepard, F.P. (1954) - Nomenclature based on sand-silt-clay ratios. *Journal Sedimentary Petrology*, 24:151-158.

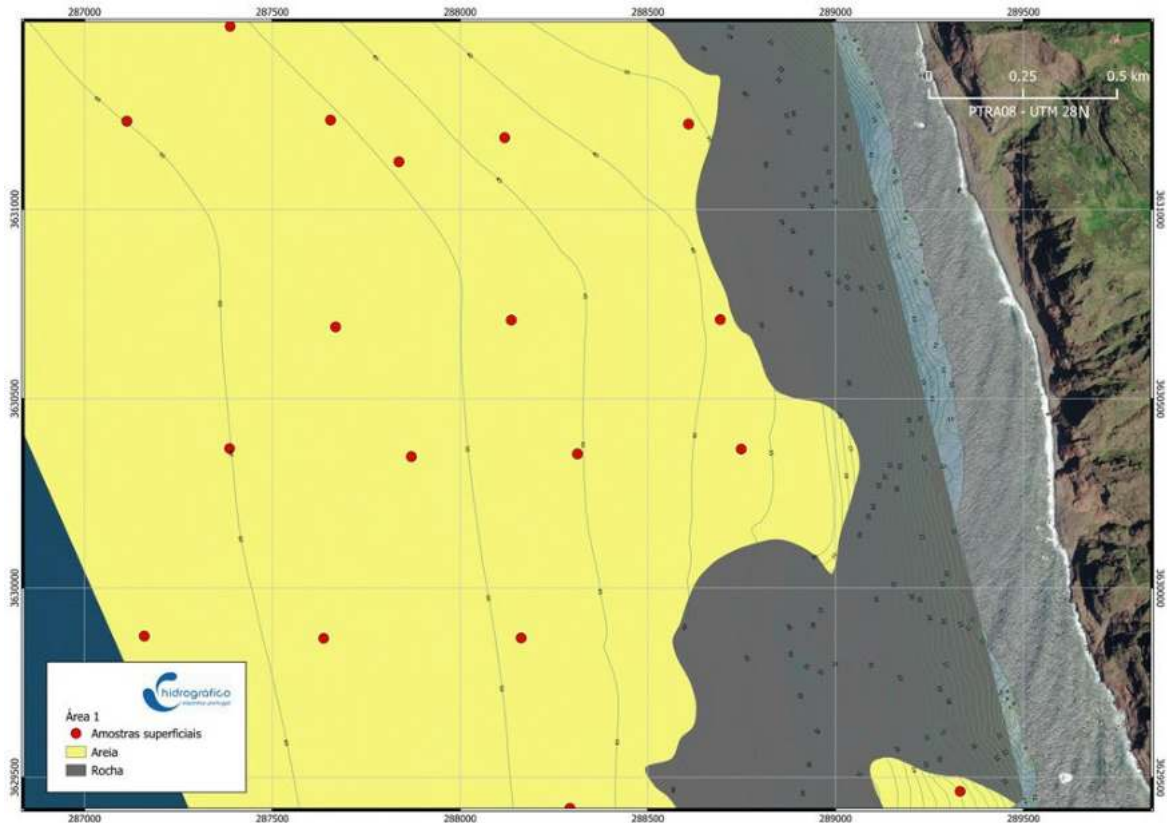


Fig. 5. Excerto do produto cartográfico referente à área 1. Implantadas as isóbatas e as amostras de sedimentos consideradas.

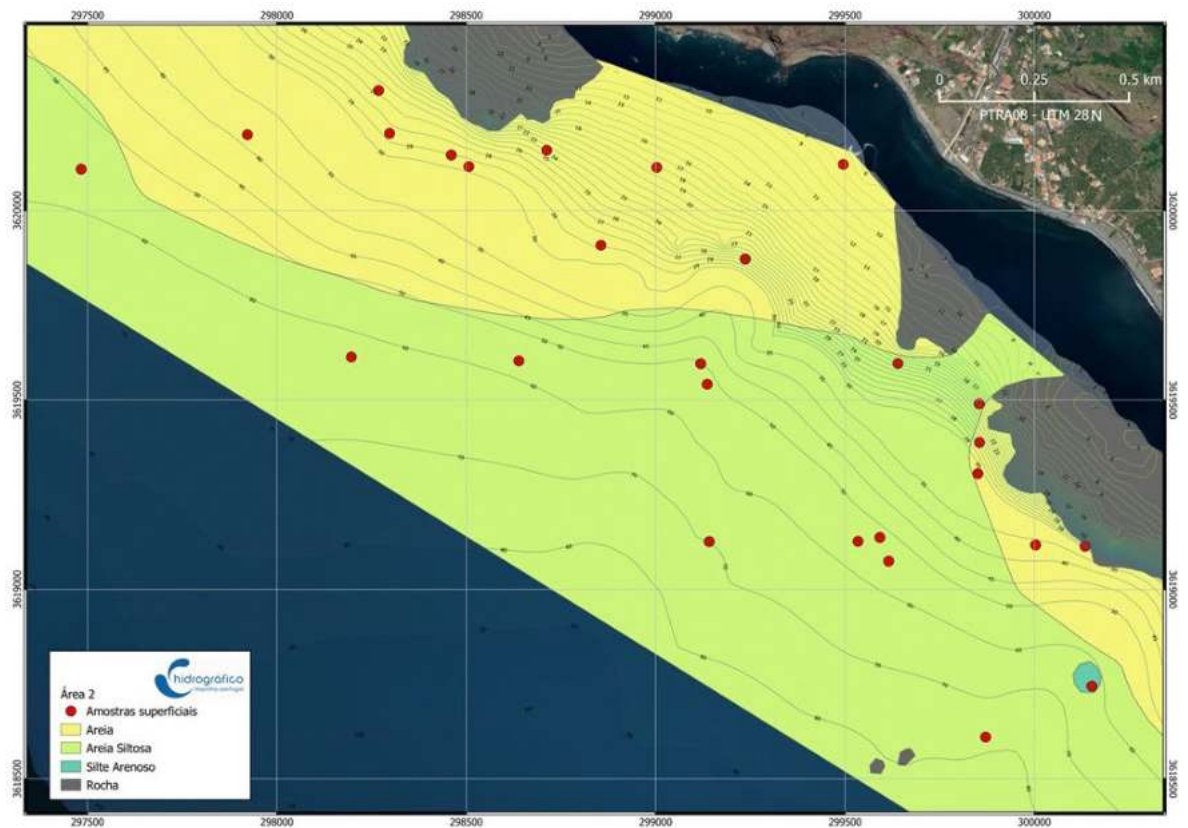


Fig. 6. Excerto do produto cartográfico referente à área 2. Implantadas as isóbatas e as amostras de sedimentos consideradas.

Resilience study of nautical-marine and naval activities in the provinces of Cadiz and Malaga, facing the challenge of climate change.

J.M Vidal Pérez¹, J.J Muñoz Pérez², M.I Beladjine³

(1) Departement of naval construction, Campus of Puerto Real, University of Cadiz; juan.vidal@uca.es

(2) Applied physics, Campus of Puerto Real, University of Cadiz; juanjose.munoz@uca.es

(3) Departement of naval construction, Campus of Puerto Real, University of Cadiz; ilyes.beladjine@alum.uca.es

Resumen: In view of the current trends of sea level rise, it is to be expected that there will be an increased frequency of storms and their wave heights. The resulting increase in coastal flooding and coastal erosion will have a major, but currently unknown, impact on port infrastructures, the operation of ships, the industrial base of its area of influence or hinterland, and even the surrounding natural areas such as beaches and marshes.

The aim of this study is to obtain data to determine the threats we will be facing in the medium and long term and the resilience of the Andalusian coastline. The provinces of Cadiz and Malaga have been chosen as study areas because they have different characteristics (existence or not of tide, different percentage of coastal occupation, ...) but representative of the rest of the Andalusian provinces.

The threats detected will be taken as an opportunity to define the lines of action for a policy that will allow an increase and improvement in the investment in climate adaptation in these coastal areas regarding the blue economy.

Palabras clave: Climate change, coastal flooding, nautical activities, port infrastructures, resilience.

1. INTRODUCCIÓN

Coastal erosion and inundation are a serious threat to the coastal systems. If current trends of sea level rise due to climate change continue (Holgate & Woodworth, 2004; Amblar et al., 2017; IPCC, 2022; Jigena et al., 2022), then projections indicate extensive and potentially catastrophic risks to ecosystems, human populations, built infrastructure, and coastal zone economies (Aguilera et al., 2022).

Resilience is a wide definition, often used to analyze the resistance and recovery of systems and established in disciplines such as physics and ecology (Angulo et al., 2017). Resilience also refers to the capacity of a socioeconomic system to recover from shocks such as economic crises, pandemics, natural disasters, etc. (Fernandez et al., 2012; Fang et al., 2018).

On the other part, the marine economy is based on industries and activities that develop, use and protect the ocean. Coastal resilience allows exploring current and future risks from coastal threats and comparing the cost-effectiveness of nature-based (SbN or green) versus artificial or technology-based (grey) solutions with an integrative (white) policy objective to reduce risks, avoid damage and ultimately help adaptive decision making. Collaboration at the technical and policy level can help control erosion in critical areas and maintain the critical livelihoods that healthy

coastal ecosystems provide to people and economies. It is of utmost importance to diagnose, plan and act at the same time, with coordinated work between all administrations and with all actors-sectors that have a say in the protection and economic exploitation of the coast.

Ports and other marine and maritime infrastructure are already suffering from the adverse effects of climate change, such as storms (wind and wave conditions), rising sea levels or extreme temperatures. Climate change represents a significant risk to business, operations, security and infrastructure and therefore to local economies. This climate change will cause many of these impacts to worsen, hindering or disabling activity in many ports, both commercial and fishing-sporting. Port and shipping operators must take urgent action to strengthen resilience and adaptation. However, this is not exclusive to them. Companies with activities in shipbuilding and ocean engineering sectors are also equally exposed. Climate change can compromise the operations of these activities, increasing operational stoppages and economic losses. This danger to operability would take the form of increased flooding of docks, loading-unloading and storage areas, as well as the overtopping of defense works or dikes due to sea level rise (Izaguirre et al, 2021; Becker et al, 2012, 2018; Alderson et al, 2015).

2. **DESARROLLO**

To approach the challenges brought about by sea-level rise and increased incidence of coastal flooding in Andalusia, we have developed a research project aimed at assessing the environmental and socio-economic impacts, as well as proposing resilient adaptation strategies. The first component of the project consists of in-depth and detailed data collection, including Oceanographic data, using buoys, satellites and numerical models to measure sea-level rise, wave characteristics and marine currents. Meteorological data.

Geographic and Geological Data, mapping coastal areas at risk using Geographic Information Systems (GIS) and topographic surveys.

Collecting data on port infrastructures, industrial activities, land use and local populations.

Based on the data collected, an advanced analysis is carried out to:

Assess the Impact on Infrastructure: several ports are studied in close detail to understand the specific vulnerabilities and adaptation needs of port infrastructure.

Simulations are conducted to assess potential damage and associated costs. Predictive models are developed to simulate sea-level rise scenarios.

Ecosystem Resilience Analysis

3. **RESULTADOS**

The guideline developed by the PIANC technical working group (2022) presents a four-phase methodological framework to assist port and waterway operators in preparing strategies and selecting measures to adapt assets and operation to climate change.

The first step provides an understanding of how assets, operations and systems might be affected and who should be involved in identifying climate change adaptation requirements.

Phase 2 identifies the type of climate-related information needed to prepare an adaptation strategy and explains how reference to climate change "scenarios" can help in understanding the range of possible future changes.

Phase 3 outlines how the vulnerability of water transport infrastructure assets, operations, and systems can be assessed and how a risk analysis can be conducted.

Phase 4 presents a "portfolio" of possible measures (structural, operational and institutional) to consider when developing an adaptation pathway.

4. **CONCLUSIONES**

Some of our initial findings indicate that the coastal areas of Cadiz and Malaga are highly vulnerable to the impacts of sea-level rise and increased flooding.

Main outcomes include Identifying risk areas
Adaptation Strategies Development of adaptation policies
Development of guidelines for a climate adaptation policy integrated into the blue economy
This study highlights the importance of resilience strategies and multi-sectoral collaboration to meet the challenges of climate change in Andalusia's coastal zones.

REFERENCIAS

Aguilera-Vidal, M., Muñoz-Perez, J.J., Contreras, A., Contreras, F., Lopez-Garcia, P., & Jigena, B. (2022). Increase in the Erosion Rate due to the Impact of Climate Change on Sea Level Rise: Victoria Beach, a Case Study. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(12), 1912.

Alderson D., Brown G., Carlyle W. Operational models of infrastructure resilience. *Risk Anal.*, 35 (4) (2015), pp. 562-586

Amblar, P., Casado, M.J.; Pastor, A., Rodríguez, E., 2017. Guía de escenarios regionalizados de cambio climático sobre España. A partir de los resultados del IPCC-AR5. Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente Agencia Estatal de Meteorología Madrid, 2017.

Angulo, A.M.; Mur, J.; Trivez, F.J. Measuring resilience to economic shocks: An application to Spain. *Ann. Reg. Sci.* 2017, 60, 349–373.

Becker, A., Inoue, S., Fischer, M. & Schwegler, B. Climate Change impacts on international seaports: knowledge, perceptions, and planning efforts among port administrators. *Climatic Change* 110, 5–29 (2012)

Becker, A., Ng, A. K. Y., McEvoy, D. & Mullet, J. Implications of climate change for shipping: ports and supply chains. *Wiley Interdiscip. Rev. Clim. Change* 9, e508 (2018).

Fang, Y.-P.; Zhu, F.-B.; Qiu, X.; Zhao, S. Effects of natural disasters on livelihood resilience of rural residents in Sichuan. *Habitat Int.* 2018, 76, 19–28.

Fernández, J. et al., 2012. Escenarios-PNACC 2012: Resultados de regionalización dinámica. En "Cambio climático: Extremos e Impactos. Publicaciones de AEC. Serie A, n8, 63-72.

Holgate, S. J., & Woodworth, P. L. (2004). Evidence for enhanced coastal sea level rise during the 1990s. *Geophysical research letters*, 31(7).

IPCC, 2022: Summary for Policymakers [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem (eds.)]. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and

New York, NY, USA, pp. 3-33,
doi:10.1017/9781009325844.001.

Izaguirre, C., Losada, I.J., Camus, P. et al. Climate change risk to global port operations. *Nat. Clim. Chang.* 11, 14–20 (2021).

Jigena Antelo, B., Berrocoso Domínguez, M., &

Vidal Pérez, J. (2021). Determinación del nivel medio del mar en el mar de Bransfield. Aplicación a la determinación del geoide en islas Decepción y Livingston, Islas Shetland del Sur (Antártida). *Revista Cartográfica*, (102), 69-97.

PIANC, MarCom WG: Ship Dimensions and Data for Design of Marine Infrastructure' n° 235-2022. Brussels: Belgium. 2022.

Uso y aplicaciones de drones en investigaciones polares

G. Navarro (1), A. Román (1), L. Barbero (2) y A. Tovar-Sánchez (1)

- (1) Instituto de Ciencias Marinas de Andalucía, ICMAN-CSIC. Puerto Real, Cádiz. gabriel.navarro@csic.es.
(2) Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Cádiz, Puerto Real, Cádiz.

Resumen: La Antártida es clave para comprender el clima global, y el estudio de sus respuestas ante el cambio climático es toda una prioridad. Este trabajo presenta los UAVs (en inglés *unmanned aerial vehicle*, vehículos aéreos no tripulados) como herramientas eficientes, rápidas y precisas para la investigación medioambiental en estas regiones extremas. Los estudios con UAVs se llevaron a cabo en las islas Decepción y Livingston (archipiélago de las Shetland del Sur, Antártida) durante varias campañas en el contexto de los proyectos PiMetAn y DICHOSO, utilizando sensores visibles, LiDAR, multiespectrales, hiperspectrales y térmicos. En este trabajo presentamos el repositorio de datos originales y en abierto ShetlandsUAVmetry, recopilados por UAVs durante la Campaña Antártica Española 2021-2022 (enero a marzo de 2022), junto con los productos fotogramétricos resultantes de su procesamiento. Incluye datos registrados durante veintiocho vuelos distintos de UAV en diversos sitios de estudio en las islas Decepción y Livingston (Islas Shetland del Sur, Antártida) y consta de un total de 15,691 capturas ópticas de alta resolución. Además, este conjunto de datos está acompañado de archivos adicionales asociados que facilitan su uso y accesibilidad. Estos estudios demuestran cómo la tecnología con UAV está transformando la investigación antártica, mejorando la monitorización ambiental y reduciendo la alteración de los hábitats más vulnerables, aportando conocimientos sobre ecosistemas aislados y sobre los impactos del cambio climático.

Palabras clave: hiperspectral, pingüinos, RGB, térmica, UAV.

1. INTRODUCCIÓN

La Antártida, incluyendo su área continental y el océano Austral circundante, es una de las zonas más afectadas por el cambio climático (Meredith et al., 2019). Comprender su funcionamiento es un desafío científico vital para predecir y mitigar riesgos a escala regional y global. Estas regiones remotas, típicamente accidentadas e inaccesibles con condiciones meteorológicas extremas, dificultan el uso de técnicas de monitorización in-situ convencionales.

La teledetección antártica comenzó en 1929 con el primer vuelo en avión de Hubert Wilkins sobre la Isla Decepción (Wilkins, 1929). Desde entonces, los avances tecnológicos han mejorado la teledetección satelital, proporcionando una amplia gama de estudios para los ecosistemas polares. Sin embargo, los datos satelitales de muy alta resolución (VHR, en inglés Very High-Resolution) tienen limitaciones en la Antártida Marítima, debido a una cobertura de nubes casi permanente, a su precio de adquisición, y a la falta de regularidad en la obtención de imágenes.

Los UAVs han emergido como una plataforma de monitorización intermedia entre las imágenes satelitales y las técnicas terrestres, ofreciendo una alternativa asequible, flexible y menos intrusiva. Los UAVs pueden desplegarse regularmente, superando las limitaciones atmosféricas y proporcionando resoluciones espaciales centimétricas o incluso milimétricas (Pina & Vieira, 2022).

La fotogrametría de Structure-from-Motion (SfM) se ha aplicado con éxito a datos de UAV para generar ortomosaicos georreferenciados y productos topográficos detallados. La investigación en la Antártida utilizando productos fotogramétricos de UAVs se ha centrado en áreas como la elaboración de mapas base detallados, el conteo de fauna y la determinación de características morfométricas, el mapeo de vegetación, el estudio de glaciares y mantos de hielo o el monitoreo de formas de relieve y suelos (Tovar et al., 2021).

En este trabajo presentamos diferentes iniciativas desarrolladas en dos proyectos de investigación antárticos como son PiMetAn y DICHOSO. Entre estos estudios, presentamos el conjunto de datos ShetlandsUAVmetry (Román et al., 2024) que incluye datos originales y productos fotogramétricos de alta resolución obtenidos de 28 vuelos de UAV en las islas Decepción y Livingston durante la Campaña Antártica Española 2021-2022. Este set de datos, procesados con el software Pix4D Mapper y de tecnología RTK (en inglés Real Time Kinematic, navegación cinética satelital), presentan una calidad excepcional y constituyen un recurso muy valioso para la investigación antártica. ShetlandsUAVmetry es el primer conjunto de datos fotogramétricos basados en UAV disponibles públicamente para un área antártica, apoyando diversas actividades de investigación y proporcionando información crucial sobre el funcionamiento ecológico de la Antártida en el contexto del cambio climático global.

2. DESARROLLO

Las zonas de estudio fueron las islas Decepción y Livingston, ambas ubicadas en el archipiélago de las Shetland del Sur. La Isla Decepción (Smith et al., 2003), situada entre las latitudes 62°53'S y 63°01'S, y las longitudes 60°29'W y 60°45'W, constituye el volcán más activo del archipiélago. Su caldera central, Port Foster, tiene 8-10 km de diámetro y está conectada al mar a través de los fuelles de Neptuno. La geomorfología de la isla está influenciada por la actividad volcánica y la acción glaciaria, con un 57% de su superficie cubierta por glaciares y depósitos volcánicos. La actividad volcánica se concentra en el sector interno de la caldera, con temperaturas geotérmicas que superan los 110 °C en algunas áreas. Además, la isla alberga especies vegetales poco frecuentes y comunidades de briófitas asociadas a la actividad geotérmica, así como importantes colonias de pingüinos como son Collado Vapor y Morro Bailly.

La Isla Livingston (localizada entre 62°27'S y 62°48'S, y entre 59°45'W y 61°15'W), es la segunda isla más grande del archipiélago, y presenta una flora y fauna diversas, especialmente en áreas terrestres libres de hielo. La Península Hurd, con su estación antártica española, destaca por albergar una gran diversidad geológica y biológica, incluyendo colonias de pingüinos y vegetación variada (Hobbs, 1968).

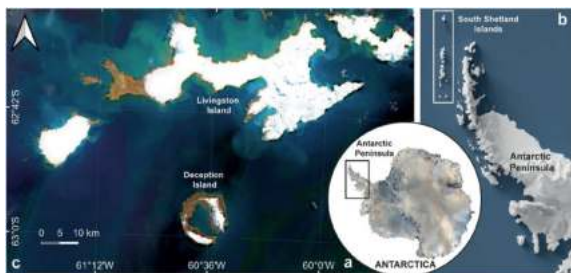


Fig. 1. Mapa que muestra las ubicaciones de: (a) la Península Antártica en una vista general de toda la Antártida, (b) las Islas Shetland del Sur en la Península Antártica; y (c) escena Sentinel 2A de las islas Decepción y Livingston el 17 de marzo de 2023.

Las aeronaves y sensores utilizados son:

- El cuadricóptero DJI Matrice 300 RTK (M300), equipado con tres sensores diferentes: el DJI Zenmuse H20T, el DJI Zenmuse P1 y el DJI Zenmuse L1. El sensor DJI Zenmuse H20T consiste en un sensor óptico RGB Zoom de 20 MP con un CMOS de 1/2.7" y un sensor óptico RGB de gran angular de 12 MP con un CMOS de 1/2.3". El DJI Zenmuse P1, integrado con un sensor de fotograma completo de 45 MP y con lente intercambiable (se utilizó un lente de 35 mm en este caso), cuenta con un cardán de 3 ejes para la estabilización inteligente de la cámara oblicua y un obturador mecánico global que permite una velocidad de obturación de 1/2000 segundos. El sensor DJI Zenmuse L1 integra una IMU de alta precisión y un sensor CMOS de 20 MP, que permite la captura de imágenes ópticas RGB con una velocidad de obturación mecánica de 1/2000 segundos y una velocidad de obturación electrónica

de 1/8000 segundos, todo estabilizado con un sistema de cardán de 3 ejes.

- El ATYGES FV1, un VTOL (Vertical Take-Off and Landing) de ala fija que es fácilmente desplegable debido a su capacidad de aterrizaje y despegue vertical, y que permite realizar vuelo automático de hasta tres horas continuas. Estaba equipado con la Sony Alpha 6000, un sensor CMOS de 24.3 MP.

- El DJI Mavic 2 Enterprise Advanced (M2EA), que incluía un módulo RTK adicional para una georreferenciación precisa. Equipado con un sensor óptico RGB de 48 MP y 1/2" CMOS.

Las operaciones con UAVs se llevaron a cabo cumpliendo con las regulaciones de Aviación Civil española, supervisadas por la Agencia Estatal de Seguridad Aérea (AESA). Los pilotos de UAV licenciados siguieron las recomendaciones del Comité Científico para la Investigación en la Antártida (SCAR) y de Hodgson & Koh (2016) para minimizar la perturbación a la fauna. Los vuelos se programaron con el *software* UgCS para los modelos M300 y M2EA, teniendo en cuenta la topografía del terreno y configurando parámetros constantes como la altura sobre el nivel del mar, velocidad, tiempo, trayectoria y superposición de la captura. Para los vuelos de VTOL se utilizó el *software* QGroundControl. Generalmente, no se recogieron Puntos de Control Terrestres (GCPs) debido a la dificultad de acceso y el gran tamaño de las áreas de estudio, confiando en la alta precisión del RTK del fabricante. Para la georreferenciación post-procesada (PPK) con el DJI Zenmuse P1, se usó una antena Reach RS2 + RTK GNSS como estación de referencia, proporcionando medidas horizontales y verticales muy precisas. Estas coordenadas base, ingresadas manualmente, permitieron establecer una precisión a nivel centimétrico. La altura de la antena se calculó y se ingresó manualmente para asegurar una posición precisa de la antena en el trípode

Además, el *software* Pix4D Mapper (v.4.8.3) fue utilizado para generar ortomosaicos ópticos RGB a partir de cada vuelo de UAV. Este *software* es comúnmente empleado para aplicaciones terrestres a partir de datos de UAV y es conocido por su metodología en la fotogrametría SfM para generar productos topográficos precisos. El proceso de procesamiento comenzó importando todas las capturas de UAV, seguido de la construcción de una nube de puntos dispersa durante la alineación de imágenes. Se utilizó una escala completa de imágenes para los puntos clave y se emparejaron imágenes usando un modelo de cuadrícula aérea o corredor, optimizando todos los parámetros de la cámara. Se seleccionó la "Coincidencia Verificada Geométricamente" para mejorar la precisión en áreas con características similares. Luego, se generó una nube densa 3D con las capturas alineadas, densificando la nube de puntos con una densidad óptima y filtrando puntos atípicos en áreas mal

resueltas. Se creó una malla texturizada 3D de alta resolución y se derivó un Modelo Digital de Superficie (DSM) interpolado, aplicando filtros de ruido y suavizado de superficie. Finalmente, el ortomosaico se renderizó usando el DSM como referencia.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El conjunto de datos ShetlandsUAVmetry está disponible públicamente en el repositorio figshare (Román et al. 2024). Los datos están organizados por ubicaciones de estudio, con dos carpetas principales llamadas "Isla Decepción" e "Isla Livingston". Estas carpetas se dividen en varios archivos ZIP para facilitar su descarga desde el repositorio.

Dentro de las carpetas principales, se encuentran subcarpetas nombradas según los sitios de vuelo, que contienen tanto los datos RAW originales como los productos fotogramétricos (incluyendo DSM, nubes de puntos, mallas 3D y ortomosaicos RGB) resultantes de cada vuelo de UAV en las fechas correspondientes. Cada DSM y ortomosaico RGB se almacena en formato geotiff (.tif). La malla 3D se almacena en formato FBX (.fbx) y cada nube de puntos en formato LAS (.las). Cada archivo de producto final se nombra con el siguiente formato: YYYYMMDD_I_LOC_SEN_PRO_FN; donde YYYYMMDD indica la fecha del vuelo, I indica la isla (D para Isla Decepción y L para Isla Livingston), LOC denota la ubicación específica, SEN el sensor o plataforma de UAV, PRO el producto fotogramétrico (OR para el ortomosaico, DSM para el Modelo Digital de Superficie, PC para la nube de puntos, 3D para la malla 3D y RP para el informe de precisión), y FN el número de vuelo si hay más de uno en cada ubicación. La carpeta de datos RAW se nombra como RAW data – SEN, donde SEN corresponde al sensor utilizado.

Acompañando a cada producto fotogramétrico procesado por UAV, se incluye un informe de precisión detallado generado automáticamente al procesar los datos con el software Pix4D Mapper. El informe incluye un resumen de las características del producto final, una vista previa de los resultados fotogramétricos, detalles de calibración, una evaluación de precisión, y una descripción detallada del procesamiento inicial, densificación de la nube de puntos y detalles del DSM, ortomosaico e índices. Una descripción completa de la evaluación de precisión se proporciona en la sección de "Validación Técnica". Para la Isla Decepción, una vista general de todas las áreas cubiertas se representa en la Fig. 2, mientras que para la Isla Livingston se muestra en la Fig. 3.

Cuando se trabaja con un módulo RTK conectado a la antena GNSS Reach RS2 + RTK, se proporcionan correcciones en tiempo real para mejorar la precisión del posicionamiento GPS/GNSS durante el vuelo de UAV. Sin embargo, desplegar puntos de control

terrestres es la única manera verdaderamente fiable de evaluar la precisión de los levantamientos de UAV. Aun así, estas correcciones en tiempo real permiten obtener datos de ubicación más precisos en comparación con los sistemas GPS convencionales, reduciendo significativamente el error de posicionamiento al utilizar el sistema RTK y mejorando así la precisión de los resultados fotogramétricos.

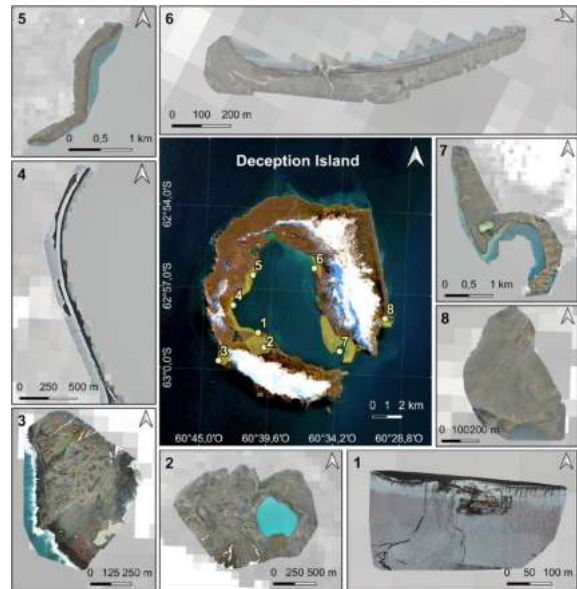


Fig. 2. Resumen de los ortomosaicos ópticos RGB generados después del proceso fotogramétrico para cada localización de estudio en la Isla Decepción (panel central, escena Sentinel 2 A de la Isla Decepción el 17 de marzo de 2023). Marcadas en amarillo, las áreas cubiertas por los vuelos realizados con UAV. Los números indican las ubicaciones: (1) BAE Gabriel de Castilla, (2) Cráter Lake, (3) Collado Vapor, (4) Bahía Fumarola, (5) Murature, (6) Caleta Péndulo, (7) Bahía Balleneros y (8) Morro Baily.

La calidad de los productos fotogramétricos se evalúa mediante la superposición, la reproyección y la precisión de geolocalización, basándose en un informe de precisión generado automáticamente después del procesamiento fotogramétrico. Por un lado, las incertidumbres absolutas de posición y orientación de la cámara proporcionan una estimación del error asociado a los parámetros de posición y orientación utilizados para la reconstrucción 3D y la georreferenciación de las regiones mapeadas. Por otro lado, las incertidumbres relativas de posición y orientación de la cámara reflejan la posición y orientación relativa de cada cámara en relación con las otras cámaras en el sistema, siendo crucial para la triangulación estereoscópica y la generación de modelos 3D precisos. Valores de incertidumbre más bajos indican una mayor precisión en la estimación de las posiciones y orientaciones relativas de las cámaras, lo cual puede llevar a una reconstrucción 3D más precisa.

En cuanto a la calidad de la superposición, el informe proporciona un gráfico indicativo que muestra el número de imágenes calculadas por píxel en los

productos fotogramétricos finales. Los resultados se consideran precisos fotogramétricamente cuando hay al menos 5 imágenes cubriendo cada píxel, ya que mayores niveles de superposición pueden mejorar la precisión del producto final, especialmente al trabajar con resoluciones de imagen más finas. Sin embargo, incluso en áreas correctamente superpuestas, pueden surgir dificultades en la salida del modelo al monitorear superficies homogéneas o en condiciones de vuelo adversas, como de iluminación deficiente o visibilidad reducida.

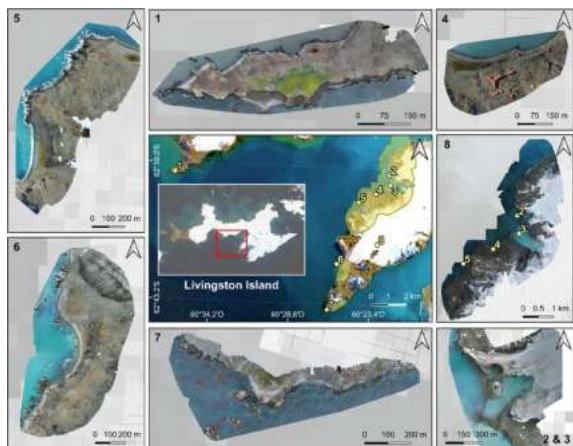


Fig. 3. Resumen de los ortomosaicos ópticos RGB generados después del proceso fotogramétrico para cada localización de estudio en la Isla Livingston (panel central, escena Sentinel 2 A de la Isla Livingston el 17 de marzo de 2023). Marcadas en amarillo, las áreas cubiertas por los vuelos realizados con UAV. Los números indican las ubicaciones: (1) Punta Hannah, (2) Charrúa, (3) Glaciar Johnsons, (4) BAE Juan Carlos I, (5) Caleta Argentina, (6) Sally rock, (7) Miers Bluff y (8) Península Hurd.

Además, se incluye una sección que proporciona una visión detallada del proceso de ajuste y los resultados obtenidos para cada vuelo específico, permitiendo también evaluar la calidad de los resultados. Se tienen en cuenta múltiples factores, como son el número de capturas, la superposición entre ellas, y los puntos de calibración, que ayudan a minimizar las diferencias entre las posiciones y orientaciones del sensor y los puntos 3D observados en las imágenes. Como estadísticas de precisión en este proceso, el informe proporciona el error medio de reproyección, que refleja las diferencias entre las coordenadas estimadas y observadas en diferentes puntos de captura del UAV. Finalmente, la precisión de la geolocalización de los resultados fotogramétricos se determina mediante el análisis de la varianza de la geolocalización absoluta y relativa. La varianza de la geolocalización absoluta indica la incertidumbre asociada con la geolocalización absoluta de los resultados en relación con un sistema de coordenadas de referencia global, mientras que la varianza de la geolocalización relativa se refiere a la precisión en la estimación de las relaciones espaciales entre los puntos mapeados. En ambos casos, valores más bajos indican una mayor precisión en la asignación de coordenadas geográficas a los resultados fotogramétricos.

4. CONCLUSIONES

Este trabajo constituye el primer set de datos en abierto de múltiples localizaciones de interés en las islas Decepción y Livingston. Los productos fotogramétricos obtenidos son de una excepcional calidad, constituyendo una valiosa fuente de información para investigaciones nacionales e internacionales dada la dificultad de acceder a estas regiones tan remotas del planeta y el contexto actual de cambio climático.

Agradecimientos

Esta investigación fue financiada por los proyectos del Gobierno de España RTI2018-098048B-100 (PiMetAn) y PID2021-1257830B-100 (DICHOSO). Los sensores y UAV fueron financiados por el Proyecto de Infraestructura del Gobierno de España en la Universidad de Cádiz EQC2018-004446-P, CSIC EQC2018-004275-P y EQC2019-005721, y el proyecto del gobierno regional de la Junta de Andalucía ID 5788. A. Román cuenta con el apoyo de la beca FPU19/04557, financiada por el Ministerio de Universidades del Gobierno de España. Los autores agradecen sinceramente al equipo del buque oceanográfico BIO (Buque de Investigación Oceanográfica) *Hespérides*, al personal militar de la Base Antártica Española Gabriel de Castilla y a la Unidad de Tecnología Marina (UTM-CSIC) por su apoyo logístico, sin el cual no habría sido posible la XXXV campaña antártica española y este trabajo.

REFERENCIAS

- Meredith et al. (2019). *Polar regions*. (IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate). <https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/chapter-3-2/>
- Wilkins, H. (1929). The Wilkins-Hearst Antarctic Expedition, 1928-1929. *Geographical Review* 19, 353–376.
- Pina, P. & Vieira, G. (2022). UAVs for Science in Antarctica. *Remote Sensing*, 14, 1610.
- Tovar-Sánchez et al. (2021). Applications of unmanned aerial vehicles in Antarctic environmental research. *Scientific Reports*, 11, 21717.
- Román et al. (2024). ShetlandsUAVmetry: Unmanned Aerial Vehicle-based photogrammetric dataset for Antarctic environmental research, *figshare*. Disponible online: <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.c.6686432.v1>
- Smith et al., (2003). Ecosystem Studies at Deception Island, Antarctica: An Overview. *Deep-Sea Research II*, 50, 1595–1609.
- Hobbs, G.I. (1968). The Geology of the South Shetland Islands. IV. The Geology of Livingston Island. BAS. *Scientific Reports*, 47, 1–50.
- Hodgson, J.C. & Koh, L.P. (2016). Best practice for minimising unmanned aerial vehicle disturbance to wildlife in biological field research. *Current Biology*, 26, R404–R405.

Automation of Cartographic Production, realizing the power of GIS

Authors: R. Ponce (1), P. Sheatsley (2)

- (1) Esri, Inc., Redlands, California, USA. rponce@esri.com
- (2) Esri, Inc., Redlands, California, USA.

Summary: The technological capabilities of a geographic information system allow for the automation of nautical chart and special purpose chart production, where the human intervention is minimal or not at all. This system is called “Custom Chart Builder” and allows saving time in producing a chart from 150 hours average to 10 to 15 minutes or less. Producing from 12 to 24 charts per day compared to 1.33 charts per month by cartographers in the traditional manual way. These huge savings in time and money are not exaggerations, but the result of applying powerful algorithms and the best technology to produce paper nautical charts, a secondary product to the Electronic Navigational Chart (ENC). Hydrographic services can use this technology to attend the needs for paper and custom charts and to free up their personnel involved in these tasks to take the important responsibilities of producing the new IHO S-100 derived product specifications.

Key words: automation, custom chart, nautical chart, savings.

1. INTRODUCTION

In general, most hydrographic offices have been seeing the decreasing demand of paper chart products and an increase in the demand of electronic navigational charts in the IHO S-57 standard (ENC). The paper chart has been for centuries the main source used by ships for navigating safely, but from the late years of the last century and during this one, the ENC has been replacing the paper chart and becoming the main chart product on board and mandated by the International Maritime Organization (IMO) and the International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS), requiring that almost all commercial vessels navigating on international waters use ENCs as their primary source.

At the beginning of the ENC era, these products were derived from the existing paper chart catalogue, that often were compiled from old surveys. As the ENC production took precedence over the paper charts, the workflow was inverted, now the paper chart can be derived from the ENC.

If we add to that, the fact that there is a growing need for more detailed nautical charts with faster updates, more precise information and better positional accuracy from Global Positioning System (GPS) displayed on Electronic Chart Display and Information System (ECDIS), we can understand why the traditional method for producing paper charts is not efficient anymore. We can see the trends when comparing the products usage in a graph from National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) in the United States, that from 2010 to 2020 the decrease in the paper chart use went from more than 200 000 sales to less than 100 000 sales per year, more than half reduction in their demand.

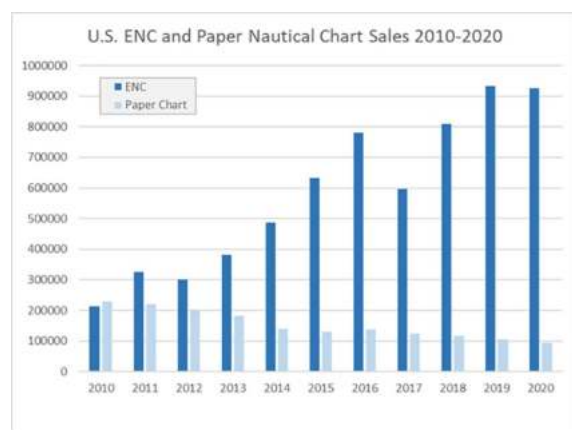


Table i. Graph from NOAA Office of Coast Survey website: <https://tinyurl.com/ENCvsPaper>

For these and other national policies reasons, in 2019 NOAA made the decision to sunset their traditional paper and raster chart production system by 2025. Similarly, the UK Hydrographic Office decided to phase out their traditional production system by 2030 and it's expected that several other national hydrographic offices will follow in the near future.

But when they decided to “sunset” or “phased out” their traditional systems, what alternative do they have to replace them? As NOAA has done and several other national hydrographic offices are in the process of doing with, here we are presenting an alternative to produce paper nautical charts directly from existing ENCs and is fully automated.

2. AUTOMATED SYSTEM DESCRIPTION

When replacing a human labor-intensive system by a fully automated one, it is expected that the output will not be exactly the same. Even the same nautical chart made by two different cartographers will have differences. How different an automated chart can be from a manual chart and still be considered

appropriate for navigation? This is a key question that the producer agency needs to answer when implementing a fully automated production system. Saving time and money comes with some tradeoffs, and the organization needs to accept, the output will not be as “perfect” to the cartographer’s eye as to his/her product, but it will be perfectly fine for the mariner to navigate with confidence.

The Esri’s ArcGIS Maritime server extension (MCS) installs on ArcGIS Server, allowing the deployment of a web-based app to generate information products in real time using the S-57 ENC cells directly and to create products at any scale with a capability called “Custom Chart Builder” (CCB). This capability has two methods for product creation: a custom product and a fixed product.

Custom Chart Builder is a combination of Geo-Processing tools, Python scripts and pre-defined templates that once set up, the user only needs to select the area of interest, the desired product and the paper size and orientation to then just click “print”.



Figure 1. CCB main components.

There are three main components of the CCB, the first one is the S-57 datasets that act as the source, they can be ENCs, or Inland ENCs or Additional Military Layers (AML) or any S-57 dataset. The second component is the generation of an Open Geospatial Consortium (OGC) Web Map Service (WMS) or

to create the charts. This web app allows the user to control the displaying properties, that can be configured according to the International Hydrographic Organization (IHO) S-52 Standard colors and symbols to expose as many or as few controls needed to change the display properties (daylight view, dusk, or night view, SCAMIN, etc.).

Behind the scenes, there is significant configuration. The system takes pre-configured map templates created in ArcGIS Pro, one template per size sheet of paper, portrait or landscape. The user can have as many or as few templates they need.

Python and Java scripts are leveraged in the system, that are used to create and update the charts. These scripts control for example when the user selects the size and orientation, the scripts know what template to grab to build the chart or to make the conversion between different units to use or to give a title to the chart that is automatically updated in the template used.

The system also uses Geoprocessing services to calculate the extent of the sheet of paper based on the latitude and longitude of the area of interest (AOI). And finally, there are some Geodatabases behind the scenes too, one is for “explanatory notes” that usually come with a chart, so when a user creates a chart, the system goes and retrieves what notes belong to that specific geographic area and scale. If the organization decides to have fixed extents for their AOIs, they are also stored in the Geodatabase.

CCB can be configured to allow users to go anywhere in the area covered by S-57 data and select any AOI at any scale and any paper size and orientation or, to restrict the chart creation to fixed extents and fixed

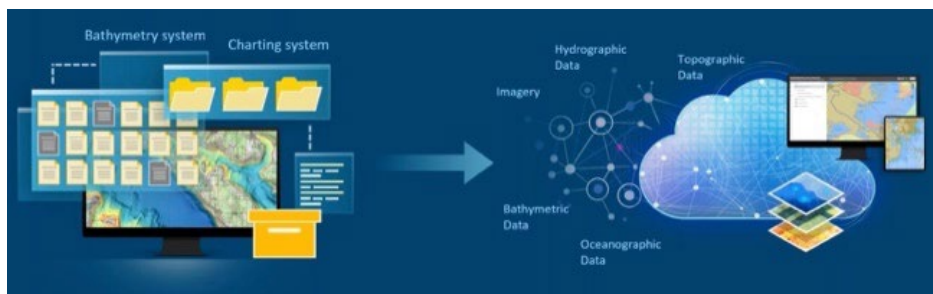


Figure 2. CCB mashups and sharing.

Representational State Transfer (REST) service directly from the source; it’s important to mention that this system doesn’t need to create a Geodatabase (ArcGIS format) to create these services, they are created directly from the S-57 datasets. This also makes it easy to update the service as update files (New Edition, EN and Revision, ER) can just be added to the service and the system updates itself, which then updates the automated paper chart production system; and the third component is a JavaScript web application to interact with the system

scales as for example, from an established paper chart catalogue.

Another important key configuration is the capability to add data, with the possibility to make mash ups and create custom or special purpose charts, combining the rich content of the ENC with other ocean and/or land data layers.

It takes advantage of the Server technology to bring into it other resources. The system can take data from a bathymetric system together with ENCs from a production system, plug them into ArcGIS and then

share authoritative content either to the organization or outside the organization according to their data sharing policies. It is essentially, together with the Maritime Chart Server capabilities, the backbone of the organization’s Marine Spatial Data Infrastructure (MSDI).

CCB doesn’t need to connect to any other production system or disrupt production since it only takes the produced ENC’s as the source to create paper charts automatically, reducing production time from months to minutes.

	Traditional	Maritime server
New Chart	150 hours	1-2 min
Per analyst	1.33 charts/month	12-24 charts/day
Overall capacity	100/year	Hundreds/day

Table ii. Average production time from Esri customers: Traditional vs. CCB.

That’s why the CCB system has a low impact with a high value for the organization. The output is a georeferenced PDF that can be printed and used in GIS software, like ArcGIS.

3. LUA PROGRAMMING LANGUAGE

This scripting language was created in 1993 in Brazil, “LUA” means “moon” in Portuguese. It combines a procedural syntax with powerful data description constructs based on associative arrays and extensible semantics, fundamental in the display representations used with CCB.

Lua can be embedded and used with other languages such as C, C++, Java, C#, Smalltalk, Fortran, and others. It provides something called “meta-mechanisms for implementing features instead of hosting features directly, keeping the language small while allowing the semantics to be extended in unconventional ways.

Lua objects are used in the ArcGIS Maritime server extension for the customization of S-57 feature symbology. Without Lua, the display would go to S-52 presentation library by default, but when using Lua scripts for custom symbology, they change to INT1.

Scripts are created to build text strings that were previously hidden in ENC pick reports, such as dredge area depths. S-52 symbols line weight is thick and is not designed for printing hard copy or digital products, so Lua provides the ability to override S-52 symbol presentation with Scalable Vector Graphics (SVG). By overriding the S-52 symbols with SVG, clear and consistent printed products are created quickly and seamlessly from ENC data. Minute details are made to match traditional charts, including color schemes, sloping text for depths and water features, and maritime limits can clearly display regulations or prohibited activities.

Lua in ArcGIS Maritime server extension also provides the capability to recreate the S-52 Conditional Symbology Procedures (CSP), a procedure to link attributes to a symbol and system configuration. For example, depth area ranges change color depending on the relationship to the safety contour chosen within the display settings pane.

Lua can also be used to simply replace the S-52 symbol for an SVG, which contains thinner line weights and increases print quality.



Figure 3. S-52 Buoy with red light flare (left) compared to an SVG of the same symbol in CCB (right). Lua script is used to replace the symbol for the object.

4. RESULTS

Maritime Chart Service CCB brings all scripts and configuration together to automatically generate nautical charts, using custom product or fixed product method.

The fixed product method allows for the creation of consistent and reproducible nautical charts. Producing agencies create area of interest (AOIs) geometries assigned to a page template and scale, which allows for quality control. Additionally, display setting options can be hard coded to turn on or turn off specific layers or symbols.

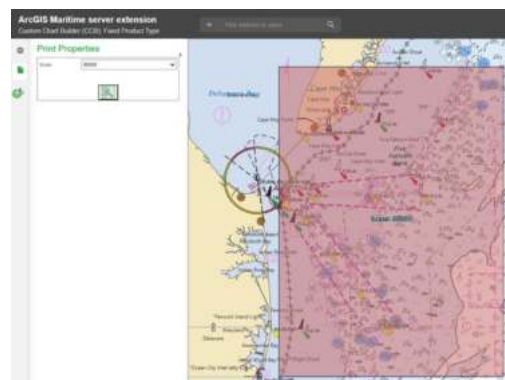


Figure 4. Selection of fixed product. Menu items are limited to a drop-down menu that lists various scales.

The fixed product export is georeferenced PDF that contains the chart, zone of confidence diagram, and explanatory notes.

The custom product method allows for the creation of a chart at any location and scale for a unique single-use output. Content panes within the web app allow the user to add layers to the chart to create information products and display settings can be modified to turn off text groups or specific ENC chart

design. Any data from ArcGIS Online or Portal or OGC service can be added to the chart.



Figure 5. Fixed product exported PDF

With this method, hydrographic offices can produce special purpose products, such as oceanographic charts and “one offs” sometimes required for special applications in a quick and easy way.



Figure 6. Custom product exported PDF with MCS, raster bathymetry, vector tile topography and hand-placed compass rose.

5. CONCLUSIONS

ArcGIS Maritime server extension can add value to ENC data by expanding its use beyond navigation. S-57 data is added directly to MCS without importing the data to a geodatabase and content can be shared inside or outside the organization as part of an MSDI.

CCB is an alternative to produce paper nautical charts directly from existing ENCs and is fully automated. It can be configured to meet an organization’s needs with the geoprocessing tools provided, templates, scripts, and web app. Products can be created rapidly, using fixed or custom methods, without distracting production personnel. Additionally, CCB can mashup and overlay data for special purpose charts, combining the rich content of the ENC with other ocean and/or land data layers.

CCB is proven in the real world, the NOAA Office of Coast Survey has implemented it and is gradually deprecating the traditional production system and the corresponding products, they developed a new paper chart catalogue to better align with their ENCs and reduced the number of scales used to make them consistent and standardize.

CCB with its automation, when compared to traditional paper chart production, allows for the creation of updated products in 1-2 minutes per chart. An entire chart catalogue can be derived automatically from the latest ENCs, this also allows for the possibility to create a new methodology to replace traditional labor intensive Notice to Mariners, with a system that displays geo-enabled symbolic corrections showing the mariner exactly how these corrections should be charted rather than having to interpret text and coordinates, giving the mariner the latest and safest charted information as soon as it is available.

CCB is a high-speed, low-cost system that provides consistency and safety, reducing significantly the time and effort in producing paper nautical charts and custom charts, allowing the organization’s staff to reorient their efforts towards the new challenges and demands arising from the need to support the new IHO S-100 series of standards and modern MSDIs. In other words, to become real hydrospatial agencies.

REFERENCES

Reference articles and websites:

Colby H., Van Den Ameele E. J. (2022). The End of Traditional Paper Charts: The Final Transition to Electronic Navigational Charts. *The International Hydrographic Review*, 27, pp. 151-158. <https://tinyurl.com/EndOfPaperCharts>

National Oceanic and Atmospheric Administration [Farewell to Traditional Nautical Charts]. (n.d.). *U.S. Office of Coast Survey: Future of NOAA charts*. nauticalcharts.noaa.gov. Retrieved June 15, 2024, from <https://tinyurl.com/FarewellTraditionalCharts>

Sunsetting of Raster Nautical charts. (2019, November 15). Federal Register. <https://tinyurl.com/SunsettingRasterCharts>

Esri Reference materials:

Deploy Custom Chart Builder (CCB)—ArcGIS Maritime server | Documentation for ArcGIS Enterprise. (n.d.). <https://tinyurl.com/CustomChartBuilder>

Greene, C. & Esri [esri.com]. (2023). *Automating paper chart Production webinar*. Esri Videos: GIS, Events, ArcGIS Products & Industries. https://mediaspace.esri.com/media/t/1_557vx22n

A person wearing a headset is seated at a desk in a dark room, working at a computer workstation. The desk features two monitors displaying data, a keyboard, and a mouse. In the background, a large screen shows a world map, and another screen displays a complex network diagram. The overall atmosphere is professional and focused.

SEGURIDAD Y AVANCE TECNOLOGÍA

Seguridad marítima y cambio climático

R. García-Llave (1) F.H. Echeverry Andrade (2) E. Rodríguez-Díaz (3)

- (1) Universidad de Cádiz (Cádiz, España). ruth.garcia@uca.es
- (2) Universidad de Cádiz (Cádiz; España)
- (3) Universidad de Cádiz (Cádiz; España)

Resumen: Actualmente la degradación medioambiental, entendida como la pérdida de biodiversidad y contaminación atribuida al cambio climático, ha incrementado la vulnerabilidad y la exposición al riesgo de perturbar la paz y la seguridad en las zonas costeras y espacios marítimos. Los fenómenos meteorológicos extremos, el aumento del nivel del mar y la pérdida de recursos marinos son factores que actúan como catalizadores de la inestabilidad e inseguridad en el ámbito marítimo mundial ya que fomentan la delincuencia transnacional, la piratería, los conflictos por las fronteras marítimas y la fragilidad geopolítica como consecuencia del acceso a los recursos naturales de los fondos oceánicos.

El presente trabajo aborda la consideración del cambio climático como amenaza no tradicional para la seguridad marítima, las principales líneas de actuación previstas por la Unión Europea para contrarrestarlo y los mecanismos e iniciativas tendentes a fomentar la paz, la seguridad y la libertad de navegación.

Palabras clave: cambio climático, seguridad marítima, seguridad climática

1. INTRODUCCIÓN: CAMBIO CLIMÁTICO Y SEGURIDAD INTERNACIONAL

Las amenazas que han afectado tradicionalmente a la seguridad internacional han visto cómo sus efectos se han multiplicado por efecto del cambio climático en las últimas décadas. Hoy en día es una evidencia que los cambios medioambientales inciden directamente en la paz y en la seguridad al agravar los riesgos sociales, económicos y medioambientales (UE, 11283/23).

Entendiendo el cambio climático como la degradación del medio ambiente, y en particular, como la pérdida de biodiversidad y la contaminación, sus afectos están estrechamente interrelacionados con los siguientes fenómenos (UE, 2021/2102(INI)):

- Inseguridad alimentaria por escasez de recursos. Los fenómenos meteorológicos extremos, las inundaciones y las olas de calor inciden en el rendimiento habitual de los cultivos causando pérdidas en las cosechas, disminución del suelo cultivable, escasez generalizada de agua y sequías prolongadas. A ello cabría añadirle, los cambios en la composición y la distribución de las poblaciones de peces que conduce a su inevitable agotamiento (BIOSEC, 2021). Se calcula que para el 2050, más de mil millones de personas tendrán un acceso insuficiente al agua y la degradación del suelo podría aumentar hasta el 90 %, mientras que la demanda de alimentos podría incrementarse un 60 % (SIPRI, 2022). Ello provocará o agravará la inseguridad alimentaria en los países menos desarrollados y un incremento insostenible del precio de los

alimentos a nivel mundial, sintiéndose aún más sus efectos en aquellas zonas con mayor presión demográfica.

- Inseguridad humana a causa de desplazamientos y migraciones (RSOCC, 2019; AR6, 2022): se estima que las zonas costeras albergan una quinta parte de la población mundial, el aumento del nivel del mar provocará un retroceso de la costa, inmersión de grandes zonas, e incluso, la desaparición de estados insulares, lo que dará lugar a pérdida de territorio provocando el desplazamiento de millones de personas dentro de su propio país, así como migraciones entre Estados, con el consecuente aumento demográfico en ciudades y zonas urbana. Esto se traducirá en una mayor demanda de vivienda, energía y empleo. El Instituto para la Economía y la Paz (IEP) calcula que, para 2050, 1.200 millones de personas podrían verse desplazadas en todo el mundo debido al cambio climático y a las catástrofes naturales (ETR, 2022). Otra consecuencia del aumento del nivel del mar, y no de menos importancia, es la modificación de las fronteras marítimas y de los derechos económicos de los Estados ribereños que ellos conlleva.
- Inseguridad energética: El aumento de la temperatura y el consecuente deshielo de las regiones árticas ha abierto la posibilidad de futuras rutas marítimas y la oportunidad de acceder a las reservas mundiales de hidrocarburo que se encuentran en la zona. Ello puede provocar a medio y largo plazo una intensificación de las competencias por parte de

las superpotencias por el acceso a los recursos y su control (UE, JOIN (2021) 27 final). Así mismo, las catástrofes naturales o los fenómenos meteorológicos adversos pueden afectar a infraestructuras vitales como las instalaciones portuarias y las refinerías de petróleo afectando al suministro mundial.

Estos fenómenos de inseguridad internacional inducidos por el cambio climático tienen como consecuencia final la inseguridad geopolítica ya que una combinación de los mismos puede agravar las vulnerabilidades, las tensiones o riesgos preexistentes, sin que sean necesariamente un elemento desencadenante en sí mismos o la causa directa de conflictos, pero puede actuar alterando el equilibrio entre las principales potencias.

Esta inestabilidad geopolítica puede ser instrumentalizada a su vez por grupos criminales y manifestarse en un aumento de la delincuencia marítima y en las tensiones con respecto a los recursos energéticos marinos (Germond et al., 2018). Según Pomeroy, la delincuencia marítima inducida por el cambio climático puede degradar aún más el medio ambiente y la seguridad humana generando otras formas de delincuencia y violencia (Pomeroy et al., 2016).

En consonancia, la Unión Europea (UE) ha prestado especial atención a la interrelación entre el cambio climático y la seguridad en su política de defensa y seguridad enfocando las estrategias sectoriales en contrarrestar sus efectos.

Concretamente, y en relación con los espacios marítimos, considerándolos como entorno estratégico clave para la seguridad, la UE reconoce en la Brújula Estratégica para la Seguridad y Defensa (UE, 7371/22) la importancia de la seguridad marítima en el mar Báltico, el mar Negro, el mar Mediterráneo, el mar de norte, así como en las aguas del Ártico, del océano Atlántico y de las regiones ultraperiféricas, tanto para la seguridad de la UE, como para el desarrollo económico, el libre comercio, el transporte y la seguridad energética.

Con base a esta premisa, la Estrategia de Seguridad Marítima de la Unión Europea (UE, 7311/23) señala el cambio climático como una amenaza contra la seguridad marítima además de considerarlo como un factor multiplicador de otras actividades marítimas ilícitas como la piratería, el tráfico ilícito de migrantes y la trata de seres humanos, el tráfico de armas y estupefacientes, la pesca ilegal, no declarada y no reglamentada (INDNR) (Eurojust, 5983/21) o como la explotación no autorizada de zonas económicas exclusivas de los Estados miembros de la UE.

La escasa literatura científica que aborde la pasada y actual Estrategia de Seguridad Marítima de la Unión, no solo desde el punto de vista de los efectos que produce el cambio climático sobre ella, sino también desde cualquier otra perspectiva (Germond, 2011,

Frontini; 2014; Suárez de Vivero 2014; Germond 2016; Pejsova, 2022; Bueger et al., 2023; Jones et al., 2023; Junquera, 2023; Papa, 2023; Usecwicz et al., 2023; Susanna, 2024) hace necesario su estudio y análisis al objeto de identificar posibles lagunas existentes y posibles líneas de actuación a desempeñar por los actores implicados, así como futuras líneas de investigación para la Comunidad científico-académica.

Por ello, el presente trabajo centra su esfuerzo en analizar el cambio climático como amenaza no tradicional para la seguridad marítima y los pasos dados por la Unión Europea en su política marítima y de gobernanza de los océanos para contrarrestar sus efectos.

1. SEGURIDAD CLIMÁTICA MARÍTIMA

No existe una definición de seguridad marítima consensuada internacionalmente (Klein, 2011; Kraska et al., 2013) ya que la misma se puede conceptualizar desde múltiples perspectivas. Por ejemplo, Bueger establece tres marcos desde los cuales se puede enfocar su significado: desde la relación que tiene la seguridad marítima con otros conceptos (ej.: economía azul); desde la “securitización”, es decir, como influye las diferentes amenazas en la seguridad marítima y, desde el estudio de las acciones que se llevan a cabo en nombre de la seguridad marítima (Bueger, 2014).

Si abordamos la definición en el ámbito del segundo marco podemos afirmar que la seguridad marítima es la ausencia de amenazas, tradicionales y no tradicionales, que prevalecen en el ámbito marítimo. Por amenazas tradicionales entendemos la piratería, el terrorismo marítimo, el tráfico ilícito de seres humanos y el tráfico de armas y estupefacientes. Las amenazas no tradicionales son un concepto acuñado en la última década y hace referencia a los desafíos relacionados con el cambio climático, la degradación medioambiental y la explotación de los recursos oceánicos (Corder, 2010; Aswany, 2020).

Si tomamos como perspectiva definitoria el tercer marco (), entendemos por seguridad marítima las prácticas convencionales que se llevan a cabo en la esfera de la protección marítima, es decir, la vigilancia marítima, las operaciones conjuntas (Ej.: Atalanta, Sophia), el intercambio de información, el desarrollo de capacidades o la diplomacia (Germond, 2015).

En suma, podemos definir la seguridad marítima como el conjunto de actividades tendentes a garantizar un dominio marítimo seguro y protegido.

Respecto a lo que entendemos por seguridad climática, Naciones Unidas la ha definido como el conjunto de iniciativas dirigidas a abordar los riesgos de seguridad relacionados con el clima y a contribuir a sostener la paz (OACP, 2022).

Si tomamos ambas definiciones podría acuñarse el concepto de seguridad climática marítima que abarcaría el conjunto de acciones encaminadas a garantizar un espacio marítimo seguro y protegido frente a las amenazas y riesgos derivados del cambio climático.

2. EL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA ESTRATEGIA DE SEGURIDAD MARÍTIMA DE LA UNIÓN EUROPEA

Al objeto de proteger los intereses de la UE frente a las amenazas inducidas por el cambio climático en la seguridad marítima, en la Estrategia de Seguridad Marítima de la UE se han adoptado una serie de medidas para contrarrestar directa e indirectamente sus efectos en el marco de los objetivos estratégicos generales: presencia marítima coordinada; operaciones de vigilancias marítimas; gobernanza marítima; cooperación internacional; optimización de recursos y capacidades y, formación y sensibilización en materia de clima y medio ambiente.

2.1 Presencia marítima coordinada (PMC)

La presencia marítima coordinada es un nuevo proyecto de la UE que refleja el creciente papel de la Unión como garante de la seguridad marítima en el mundo. Esta iniciativa se constituye como un instrumento más de la Política Común de Seguridad y Defensa (PCSD) y diferente a la de las operaciones y misiones tradicionales de la Unión Europea. Su puesta en marcha permite optimizar el empleo de los medios navales desplegados bajo la cadena de mando nacional, garantizando una presencia continua de la Unión en las Áreas Marítimas de Interés (AMI) y promoviendo la cooperación internacional y la asociación en la mar (UE, 5387/21).

En la Estrategia de Seguridad Marítima se ha adoptado un enfoque global y proactivo en este ámbito, por lo que se pretende intensificar la presencia de activos navales en zonas de interés estratégico con el fin de reforzar la lucha contra las actividades ilícitas, así como considerar nuevas zonas marítimas de interés sobre la base de las propuestas del Servicio Europeo de Acción Exterior.

2.2 Operaciones de vigilancia marítima

En este marco, en la Estrategia de Seguridad Marítima se prevé incrementar la cooperación en el marco de las funciones de guardacostas y promover el desarrollo de nuevas operaciones marítimas de vigilancia en las múltiples cuencas de la UE, incluido el mar Negro. En este caso, las acciones serían llevadas a cabo por la Agencia Europea de Control de Pesca (AECO) y la Agencia Europea de la Guardia de Fronteras y Costas (FRONTEX).

2.3 Gobernanza marítima

La UE asumirá el liderazgo en conocimiento del dominio marítimo y garantizará el intercambio seguro

de información clasificada y no clasificada entre los distintos sectores marítimos de los Estados miembros. Ejemplo de ello es el Sistema de Vigilancia Marítima Integrada de la UE (COM (2007) 575 final). Este sistema tiene como objetivo ofrecer un entorno que permita a las comunidades sectoriales de los Estados miembros, el conocimiento de la situación de las actividades realizadas en el mar con repercusión en la seguridad y protección marítima mediante la provisión de datos útiles de carácter intersectoriales y transfronterizos, proporcionando con ello, una mejora en la toma de decisiones, mayor eficacia, calidad y capacidad de respuesta ante el aumento de actividades ilícitas en los espacios marítimos (García Llave et al., 2018).

Para ello la UE ha puesto en marcha el Entorno Común de Información (ECII) (UE, 9946/2021) y la Red de Intercambio de Información sobre Vigilancia Marítima de Defensa (MARSUR) que se encuentra respaldada por la Agencia Europea de Defensa (AED) y diseñada para que los Estados miembros puedan intercambiar información y servicios operativos.

2.4 Cooperación internacional

Se promoverá la cooperación entre la UE y sus socios en materia de intercambio de información en el marco de justicia y asuntos internos y circunscritos al ámbito marítimo.

Asimismo, se intensificará la cooperación con la OTAN y otros Organismo internacionales, como la Organización Marítima Internacional (OMI) o la Unión Africana (UA) en otras zonas marítimas de importancia estratégica. Ejemplo de ello es el Proyecto “Mejora de la cooperación en materia de seguridad en Asia y con Asia” o su futura participación en la Asociación de los Países de Océano Indico.

En el marco de la cooperación, en la Estrategia de Seguridad Marítima, también se contempla por parte de la UE fomentar la firma y ratificación de los instrumentos internacionales relacionados con el ámbito marítimo, en concreto, con la Convención de Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar.

2.5 Optimización de recursos y capacidades

A fin de optimizar las inversiones realizadas por la UE en lo relativo a la política espacial, la Estrategia de Seguridad Marítima promueve el aprovechamiento de los recursos espaciales y sus capacidades (Copérnico, Galileo e IRIS) en materia de vigilancia marítima, medioambiental y cambio climático (Kristopaitis et al., 2023).

En el ámbito preventivo, se pretende reforzar las capacidades de análisis y los sistemas de alerta temprana en lo que respecta a los retos de seguridad específicos que plantean el cambio climático (aumento del nivel del mar, tormentas, etc.). Para mejorar el acceso a los datos y su posterior análisis, el Centro de Satélites de la UE (SACTEN) estudiará

la creación del Centro de Datos y Análisis sobre Seguridad Climática y Medioambiental donde se dispondrá de los recursos necesarios para las evaluaciones de riesgo de seguridad relacionados con el clima. Ejemplo de ello será la elaboración de planes de contingencia y de recuperación en caso de catástrofe medioambiental para las infraestructuras marítimas.

En cuanto a las capacidades navales, en la Brújula se insta a que la Unión tenga una presencia más asertiva en el mar y para asegurar su capacidad de proyección de la fuerza, serán necesarios buques de guerra de alto nivel, y en concreto, plataformas no tripuladas para el control subacuático y en superficie (UE, 7371/22).

Por último, la investigación y desarrollo (I+D) sobre aspectos civiles de la seguridad marítima se llevará a cabo a través del clúster “Seguridad civil para la sociedad” del Programa Horizonte Europa (2021-2027).

2.6 Formación y sensibilización en materia de clima y medio ambiente

Para finalizar, la UE promueve en la Estrategia de Seguridad Marítima la educación, capacitación y formación de todo el personal involucrado para hacer frente a los retos presentes y futuros en materia de seguridad marítima.

En atención al cambio climático y su incidencia en la seguridad internacional, se creará una plataforma de formación sobre seguridad y defensa climática de la UE en el marco de la Escuela Europea de Seguridad y Defensa (EESD) y cuyo objetivo será desarrollar los conocimientos necesarios para formar expertos en legislación, delincuencia medioambiental y analistas de riesgo para la seguridad relacionados con el clima (UE, 11283/23).

3. LA DIPLOMACIA CLIMÁTICA

Según Fajarado del Castillo, la diplomacia climática es un instrumento de la política exterior de la UE, a través del cual las instituciones de la Unión Europea promueven a nivel mundial el desarrollo, la implementación de mecanismos para luchar contra el cambio climático (Fajarado del Castillo, 2021).

La UE mediante la diplomacia insta a todos los países, y en particular a los grandes emisores y a los miembros del G20, a que redoblen sus esfuerzos para adoptar y aplicar políticas climáticas y energéticas ambiciosas y compatibles con el objetivo de neutralidad climática para el 2050 y con los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2030 (ODS). Así mismo, anima a aumentar la financiación para la adaptación y la resiliencia climática (UE, 6233/23).

Ejemplo de ello es la participación de la UE en el Mecanismo de Seguridad Climática de Naciones Unidas mediante el cual se lleva a cabo el intercambio de información, coordinación y cooperación en lo

relativo a riesgos climáticos para la paz y la seguridad.

La UE también trabaja fomentando el dialogo a nivel bilateral con otras Organizaciones internacionales sobre clima y medio ambiente como son la OTAN, la Unión Africana, la Asociación de Naciones del Asia Sudoriental, el Consejo Ártico o la Comunidad de Estados Latinoamericanos y Caribeños.

4. CONCLUSIONES

Naciones Unidas define seguridad climática como el conjunto de iniciativas dirigidas a abordar los riesgos de seguridad relacionados con el clima y a contribuir a sostener la paz. Los espacios marítimos representan un entorno en el cual los efectos adversos de la degradación del medio ambiente y la contaminación hacen patentes las vulnerabilidades de la sociedad a sus efectos. Tanto la inseguridad alimentaria, la humanitaria como la energética provocada por el cambio climático pueden desencadenar una inestabilidad geopolítica mundial que haría del mar su campo de batalla.

La UE ha reflejado esta preocupación tanto en sus Política Común de Seguridad y Defensa como en las Estrategias sectoriales y regionales, sin menoscabar, el importante papel que juega la diplomacia climática en los foros internacionales a la hora de promover la neutralidad y la resiliencia climática.

En el ámbito marítimo, la Estrategia de Seguridad Marítima 2023 aborda una serie de acciones que, teniendo como telón de fondo el cambio climático, tienden a garantizar los espacios marinos como entornos seguros y protegidos ante las amenazas tradicionales y no tradicionales, y derivadas del mismos.

Cabe señalar, que los objetivos marcados por la Unión Europea en este aspecto se alejan de poder definirse como ambiciosos, ya que de su análisis solo se percibe un reforzamiento de las actividades ya iniciadas anteriormente en Estrategias previas.

No obstante, sí conviene subrayar, que la lucha contra el cambio climático es una responsabilidad compartidas a todas las esferas, por lo que se debe seguir trabajando en ello desde todos los campos: político, social y académico.

Es por ello que desde el punto de vista académico y dado la exigua literatura que aborde el cambio climático y la seguridad marítima, la comunidad académica debería enfocar sus próximos estudios en seguir la evolución de los efectos que provocan la degradación del medio ambiente y la contaminación, así como la efectividad de las prácticas puestas en marcha por la Unión Europea, el grado de aplicación y si son efectivos de acuerdo a los objetivos marcados en la Estrategia de Seguridad Marítima 2023.

REFERENCIAS

- Aswani R. (2022). Non-Traditional maritime security threats in the Indian Ocean Region: Policy alternatives. *J Public Affairs*, 22, e2456.
- Bueger, C. (2015). What is maritime security? *Marine Policy*, 53,159-164.
- Bueger, C., Timothy E. (2023). The European Union's Quest to Become a Global Maritime-Security Provider, *Naval War College Review*. 76. 2, 67-86.
- Cordner. L. (2010). Maritime security in the Indian Ocean region: Compelling and convergent agendas, *Australian Journal of Maritime & Ocean Affairs*, 2.1, 16-27.
- EU (2007). *Una política marítima integrada para la Unión Europea*, COM (2007) 575 final.
- EU (2021-2027). *Programa Horizonte Europa*, <https://www.horizonteeuropa.es/seguridad-civil-para-la-sociedad>
- EU (2021). *Comunicación conjunta "Un compromiso más firme de la UE para un Ártico pacífico, sostenible y próspero"*, JOIN (2021) 27 final.
- EU (2021). *Council Conclusions launching the pilot case of the Coordinated Maritime Presences concept in the Gulf of Guinea*, 5387/21.
- EU (2022). *Una Brújula Estratégica para la Seguridad y la Defensa. Por una Unión Europea que proteja a sus ciudadanos, defienda sus valores e intereses y contribuya a la paz y la seguridad internacionales*, 7371/22.
- EU (2023). *A new outlook on the climate and security nexus: Addressing the impact of climate change and environmental degradation on peace, security and defence*, 11283/23.
- EU (2023). *Council conclusions on Climate and Energy Diplomacy*, 6233/23.
- EU (2102). *Informe sobre la Hoja de ruta del SEAE sobre cambio climático y defensa*, 2021/2102 (INI).
- Fajardo del Castillo, T. (2021). La Diplomacia del Clima de la Unión Europea. La Acción Exterior sobre Cambio Climático y el Pacto Verde Mundial. *Editorial Reus*, p. 8.
- Frontini, A. (2024). The European Union Maritime Security Strategy: sailing uncharted waters? *European Policy Center*, 26-27.
- García-Llave, R., Alcaide-Jiménez, J.I. (2018). La vigilancia marítima integrada como instrumento de garantía de la economía azul. En: *Estrategia Blue Growth y Derecho del Mar*. Bormazo S.L., Albacete, 503-530.
- Germond, B. (2011). The EU's security and the sea: defining a maritime security strategy. *European Security*, 20.4, 563-584.
- Germond, B. (2015). The geopolitical dimension of maritime security, *Marine Policy*, 54, 137-42.
- Germond, B., D. Mazaris, A. (2019). Climate change and maritime security, *Marine Policy*, 99, 262-266.
- Germond, B., Germond-Duret, C. (2016). Ocean governance and maritime security in a peaceful environment: The case of the European Union, *Marine Policy*, 66, 124-131.
- Germond, B., Ha, F.W. (2019). Climate change and maritime security narrative: the case of the international maritime organization, *J Environ Stud Sci*, 9, 1-12.
- GIECC (2019). *Informe Especial sobre el Océano y la Criosfera en un Clima Cambiante*.
- IEP (2022). *Ecological Threat Report (ETR)*, pp. 4-5.
- GIECC (2022). Informe AR6. Grupo de trabajo II del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.
- Jones, D., Labib, A., Willis, K., Costello, J.T., Ouelhadj, D., Ikonen, E.S., Mikel Domínguez Cainzos, M. (2023). Multi-criteria mapping and prioritization of Arctic and North Atlantic maritime safety and security needs. *European Journal of Operational Research*, 307. 2, 827-841.
- Junquera, A.R. (2023). Estrategia Europea de Seguridad Marítima: Seguimos navegando en régimen de "avante poca", *Revista de Marina*, 30, 9-25.
- Klein, N. (2011). Maritime security and the law of the sea. *Oxford & New York: Oxford University Press*.
- Kraska, J., Pedrozo, R. (2013). International maritime security law. *Leiden & Boston: Martinus Nijhoff*.
- Kristopaitis, E., Meneses De Abreu, R. (2023). The Strategic Research Agenda for Copernicus Security Service 2023.
- OACP (2022). *Terms of Reference: Thematic Review on Climate Security and Peacebuilding*, p. 4.
- Paleari, S. (2024). The EU policy on climate change, biodiversity and circular economy: Moving towards a Nexus approach. *Environmental Science & Policy*, 151, 103603.
- Papa, P. (2013). US and EU strategies for maritime transport security: A comparative perspective. *Transport Policy*, 28, 75-85.
- Pejsova, E. (2022). *EU as a maritime security provider*. *European Union Institute for Security Studies (EUISS)*.

- Pomeroy, R., Parks, J., Mrakovcich, K.L., LaMonica, C. (2016). Drivers and impacts of fisheries scarcity, competition, and conflict on maritime security, *Marine Policy*, 67, 94-104.
- SIPRI Yearbook (2022). Armaments, disarmament and international security. *Oxford University Press*, Oxford. Reino Unido.
- Suárez de Vivero, J.L., Rodríguez Mateos, J.C. (2014). Changing maritime scenarios. The geopolitical dimension of the EU Atlantic Strategy, *Marine Policy*, 48,59-72.
- Usewicz, T., Jarosław K., 2023. Hybrid Actions and Their Effect on EU Maritime Security. *Journal on Baltic Security*, 9.1, 32-68.

Estudio de las distintas alternativas aplicadas de planes de emergencia y evacuación en alertas por Tsunamis

F.J. Pérez ¹, M. Ramírez ¹ y M. Otero ¹, Escuela Superior de Ingeniería, Universidad de Cádiz.
Avda. de la Universidad, nº10, Puerto Real, 11519, Cádiz.
franciscojavier.perezrodriguez@uca.es

Resumen: El riesgo de Tsunami en nuestro país es una realidad. España está rodeada de mar en su mayor parte. Además de esto, son muchas las personas que habitan y realizan turismo en las zonas costeras, provocando una elevada exposición a este riesgo. Debido a esto, la reducción del daño de Tsunami es un factor clave para disminuir la letalidad de estos desastres en el caso de que ocurran. Dentro de Andalucía el Golfo de Cádiz tiene una peligrosidad muy alta por riesgo de maremoto. El presente estudio pretende estudiar las diferentes alternativas implantadas a nivel mundial en lugares en los que se haya producido este fenómeno, con el fin de poder valorar las posibles aplicaciones a nivel local.

Palabras clave: Tsunami 1, Maremoto 2, Terremoto 3, Emergencia 4, Evacuación 5.

1. INTRODUCCIÓN

La causa más frecuente de generación de Tsunamis son los terremotos, siendo estos los responsables de al menos el 80% de los Tsunamis. Los terremotos ocurren principalmente en las zonas cercanas a los bordes de placas litosféricas. Estos se producen en todas las cuencas oceánicas del mundo, pero no todos generan Tsunamis. Los parámetros que influyen más decisivamente en la generación de Tsunamis son el tamaño del terremoto (descrito por la magnitud, que está íntimamente relacionada con el tamaño de la falla que rompe y el desplazamiento en esta), su profundidad y el tipo de ruptura. También influye el espesor de la capa de agua, ya que cuanto mayor sea el volumen de agua que desplaza, mayor será el Tsunami.

Aunque los maremotos son fenómenos poco frecuentes, pueden ser extremadamente peligrosos y mortales. Según Naciones Unidas, en los últimos 100 años, 58 maremotos se han cobrado más de 260.000 vidas, un promedio de 4.600 pérdidas humanas por desastre, superando cualquier otro riesgo natural.

investigación pretende realizar una revisión del estado del arte, lo que implica una ponderación, un análisis crítico de la distinta documentación que existe al respecto, y una identificación de los factores críticos para después plantear las posibles mejoras en las actuaciones sobre los planes de emergencia y evacuación por alerta de este fenómeno.

Como referencia de consulta principal en este estudio se revisa el I Plan Estatal de Maremotos ante el riesgo de maremotos.

[1] D. G. del Instituto Geográfico Nacional y D. G. de Protección Civil y Emergencias. Edición comentada. ES, 2021. Plan Estatal de Protección Civil ante el riesgo de maremotos, doi: 10.7419/162.02.2022.

Este Plan cuenta entre sus órganos con una Comisión Técnica, en la que se integran todos aquellos organismos españoles de carácter técnico-científico que son relevantes en esta materia, reforzándose la incorporación de la Ciencia a las misiones de protección civil.

El objeto del presente estudio es definir cómo actuar ante la presencia repentina de un Tsunami, antes de que ocurra, durante el suceso y después del acontecimiento para poder así trasladar la información ante este tipo de emergencias y evacuación, a todos/as los/las ciudadanos/as a nivel local, ante una determinada situación de repetición cíclica de este tipo de fenómenos naturales, cada vez más agravado e influenciado por el cambio climático.

Ante la necesidad de cómo actuar ante los desastres provocados por Tsunamis, este Trabajo de



Fig. 1. Imagen recreada mediante inteligencia artificial de elaboración propia.

2. DESARROLLO

Según el catálogo de Tsunamis del mundo de NGDC/WDS Global Historical Tsunami Database, desde 1970 a nuestros días, 19 son los Tsunamis registrados, algunos de los cuales con repetición en la misma zona. Esta será la base de partida para poder analizar la documentación desarrollada por los distintos países que permitirá establecer la comparativa y eficacia de las mismas a nivel mundial que junto con las que actualmente existen en España, permitirá desarrollar un cuadro de posibles intervenciones de aplicación local en la ciudad de Cádiz.

Fecha	Causa	Localización de la fuente	Máx. altura de ola (m)	Víctimas
16/08/1976	Terremoto	Golfo Moro, Filipinas	9	6.800
19/08/1977	Terremoto	Islas de la Sonda, Indonesia	15	189
18/07/1979	Deslizamiento	Lembata, Indonesia	9	1.239
12/12/1979	Terremoto	Colombia	6	600
02/08/1992	Terremoto	Nicaragua	9	170
12/12/1992	Terremoto	Mar de Flores, Indonesia	26	1.169
12/07/1993	Terremoto	Mar del Japón, Japón	32	208
02/06/1994	Terremoto	Sur de Java, Indonesia	13	238
17/02/1996	Terremoto	Nueva Guinea Occidental, Indonesia	7	110
17/07/1998	Terremoto y deslizamiento	Papúa Nueva Guinea	15	1.636
17/08/1999	Terremoto	Izmit, Turquía	2	156
26/12/2004	Terremoto	Sumatra, Indonesia	50	227.899
17/07/2006	Terremoto	Sur de Java, Indonesia	20	802
29/09/2009	Terremoto	Samoa	22	192
27/02/2010	Terremoto	Chile	29	156
25/10/2010	Terremoto	Sumatra, Indonesia	16	431
11/03/2011	Terremoto	Isla de Honshu, Japón	39	18.431
28/09/2018	Terremoto y deslizamiento	Isla de Célebes, Indonesia	10	4.340
22/12/2018	Volcán y deslizamiento	Krakatoa, Indonesia	85	437

Tabla 1. Adaptada de Tsunamis con mayor número de víctimas desde 1970 según NGDC/WDS (2021)

En cuanto a la numeración o citación de los Tsunamis en las costas españolas, describimos aquellos Tsunamis históricos que, con probabilidad razonable,

han afectado las costas españolas (Tabla 2). Además de estos, diversos autores mantienen, en base a estudios geológicos, la existencia de otros Tsunamis importantes que con anterioridad han afectado a las costas españolas. En este sentido Lario et al. (2011) recopila varias investigaciones concluyendo que al menos 5 Tsunamis habrían afectado significativamente al suroeste de la península ibérica en los últimos 7.000 años con anterioridad al de 1755.

Fecha	Causa	Localización de la fuente	Máx. altura de ola (m)	Víctimas
22/09/1522	Terremoto	Almería		1000
09/10/1680	Terremoto	Málaga	5	70
01/11/1755	Terremoto	Suroeste península ibérica	13	1000
31/03/1761	Terremoto	Suroeste península ibérica		
09/10/1790	Terremoto	Norte de Argelia	1,8	
13/01/1804	Terremoto	Mar de Alborán		
21/08/1856	Terremoto	Norte de Argelia		
09/09/1954	Terremoto/Deslizamiento	Norte de Argelia	0,2	
28/02/1969	Terremoto	Suroeste península ibérica	0,5	
17/07/1969	Desconocida	¿Canarias?	0,2	
26/05/1975	Terremoto	Falla de Gloria	0,1	
10/10/1980	Terremoto	Norte de Argelia	0,35	
21/05/2003	Terremoto	Norte de Argelia	1	

Tabla 2. Adaptada de resumen de los Tsunamis históricos recogidos en el catálogo de Tsunamis en las costas españolas.

El 18 de mayo de 2021 el Consejo de Ministros aprobó el I Plan Estatal de Protección Civil ante el Riesgo de Maremotos, incorporándolo al Plan Estatal General de Emergencias de Protección Civil, como un anexo. Este plan establece un sistema de alerta ante maremotos cuya finalidad es avisar, en el caso de la inminencia de dicha amenaza, a las autoridades de protección civil y servicios públicos de emergencia, así como a los ciudadanos que se hallen en lugares cercanos.

El creciente incremento de la población en las zonas costeras, unido al aumento del turismo en las regiones propensas a los maremotos, ha incrementado la exposición a este riesgo, por lo que su reducción es un factor clave para disminuir sustancialmente la letalidad de los desastres en el mundo, objetivo primordial del Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030.

La metodología utilizada para este estudio se basa en la revisión bibliográfica, recopilando, agrupando y comparando documentación y artículos de investigación de los últimos años, así como las relaciones entre estos, para obtener unos resultados y llegar a unas conclusiones finales.

Para su desarrollo se tienen en cuenta también los mapas de evacuación e inundación realizados por el Instituto Hidráulico de Cantabria.

3. RESULTADOS

Teniendo esto en cuenta los resultados obtenidos en este estudio, en las costas de España, el efecto de un Tsunami que se origine cerca de estas será casi inmediato. En cambio, teniendo en cuenta los resultados consultados en el I Plan Estatal de Maremotos, un Tsunami regional, por ejemplo, generado al suroeste del cabo de San Vicente, llegará a la costa de Cádiz en unos 40 minutos, el mismo tiempo que tarda en llegar un Tsunami generado en Argelia a las islas Baleares. Por el contrario, los Tsunamis más lejanos, llamados teleTsunamis, tardarán más tiempo en afectar a nuestras costas. Si un Tsunami comienza en el sur de Italia, este tardará en llegar a las islas Baleares poco más de 2 horas, si se origina en las islas Azores, llegará a las islas Canarias y Galicia en aproximadamente 2 horas y media, y si proviene de las islas del Caribe, llegará en 6 horas a Canarias y en casi 8 horas a las costas de Huelva y Cádiz.

¿Qué podemos hacer ante el riesgo de maremotos?

La respuesta al riesgo de maremotos, como en la mayoría de los riesgos, no involucra sólo a las Administraciones Públicas, sino que todas las personas pueden -y deben- tener una participación activa para proveer de seguridad a sí mismos y a su entorno más inmediato. Es lo que se conoce como autoprotección, e incluye las siguientes medidas:

- Tener en cuenta a las personas más vulnerables (menores, mayores, personas con necesidades especiales).
- Tener preparado un equipo de emergencia (agua, alimentos, radio, linterna, baterías, medicamentos, documentos, etc.).

Los resultados obtenidos se realizan en función de las distintas fuentes de información analizadas, consultadas y reflexionadas:

Fuentes que citan la información	Estrategias/acciones antes del maremoto
D. G. del Instituto Geográfico Nacional y D. G. de Protección Civil y Emergencias. Edición comentada. ES, 2021. Plan Estatal de Protección Civil ante el riesgo de maremotos. [Online]. Available: https://doi.org/10.7419/162.02.2022	1) Informarse de si vivimos en una zona susceptible de ser afectada por maremoto. 2) Familiarizarse con las rutas de evacuación, las zonas de seguridad y los puntos de concentración establecidos por las autoridades municipales. 3) Actuar inmediatamente en caso de alerta. 4) Preparar un plan personal y familiar de evacuación.
Guía didáctica Tsunamis, recomendaciones básicas para estar preparados y prevenir riesgos, 112 emergencias de la Junta de Andalucía e Instituto Universitario de Investigación Andaluz de Geofísica y Prevención de Desastres Sísmicos de la Universidad de Granada, 2021.	Localiza lugares altos donde puedas refugiarte en caso de maremoto, por ejemplo, edificios resistentes de más de cuatro pisos. 1) Conoce la distribución de los lugares seguros y vías de escape de la casa o lugar de trabajo. 2) Aprende a cortar la electricidad, el agua y el gas (incluso en la oscuridad). 3) Ten preparado un botiquín, radio, pilas secas, cargadores de móvil y elementos necesarios para una evacuación.
Mesa técnica interinstitucional de recomendaciones para la preparación y respuestas ante tsunamis. Recomendaciones para la preparación y respuestas ante tsunamis. Santiago: ONEMI. 2014. p.31. Disponible en: www.onemi.cl	1) Infórmate e identifica si estás en Zona de Amenaza de Tsunami. 2) Familiarízate con las Vías de Evacuación, Zonas de Seguridad y Puntos de Encuentro. 3) Prepara un Plan de Evacuación con tu grupo familiar, de trabajo, de estudios y la comunidad. 4) Practica la evacuación. 5) Reconoce los signos de la naturaleza que preceden a un tsunami. 6) Ten presente las necesidades de niños y niñas, personas en situación de discapacidad, embarazadas y mayores.

Estrategias/acciones durante del maremoto	Estrategias/acciones después del maremoto
1) Mantener la calma. 2) Alejarse de la costa, ríos y albuferas. 3) Aplicar el plan de evacuación, dirigiéndose a la zona segura más cercana. 4) Mantenerse informado por fuentes oficiales. 5) Seguir las indicaciones de las autoridades de Protección Civil. 6) Ayudar a las personas que lo necesiten.	1) Permanecer en la zona de seguridad hasta que las autoridades indiquen que es seguro el fin de la evacuación. 2) Comunicarse con familiares. 3) Informarse a través de fuentes oficiales. 4) Si la vivienda ha sufrido daños, no acceder a ella hasta que lo indique el equipo de evaluación de daños.
1) Dirígete a una zona alta de, al menos, 30 metros sobre el nivel del mar. 2) Alejate de ríos, cauces secos o vaguadas por los que pueda adentrarse el agua. 3) No te quedes en la playa, ni cerca, para observar el mar. ¡Ponte a salvo!	1) REALÍZOS, vuelve solo cuando las autoridades lo permitan ¡Un tsunami puede durar horas! 2) Comprueba el estado de tu casa antes de volver a ocuparla. 3) Mantén la calma, corta cualquier bulo o rumor e infórmate por canales oficiales y medios de comunicación. 4) Revisa tu provisión de alimentos y bebidas. No comas ni bebas de recipientes abiertos. 5) No uses tu coche salvo que sea de urgencia. Despeja las calles altos vehículos de emergencia.
1) Mantén la calma. 2) Alejate de la costa, ríos y esteros. 3) Ayuda en la evacuación a quienes lo necesiten. 4) Aplica tu Plan de Evacuación y dirígete a una Zona de Seguridad ante Tsunami. 5) Llévate tu Kit de emergencia. 6) Mantente informado/a y sigue las instrucciones de las autoridades. 7) Si vas por rutas urbanas costeras, deja tu vehículo, cuidando no obstruir las vías de evacuación y de tránsito, continuando a pie hacia una Zona de Seguridad ante tsunamis.	1) Permanece en una Zona de Seguridad ante Tsunami hasta que las autoridades indiquen que es posible volver. 2) Previo al ingreso y uso del inmueble, realiza un reconocimiento de los riesgos presentes. 3) Mantente alerta, los movimientos sísmicos pueden continuar e incluso ocurrir un nuevo tsunami. 4) Comunícate con tus familiares preferentemente por medio de mensaje de texto y/o redes sociales. 5) Continúa informándote y sigue las instrucciones de las autoridades.

Tabla 3. Elaboración propia de un resumen de las actuaciones y recomendaciones a tener en cuenta, antes, durante y después de un Tsunami.

Además de los aspectos recopiladas en la tabla se aconseja el Kit de emergencia. Al organizar el Kit de Emergencia, debe considerarse las necesidades de menores de edad, personas en situación de discapacidad, embarazadas y personas mayores.

- Agua (2 litros por persona).
- Comida enlatada y abrelatas manual.
- Papel higiénico.
- Linterna y pilas de repuesto.
- Radio portátil con pilas adicionales.
- Elementos de primeros auxilios.
- Medicamentos.
- Llaves de tu casa y auto.
- Dinero en efectivo.
- Ropa de abrigo.
- Guantes de seguridad.

4. CONCLUSIONES

Los Tsunamis pueden deberse a varias causas, siendo las más habituales los terremotos, los deslizamientos y los volcanes.

Si se tienen en cuenta estas medidas a adoptar por toda la población, el número de víctimas y de daños económicos se minimizarían a un porcentaje bajo.

El Mecanismo Europeo de Protección Civil incluye entre sus medidas de prevención analizar la capacidad de gestión de los desastres, incluyendo amenazas de baja probabilidad y alto impacto. Fuente: Dirección General de Protección Civil y Emergencias (DGPC) / Comisión Europea.

De los resultados obtenidos a través de la comparativas realizadas a nivel Nacional, de

Comunidad Autónoma e Internacional, se concluye con estas propuestas de mejora para el plan de emergencia y evacuación por alerta de Tsunamis en la provincia de Cádiz.

De las conclusiones finales, se extrae que:

- En evacuación horizontal:
 - Mantén la calma y aplica tu Plan de Evacuación.
 - Dirígete hacia una Zona de Seguridad ubicada al menos a 30 metros de altura.
 - Siempre ir a pie y no coger el vehículo.
 - Regresar a tu hogar cuando las autoridades indiquen que es seguro hacerlo.
 - Escucha una emisora de radio o televisión para recibir información de las autoridades competentes.
 - Comunícate con tus familiares a través de mensajes de texto o redes sociales.
- Plan secundario o evacuación vertical:
 - Dirígete a un edificio que tenga al menos 8 plantas de altura y sube al piso más alto.
- Si vas conduciendo un vehículo:
 - Si vas por ruta urbana costera, estaciona tu vehículo en zona donde no moleste ni obstruya la calle y ve a pie hacia una zona de seguridad de Tsunami.
 - Si vas por un camino rural costero, reduce la velocidad y ve hacia una zona de altura del orden de 30 metros.

Agradecimientos

A todas las personas que han hecho realidad este estudio para velar por la seguridad de los ciudadanos, a toda la comunidad universitaria de la Universidad de Cádiz (UCA), al campus de Excelencia Internacional del Mar (CEIMAR), a la Escuela Superior de Ingeniería (ESI) del Campus de Puerto Real (Cádiz), a los organizadores y patrocinadores que desarrollan y hacen posible que se desarrolle este encuentro, como son la Armada Española y Ministerio de Defensa, Instituto Hidrográfico de la Marina de Portugal e Instituto Hidrográfico de la Marina de España.

REFERENCIAS

Bolt B., 1981, "Terremotos", Ed. Reverté y Ed. Orbis, Barcelona, pp. 17-38.

Campos M., 1992, El Riesgo de Tsunamis en España : análisis y valoración geográfica, Instituto Geográfico Nacional, 1992, ISBN 84-7819-041-4, Madrid, P. 185-204

[1] D. G. del Instituto Geográfico Nacional y D. G. de Protección Civil y Emergencias. Edición comentada. ES, 2021. Plan Estatal de Protección Civil ante el

riesgo de maremotos. [Online]. Available: <https://doi.org/10.7419/162.02.2022>

Guía didáctica Tsunamis, recomendaciones básicas para estar preparados y prevenir riesgos, 112 emergencias de la Junta de Andalucía e Instituto Universitario de Investigación Andaluz de Geofísica y Prevención de Desastres Sísmicos de la Universidad de Granada. 2021.

Martínez J., 2001, Los efectos en España del terremoto de Lisboa (1 de noviembre de 1755), monografía nº19, Dirección General del Instituto Geográfico Nacional, ISBN: 84-95.172-26-7, Madrid, pp. 50-58.

Mesa técnica interinstitucional de recomendaciones para la preparación y respuestas ante Tsunamis. Recomendaciones para la preparación y respuestas ante Tsunamis. Santiago: ONEMI. 2014. p.31. Disponible en: www.onemi.cl

Plan de emergencia de maremotos antes el riesgo de maremotos en Andalucía, Consejería de la Presidencia, Interior, Diálogo Social y Simplificación Administrativa 2023.

Sørensen, M. B., M. Spada, A. Babeyko, S. Wiemer, and G. Grünthal (2012), Probabilistic Tsunami hazard in the Mediterranean Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 117 [Online]. Available: <https://doi.org/10.1029/2010JB008169>.

Tarback, E. J.; Lutgens, F. K., y Tasa, D., 2005. "Los terremotos", CIENCIAS DE LA TIERRA, Miguel Martín-Romo, Madrid: Pearson Educación S. A., pp. 307-339.

Implementação do standard S-124 na informação de segurança marítima do serviço ANAVNET

C. Videira (1), P. Sanches (1), F. Vieira (1), C. Pata (1), V. Conde (2), G. Mendes (2)

(1) Instituto Hidrográfico. Rua das Trinas, 49, 1249-093 Lisboa, Portugal. rodrigues.videira@hidrografico.pt.

(2) Deimos Engenharia, S.A., Portugal.

Resumo: O Instituto Hidrográfico (IH) tem desenvolvido trabalho no sentido de implementar o Modelo Hidrográfico Universal S-100 nas suas áreas de responsabilidade, de acordo com as recomendações da Organização Hidrográfica Internacional (OHI). Este artigo tem como objetivo apresentar o fluxo de trabalho desenvolvido para a implementação da especificação “S-124 Navigational Warnings” aos Avisos à Navegação (ANAV) Costeiros e Locais disponibilizados no serviço ANAVNET do IH. Aplicando um processo de Extração, Transformação e Carregamento (*Extract, Transform and Load – ETL*) e recorrendo aos softwares de código aberto *Hale Studio* e *Geoserver* (com extensão *App-Schema*), os ANAV, informação geoespacial armazenada numa base de dados relacional *PostgreSQL/PostGIS*, são codificados para o formato *Geography Markup Language* (GML) S-124. A disponibilização de um produto ou serviço harmonizado com a especificação S-124 é um contributo importante para a interoperabilidade entre os vários sistemas marítimos, a bordo e em terra, respondendo ao conceito *e-navigation* definido pela Organização Marítima Internacional (IMO).

Palavras-chave: informação de segurança marítima, harmonização, modelo hidrográfico universal S-100, S-124 *Navigational Warnings*.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, uma das prioridades da OHI é o processo de implementação do modelo S-100 “*IHO Universal Hydrographic Data Model*” (OHI, 2024). O *standard* S-100 tem como objetivo padronizar a produção e a disponibilização de dados, produtos e serviços em formato digital, como são exemplo os novos padrões para as cartas eletrónicas de navegação, batimetria de alta resolução, correntes de superfície, avisos à navegação, entre outros. Baseado nas normas ISO 19100 desenvolvidas pelo *International Organization for Standardization, Technical Committee 211 - ISO TC/211* (ISO, 2024), requisito essencial para que o modelo S-100 esteja alinhado com outras iniciativas de desenvolvimento de normas, como as normas do *Open Geospatial Consortium* (OGC), este modelo promove a harmonização e interoperabilidade dos dados hidrográficos (OHI, 2024).

O modelo S-100 vem substituir o modelo de transferência de dados hidrográficos digitais S-57, “*IHO Transfer Standard for Digital Hydrographic Data*” (OHI, 2000), adotado pela OHI em 1992. As limitações do S-57, nomeadamente a falta de flexibilidade e extensibilidade, com uma estrutura rígida que dificulta a inclusão de novos formatos de dados geoespaciais marítimos, a incapacidade de suportar a representação de dados mais complexos, a

necessidade de interoperabilidade com outros padrões de dados geoespaciais e sistemas de informação geográfica (SIG) e a sua inadequação aos requisitos da *e-navigation* (IMO, 2019a), são alguns dos motivos para a desenvolvimento do novo modelo S-100. No contexto do desenvolvimento da *e-navigation*, o S-100 foi aprovado pela IMO como modelo base para os dados e para o intercâmbio de informações (IMO, 2019b).

Suportadas pelo modelo S-100 são definidas várias especificações dedicadas a diferentes produtos e serviços (OHI, 2022a). Alinhado com o *roadmap* para a implementação do S-100 - *Década (2020-2030)* (OHI, 2023a), o IH está dedicado à implementação dos produtos e/ou serviços considerados prioritários, para a Fase 1 de Implementação (S-101, S-102, S-104, S-111, S-124 e S-129) (Nunes, et al., 2023), cujas especificações operacionais devem estar disponíveis até 2026.

A especificação S-124 *Navigational Warnings*, foco deste artigo, tem como objetivo obter um produto de dados para os ANAV, codificando a sua natureza e extensão, que possa ser exibido num ECDIS¹ (OHI, 2023b), por sobreposição à Carta Eletrónica de Navegação (ENC²). À semelhança dos atuais ANAV, o conjunto de dados S-124 pode ser difundido por radiodifusão tradicional, NAVTEX (canais de comunicação terrestre) e serviços EGC³ (serviços móveis por satélite), garantindo uma maior

¹ ECDIS - *Electronic Chart Display and Information System*.

² Sigla em inglês: *Electronic Navigational Chart*.

³ EGC: *Enhanced Group Call*.

compatibilidade retroativa. Ao permitir que a informação S-124 seja divulgada em vários canais, há uma maior disseminação de informação crítica para a segurança da navegação. No entanto, o S-124 não deve ficar limitado aos canais anteriores. Adicionalmente ao produto S-124, é também de esperar a disponibilização dos ANAV a partir de um serviço *web* S-124, para uma troca contínua de dados entre aplicações de *e-navigation*.

Para a implementação do S-124, o IH recorreu a um processo de ETL sobre a informação do sistema de gestão de Informação de Segurança Marítima (MSI⁴) do ANAVNET⁵, implementado desde 2022. Este sistema, desenvolvido para apoiar os produtores e gestores de MSI, codifica a natureza e extensão dos avisos, armazena toda a informação georreferenciada numa base de dados relacional, mas não cumpre os requisitos do modelo de dados S-100.

Este trabalho pretende apresentar o fluxo de trabalho para a implementação da especificação S-124 aos ANAV disponibilizados no ANAVNET. Com base nos resultados obtidos, pretende-se ainda avaliar as vantagens, limitações e desenvolvimentos futuros.

2. MÉTODOS E MATERIAIS

Para a obtenção de um produto S-124 podem ser consideradas, pelo menos, duas metodologias. Uma das metodologias passa pela criação e manutenção de uma nova base de dados dos ANAV, de acordo com o modelo lógico definido na especificação do produto S-124 (OHI, 2023b). Esta estratégia implicaria a manutenção de duas bases de dados, com informação redundante, bem como a criação de uma nova plataforma para criação e gestão desta informação. Em alternativa, pode-se considerar a implementação de um processo de ETL sobre a informação existente na atual base de dados do sistema ANAVNET, evitando as limitações da metodologia anterior. Neste trabalho, é desenvolvida esta metodologia, com a definição do processo de ETL adequado para harmonização dos dados do sistema ANAVNET com o modelo de dados S-124.

O ETL foi implementado sobre a versão 1.0.0 da especificação S-124, disponibilizada pela OHI, em maio de 2023, apenas para validação e teste (OHI, 2023b). A versão operacional, edição 2.0.0 da especificação S-124, para ser implementada em sistemas como o ECDIS, estará disponível no último trimestre de 2024, tal como para as restantes da primeira fase. Do lado da produção e distribuição de dados, espera-se a sua disponibilização regular a partir de 2026.

2.1. Modelo de dados S-124

O modelo de dados S-124 é composto por cinco classes principais, das quais três são *Feature Types* (*NAVWARNPart*, *NAVWARNAreaAffected* e *TextPlacement*) e duas são *Information Types* (*NAVWARNPreamble* e *References*). A informação relativa ao “o quê” e “onde” do ANAV é codificada no *NAVWARNPart*. As classes opcionais *NAVWARNAreaAffected* e *TextPlacement* permitem, respetivamente, marcar áreas afetadas por um ANAV fora da proximidade imediata onde o próprio ANAV está localizado e colocar rótulos de texto no ecrã para facilitar a leitura do seu conteúdo. As classes *NAVWARNPreamble* e *References* são obrigatórias. A primeira fornece informações gerais do ANAV e a segunda é usada para referenciar ANAV anteriores para cancelamento ou para criar listas de avisos em vigor (OHI, 2023b).

2.2. Processo de ETL

O processo de ETL implementado pode ser resumido nas seguintes etapas:

- *Extract*: extração dos dados da base de dados relacional *PostgreSQL/PostGIS* do sistema ANAVNET;
- *Transform*: transformação para o formato GML, respeitando o modelo S-124, com recursos ao mapeamento desenvolvido no *HALE*;
- *Load*: carregamento dos dados GML transformados pelo *Geoserver*⁶ (com a extensão *App-Schema*).

Para facilitar a tarefa de mapeamento e transformação, foram realizadas, a montante, várias alterações na base de dados relacional. Estas alterações incluíram a criação de vistas, realizadas através da execução de *scripts* SQL, que efetuaram operações específicas nos dados, ajustando-os ao modelo de dados S-124. Estas vistas permitiram um mapeamento mais eficiente dos dados durante a etapa de transformação do processo de ETL, assegurando que a informação fosse corretamente mapeada para o formato GML conforme os requisitos do S-124. A opção por esta etapa prévia de criação de vistas também apresenta a vantagem de permitir que eventuais alterações no modelo de dados do ANAVNET sejam tratadas nas vistas, sem afetar o processo de ETL implementado. A Fig. 1 ilustra as vistas criadas.

Para a tarefa de harmonização dos dados, recorreu-se ao software de código aberto *Hale Studio v3.5*⁷. Esta ferramenta aborda os diversos desafios da harmonização, permitindo definir regras de mapeamento entre o *source schema* (as vistas da base

⁴ Sigla em inglês: *Maritime Safety Information*.

⁵ <https://geoanavnet.hidrografico.pt> [Acedido 28 junho 2024].

⁶ <https://geoserver.org/> [Acedido 28 junho 2024].

⁷ <https://github.com/halestudio/hale/releases/tag/3.5.0> [Acedido 28 junho 2024].

de dados do sistema ANAVNET) e o *target schema* (especificação S-124). As várias etapas do processo ETL, realizadas no *Hale Studio*, estão representadas na Fig. 2.

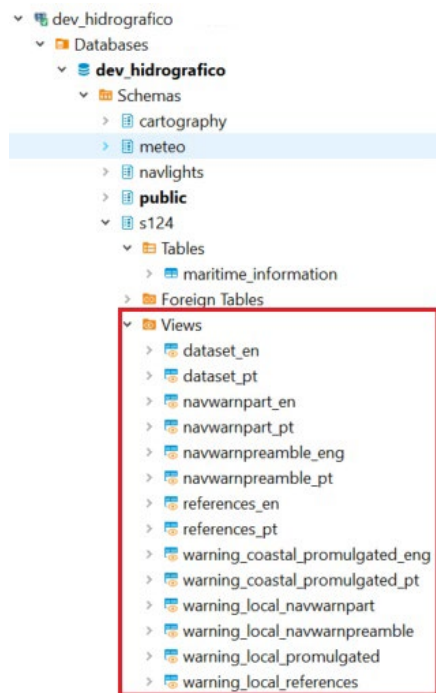


Fig. 1. Vistas criadas previamente, com recurso aos dados do sistema ANAVNET.



Fig. 2. Etapas do processo de ETL realizadas nos softwares *Hale Studio* e *Geoserver*.

Após a importação do *source schema* e dos dados do sistema ANAVNET, e do *target schema* S-124, realizou-se o mapeamento, isto é, estabeleceu-se uma correspondência entre os atributos dos dois modelos de dados através de funções, escolhidas conforme o tipo de atributos e as propriedades dos *schemas* (etapa 3 do ETL, Fig. 2). A Fig. 3 mostra o mapeamento efetuado para a construção da classe *NAVWARNPart*, partindo da informação existente na *view navwarnpart* e recorrendo às funções *Retype*, *Rename* e *Formatted String*. Estabelecidas as relações necessárias para construção das classes do modelo S-124, efetuou-se a transformação e exportação dos dados para o formato GML, executados através do *Geoserver* com a extensão *App-Schema* (etapas 4 e 5 do ETL, Fig. 2). De notar que o software permite

realizar uma validação automática⁸ baseada no *schema S-124*, durante o processo de mapeamento.

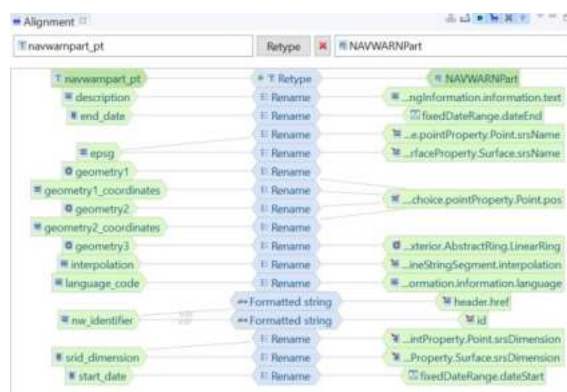


Fig. 3. Representação gráfica do mapeamento para definição da classe *NAVWARNPart*.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como resultado do ETL, obtém-se um conjunto de dados no formato GML, em conformidade com a especificação S-124, contendo os ANAV em vigor existentes no sistema ANAVNET (Fig. 4). Com recurso à extensão *GeoServer App-Schema*⁹ para o HALE, o resultado da transformação pode ser carregado diretamente no *GeoServer* para disponibilização de serviços de visualização e de descarregamento. A utilização desta extensão permite a conversão da informação em tempo real: qualquer alteração nos dados do sistema ANAVNET é imediatamente refletida nos serviços, como informação em conformidade com a especificação S-124.

A utilização do software HALE, com a disponibilização de uma interface gráfica, simplifica o processo de mapeamento, assegurando a harmonização da informação e a sua publicação através de serviços de rede. Contudo, a validação executada pelo software apenas garante a conformidade com o *schema* S-124. O produto S-124 terá de ser validado pelo produtor antes da publicação para cumprir com a lista de verificações¹⁰ presentes na especificação S-124.

4. CONCLUSÃO

O recurso ao processo de ETL implementado permite manter o atual sistema ANAVNET para gerar os ANAV S-124, sem a necessidade de desenvolver uma nova plataforma para capturar a informação do aviso e uma nova base de dados. Esta solução permite uma dupla produção a partir de uma única captura de informação, gerando avisos no atual formato para distribuição via NAVTEX e EGC, e no formato S-124.

⁸ Com ativação da ferramenta *live transformation*.

⁹ <https://github.com/geosolutions-it/hale-appschema-plugin> [Acedido 29 junho 2024].

¹⁰ Validação de formatos, conformidade com o *schema* e verificações de consistência lógica.

```

▼<wfs:FeatureCollection xmlns:wfs="http://www.opengis.net/wfs/2.0" xmlns:xs="http://www.w3.org/2001/XMLSchema" xmlns:nns_1="http://www.iho.int/S124/1.0"
xmlns:gml="http://www.opengis.net/gml/3.2" xmlns:S100="http://www.iho.int/S100gml/5.0" xmlns:xlink="http://www.w3.org/1999/xlink"
xmlns:xs1="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance" numberMatched="unknown" numberReturned="34" timeStamp="2024-03-22T14:19:24.583Z"
xmlns:schemaLocation="http://www.iho.int/S124/1.0 File:/C:/Users/gmm/Documents/S124/S-124_OHG_Schemas_1.0.0.xsd http://www.opengis.net/wfs/2.0
http://localhost:8080/geoserver/schemas/wfs/2.0/wfs.xsd http://www.opengis.net/gml/3.2 http://localhost:8080/geoserver/schemas/gml/3.2.1/gml.xsd">
▼<wfs:member>
▼<nns_1:NAVWARNPart gml:id="NW.PT.CENCOMAR.1890.23.2">
▼<nns_1:warningInformation>
▼<nns_1:information>
<nns_1:language>pt</nns_1:language>
▼<nns_1:text>
05OUT23, DAS 1100 AHS 1300 HORAS LOCAIS, REALIZA-SE PROVA NAUTICA DESPORTIVA NA BAIJA DE SESIMBRA. SOLICITA-SE RESGUARDO.
</nns_1:text>
</nns_1:information>
</nns_1:warningInformation>
<nns_1:header xlink:href="#NW.PT.CENCOMAR.1890.23"/>
▼<nns_1:geometry>
▼<S100:pointProperty>
▼<S100:Point srsDimension="2" srsName="4326">
<S100:informationAssociation xlink:href="NW.PT.CENCOMAR.1890.23" xlink:type="2"/>
</S100:Point>
</S100:pointProperty>
▼<S100:surfaceProperty>
▼<S100:Surface srsDimension="2" srsName="4326">
▼<gml:paches>
▼<gml:PolygonPatch>
▼<gml:exterior>
▼<gml:LinearRing>
▼<gml:posList>
-9.106457 38.436085 -9.106457 38.44153 -9.089417 38.44153 -9.089417 38.436085 -9.106457 38.436085
</gml:posList>
</gml:LinearRing>
</gml:exterior>
</gml:PolygonPatch>
</gml:paches>
<S100:informationAssociation xlink:href="NW.PT.CENCOMAR.1890.23"/>
</S100:Surface>
</S100:surfaceProperty>
</nns_1:geometry>
</nns_1:NAVWARNPart>
</wfs:member>

```

Fig. 4. Extrato do produto S-124, formato GML, resultante do processo de ETL.

Contudo, a especificação S-124 exige informação que não se encontra disponível no atual sistema ANAVNET, nomeadamente nos avisos locais. Por conseguinte, será necessário realizar alterações na plataforma *web* de produção dos avisos do ANAVNET para capturar essa informação, nomeadamente ao nível dos avisos locais.

Como desenvolvimentos futuros, dependentes da evolução em curso das especificações S-100, destaca-se a implementação e o teste da interoperabilidade do produto S-124 nos futuros S-100 ECDIS, para garantir o uso e exibição simultânea de dois ou mais produtos baseados em S-100, conforme definido no nível 1 da especificação S-98¹¹ (OHI, 2022b).

REFERÊNCIAS

- IMO, 2019a. E-navigation. [Online] Disponível em: <https://www.imo.org/en/OurWork/Safety/Pages/eNavigation.aspx> [Acedido em 28 junho 2024].
- IMO, 2019b. Guidance on the definition and harmonization of the format and structure of maritime services in the context of e-navigation (MSC.467(101)). [Online] Disponível em: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Safety/Documents/enavigation/MSC.467\(101\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Safety/Documents/enavigation/MSC.467(101).pdf) [Acedido em 28 junho 2024].
- ISO, 2024. Standards by ISO/TC 211: Geographic information/Geomatics. [Online] Disponível em: <https://www.iso.org/committee/54904/x/catalogue/> [Acedido em 28 junho 2024].
- Nunes, P. et al., 2023. O Modelo Hidrográfico Universal S-100: A Informação Hidrográfica e a Digitalização do Oceano. 11ª Jornadas de Engenharia Costeira e Portuária (PIANC).

OHI, 2000. IHO Transfer Standard for Digital Hydrographic Data - Edition 3.1. [Online] Disponível em: <https://iho.int/uploads/user/pubs/standards/s-57/31Main.pdf> [Acedido em 28 junho 2024].

OHI, 2022a. S-100 based Product Specifications. [Online] Disponível em: <https://iho.int/en/s-100-based-product-specifications> [Acedido em 28 junho 2024].

OHI, 2022b. S-98 Data Product Interoperability in S-100 Navigation Systems, Edition 1.0.0, May 2022. [Online] Disponível em: https://iho.int/uploads/user/pubs/standards/S-98/S98Main_Ed1.0.0_Final.pdf [Acedido em 28 junho 2024].

OHI, 2023a. Roadmap for the S-100 Implementation Decade (2020 – 2030), Annex 2, S-100 Timelines. [Online] Disponível em: https://iho.int/uploads/user/About/IHO/Council/S100_ImplementationStrategy/S-100Roadmap_Annex_2_v3.0_October2023.pdf [Acedido em 28 junho 2024].

OHI, 2023b. S-124 Navigational Warnings, Edition 1.0.0, May 2023. [Online] Disponível em: https://registry.iho.int/productspec/view.do?idx=181&product_ID=S124&statusS=5&domainS=ALL&category=product_ID&searchValue= [Acedido em 28 junho 2024].

OHI, 2024. S-100 Universal Hydrographic Data Model, Edition 5.2.0, June 2024. [Online] Disponível em: https://iho.int/uploads/user/pubs/standards/s-100/S-100_5.2.0_Final_Clean.pdf [Acedido em 28 junho 2024].

¹¹ S98 – Level 1: pressupõem que as várias camadas sejam intercaladas, mantendo a camada S-101 ENC como a camada principal, evitando que os dados da ENC sejam obscurecidos.

O
C
E
A
N
O
G
R
A
F
Í
A



Circulación en el LIC Volcanes de Fango del golfo de Cádiz

A. Aldarias (1), C. González-Pola (2), R. Graña (2), S. Sammartino (3), M. Bruno (4), y R. Sánchez-Leal (1)

- (1) Centro Oceanográfico de Cádiz. Instituto Español de Oceanografía (IEO-CSIC). ana.aldarias@ieo.csic.es
- (2) Centro Oceanográfico de Gijón. Instituto Español de Oceanografía (IEO-CSIC).
- (3) Grupo de Oceanografía Física. ETSI Telecomunicación. Universidad de Málaga (UMA).
- (4) Departamento de Física Aplicada. Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales. Universidad de Cádiz (UCA).

Resumen: La circulación en los fondos del golfo de Cádiz está dominada por la corriente del *outflow* mediterráneo (MOW, en sus siglas en inglés). La MOW es una mezcla de distintas aguas formadas en diferentes regiones del Mediterráneo que se va transformando a través de complejos procesos turbulentos que se dan cita desde el estrecho de Gibraltar hasta cabo San Vicente.

Este trabajo presenta medidas directas de velocidades de corriente de fondo a partir de un conjunto de instrumentos fondeados en landers bentónicos en el LIC Volcanes de fango del golfo de Cádiz. Estas observaciones se contextualizan con observaciones en toda la columna de agua a partir de un par de correntímetros instalados en el umbral de Espartel y el denominado canal de Tofiño. Todo ello dentro del programa STOCA (Series Temporales Oceanográficas del golfo de Cádiz, 2009). Los resultados muestran un patrón de variabilidad coherente, y muy marcado, en todo el golfo de Cádiz.

Palabras clave: circulación profunda, correntímetros, masas de agua.

1. INTRODUCCIÓN

El golfo de Cádiz se ubica entre los márgenes atlánticos de la península ibérica y el continente africano. En él se produce el intercambio entre las aguas salientes del mar Mediterráneo (más salinas y densas) y las residentes en esta zona del océano Atlántico, que fluyen por la superficie hacia el Mediterráneo. Las implicaciones globales y la singularidad científica de estos procesos de intercambio han puesto el foco en el estudio de la dinámica del Agua Mediterránea.

La circulación en los fondos del golfo de Cádiz, desde el borde exterior de la plataforma hasta el talud continental, está dominada por la corriente del *outflow* mediterráneo. Se trata de una corriente gravítica que transporta agua mediterránea de salida (MOW, en sus siglas en inglés). La MOW es un agua formada por la mezcla de un conjunto de diversos tipos de aguas mediterráneas formadas en varias regiones del mar Mediterráneo. En su camino hacia el Atlántico, esta agua de salida se va transformando a través de complejos procesos turbulentos que se dan cita desde el estrecho de Gibraltar hasta el cabo de San Vicente.

El objetivo de este estudio es conocer y definir en profundidad la circulación en los fondos del golfo de Cádiz y sobre ese patrón general estudiar la influencia de la estacionalidad y como afecta al desplazamiento y cambio en las propiedades de las masas de agua.

Para llevar a cabo este estudio se han realizado mediciones in-situ de velocidades de corriente de fondo a partir de un conjunto de instrumentos fondeados en landers bentónicos en Canal Cádiz y cuatro volcanes del LIC Volcanes de fango del golfo de Cádiz (Fig.1).

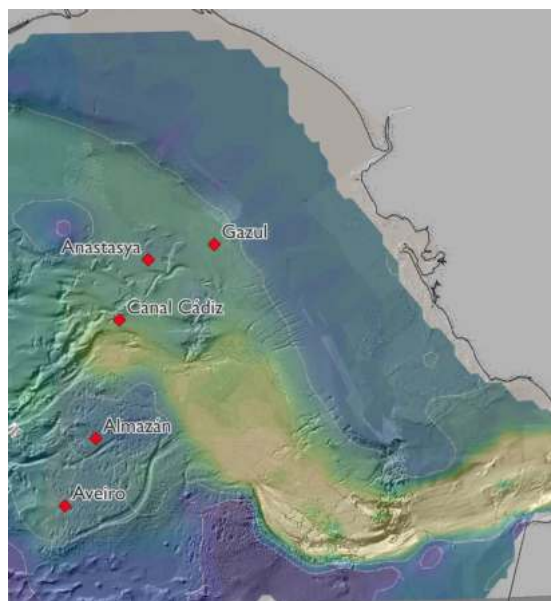


Fig. 1. Localización de los 5 correntímetros instalados en cuatro volcanes del LIC del golfo de Cádiz y Canal Cádiz.

2. DESARROLLO

El programa sistemático STOCA, a cargo del Centro Oceanográfico de Cádiz (Instituto Español de Oceanografía), lleva tomando datos con una frecuencia estacional, casi ininterrumpida, desde 2009 en el golfo de Cádiz. Además de los muestreos realizados durante las campañas oceanográficas también se realizan fondeos para la monitorización *in-situ* en continuo.

En concreto para este trabajo se presentan medidas directas de velocidades de corriente de fondo en el rango batimétrico que va de los 350 – 1070 m de profundidad a partir de un conjunto de instrumentos fondeados en landers bentónicos en el LIC Volcanes de fango del golfo de Cádiz (Fig. 1, Tab. i). En general los landers van equipados con un sensor de temperatura compacto de alta precisión (RBRsolo³T) y un sensor de velocidad e inclinación de la corriente (TCM-1, Tilt Current Meter) que también cuenta con su propio sensor de temperatura.

Tab. i. Localización y equipamiento de los landers bentónicos.

Ubicación	Prof (m)	Periodo de estudio	Instrum.
Aveiro	1069	17/05/2022 21/01/2024	RBR TCM
Almazán	852	17/05/2022 21/01/2024	RBR TCM
Canal Cádiz	717	19/05/2022 16/05/2023	RBR TCM
Anastasya	457	21/05/2022 20/01/2024	RBR TCM
Gazul	363	19/05/2022 20/01/2024	RBR TCM

Los landers bentónicos han sido fondeados y recuperados utilizando el sistema LanderPick. Se trata de un vehículo remolcado teledirigido (ROTV, por sus siglas en inglés), diseñado por personal del Instituto Español de Oceanografía junto a la empresa eDronica para ofrecer un servicio de monitorización permanente de bajo coste (Fig. 2). El ROTV va equipado con cámara, propulsores auxiliares, una baliza y una serie de garfios y ganchos específicamente diseñados para el despliegue y la recuperación de los landers. El desarrollo y optimización de la metodología de bajo coste LanderPick, ha sido posible gracias a varios proyectos generalmente financiados por el programa Pleamar de la Fundación Biodiversidad. Este sistema ha sido probado con éxito no solo en el golfo de Cádiz, sino también en el Cantábrico, las islas Canarias y el mar Mediterráneo con un total de casi 50 landers

bentónicos equipados con diferentes instrumentos que han sido fondeados y recuperados con éxito.

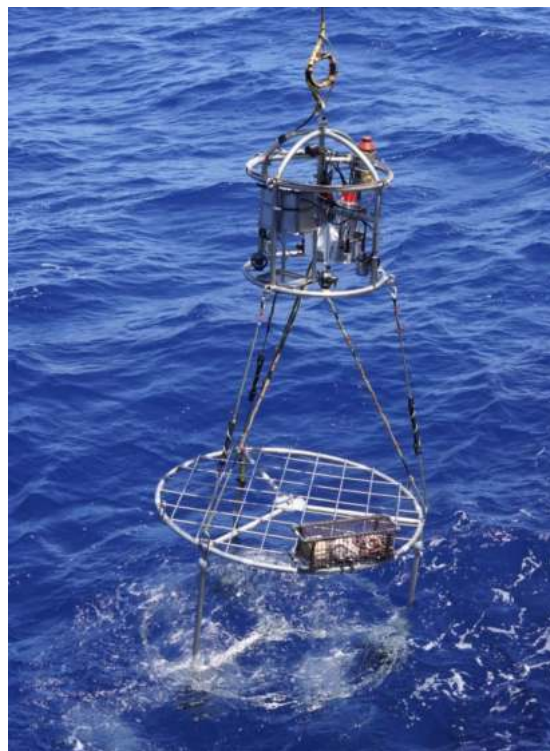


Fig. 2. Lander bentónicos fondeados en Anastasya utilizando el sistema LanderPick, vehículo remolcado teledirigido (ROTV).

Además de estos fondeos en landers bentónicos también se dispone, dentro del programa STOCA de fondeos tradicionales. De manera que estas observaciones se pueden contextualizar con observaciones en toda la columna de agua a partir de un par de perfiladores de corriente que, junto con otra instrumentación, se encuentran instalados en el umbral de Espartel (35° 51,709' N - 05° 58,217' W) en el Estrecho de Gibraltar, y en el denominado canal de Tofiño (36° 27.408' N - 06° 55.971' W), a unas 30 millas al oeste de la desembocadura del río Guadalquivir.

3. RESULTADOS

En la Figura 3 se muestran los resultados correspondientes a la serie temporal de velocidades sobre el fondo en los cuatro volcanes del LIC del golfo de Cádiz y Canal Cádiz para el periodo comprendido entre mayo de 2022 y enero de 2024. En el caso del lander situado en Canal Cádiz, los datos llegan hasta mayo de 2023 ya que cuando se recuperó el lander se encontraba dañado por la corrosión marina y no pudo ser re-fondeado hasta enero de 2024.

Para eliminar la variabilidad de alta frecuencia las series de datos del TCM están filtradas con un filtro de paso bajo de 40 horas. Los vectores de velocidad se muestran rotados para facilitar la visualización de los resultados y la temperatura se indica en escala de colores.

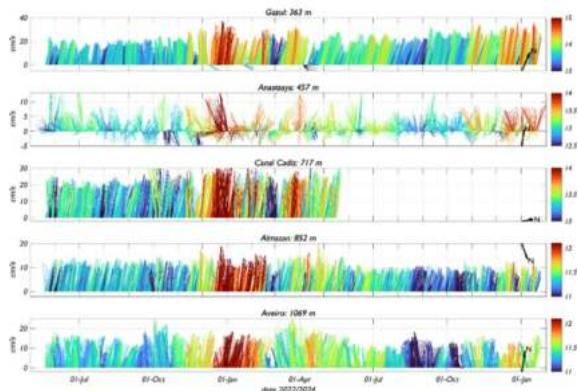


Fig.3. Serie temporal (mayo 2022 - enero 2024) de velocidades sobre el fondo en cuatro volcanes del LIC del golfo de Cádiz y Canal Cádiz. Para eliminar la variabilidad de alta frecuencia las series están filtradas con un filtro de paso bajo de 40 h. Los vectores están rotados para facilitar la visualización (el N está marcado en cada panel). La escala de colores corresponde a la temperatura.

Las observaciones de corriente muestran el predominio de la corriente mediterránea en el intervalo batimétrico 360-800 m y permiten caracterizar la propagación de los principales flujos sobre el fondo (Fig.3). A excepción del volcán Anastasya (457 m de), que muestra un patrón muy errático al quedar aislado de la circulación principal por un bloqueo causado por la dorsal diapírica de Cádiz (Fig. 1). Los restantes instrumentos sugieren la apertura en abanico del flujo, un patrón asociado a la ruta principal de la corriente mediterránea en el golfo de Cádiz (Sánchez-Leal et al., 2017).

El instrumento más profundo, situado al sur del dominio (Aveiro), muestra un flujo que circula en sentido opuesto al observado en la zona norte. Exhibe una corriente persistente hacia el norte siguiendo el contorno de la batimetría profunda del olistostroma del golfo de Cádiz que muestra aspectos diferenciadores de la corriente mediterránea. A pesar de ello, este instrumento muestra un elevado grado de covarianza con las temperaturas observadas en toda la región. Sigue el marcado calentamiento experimentado en invierno de 2022-2023 y el enfriamiento en el verano de 2023.

Además de los datos obtenidos en los landers, se están analizando los resultados de los fondeos de Espartel y Tofiño que nos permitirán ampliar la visión del patrón de corrientes en el fondo del golfo de Cádiz y analizar en profundidad los eventos de calentamiento y enfriamiento identificados.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se muestran los resultados de velocidad en el fondo en Canal Cádiz y cuatro volcanes del LIC del golfo de Cádiz para el periodo comprendido entre mayo 2022 y enero 2024. No obstante, los landers siguen fondeados con la misma instrumentación por lo que esperamos poder seguir extendiendo la serie temporal. Hasta el momento podemos destacar dos conclusiones principales:

- 1) La metodología de LanderPick hace posible el despliegue de una amplia flotilla de landers bentónicos que nos permite obtener información a través de la monitorización en continuo y con bajo presupuesto. Favoreciendo la disponibilidad de datos cerca del fondo y en distintas localizaciones pudiendo así conformar una imagen general de la zona de estudio que recoja además la variabilidad estacional.
- 2) Se observa un patrón coherente de variabilidad en todo el golfo de Cádiz con flujos muy marcados y en diferentes dominios, tanto aguas mediterráneas intermedias como profundas. Además se observa una fuerte influencia de la marea incluso en las mayores profundidades.

Agradecimientos

Agradecemos al equipo de desarrollo y optimización de la metodología LanderPick, así como al personal a bordo de los buques oceanográficos Ángeles Alvariño y Ramón Margalef de la flota del Instituto Español de Oceanografía por su colaboración. Y al Programa de Seguimiento de las Estrategias Marinas que financian a la autora principal de este trabajo.

REFERENCIAS

- Sánchez-Leal, R. F., Bellanco, M. J., Fernández-Salas, L. M., García-Lafuente, J., Gasser-Rubinat, M., González-Pola, C., ... & Sánchez-Garrido, J. C. (2017). The Mediterranean Overflow in the Gulf of Cadiz: A rugged journey. *Science advances*, 3(11), eaao0609, <https://doi.org/10.1126/sciadv.aao0609>

Estudio de la dinámica de las ondas internas en el estrecho de Gibraltar y mar de Alborán desde Tierra, Mar y Aire

M. Bolado-Penagos (1), Á. Vázquez (1), L.V. Delvasto-Algarin (2), A. Alvera-Azcárate (2), C.J. González (3), M. Bruno (1)

(1) Departamento de Física Aplicada, Instituto Universitario de Investigación Marina (INMAR), Campus de Excelencia Internacional/Global del Mar (CEI-MAR), Universidad de Cádiz, Puerto Real 11519, Cádiz, Spain. marina.bolado@uca.es

(2) GeoHydrodynamics and Environment Research (GHER). Edificio B5 Oceanografía Física, Allée du 6 Août 17, 4000, Lieja, Bélgica.

(3) Instituto Hidrográfico de la Marina (IHM), Armada Española, División de Apoyo Naval y Oceanografía, Plaza San Severiano 3, 11007 Cádiz, España.

Abstract: Las ondas internas se observan frecuentemente en océanos y lagos con alta estratificación y son cruciales para la distribución de propiedades marinas, como nutrientes. Este estudio analiza la presencia de solitones en el estrecho de Gibraltar y el mar de Alborán, generados en el umbral de Camarinal. Se emplean datos *in situ*, corriente superficial de radar de alta frecuencia (HFR), modelado numérico y productos satelitales. Los solitones detectados por radar de apertura sintética (SAR) se alinean con la dirección y velocidad de la corriente medida por HFR y con altas concentraciones de clorofila. Se observó variabilidad quincenal en la amplitud y tiempos de llegada de los solitones, siendo mayor la amplitud y menor el tiempo de viaje en mareas vivas (14 horas) en comparación con mareas muertas (20 horas). Las fluctuaciones en los tiempos de viaje también están influenciadas por la variabilidad subinercial impulsada por el forzamiento atmosférico. Estos hallazgos resaltan la complejidad de los procesos oceanográficos en la región.

Palabras clave: Ondas internas, estrecho de Gibraltar, radar de alta frecuencia, modelado numérico, satélite.

1. INTRODUCCIÓN

En el estrecho de Gibraltar se encuentran las masas de agua de naturaleza atlántica, más ligera, menor salinidad, y que se desplaza en superficie hacia el este, y mediterránea, más densa, con mayor salinidad, que fluye en profundidad hacia el oeste, formando un intercambio baroclino, el cual ha sido estudiado en profundidad en diversos trabajos (e.g., Criado-Aldeanueva et al., 2012). El agua atlántica se adentra en el mar de Alborán formando lo que se conoce como el chorro atlántico, o *Atlantic Jet*, que varía estacionalmente (Macías et al., 2016) y determina el patrón principal de circulación en los primeros 100-150 m de la columna de agua en el mar de Alborán (Oguz et al., 2017). Por su parte, el agua mediterránea está formada por una mezcla de distintas masas de agua formadas por distintos procesos en dicha cuenca (e.g., Millot, 2009).

Por lo tanto, la circulación a través del estrecho de Gibraltar se simplifica comúnmente como un intercambio estuarino inverso de dos capas (Armi y Farmer, 1988), y la interacción entre ambas masas de agua constituye la interfaz Atlántico-Mediterráneo (AMI), que es más salada, cálida y superficial en el lado oriental del Estrecho que en el lado occidental (Bray et al., 1995).

La topografía irregular del fondo del estrecho de Gibraltar domina los principales procesos hidrodinámicos. El flujo entrante del Atlántico está controlado hidráulicamente por la sección más estrecha del Estrecho, el estrechamiento de Tarifa (TN en Fig. 1a), donde se observa una AMI más gruesa (García-Lafuente et al., 2002a). El flujo saliente del agua mediterránea está controlado por los principales umbrales del Estrecho (Armi y Farmer, 1985; García-Lafuente et al., 2002a), ubicados al oeste de TN: los umbrales de Espartel (~360 m) y Camarinal (~290 m; CS) (ver Fig. 1a).

CS ha sido objeto de varios estudios, ya que la interacción del flujo de marea barotrópica con esta característica batimétrica genera ondas internas de gran amplitud sobre el umbral (e.g., Izquierdo et al., 2001) durante la mayor parte de los ciclos de marea. Como describen Vázquez et al. (2008), las llamadas A-Waves (Watson y Robinson, 1990) se generan cuando se alcanzan condiciones de flujo crítico (número de Froude $G^2 = 1$), o supercrítico ($G^2 > 1$), sobre CS durante la fase hacia el oeste de la corriente de marea barotrópica, que es cuando la corriente barotrópica M_2 máxima hacia el oeste alcanza velocidades de aproximadamente 1 m/s. Estas condiciones conducen a la formación de un bore interno a sotavento del umbral.

Estas ondas se propagan hacia el mar de Alborán (e.g., Izquierdo et al., 2001), y su velocidad de fase varía según condiciones como la estratificación vertical de densidad. Sannino et al. (2004) observaron, a partir de un modelo tridimensional, que la velocidad máxima de fase entre Tarifa y Punta Cires (2.5 m/s) coincidía con los resultados de Izquierdo et al. (2001) de un modelo bidimensional. Sánchez-Garrido et al. (2008) estimaron una velocidad máxima de hasta 2.6 m/s sobre TN. Como se observa en la Fig. 1, al entrar en el mar de Alborán, las ondas se irradian en frentes que se curvan debido a la difracción y la advección de marea (e.g., Watson y Robinson, 1990). En el mar de Alborán, se han identificado diferentes frentes usando la rugosidad de la superficie del mar y la distribución de clorofila-a (Chl-*a*) detectadas por satélite (Vázquez et al., 2009). La presencia de solitones internos en el mar de Alborán se ha registrado hasta 200 km hacia el este (Pistek y La Violette, 1999), y hasta 50 horas después de su generación en CS.

Con respecto de la interacción físico-biológica de este fenómeno, se ha observado que los desplazamientos verticales de las isopícnas sobre el Umbral (> 200 m) con frecuencia semidiurna, son capaces de favorecer la mezcla vertical como consecuencia de la rotura de la onda interna, lo que favorece el ascenso de nutrientes a profundidades más someras en la capa Atlántica.

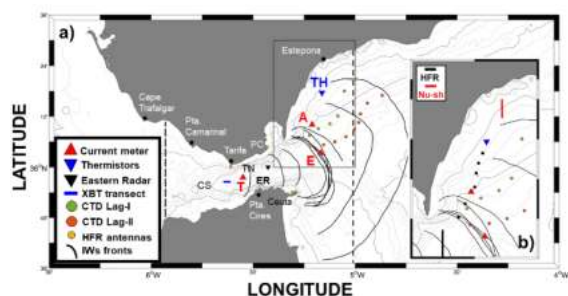


Fig. 1. (a) Mapa de la zona de estudio con las principales localizaciones geográficas y la localización de los datos analizados. Las líneas gruesas discontinuas delimitan el dominio del modelo UCA3D. (b) El rectángulo negro muestra un zoom de la plataforma occidental del mar de Alborán en donde se analiza la llegada de solitones internos. Las líneas negras curvas son frentes de ondas internas capturados por SAR.

El objetivo de este trabajo es analizar la presencia de ondas internas en el estrecho de Gibraltar y plataforma occidental del mar de Alborán, para determinar con qué frecuencia se observan estas. Con este fin, también se explora la posible variabilidad quincenal tanto en su presencia como en su amplitud, así como los efectos de la variabilidad subinercial. Asimismo, se consideran los efectos de estos eventos de ondas internas en la alta productividad de fitoplancton en estas aguas de talud.

2. DESARROLLO

La presencia de solitones se analizó desde distintos enfoques: (i) datos *in situ*; (ii) corriente superficial

adquirida con radar de alta frecuencia (HFR, *High-Frequency Radar*); (iii) modelado numérico (UCA3D); y (iv) productos derivados de satélites (imágenes de Chl-*a* superficial, y SAR).

Las observaciones *in situ* analizadas (Fig. 1a), se adquirieron durante distintos periodos de tiempo (Tab. i). Por un lado, se analizaron registros de corriente y temperatura obtenidos gracias al fondeo de correntímetros RCM en 2003 (*Recorder Current Meter*, T y E, triángulos rojos en Fig. 1a) a distintas profundidades. En noviembre de ese mismo año, en una campaña oceanográfica a bordo del buque *Mytilus* permitió registrar la presencia de un solitón mientras este se desplazaba hacia el lado Mediterráneo. Este se registro gracias a perfiles de temperatura y corriente obtenidos por sondas XBT, y del correntímetro instalado en el barco.

En septiembre y octubre de 2015, se instaló una cadena de termistores en el talud continental occidental del mar de Alborán, a una profundidad de 150 m (TH, en Fig. 1). Esta cadena constaba de 35 sensores de temperatura colocados cada 3 m. Durante este tiempo, se llevó a cabo una campaña oceanográfica a bordo del buque oceanográfico Sarmiento de Gamboa, en donde se adquirieron perfiles CTD (*Conductivity, Temperature and Depth*) en dos periodos diferentes.

Tab. i. Información los fondeos. T, E y A son los perfiladores de corriente fondeados en Tarifa y en el este del estrecho de Gibraltar, respectivamente (triángulos rojos en la Fig. 1). TH corresponde al fondeo de termistores (triángulo azul invertido en la Fig. 1).

Fondeo	Posición		Tiempo de adquisición		# días	Profundidad (m)	Intervalo de muestreo
	Latitud (°N)	Longitud (°W)	Inicio (UTC)	Final (UTC)			
T3	35,96	5,55	29.Abr.2003 - 14:43	22.May.2003 - 23:02	22	90	2'
T4			29.Abr.2003 - 14:43	22.May.2003 - 23:02	22	140	2'
E1	36,06	5,17	01.May.2003 - 09:32	13.May.2003 - 09:16	12	60	2'
E2			01.May.2003 - 09:32	22.May.2003 - 23:02	21	90	2'
E3			01.May.2003 - 09:32	22.May.2003 - 23:02	21	120	2'
A	36,17	5,21	11.Oct.2011 - 13:49	12.Oct.2011 - 12:50	1	14	2'
TH	36,29	5,16	08.Sep.2015 - 09:09	08.Oct.2015 - 11:49	30	38-140	1'

La intensidad del flujo de entrada atlántico se evaluó con el sistema de antenas HFR, localizado en el estrecho de Gibraltar. Estos datos fueron analizados coincidiendo con el periodo del fondeo de la cadena de termistores TH, así como para el periodo de mayo a octubre de 2023 para analizar la presencia de solitones en el área de cobertura del sistema. Estos datos se convinaron con imágenes de SAR, y de concentración de Chl-*a* superficial (productos L3 y L4), de distintos satélites.

Finalmente, se realizaron simulaciones numéricas con el modelo UCA3D para corroborar la llegada de ondas internas en la plataforma. Se trata de un modelo 3D, no-lineal, baroclinico, no hidrostático con coordenadas cartesianas y niveles sigma (Álvarez et al., 2011). El modelo se forzó en las fronteras este y oeste (Fig. 1a) con la onda de marea M_2 , y con un flujo baroclinico constante superior de 1.19 Sv dirigido

hacia el este, e inferior de 1.14 Sv dirigido hacia el oeste (García-Lafuente et al., 2002b).

3. RESULTADOS

A partir de los registros de mayo de 2003, se estudió el viaje de solitones internos desde su liberación en CS hasta el este del Estrecho. Estos solitones fueron detectados en el fondeo T (MT) a 18.52 km de CS, mostrando oscilaciones de temperatura y velocidad 3.30 y 3.43 horas después de su liberación para los primeros y segundos eventos, respectivamente. En el fondeo E (ME), ubicado a 54.45 km de distancia, se observaron estas ondas 5.75 y 5.40 horas después de su paso por T. En promedio, los solitones tardaron 4.50 horas en llegar al fondeo T desde CS, pero este tiempo varió entre mareas vivas (~ 4 horas) y mareas muertas (~ 6.50 horas). Esta diferencia se atribuye a los menores máximos de corriente hacia el este durante las mareas muertas, que oscilaron entre 0.40-0.60 m/s.

El tiempo medio de viaje entre los fondeos T y E, separados por 35.93 km, fue de 6.30 horas, indicando un desplazamiento promedio de 1.56 m/s. Este tiempo también varió entre mareas vivas (~ 6 horas) y mareas muertas (~ 8 horas).

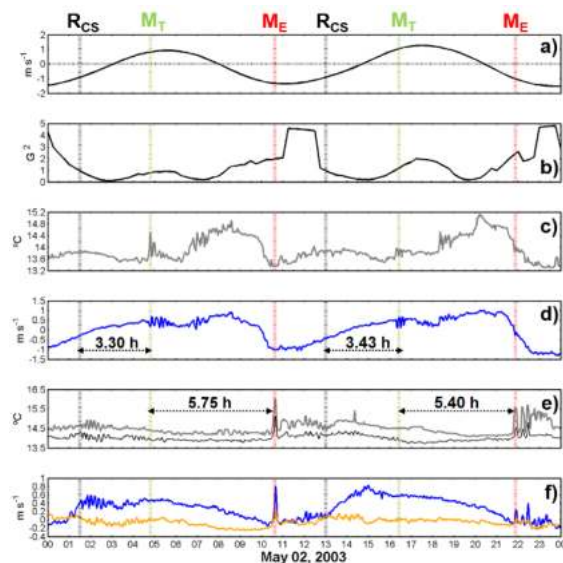


Fig. 2. Series temporales de las diferentes variables utilizadas en la identificación de solitones internos al pasar por los fondeos desplegados en Tarifa (T) y al este del Estrecho (E).

Los solitones llegan al fondeo TH (70.46 km de distancia a CS, Fig. 3e) de manera regular, identificándose a lo largo de la isoterma correspondiente a la AMI durante septiembre y octubre de 2015 (Tab. i). Durante este período, hubo un calentamiento significativo en la capa superior del agua y la AMI se hundió por debajo de los 90 m de profundidad. Los vientos zonales mostraron predominancia hacia el oeste durante estos días, con la posición más superficial de la interfaz correlacionada con vientos del este previos.

El tiempo promedio de viaje de los solitones desde ER hasta TH fue de aproximadamente 11 horas, sin diferencias notables entre mareas vivas y muertas. La Fig. 3 ilustra cómo se identificaron y rastrearon los solitones internos en ER durante este período, utilizando mapas de corrientes superficiales derivados por HFR. Estos solitones interactúan con la corriente y Chl-a superficial, observándose que los solitones detectados con SAR se alinean con la dirección y velocidad de la corriente medida por HFR, así como con altas concentraciones de Chl.

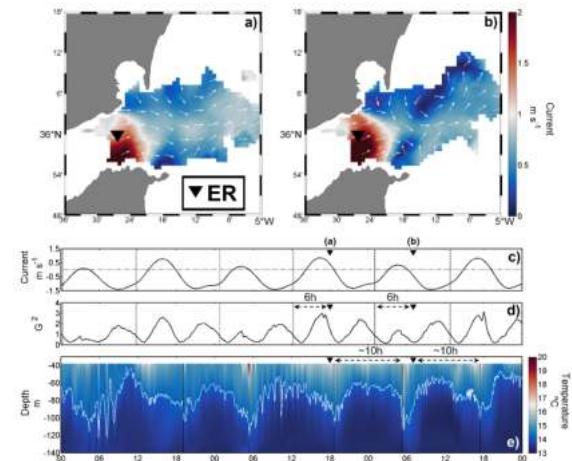


Fig. 3. (a, b) Mapas de velocidad de corriente superficial para el 12 de septiembre de 2015, 18:00 UTC, y para el 13 de septiembre de 2015, 07:00 UTC. (c) Predicción de corriente de marea sobre el Umbral de Camarinal (CS) (m/s). (d) Estimación del número de Froude interno (G^2). (e) Variabilidad vertical de la temperatura ($^{\circ}C$) de la cadena de termistores desplegada en TH. La línea blanca marca la posición de la AMI ($14.20\ ^{\circ}C$). Las líneas punteadas verticales negras en (c) y (d) indican el tiempo predicho para la liberación de solitones internos desde CS ($G^2 < 1$), y en (e) indican la llegada de solitones al fondeo TH.

Finalmente, utilizando el modelo UCA3D, se simuló el paso de trenes de solitones internos a lo largo del Estrecho. Se observó que estos solitones generaban pulsos de alta intensidad de corriente horizontal (como en HFR). La simulación permitió también estimar los tiempos de viaje de los solitones desde su lugar de generación en CS hasta la posición de los diferentes fondeos en el mar de Alborán. Se determinó que los solitones tardaban aproximadamente 10 horas en llegar al fondeo E, 20 horas en llegar al fondeo TH, y se observaron tiempos intermedios en los fondeos T y ER.

4. CONCLUSIONES

En este estudio, se examinó la presencia de solitones internos en el estrecho de Gibraltar y el Mar de Alborán utilizando diversos datos y modelado numérico. Los solitones detectados sobre la plataforma continental del mar de Alborán (TH) parecen originarse en las ondas internas generadas en el lado de sotavento de CS durante la fase oeste de la corriente de marea. La secuencia temporal de llegada de los solitones en el talud del mar de Alborán

muestra un ciclo quincenal evidente en la regularidad y amplitud de las llegadas. Durante las mareas vivas, los solitones llegan con mayor regularidad y amplitud que durante las mareas muertas. Además, durante estas últimas, hay una notable variación diurna en la predicción de las corrientes de marea sobre CS.

Los tiempos de llegada registrados de los solitones en el fondeo TH varían entre 14 horas durante las mareas vivas y 20 horas durante las mareas muertas. Esta variabilidad quincenal en los tiempos de viaje se atribuye principalmente a los máximos valores de la corriente máxima de marea hacia el este durante las mareas vivas. Sin embargo, para entender completamente esta variabilidad, es crucial considerar la influencia subinercial atmosféricamente forzada que afecta tanto al flujo a través del Estrecho como a las estructuras mesoescalares del mar de Alborán.

Agradecimientos

Este estudio fue apoyado por el Plan Nacional de Investigación de España a través del proyecto MEGAN: CTM2013-49048, y OCASO (0223_OCASO_5_E) del Programa Interreg VA España-Portugal (POCTEP) 2014-2020.

REFERENCIAS

- Álvarez, Ó., González, C.J., Mañanez, R., López, L., Bruno, M., Izquierdo, A., Gómez-Enri, J., Forero, M. (2011). Analysis of short-period internal waves using wave induced surface displacement: A three-dimensional model approach in Algeciras Bay and the Strait of Gibraltar. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116, C12033.
- Armi, L., Farmer, D.M. (1985). The international hydraulics of the Strait of Gibraltar and associated sills and narrows. *Oceanologica Acta*, 8, 37-46.
- Armi, L., Farmer, D.M. (1988). The flow of Mediterranean water through the Strait of Gibraltar. *Progress in Oceanography*, 21, 41-82.
- Bray, N.A., Ochoa, J., Kinder, T.H. (1995). The role of the interface in exchange through the Strait of Gibraltar. *Journal of Geophysical Research*, 100, 10.755-10.776.
- Criado-Aldeanueva, F., Soto-Navarro, F.J., García-Lafuente, J. (2012). Seasonal and interannual variability of surface heat and freshwater fluxes in the Mediterranean Sea: Budgets and exchange through the Strait of Gibraltar. *International Journal of Climatology*, 32, 286-302.
- García-Lafuente, J., Delgado, J., Vargas, J.M., Vargas, M., Plaza, F., Sarhan, T. (2002a). Low-frequency variability of the exchanged flows through the Strait of Gibraltar during CANIGO. *Deep-Sea Research II*, 49, 4051-4067.
- García-Lafuente, J., Álvarez-Fanjul, E., Vargas, J.M., Ratsimandresy, W. (2002b). Subinertial variability in the flow through the Strait of Gibraltar. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 107, C10, 32-1-31-9.
- Izquierdo, A., Tejedor, L., Sein, D.V., Backhaus, J.O., Brandt, P., Rubino, A., Kagan, B.A. (2001). Control Variability and Internal Bore Evolution in the Strait of Gibraltar: A 2-D Two-Layer Model Study. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 53, 637-651.
- Macías, D., García-Gorriz, E., Stips, A. (2016). The seasonal cycle of the Atlantic Jet dynamics in the Alboran Sea: direct atmospheric forcing versus Mediterranean thermohaline circulation. *Ocean Dynamics*, 66, 137-151.
- Millot, C. (2009). Another description of the Mediterranean Sea outflow. *Progress in Oceanography*, 82, 101-124.
- Oguz, T., Mourre, B., Tintoré, J. (2017). Modulation of frontogenetic plankton production along a meandering jet by zonal wind forcing: An application to the Alboran Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122, 8, 6594-6610.
- Pistek, P., La Violette, P.E. (1999). Observations of the suppression of tide-generated nonlinear internal wave packets in the Strait of Gibraltar. *Journal of Marine Systems*, 20, 113-128.
- Sánchez-Garrido, J.C., García-Lafuente, J., Criado-Aldeanueva, F., Baquerizo, A., Sannino, G. (2008). Time-spatial variability observed in velocity of propagation of the internal bore in the Strait of Gibraltar. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 113, 1-6.
- Sannino, G., Bargagli, A., Artale, V. (2014). Numerical modeling of the semidiurnal tidal exchange through the Strait of Gibraltar. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 109, 1-23.
- Vázquez, A., Bruno, M., Izquierdo, A., Macías, D., Ruiz-Cañavate, A. (2008). Meteorologically forced subinertial flows and internal wave generation at the main sill of the Strait of Gibraltar. *Deep-Sea Research I*, 55, 10, 1277-1283.
- Vázquez, A., Flecha, S., Bruno, M., Macías, D., Navarro, G. (2009). Internal waves and short-scale distribution patterns of chlorophyll in the Strait of Gibraltar and Alboran Sea. *Geophysical Research Letters*, 36, 23.
- Watson, G., Robinson, I.S. (1990). A study of internal wave propagation in the Strait of Gibraltar using shore-based marine radar images. *Journal of Physical Oceanography*, 20, 374-394.

Tidal and Subtidal Hydrodynamics and Residual Transport in Port Foster (Deception Island, Antarctica)

O. A. Caballero-Martínez (1,2), M. Díez-Minguito (1,2), C. Zarzuelo-Romero (2,3), A. Tovar-Sánchez (4), I. E. Huertas-Cabilla (4), G. Navarro-Almendros (4)

- (1) Dpto. de Mecánica de Estructuras e Ingeniería Hidráulica, Universidad de Granada, 18071 Granada, España.
- (2) Instituto Interuniversitario del Sistema Tierra en Andalucía (IISTA-UGR), 18006 Granada, España.
- (3) Dpto. Ingeniería Gráfica, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla, 41092 Sevilla, España
- (4) Dpto. de Ecología y Gestión del Litoral, Instituto de Ciencias del Mar de Andalucía (ICMAN), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), 11519 Puerto Real, España

Correo de contacto: oacm0001@ugr.es

Resumen: La circulación en Isla Decepción se encuentra afectada por distintos agentes. Entre todos ellos está la marea, que ocasiona variaciones en el nivel del mar y circulaciones inducidas por estas. A través de un modelo numérico complejo y calibrado se ha determinado que las elevaciones del nivel en la zona de estudio presentan un comportamiento mixto predominantemente semidiurno y sincrónico, con rangos de marea próximos a 2 metros. Respecto a las corrientes, en los Fuelles de Neptuno estas alcanzan valores de 0.8 m/s mientras que en el interior de Puerto Foster la velocidad decae en al menos un orden de magnitud debido a la morfología de la cuenca. Estos cambios en la velocidad se reflejan directamente en el transporte residual por asimetrías mareales, manifestándose en los Fuelles de Neptuno con una mayor relevancia entre la M2 con las componentes diurnas, mientras que en el interior este es despreciable.

Palabras clave: análisis armónico, corriente mareal, Isla Decepción, marea, transporte residual

1. INTRODUCCIÓN

Isla Decepción (63°00'S, 60°40'O) es una de las muchas islas pertenecientes al archipiélago de las islas Shetland del Sur, en el Estrecho de Bransfield (Fig. 1). Se trata de una de las zonas antárticas que presentan una mayor importancia a nivel ecológico del planeta, puesto que es una zona volcánica e hidrotermal muy activa, viéndose muy afectada por un alto dinamismo (Morley et al., 2020). La isla en cuestión se trata de un estratovolcán con un perímetro de 14 km y forma de herradura, la cual se generó por el hundimiento de la caldera, ocasionando así la formación de la bahía interior llamada Puerto Foster, donde se alcanzan profundidades de hasta 190 m. La única conexión entre esta y el Estrecho de Bransfield es a través de un canal conocido como Fuelles de Neptuno, que tiene aproximadamente 550 m de ancho en su punto más estrecho y una profundidad reducida llegando a alcanzar los 11 m.

Diferentes factores influyen en la hidrodinámica de bahías y otras cuencas semicerradas. Entre estos factores se encuentran el viento, los gradientes de densidad y las mareas. Estas últimas, en particular, son causadas por las fuerzas gravitacionales de la Luna y el Sol sobre la Tierra, lo que provoca movimientos periódicos del agua.

Pese a la suma importancia en el ecosistema general de Isla Decepción, existen pocos estudios que traten

de forma profunda y detallada la hidrodinámica y la circulación en esta zona de interés multidisciplinar. Es por ello que este estudio se centra en estudiar la marea como uno de los principales forzamientos en la circulación de Puerto Foster empleando para ello modelado numérico y datos observados. A nivel mareal se pretenden determinar las principales constituyentes mareales que afectan a la variación del nivel del mar y de las corrientes mareales, calcular las elipses de marea y comparar los resultados obtenidos con los de otros autores. A nivel submareal, se pretende determinar el transporte residual calculado por asimetrías entre componentes armónicos.

2. DESARROLLO

Para la toma de datos se emplearon una variedad de instrumentos distribuidos a lo largo del perímetro de Puerto Foster durante la primera campaña de DICHOSO (Fig. 1). Se emplearon para ello 6 mareógrafos perimetrales y un correntímetro localizado en los Fuelles de Neptuno. Estos equipos estuvieron en funcionamiento desde el 20 de febrero hasta el 20 de marzo de 2024. Adicionalmente, se contó con datos de elevaciones procedentes de la boya del Instituto Hidrográfico de la Marina (Ministerio de Defensa Español), desde el 20 de enero al 20 de marzo de 2024. Por otra parte, se ha utilizado en el modelado numérico la batimetría de Puerto Foster procedente también del Instituto Hidrográfico de la Marina, con una resolución de 10 x 10 m².

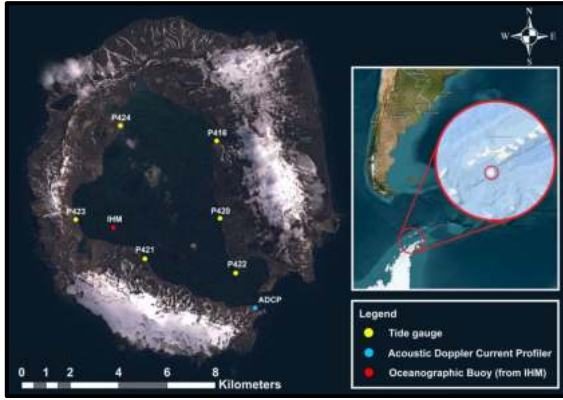


Fig. 1. Localización de Isla Decepción y ubicación de los equipos de medición utilizados.

Tras obtener los datos, se aplicó a los mismos un filtro de paso-bajo, a fin de preservar la energía mareal y eliminar los efectos meteorológicos (Licate et al., 2017). A continuación, se utilizó un análisis armónico estándar (SHA) en los datos filtrados (Losada et al., 2017), mediante la herramienta T_TIDE de Matlab de Pawlowicz et al. (2002).

Respecto al modelo hidrodinámico, se utilizó el programa Delft3D con el módulo de ondas largas (Flow module), que calcula la propagación de ondas mediante las ecuaciones tridimensionales de Navier-Stokes y de transporte. El modelo cuenta con 313 x 463 celdas de 23 x 38 m² cada una. Solo se ha considerado el forzamiento de mareas, despreciando viento y gradiente de densidad, y se ha incluido el efecto de Coriolis. Además, el modelo se ha promediado en profundidad.

Para la calibración del modelo se ha utilizado una metodología basada en la propuesta por Elias y Hansen (2013). Primero, se impone una fuerza de marea como condición de contorno en uno de los límites del modelo, definida por los 9 armónicos predominantes, los cuales fueron obtenidos con un modelo regional de alta resolución. Posteriormente, el modelo se calibra mediante la modificación del coeficiente de Chézy y de viscosidad turbulenta horizontal, así como la condición de rugosidad de los bordes (Zarzuelo et al., 2015). Después, los datos proporcionados por el modelo se comparan con las observaciones, tanto de elevaciones como de corrientes.

El mejor ajuste obtenido fue con un coeficiente de rugosidad de Chézy en ambas direcciones de 40 m^{1/2}/s, un coeficiente de viscosidad turbulenta horizontal de 1 m²/s y una condición de contorno de deslizamiento parcial con una longitud de rugosidad de 0,5 m, con un time-step de 6 segundos. Estos parámetros son constantes en todo el mallado del modelo.

En relación con las elevaciones, el coeficiente de correlación R entre los datos registrados por el ADCP y el modelo son mayores que 0.99, lo que indica que el modelo produjo las variaciones del nivel con una

precisión razonable (Veerapaga et al., 2019). En cuanto a las corrientes, correlaciones son algo menores (R=0.825 para la componente este-oeste; R=0.901 para la componente norte-sur).

Respecto al transporte residual por asimetría de los principales constituyentes mareales, se toma como base la teoría de Bagnol (1963) en la que el transporte de sedimento de fondo debido al movimiento producido por la marea es proporcional a U³, considerando una velocidad umbral nula para el movimiento de sedimentos. Teniendo esto en consideración, el transporte residual debido a una corriente constante cuando se integra respecto a un número infinito de ciclos de marea vivas-muertas es:

$$\begin{aligned}\bar{Q} &\propto U_{\infty}^3 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{u} |\mathbf{u}|^2 dt \\ &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T (u^3 + u \cdot v^2, v^3 + v \cdot u^2) dt \quad (1)\end{aligned}$$

siendo \mathbf{u} el vector velocidad, cuyas componentes son la este-oeste u , y la norte-sur v .

Siguiendo los trabajos de Hoitink et al. (2003) y Guo et al. (2016), se han considerado las constituyentes mareales M2, S2, K1, O1, M4 y MSf para determinar el transporte producido por la asimetría mareal de la interacción entre las componentes diurnas, semidiurnas y el sobre-armónico principal M4 con la constituyente semidiurna principal M2. Estas componentes tienen en cuenta una parte significativa de la asimetría en aguas poco profundas y que influyen en la magnitud y dirección del transporte residual.

3. RESULTADOS

Tras calibrar el modelo, se realizó una simulación general de una duración de 6 meses para estudiar tanto la variación del nivel como las corrientes a lo largo de un periodo prolongado en el tiempo.

En referencia con las elevaciones, se ha determinado un rango mareal que puede llegar a superar los 2 metros, con una mayor influencia de la componente semidiurna en la variación del nivel.

En la Fig. 2 se puede observar la variación de amplitud y fase para la componente predominante semidiurna M2, junto con la K1 como una de las constituyentes diurnas más influyentes. Se puede apreciar como los valores de las amplitudes y fases son prácticamente constantes a lo largo de toda la cuenca, para componentes diurnas y semidiurnas. En la Tab. i se comprueba que los valores entre las diferentes componentes presentan el mismo orden de magnitud, aunque destaca por encima del resto la M2.

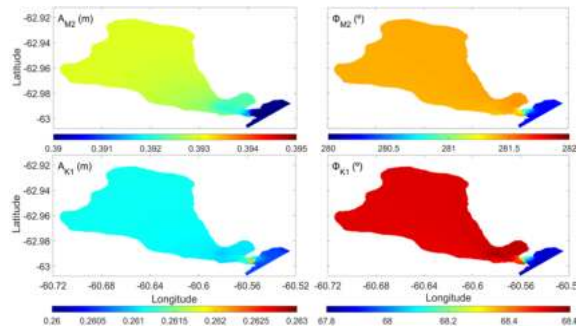


Fig. 2. Distribución espacial de las amplitudes y fase de las elevaciones para la componente M2 y K1 en Puerto Foster.

Respecto a las corrientes en Puerto Foster, dentro de la cuenca el flujo presenta velocidades inferiores a 2 cm/s. En contraste, en los Fuelles de Neptuno las corrientes alcanzan valores un orden de magnitud mayor. En el centro del canal, donde la profundidad es mayor, las velocidades superan los 80 cm/s, mientras que en los laterales la velocidad se reduce a menos de la mitad.

El análisis armónico de los datos del modelo, mostrado en la Fig. 3, indica que los ejes de la elipse de marea en las componentes diurnas llegan a ser entre 3 y 7 veces menores que en el caso de las componentes semidiurnas, tanto en el interior de Puerto Foster como en los Fuelles de Neptuno. Asimismo, se observa que, para los armónicos predominantes, los ejes mayores de la elipse en el canal tienen una inclinación similar a la dirección de las corrientes. En la Tab. i igualmente se muestran los valores de las componentes armónicas predominantes para la velocidad proyectada en la dirección este-oeste.

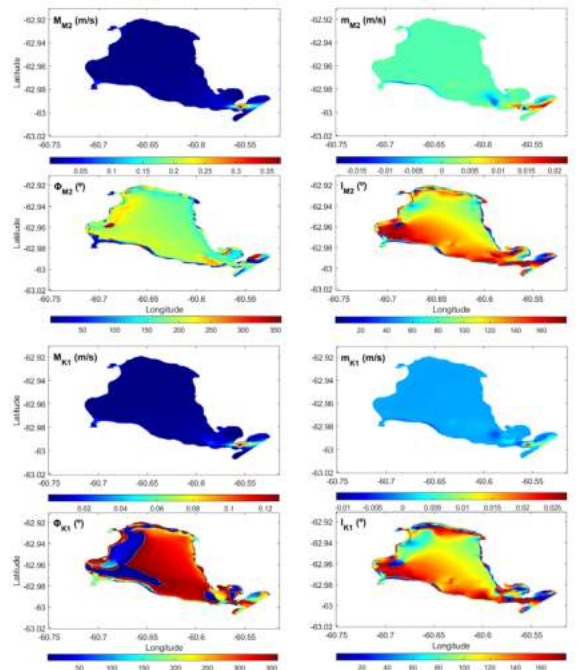


Fig. 3. Componentes de la elipse para la constituyente M2 (figuras superiores) y K1 (figuras inferiores). M_x es el eje mayor, m_x es el eje menor, ϕ es la fase e I es la inclinación de la elipse.

Tab. i. Valores de amplitudes y fases de las constituyentes principales para las elevaciones y corriente en la dirección predominante Este-Oeste. Los valores de la corriente están referidos a un punto central de los Fuelles de Neptuno.

Const.	Elevación		Corriente (E-O _{dir})	
	A (m)	Φ (°)	A (m/s)	Φ (°)
M2	0.391	281.19	0.337	13.13
S2	0.212	352.65	0.189	74.55
K1	0.210	80.18	0.117	160.48
O1	0.271	51.20	0.110	143.81

En referencia al transporte residual por asimetría de marea entre la principal componente M2 y el resto de constituyentes, se determina que el valor en los Fuelles de Neptuno llega a ser del orden de una constante q multiplicada por 10^{-3} (considerando densidad usual de sedimento, el transporte potencial residual sería del orden de 10^{-7} m³/m). Sin embargo, en el interior de Puerto Foster los valores del transporte residual son varios ordenes de magnitud inferiores, como se observa en la Fig. 4.

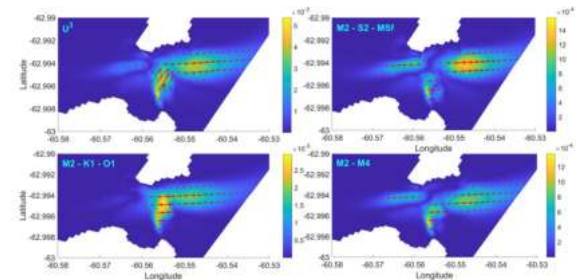


Fig. 4. Valor proporcional del transporte residual total en los Fuelles de Neptuno y valor del transporte entre componentes semidiurnas, diurnas y sobre-armónico principal respecto a la M2.

4. CONCLUSIONES

Analizando los resultados obtenidos, respecto a las elevaciones, se puede observar un comportamiento mixto con una predominancia semidiurna (factor de forma $F=0.85$). Además, la cuenca también presenta un comportamiento sincrónico, ya que la masa de agua se eleva en su totalidad de forma prácticamente constante en el tiempo. Esto es debido a que la fricción en el interior de la cuenca y los efectos de convergencia tienen poca relevancia dada la geometría de la misma y a las grandes profundidades que esta presenta (Valle-Levinson, 2022).

Respecto a la corriente mareal, se encuentra muy influenciada por la morfología de la bahía, dado que en el interior de la bahía donde las secciones transversales aumentan mucho por la anchura de la cuenca, el flujo se desplaza a escasa velocidad. Por el contrario, en los Fuelles de Neptuno, debido a la constricción topográfica existente, se produce una aceleración del mismo. Este incremento de la velocidad ocasiona directamente un aumento del transporte residual entre componentes mareales.

Comparando los resultados de elevación y velocidad del flujo se determina que las ondas en el interior de la bahía se comportan de forma estacionaria, al haber

un desfase entre ambas series de datos de 90°. Por lo tanto, el comportamiento de Puerto Foster se puede asociar en la propagación al de un estuario corto (Valle-Levinson, 2010).

Tras comparar los resultados obtenidos con los otros autores (de modelos y observados) (Vidal et al., 2011; Figueiredo et al., 2018) se observa ciertas discrepancias, las cuales se deben tanto a diferentes equipos utilizados para la calibración con los datos observados, como a la ubicación de los mismos y, sobre todo, diferentes periodos considerados (tanto en número total de días simulados al poder separar armónicos, como en la fecha de registro por el grado de influencia de las constituyentes mareales de mayores periodos).

Por otro lado, aunque las corrientes muestran un comportamiento predominantemente semidiurno, en el transporte residual las componentes diurnas K1 y O1 tienen mayor importancia debido a los desfases con la componente M2. No obstante, solo en los Fuelles de Neptuno se produce un transporte residual relevante, dadas las velocidades de la corriente alcanzadas, mientras que en el interior de la bahía se puede considerar despreciable.

Agradecimientos

Esta investigación se realizó gracias al proyecto DICHOSO, con referencia: PID2021-125783OB-I00, financiado por el MCIN y con fondos FEDER.

REFERENCIAS

Artículos en revistas:

- Bagnold, R., 1963. Mechanics of marine sedimentation. *The sea* 3, 507–528.
- Elias, E.P., Hansen, J.E., 2013. Understanding processes controlling sediment transports at the mouth of a highly energetic inlet system (san francisco bay, ca). *Marine Geology* 345, 207–220
- Figueiredo, D., Dos Santos, A., Mateus, M., Pinto, L., 2018. Hydrodynamic modelling of port foster, deception island, antarctica. *Antarctic Science* 30, 115–124.
- Fretzdorff, S., Smellie, J., 2002. Electron microprobe characterization of ash layers in sediments from the central bransfield basin (antarctic peninsula): evidence for at least two volcanic sources. *Antarctic Science* 14, 412–421.
- Guo, L., van der Wegen, M., Wang, Z.B., Roelvink, D., He, Q., 2016. Exploring the impacts of multiple tidal constituents and varying river flow on long-term, large-scale estuarine morphodynamics by means of a 1-d model. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 121, 1000–1022.
- Hoitink, A., Hoekstra, P., Van Maren, D., 2003. Flow asymmetry associated with astronomical tides: Implications for the residual transport of sediment. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 108.
- Lenn, Y.D., Chereskin, T., Glatts, R., 2003. Seasonal to tidal variability in currents, stratification and acoustic backscatter in an antarctic ecosystem at deception island. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 50, 1665–1683.
- Licate, L.A., Dusek, G., Huang, L., 2017. A comparison of datums derived from co-ops verified data products and tidal analysis datum calculator.
- Losada, M., Díez-Minguito, M., Reyes-Merlo, M., 2017. Tidal-fluvial interaction in the gadalquivir river estuary: Spatial and frequency-dependent response of currents and water levels. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 122, 847–865.
- Morley, S. A., Abele, D., Barnes, D. K., Cárdenas, C. A., Cotté, C., Gutt, J., ... & Constable, A. J. (2020). Global drivers on southern ocean ecosystems: changing physical environments and anthropogenic pressures in an earth system. *Frontiers in Marine Science*, 7, 547188.
- Pawlowicz, R., Beardsley, B., Lentz, S., 2002. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in matlab using t tide. *Computers & geosciences* 28, 929–937.
- Veerapaga, N., Azhikodan, G., Shintani, T., Iwamoto, N., Yokoyama, K., 2019. A three-dimensional environmental hydrodynamic model, fantom-refined: Validation and application for saltwater intrusion in a meso-macrotidal estuary. *Ocean Modelling* 141, 101425.
- Zarzuelo, C., Díez-Minguito, M., Ortega-Sánchez, M., López-Ruiz, A., Losada, M. A., 2015. Hydrodynamics response to planned human interventions in a highly altered embayment: The example of the bay of Cádiz (Spain). *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 167, 75–85.

Libros:

- Valle-Levinson, A. (Ed.). (2010). *Contemporary issues in estuarine physics*. Cambridge University Press.
- Valle-Levinson, A. (Ed.). (2022). *Introduction to estuarine hydrodynamics*. Cambridge University Press.

Flujo de Intercambio Total en el Estuario del Guadalquivir

M. Díez-Minguito y H. Burchard

(1) Universidad de Granada, Instituto Interuniversitario del Sistema Tierra en Andalucía (IISTA-UGR), Granada, España. mdiezm@ugr.es

(2) Leibniz Institute for Baltic Sea Research Warnemünde, Physical Oceanography and Instrumentation, Rostock, Alemania

Resumen: El marco de análisis TEF (Total Exchange Flow) calcula el flujo de intercambio en los estuarios utilizando coordenadas isohalinas. El TEF es un paradigma para estimaciones del flujo de intercambio y que permite cuantificar los niveles de mezcla en estuarios consistentes con los valores teóricos de Knudsen (en estado estacionario). Asimismo, permite separar flujos de agua y de salinidad tanto de entrada como de entrada y salida. Este estudio proporciona estimaciones preliminares del TEF a lo largo del estuario del río Guadalquivir en siete secciones transversales notables en condiciones de aguas bajas. El análisis combina observaciones registradas entre 2008 y 2011 por una red de monitorización en tiempo real y resultados de modelos analíticos para un flujo de marea M2+M4 bien mezclados con salinidad oscilante. Se calculan los perfiles de intercambio y los transportes de volumen y salinidad clasificados por clases de salinidad.

Palabras clave: Circulación Estuarina, Estuario, Guadalquivir, Isohalina, Total Exchange Flow

1. INTRODUCCIÓN

El estuario del río Guadalquivir (EGR) es un estuario de llanura costera situado en el suroeste de la Península Ibérica. El ERG comprende los últimos 110 km del río Guadalquivir, desde la presa de cabecera en la localidad de Alcalá del Río hasta Sanlúcar de Barrameda, donde sus aguas desembocan en el Golfo de Cádiz en el Océano Atlántico (Fig.1). El estuario es convergente con secciones transversales aproximadamente decrecientes de forma exponencial desde la desembocadura hasta el extremo hacia tierra. Su profundidad media en el *thalweg*, $h \sim 7$ m, se mantiene mediante el dragado periódico del canal de navegación.

Las mareas son mesomareales y semidiurnas, siendo el M2 la constituyente más significativa. El estuario es *flood-dominant*, como lo demuestran las diferencias de fase de marea entre M2 y su primera sobremarea M4 (Díez-Minguito et al., 2012). La propagación mareal está dominada por la fricción en los tramos inferiores del estuario. En la parte superior la dinámica está dominada por la reflexión mareal en la presa de cabecera de Alcalá del Río (Díez-Minguito et al., 2012; Sirviente et al., 2023). Además, el transporte debido a la covarianza M2 y M4 de velocidad de corriente y sedimento en suspensión explica el establecimiento de Máximos de Turbidez Estuarina en el ERG (Díez-Minguito et al., 2014).

El clima en la mayor parte de la cuenca del Guadalquivir es Mediterráneo. El régimen de descargas está muy condicionado por la extensa regulación de la cuenca aguas arriba. Los vertidos de agua dulce desde la presa de Alcalá del Río suelen ser inferiores a $Qr = 40 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, siendo lo más frecuente

unos $Qr = 25 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. La salinidad disminuye desde la desembocadura aguas arriba debido al aporte de agua dulce. Las condiciones mesomareales junto con los valores relativamente bajos de Qr hacen que el estuario sea marealmente energético y esté bien mezclado (parcialmente mezclado cerca de la desembocadura) en términos de salinidad durante los caudales bajos del río. Así lo confirman los bajos valores del número de Richardson estuarino (Díez-Minguito et al., 2013).

En este sistema prototipo de estuario estrecho, de baja estratificación y elevada turbidez se evalúa el Flujo de Intercambio Total (TEF por sus siglas en inglés) en condiciones de aguas bajas (no avenidas). El TEF representa un paradigma que permite calcular el flujo de intercambio en estuarios utilizando coordenadas isohalinas. El volumen neto promediado en el ciclo de marea y el transporte de masa a través de una sección transversal estuarina se obtienen ordenados por clases de salinidad (MacCready, 2011; Burchard et al., 2019). Entre sus características destaca que el TEF permite cuantificar de forma natural la mezcla integrada en el volumen, que a su vez controla los flujos de entrada y salida de agua y salinidad.

2. METODOLOGÍA

El modelo mareal oscilatorio y bien-mezclado ideado por Burchard et al., (2019) se extiende para incluir la contribución de la constituyente mareal M4. Esto requiere la prescripción en cada localización de amplitudes y fases tanto de la M2 como de la M4, tanto en corrientes como en salinidad, así como de la corriente media (asociada a la descarga fluvial) y la salinidad media. El modelo extendido se aplica al estuario del Guadalquivir para estimar el TEF por

primera vez en varias secciones transversales (véase Fig.1), próximas a la desembocadura.

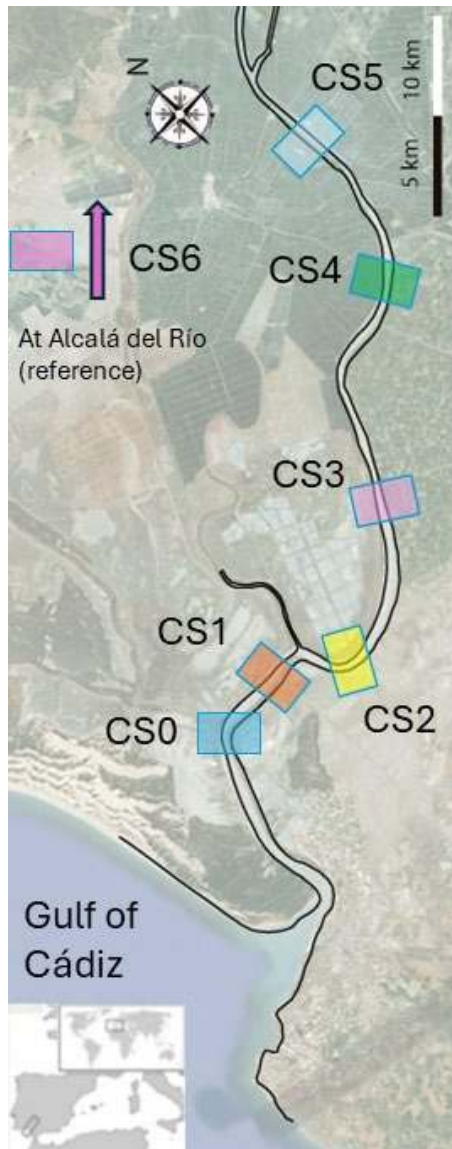


Fig. 1. Mapa de la zona de estudio. Los datos de este trabajo se obtienen de correntímetros perfiladores ADCPs y sondas de calidad ambiental o CTDs en las secciones transversales que se identifican mediante CS. Se estima TEF en cada una de esas secciones.

Haciendo uso del modelo mareal bien-mezclado que incluye las constituyentes M2 y M4 para corrientes y salinidad, el flujo de volumen promedio-mareal por clases de salinidad en una sección transversal dada con salinidad s mayor que un valor de salinidad dado S se calcula según el marco de análisis TEF como

$$Q(S) = \overline{\int_{A(s \geq S)} u dA}, \quad (1)$$

donde la barra indica promedio-mareal en un ciclo semidiurno M2, u es la corriente longitudinal al cauce y normal a la sección transversal A . El perfil de intercambio de flujo de agua por clases de salinidad

en una sección dada se obtiene de la Ecuación (1) como

$$q(S) = \frac{\partial Q(S)}{\partial S}, \quad (2)$$

donde se verifica $Q = \int_{s \geq S} q(s) ds$.

Para realizar las estimaciones de la TEF en el ERG, las medidas de campo de alta resolución de las corrientes u y la salinidad s a lo largo del canal en siete secciones transversales notables fueron la base del análisis. Las observaciones fueron registradas automáticamente entre 2008 y 2011 por una red de monitorización en tiempo real (Navarro et al., 2011).

A partir de las observaciones se determinaron mediante análisis armónico de las series temporales las amplitudes y las fases M2 y M4 de corrientes y salinidad en cada ubicación tanto para la componente M2 como para la M4. Una vez caracterizadas corriente y salinidad como suma de los armónicos M2 y M4 se introdujeron en la Ecuación (1) para determinar los perfiles del transporte de volumétrico $Q(S)$ y, obtenidas estas, mediante la Ecuación (2) se obtuvieron los perfiles de intercambio $q(S)$ clasificados por perfiles de salinidad en cada sección transversal CS (Fig.1), incluyendo a modo de referencia la sección de la presa de cabecera en Alcalá del Río, que es el límite mareal aguas arriba. A la escala de este estudio y en condiciones de aguas bajas, el estuario puede considerarse razonablemente próximo a las condiciones de equilibrio en el que el transporte residual de sal es nulo.

3. RESULTADOS

Los flujos de volumen y los perfiles de intercambio clasificados por clases de salinidad se calculan localmente en diferentes secciones transversales a lo largo de la ERG. Las corrientes mareales y la salinidad se obtienen a partir del modelo de flujo de marea oscilante y bien mezclado extendido.

La Fig.2 muestra el flujo de volumen isohalino $Q(S)$ (líneas continuas) y el perfil de intercambio $q(S)$ (líneas de puntos) en función de la salinidad en las secciones transversales CS_i . En general, a medida que la marea se propaga río arriba hacia partes de menor salinidad e intensidad de la corriente mareal, los valores de $Q(S)$ y $q(S)$ se reducen. Así, los mayores flujos de volumen $Q(S)$ se observan en las secciones transversales de la parte inferior del estuario, es decir, en $CS1$ y $CS0$, donde las corrientes de marea son mayores. El perfil de intercambio se estructura en dos capas en todas las localizaciones, mostrando así un flujo de entrada de agua q_{in} a mayor salinidad y un flujo de salida a menor salinidad q_{out} .

Los transportes de volumen de agua entrante y saliente son aproximadamente un 10% mayores que las estimaciones anteriores basadas únicamente en la circulación gravitacional (Reyes-Merlo et al., 2013). El mayor transporte neto de volumen de agua entrante, unos 300 m³s⁻¹, se alcanza en la parte baja del estuario, cerca de donde se observa el mayor gradiente de salinidad. Este valor es aproximadamente 12 veces el caudal normal del río desde la presa de cabecera de Alcalá del Río. Su correspondiente valor representativo de salinidad aparente del TEF es de 20 psu, mientras que el valor representativo de los caudales de salida en el mismo lugar es de unos 16 psu.

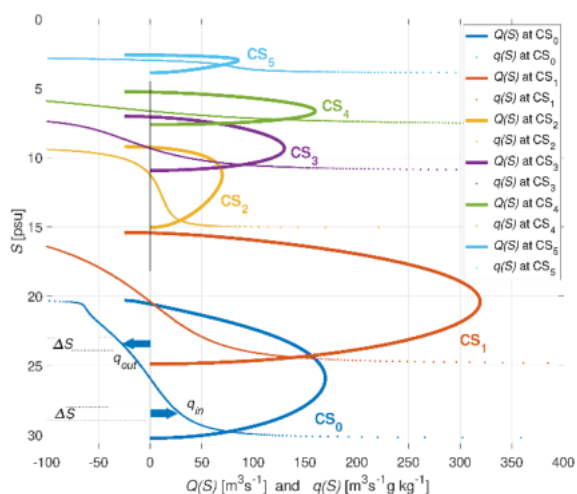


Fig. 2. Los flujos de volumen $Q(S)$ (curvas sólidas) y los perfiles de intercambio (curvas punteadas) $q(S)$ ordenados por clases de salinidad se calculan en las secciones transversales CS_i . Nótese la inversión del eje vertical.

4. CONCLUSIONES

Se ha determinado el flujo de intercambio total (TEF) empleando coordenadas isohalinas en varias secciones notables en el Estuario del Guadalquivir en condiciones de aguas bajas. Esto ha permitido caracterizar el intercambio de masas de agua separando flujos de agua y de salinidad tanto de entrada como de salida y de salinidad. El análisis combina observaciones registradas entre 2008 y 2011 y resultados de modelos analíticos para un flujo de marea que incluye la consituyentes M2+M4, ambas relevantes para el transporte residual. Se han calculado los perfiles de intercambio y los transportes de volumen y salinidad clasificados por clases de salinidad. Los resultados indican que las estimaciones del TEF a lo largo del canal disminuyen aguas arriba. Los transportes de volumen de agua entrante y saliente son aproximadamente un 10% mayores que las estimaciones anteriores basadas únicamente en la circulación gravitacional. El mayor transporte neto de volumen de agua entrante, unos 300 m³s⁻¹, se alcanza en la parte baja del estuario, cerca de donde se observa el mayor gradiente de salinidad. Este valor es

aproximadamente 12 veces el caudal normal del río desde la presa de cabecera de Alcalá del Río. Su correspondiente valor representativo de salinidad aparente del TEF es de 20 psu, mientras que el valor representativo de los caudales de salida en el mismo lugar es de unos 16 psu.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por Junta de Andalucía – Consejería de Universidad, Investigación e Innovación – Proyecto EPICOS ProyExcel_00375.

REFERENCIAS

- Burchard, H., Lange, X., Klingbeil, K., and MacCready, P. (2019) Mixing estimates for estuaries. *Journal of Physical Oceanography*, 49, 631–648, 2019. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-18-0147.1>
- Diez-Minguito, M., Baquerizo, A., Ortega-Sánchez, M., Navarro, G. y Losada, M. Á. (2012). Tide transformation in the Guadalquivir estuary (SW Spain) and process-based zonation. *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)* 117(C3). <https://doi.org/10.1029/2011JC007344>
- Diez-Minguito, M., Contreras, E., Polo, M. J. y Losada, M. Á. (2013). Spatio-temporal distribution, Along-channel transport, and post-riverflood recovery of salinity in the Guadalquivir estuary (SW Spain). *Journal of Geophysical Research: Oceans* 118.5, 2267–2278. <https://doi.org/10.1002/jgrc.20172>
- Diez-Minguito, M., Baquerizo, A., Swart, H. E. de y Losada, M. Á. (2014). Structure of the turbidityfield in the Guadalquivir estuary: Analysis of observations and a box model approach. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 119.10, 7190–7204. <https://doi.org/10.1002/2014JC010210>
- MacCready, P. (2011). Calculating estuarine exchange flow using isohaline coordinates. *Journal of Physical Oceanography*, 41, 1116–1124. <https://doi.org/10.1175/2011JPO4517.1>
- Navarro, G., Gutierrez, F. J., Diez-Minguito, M., Losada, M. A., and Ruiz, J.: Temporal and spatial variability in the Guadalquivir Estuary: A challenge for real-time telemetry. *Ocean Dynamics*, 61, 753–765, 2011. <https://doi.org/10.1007/s10236-011-0379-6>
- Reyes-Merlo, M. Á., Diez-Minguito, M., Ortega-Sánchez, M., Baquerizo, A., & Losada, M. Á. (2013). On the relative influence of climate forcing agents on the saline intrusion in a well-mixed estuary: Medium-term Monte Carlo predictions. *Journal of Coastal Research*, (65), 1200–1205. <https://doi.org/10.2112/SI65-203.1>

Sirviente, S., Sánchez-Rodríguez, J., Gomiz-Pascual, J. J., Bolado-Penagos, M., Sierra, A., Ortega, T., Álvarez, Ó., Forja, J., & Bruno, M. (2023). A numerical simulation study of the hydrodynamic effects caused by morphological changes in the Guadalquivir River Estuary. *Science of The Total Environment*, 902, 166084. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166084>

Impactos de la variabilidad climática sobre la fenología del fitoplancton que habita las ecorregiones marinas españolas

M. Fernández-Barba (1) *, P. Almaraz (1), I.E. Huertas (1), G. Navarro (1)

(1) Departamento de Ecología y Gestión Costera, Instituto de Ciencias Marinas de Andalucía (ICMAN), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), 11519 Puerto Real, Cádiz, España. * manuel.fernandez@csic.es

Resumen: Las tendencias del cambio climático están alterando la fenología del fitoplancton (es decir, la magnitud y la temporalidad de las floraciones) a nivel global. Sin embargo, menos se conoce en las regiones costeras, donde los eventos extremos están siendo la nueva normalidad. En este trabajo, se analizaron cambios espaciotemporales en la fenología del fitoplancton a lo largo de las ecorregiones marinas españolas, a partir de datos satelitales de alta resolución de clorofila-a. En general, se obtuvieron floraciones menos intensas, que se iniciaron y terminaron antes durante los últimos años. La menor reproducibilidad del ciclo estacional confirmó los cambios en las dinámicas fenológicas en los años recientes. Además de la tendencia a largo plazo, se puso de manifiesto la importancia de la variabilidad climática induciendo cambios dinámicos en las floraciones, evidenciada en el análisis de causalidad entre profundidad de capa de mezcla, olas de calor marinas y vientos extremos sobre clorofila-a.

Palabras clave: Fenología, Fitoplancton, Variabilidad Climática, Inferencia Causal.

1. INTRODUCCIÓN

Comprender la dinámica de la bomba biológica de carbono y su respuesta a los cambios climáticos es esencial para predecir alteraciones a largo plazo en el ciclo global del carbono (C) y evaluar los impactos de las emisiones de CO₂ antropogénico sobre los ecosistemas marinos (Behrenfeld et al., 2016; Henson et al., 2010). Las tendencias del cambio climático están transformando significativamente los ecosistemas marinos superficiales, que cubren el 70% de la superficie terrestre y representan el 50% de la producción primaria mundial (Cael et al., 2023; Dutkiewicz et al., 2019). Junto con la tendencia a largo plazo, impactos de la variabilidad climática en forma de eventos extremos, como las olas de calor marinas (MHWs, por sus siglas en inglés), están alterando la estructura ecológica y el funcionamiento de estos ecosistemas, mediante la modificación de las redes tróficas y el flujo de energía (Gomes et al., 2024).

Disrupciones en la temperatura oceánica superficial (SST, por sus siglas en inglés), en el suministro de nutrientes, en la estabilidad de la capa de mezcla (MLD) y en la disponibilidad de luz (Hutchins y Tagliabue, 2024), tienen la capacidad de alterar la fenología de las floraciones de fitoplancton (es decir, la estacionalidad y la magnitud de las floraciones; Fig. 1a), lo que en última instancia causa desajustes en la cadena alimentaria y variaciones en el secuestro de carbono a nivel global (Henson et al., 2018). Discernir tendencias globales en las comunidades fitoplanctónicas ha sido un reto debido a las limitadas observaciones. Con el avance de la era satelital y la intercalibración de sensores de color oceánico, numerosos estudios han investigado sobre la fenología del plancton, tanto a nivel global (Henson

et al., 2018; Nicholson et al., 2024; Racault et al., 2012) como regional (Navarro et al., 2012; Salgado-Hernanz et al., 2019; Thomalla et al., 2023); con un consenso general de que las floraciones están variando como consecuencia de un océano más cálido y estratificado. Sin embargo, pocos estudios se han centrado en regiones costeras, donde las condiciones ambientales complejas y los impactos antropogénicos más pronunciados significativamente modulan la dinámica fitoplanctónica (Ferreira et al., 2021).

En este trabajo, se usan datos satelitales de alta resolución de clorofila-a (chl-a) para analizar cambios espaciotemporales en la fenología del fitoplancton a lo largo de las cinco Demarcaciones Marinas Españolas (DMEs) definidas para cumplir con la Directiva Marco de Estrategia Marina (DMEM) (Fig. 1b). Además, se exploran relaciones causales entre cambios dinámicos en las floraciones de fitoplancton y alteraciones en forzamientos físicos como consecuencia de la variabilidad climática. Ser capaces de predecir las respuestas de las comunidades fitoplanctónicas ante un clima cambiante es fundamental para anticipar impactos socioeconómicos bajo escenarios futuros, sobre todo en zonas costeras.

2. DESARROLLO

2.1. Áreas de estudio

Las regiones de estudio fueron las DMEs definidas en el marco de la DMEM, para asegurar su buen estado medioambiental: Canaria (CAN), Noratlántica (NA), Sudatlántica (SA), Estrecho de Gibraltar y mar de Alborán (AL) y Levantino-Balear (BAL) (Fig. 1b). Los contornos de estas ecoregiones pueden descargarse libremente en <https://www.miteco.gob.es>.

2.2. Datos

Los índices fenológicos se calcularon a partir de observaciones multisatelitales (L4) diarias de alta resolución (1 km) de chl-a, desde 1998 hasta 2023, derivadas del procesador Copernicus-GlobColour (<https://doi.org/10.48670/moi-00289>). Los datos diarios (1982-2023) de SST se derivaron de dos reanálisis multisatelitales (L4): (i) IBI (<https://doi.org/10.48670/moi-00153>), para las demarcaciones peninsulares; y (ii) ESA SST CCI & C3S (<https://doi.org/10.48670/moi-00169>), para CAN. La resolución espacial de ambos es de 5 km. La profundidad de la MLD se obtuvo diariamente (1998-2023) del reanálisis GLORYS12V1 (<https://doi.org/10.48670/moi-00021>), a resolución espacial de ~8.3 km. En cuanto a los datos de viento, se obtuvieron (1998-2023) del producto de Copernicus (<https://doi.org/10.48670/moi-00185>) que combina observaciones de dispersómetros con modelado numérico (ERA-5), ofreciendo un producto horario a 12.5 km de resolución espacial.

Todos los datos se interpolan bilinealmente a las coordenadas de los datos de chl-a. Además, los datos de viento se promediaron a intervalos diarios.

2.3. Metodología

La estimación de los índices fenológicos de inicio y final de floración, así como del valor máximo de chl-a durante la floración principal (Figs. 1b-c), se llevó a cabo a partir de datos suavizados de chl-a (promedio móvil de 24 días), siguiendo la metodología establecida por Henson et al. (2018) (Fig. 1a). Además, se definió la métrica de chl-a acumulada (biomasa total acumulada durante el ciclo estacional), que tiene en cuenta la concentración de chl-a tanto de la floración principal como de las secundarias (si las hubiese). También, se estableció la reproducibilidad del ciclo estacional (SCR) como el coeficiente de correlación de Pearson entre el ciclo estacional anual y el ciclo estacional climatológico. A diferencia que para el resto de métricas, para el cálculo del SCR no se suavizó la serie de chl-a. Para analizar cambios en los índices fenológicos a lo largo del periodo de estudio, se representó la diferencia entre promedios anuales (últimos 13 años menos los primeros 13 años).

Para investigar posibles respuestas de la fenología del fitoplancton a cambios mensuales atípicos en los forzamientos físicos, se calculó el número de días de MHWs a lo largo de cada mes (Fernández-Barba et al., 2024). Es decir, los días en los que la SST fue anormalmente cálida, siguiendo los criterios establecidos por Hobday et al. (2016). Además, se caracterizó una métrica (VentExt) que tiene en cuenta las altas velocidades de viento, definida como el número de días a lo largo de un mes en los que las velocidades del viento promedio son superiores al percentil 75 de la distribución climatológica (basada en el periodo 1998-2023), siguiendo a Thomalla et al. (2023).

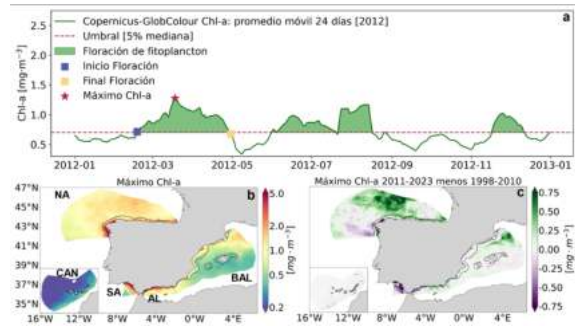


Fig. 1. Fenología del fitoplancton en las ecorregiones marinas españolas. (a) Representación esquemática de los índices fenológicos, (b) promedio (1998-2023) del máximo de chl-a durante la floración principal y (c) diferencia entre promedios del máximo de chl-a. La línea negra delimita la zona costera (profundidad oceánica < 200 m).

Adicionalmente, se calculó el máximo mensual de MLD para cada píxel oceánico a lo largo del periodo 1998-2023. Una vez preparadas las variables físicas, se utilizó modelado empírico dinámico (EDM) para explorar interacciones causales entre la fenología del fitoplancton y la variabilidad climática. Mediante este método, se puede analizar la dinámica no lineal de una variable de estado (métrica fenológica, llámese X) a partir de la dinámica observada de otra variable (impulsor físico, Y). Concretamente, se aplicó la técnica de mapeo cruzado convergente (CCM; Sugihara et al., 2012), que permite evaluar causalidad al medir como de buena es Y para predecir el estado de X . Esta predicción solo sería factible si Y tiene un impacto causal en X .

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Fig. 2 se muestran algunos de los índices fenológicos a lo largo de las DMEs. En promedio, el fitoplancton comenzó a florecer en marzo-mayo en zonas costeras, y en enero-febrero en zonas más oceánicas (Fig. 2a); lo cual es coherente en regiones templadas (Henson et al., 2018; Salgado-Hernanz et al., 2019). Si bien en zonas costeras más dinámicas (p.e., de afloramientos) se observaron floraciones comenzando durante los primeros meses de verano, el final de la floración no se extendió hasta más allá de la estación estival (Fig. 2c). Es importante destacar que, en general, el fitoplancton está floreciendo cada vez más pronto y terminando su floración también cada vez más pronto (Figs. 2b y 2d), lo cual puede ser debido a la tendencia del calentamiento a largo plazo. La biomasa total de chl-a acumulada durante el ciclo estacional fue mayor en zonas costeras más someras (Fig. 2e) y donde hay un mayor aporte continental de nutrientes. Generalmente, se observó una menor producción acumulada durante los últimos 13 años, aunque hubo algunas excepciones en zonas más sensibles a procesos a corto plazo (p.e., rías gallegas o golfo de León) (Fig. 2f).

Precisamente en estas zonas más dinámicas, las floraciones fitoplanctónicas presentaron una mayor variabilidad estacional (menor r ; Fig. 2g). Estos resultados, junto con una predominancia a una menor SCR durante los últimos años (Fig. 2h), sugieren que

las comunidades fitoplanctónicas que habitan amplias zonas de las ecorregiones marinas españolas están evolucionando para reflejar cambios en el grado de variabilidad ambiental.

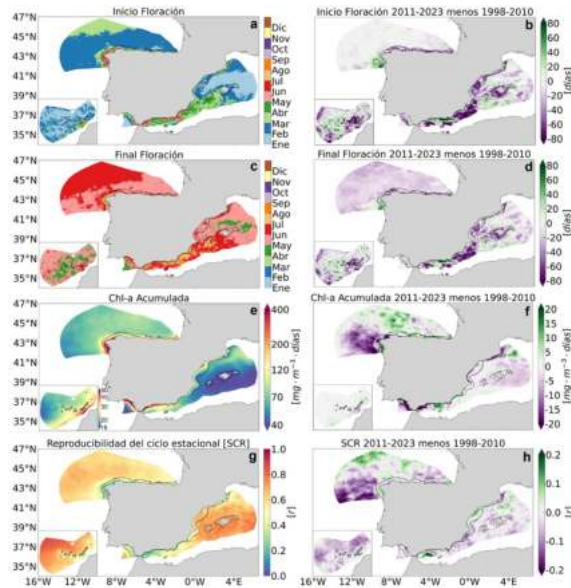


Fig. 2. (a, c, e, g) Promedios anuales (1998-2023) y (b, d, f, h) diferencias entre promedios (últimos 13 años menos primeros 13 años) de las métricas fenológicas en las ecorregiones marinas españolas.

Los cambios fenológicos suelen reflejar el impacto integrado de un conjunto de procesos físicos, químicos y biológicos concurrentes; que pueden ser sinérgicos o antagónicos, y con un alto grado de no linealidad bajo un clima cambiante (Cael et al., 2023; Hutchins y Tagliabue, 2024). Todo ello hace que sea desafiante atribuir tendencias observadas en las características estacionales a un mecanismo específico; mucho más a partir de una simple correlación. Por ello, en la Fig. 3 analizamos la causalidad entre variables físicas representativas de la variabilidad climática (máxima MLD durante evento de MHW y días mensuales de viento extremo) y alteraciones en las concentraciones de chl-a como proxy de biomasa de fitoplancton en ubicaciones concretas para cada DMEs. La manera de interpretar ‘Max Chl-a xmap Max MLD durante MHW’ (o ‘Max Chl-a xmap VentExt’) sería la siguiente: como cambios en la capa de mezcla durante eventos de MHW (o en los días de vientos extremos) permiten predecir la dinámica de los máximos de chl-a durante la floración principal. En aquellos meses en los que no ocurrieron MHW se tuvo en cuenta simplemente la máxima MLD a lo largo del mes. En CAN, se observaron habilidades predictivas muy elevadas y más o menos homogéneas para los cambios en la MLD durante MHWs (Fig. 3a), lo que significa que el cambio es predecible tanto a menores como a mayores escalas temporales. Sin embargo, VentExt mostró un máximo de predictibilidad para retardos de entre 2 y 4 meses (Fig. 3b). Esto es coherente con la naturaleza pulsante de las velocidades de viento, afectando sobre la intensidad de la floración fitoplanctónica en CAN. En las ubicaciones costeras

atlánticas (NA y SA; Figs. 3c-f), se obtuvieron habilidades predictivas muy similares, con las variaciones en la MLD dominando la dinámica estacional del sistema (Figs. 3c y 3e) y una menor importancia en el viento (Figs. 3d y 3f) (nótese que son coordenadas concretas; VentExt quizás adquiera mayor importancia en otros puntos de estas demarcaciones).

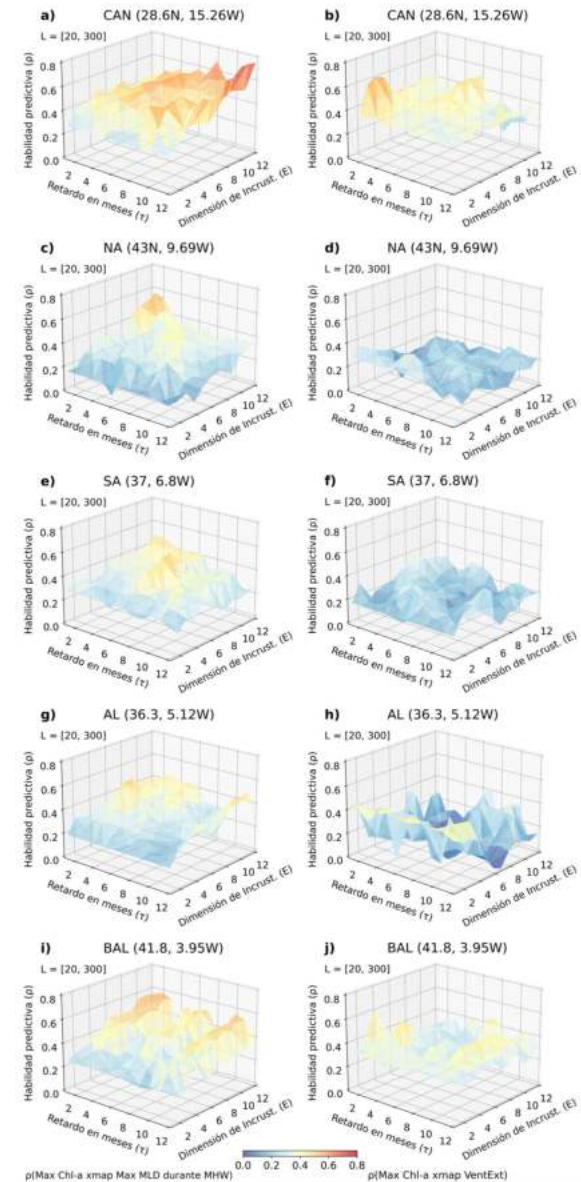


Fig. 3. Inferencia causal entre series temporales de (a, c, e, g, i) máxima MLD durante días de MHWs y (b, d, f, h, j) días de viento extremo (VentExt) sobre los máximos de chl-a en las DMEs.

En la ubicación occidental de AL, la relación entre la máxima MLD durante un evento térmico extremo y la máxima chl-a durante la floración fue más predecible con un retardo de pocos meses y una dimensión de incrustación intermedia (Fig. 3g). Las velocidades de viento parecen jugar un papel más importante en la dinámica de las floraciones también a menores escalas temporales (Fig. 3h) con la mayor variabilidad en las habilidades predictivas sugiriendo una relación altamente sensible a las condiciones del sistema, característica de sistemas con fuerte no

linealidad (Sugihara et al., 2012). Por último, se destacan las elevadas habilidades predictivas en la ubicación de BAL, escogida en el exterior del Golfo de León (Figs. 3i-j). Aquí, las condiciones atmosféricas y la estructura de la columna de agua influyen críticamente sobre la formación de aguas profundas y por tanto sobre la dinámica fenológica de los productores primarios (Salgado-Hernanz et al., 2019). Los resultados del CCM evidenciaron el acoplamiento no lineal existente en las condiciones físicas cambiantes y la dinámica espaciotemporal de las comunidades fitoplanctónicas que habitan las DMEs (Fig. 3).

4. CONCLUSIONES

Nuestro estudio reveló cambios espaciotemporales en la fenología del fitoplancton a lo largo de las DMEs. Concretamente, se observaron floraciones fitoplanctónicas que comienzan y terminan antes durante los últimos años, coherente con las tendencias del calentamiento oceánico. Además, aunque la biomasa de chl-a incrementó en ciertas zonas costeras con altos aportes de nutrientes, en general disminuyó en los últimos 13 años. La evolución de los productores primarios con la tendencia climática quedó manifestada con la menor reproducibilidad de su ciclo estacional.

Los resultados del CCM evidenciaron empíricamente estrechas relaciones causales no lineales entre la variabilidad climática (medida en MHWs, MLD y VentExt) y las dinámicas espaciotemporales de las floraciones fitoplanctónicas en las ecorregiones marinas españolas. La capacidad predictiva de los cambios estacionales en las comunidades fitoplanctónicas es crucial para la gestión y conservación de los ecosistemas marinos bajo escenarios presentes y futuros de cambio climático.

Agradecimientos

Esta investigación está financiada por la Unión Europea -NexGenerationEU- como parte del programa del MITECO para el Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia español (Mecanismo de Recuperación y Resiliencia de la Unión Europea establecido por el Reglamento (EU) 2020/2094), y está asignada al CSIC, AZTI, SOCIB y las universidades de Vigo y Cádiz.

REFERENCIAS

Behrenfeld, M., O'Malley, et al. (2016). Revaluating ocean warming impacts on global phytoplankton. *Nature Climate Change* 6, 323–330.

Cael, B.B., Bisson, K, et al. (2023). Global climate-change trends detected in indicators of ocean ecology. *Nature* 619, 551–554.

Dutkiewicz, S., Hickman, et al. (2019). Ocean colour signature of climate change. *Nature Communications* 10, 578.

Fernández-Barba, M., Huertas, I. E., & Navarro, G.

(2024). Assessment of surface and bottom marine heatwaves along the Spanish coast. *Ocean Modelling*, 102399.

Ferreira, A., Brotas, V., et al. (2021). Assessing phytoplankton bloom phenology in upwelling-influenced regions using ocean color remote sensing. *Remote Sensing*, 13(4), 675.

Gomes, D.G.E., Ruzicka, J.J., et al. (2024). Marine heatwaves disrupt ecosystem structure and function via altered food webs and energy flux. *Nature Communications* 15, 1988.

Henson, S. A., Sarmiento, J. L., et al. (2010). Detection of anthropogenic climate change in satellite records of ocean chlorophyll and productivity. *Biogeosciences*, 7(2), 621-640.

Henson, S. A., Cole, H. S., et al. (2018). Detection of climate change-driven trends in phytoplankton phenology. *Global Change Biology*, 24(1), e101-e111.

Hobday, A. J., Alexander, L. V., et al. (2016). A hierarchical approach to defining marine heatwaves. *Progress in oceanography*, 141, 227-238.

Hutchins, D.A., Tagliabue, A. (2024). Feedbacks between phytoplankton and nutrient cycles in a warming ocean. *Nature Geosciences*. 17, 495–502.

Navarro, G., Caballero, I., et al. (2012). Seasonal-to-interannual variability of chlorophyll-a bloom timing associated with physical forcing in the Gulf of Cádiz. *Advances in Space Research*, 50(8), 1164-1172.

Nicholson, S. A., Ryan-Keogh, T. J., et al. (2024). Observed global ocean phytoplankton phenology indices. *Earth System Science Data Discussions*, 2024, 1-19.

Racault, M. F., Le Quéré, C., et al. (2012). Phytoplankton phenology in the global ocean. *Ecological Indicators*, 14(1), 152-163.

Salgado-Hernanz, P.M., Racault, M.F., et al. (2019). Trends in phytoplankton phenology in the Mediterranean Sea based on ocean-colour remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 221, 50-64.

Sugihara, G., May, R., et al. (2012). Detecting causality in complex ecosystems. *Science*, 338(6106), 496-500.

Thomalla, S. J., Nicholson, S. A., et al. (2023). Widespread changes in Southern Ocean phytoplankton blooms linked to climate drivers. *Nature Climate Change*, 13(9), 975-984.

Vulnerabilidad del Patrimonio Cultural Litoral frente a agentes ambientales: impacto del Cambio Climático (VOLICHE)

Autores: C. Ferrero-Martín (1), A. Izquierdo (1), M. Bethancourt (2) and T. Fernández-Montblanc (3)

- (1) Departamento de Física Aplicada, Universidad de Cádiz, Cádiz, España. *carmen.ferrero@uca.es*
- (2) Departamento de Ciencias de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica y Química Inorgánica, Universidad de Cádiz, Cádiz, España.
- (3) Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Cádiz, Cádiz, España.

Resumen:

El proyecto VOLICHE se centra en evaluar el riesgo del patrimonio cultural (PC) situado en el litoral andaluz frente a las condiciones ambientales actuales y valorar el impacto del cambio climático (CC) en la conservación de estos bienes.

La evaluación del riesgo del PC se basa en la definición de índices de riesgo calculados para cada ubicación específica según las principales amenazas, las características ambientales y los bienes arqueológicos. Para el PC emergido, nos centraremos en los peligros costeros erosión e inundación con base en los cambios cuantificados impuestos por el CC en valores extremos de velocidad del viento, oleaje y nivel del mar. Para el PC sumergido, se evaluarán los efectos de los procesos físicos, químicos y biológicos que intervienen en la degradación/conservación de los yacimientos arqueológicos subacuáticos. Con este conocimiento, se crearán mapas de riesgos para las condiciones actuales y se analizarán los cambios según los escenarios climáticos.

Palabras clave: cambio climático, patrimonio cultural emergido, patrimonio cultural sumergido.

1. INTRODUCCIÓN

Desde tiempos prehistóricos el litoral ha sido un lugar privilegiado para el asentamiento humano. Prueba de ello es la gran densidad de patrimonio cultural (PC) que se localiza en él. Estas zonas costeras se caracterizan por su gran dinamismo, provocado por un importante número de procesos naturales de diferentes escalas espaciotemporales, muchos de los cuales son específicos de estas áreas donde factores atmosféricos, continentales y marinos interactúan entre sí. Por consiguiente, los procesos que contribuyen a la formación de un yacimiento y que condicionan su estado son complejos y surgen resultantes de la interacción permanente de multitud de agentes que actúan, ya sea simultánea o secuencialmente sobre materiales de muy distinta naturaleza.

Los procesos que tienen lugar en los yacimientos sumergidos pueden ser de naturaleza física, química y biológica, regulados principalmente por tres agentes: el agua, los sedimentos y los organismos vivos (Gregory et al., 2009). Por otro lado, el PC emergido se encuentra amenazado por los efectos fisicoquímicos de los contaminantes atmosféricos y las condiciones meteorológicas, pero también está expuesto al impacto del mar debido a inundaciones episódicas, salpicaduras, o también el aerosol marino que puede penetrar tierra adentro dependiendo de las condiciones de viento y oleaje. Una amplia gama de

los mencionados procesos se está viendo exacerbados por el cambio climático (CC), así como por diversas actividades humanas (Kapsomenakis et al., 2022).

La conservación del PC es crucial pues se trata de un bien que aporta respuestas de nuestro pasado. Esto es especialmente importante considerando que, según todas las proyecciones de CC, los impactos más significativos se esperan en zonas costeras (IPCC, 2022), lo que plantea graves retos para nuestro PC durante el próximo siglo (Fatorić y Seekamp, 2017).

Por estos motivos, el objetivo principal de este proyecto es evaluar el riesgo del PC emergido y PC sumergido bajo las condiciones ambientales actuales y valorar el impacto del CC en la conservación in situ de los bienes culturales del litoral andaluz, una zona caracterizada por la alta densidad y el extraordinario valor del patrimonio cultural y donde el turismo costero es un factor clave en el sector socioeconómico. El carácter innovador de este proyecto radica en un desarrollo metodológico que permite cuantificar por primera vez el impacto del cambio climático en el patrimonio cultural ubicado en el litoral.

2. DESARROLLO

Para la evaluación del riesgo del PC se elaborarán índices de riesgo que permitan cuantificar el impacto de las variables que juegan un papel clave en el deterioro de los materiales que conforman los yacimientos, teniendo en cuenta los cambios

impuestos por el CC. Estos índices tendrán en cuenta el tipo de material, sus procesos de degradación y estarán directamente relacionados con las características del oleaje y la hidrodinámica, el transporte de sedimentos y las características fisicoquímicas, geoquímicas y biológicas. Por consiguiente, el riesgo del PC se calcula en función de la vulnerabilidad y el peligro.

Una evaluación completa del riesgo requiere una cuantificación de la exposición de cada uno de los yacimientos. Este alto nivel de información raramente está disponible a escala local o regional. Por lo tanto, asumiremos valores de exposición similares para todos los yacimientos sumergidos. Para definir el grado de vulnerabilidad se recurrirá al juicio de expertos con conocimientos locales en oceanografía y conservación para el PC sumergido y para el caso del PC emergido al estar muy bien documentados se utilizará esta información para la evaluación de su vulnerabilidad.

Para el caso del PC emergido, nos centraremos en los daños físicos derivados de las inundaciones, la erosión/acreción y la carga eólica (Mattei et al., 2019). Mientras que para evaluar los múltiples factores que impactan en el PC sumergido se evaluarán los riesgos en función de su naturaleza: degradación física, química y biológica.

Tras obtener estos indicadores, se pretende elaborar mapas de riesgos para las condiciones actuales y se analizarán los cambios según los escenarios climáticos (RCP 4.5 y RCP 8.5). De esta forma, se identificará el PC amenazado por el impacto del CC. Este conocimiento ayudará a diseñar medidas de adaptación y mitigación de los impactos del CC en el PC litoral.

Esta evaluación se llevará a cabo a tres escalas espaciales. La escala regional se corresponde con la costa andaluza. Esta elección se debe a la gran densidad de PC que posee la zona y a que esta área incluye zonas con características oceanográficas diferentes. La escala local se corresponde a las bahías de Cádiz y Algeciras por su gran valor arqueológico. Asimismo, se han seleccionado dos yacimientos para la aplicación de los modelos predictivos de largo plazo. Como ejemplo de PC sumergido se ha elegido el Fougueux, un navío francés de 74 cañones hundido tras la batalla de Trafalgar en 1805. Este yacimiento sigue conservando abundantes restos de madera del casco, y material metálico, principalmente hierro fundido de la artillería y revestimiento de cobre. En segundo lugar, como ejemplo de PC emergido, se ha elegido Baelo Claudia, una ciudad-factoría romana situada en el estrecho de Gibraltar destruida por un terremoto en el siglo III d.C.

3. RESULTADOS

La evaluación de los peligros de inundación y erosión para el PC emergido se llevará a cabo teniendo en cuenta el aumento del nivel del mar, los cambios en la intensidad y/o frecuencia de los temporales marítimos y el viento. Las variaciones del nivel total del mar en la costa son principalmente el resultado del efecto combinado de las mareas astronómicas, los cambios en los componentes de masa y termostéricos, la fuerza mecánica atmosférica a través del viento y los efectos de la presión atmosférica, y los cambios en la circulación oceánica y el *runup* de olas. Estos diferentes términos se calcularán utilizando modelos numéricos para las condiciones presentes y futuras. Para evaluar los efectos de las olas en la costa se propagará el oleaje de aguas profundas hacia aguas someras y se calculará el *runup* para un conjunto de condiciones: perfil de playa y condiciones del oleaje cercanas a la costa. Este enfoque nos permite un cálculo preciso del *runup* de olas para un gran conjunto de ubicaciones. En los modelos hidrodinámicos se utilizarán perfiles modificados para tener en cuenta los cambios a largo plazo en la topobatemetría debido a las variaciones a largo plazo.

Para el caso del PC sumergido, la evaluación del peligro de degradación química y biológica se estudiará analizando el impacto de la temperatura, salinidad, el pH y la concentración de oxígeno disuelto en los bienes culturales. Estas variables fisicoquímicas son obtenidas del Modelo Oceánico del Instituto Max Planck (MPIOM) y del modelo del ciclo del carbono oceánico de Hamburgo (HAMOCC), los cuales forman parte del modelo regional atmosférico (ROM; Sein et al., 2015). Para evaluar cuantitativamente los impactos debidos a cambios graduales y aquellos debidos a eventos extremos se generarán índices de peligro y se ponderarán según su importancia basada en el juicio de expertos en la conservación de estos bienes.

La degradación física del PC sumergido se analizará a partir de los impactos del oleaje, uno de los principales elementos que afectan a su preservación y evolución en áreas de aguas poco profundas (Fernández-Montblanc et al., 2016; Quinn, 2006). Las olas generan tres peligros fundamentales para la preservación del PC sumergido a largo plazo: descontextualización, socavación y erosión por abrasión (Fernández-Montblanc et al., 2022). Para su evaluación se utilizan proyecciones de olas forzadas por cinco modelos globales pertenecientes a CMIP5. Tras corregir estos datos para reducir los sesgos inherentes al uso de datos de un modelo global para un área de estudio local, el oleaje se propaga de aguas profundas a aguas poco profundas utilizando una reducción de escala (*downscaling*) híbrido (Camus et al., 2011). A continuación se evalúan los tres principales peligros siendo una metodología que adopta un enfoque respuesta (Garrity et al., 2007), donde la probabilidad de ocurrencia se calcula

directamente para el peligro sin hacer ninguna suposición sobre el factor desencadenante o las variables que gobiernan el peligro.

Tras la evaluación del peligro, se obtiene el índice de riesgo correspondiente a cada peligro. Para la evaluación de los cambios en el riesgo asociados al impacto del cambio climático se llevará a cabo una comparación entre el periodo de referencia (1980-2005) y los periodos de mitad de siglo (2035-2060) y finales de siglo (2074-2099) para los escenarios climáticos.

Los resultados muestran un aumento en el flujo de energía de las olas en profundidades menores a 10 m. Además, se proyecta un desplazamiento hacia el sur en la dirección de las olas en la bahía (Fig. 1).

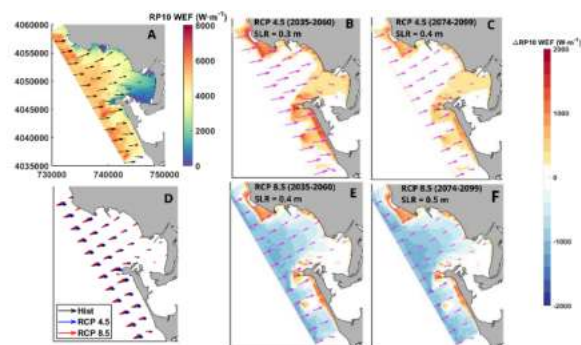


Figura 1. A) Flujo de energía de las olas (WEF) correspondiente al periodo de retorno de 10 años y la dirección media asociada con el percentil 99 del flujo de energía de las olas (flecha negra). Cambio absoluto y dirección media asociada con el percentil 99 del flujo de energía de las olas con el aumento del nivel del mar (flecha azul): B) periodo 2035-2060 del escenario RCP 4.5, C) periodo 2074-2099 del escenario RCP 4.5, E) periodo 2035-2060 del escenario RCP 8.5, F) periodo 2074-2099 del escenario RCP 8.5. El aumento del nivel del mar para cada periodo se indica en la esquina inferior izquierda. D) Dirección media asociada con el percentil 99 del flujo de energía de las olas para el periodo histórico (flecha negra), el final de siglo del escenario RCP 4.5 (flecha azul) y el final de siglo del escenario RCP 8.5 (flecha roja).

Los resultados para el riesgo del PC sumergido en la bahía de Cádiz debido a la degradación física muestran un aumento de los tres peligros en las zonas más someras. Estos cambios provocan un incremento en el número de yacimientos en riesgo de erosión por abrasión, con dos yacimientos adicionales en riesgo a mitad de siglo y uno más a finales de siglo para el escenario RCP 4.5 (Fig. 2).

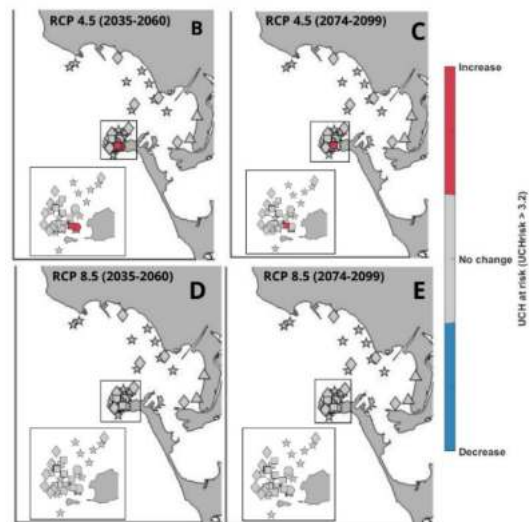


Figura 2. Riesgo de erosión por abrasión para los sitios de UCH ubicados en la Bahía de Cádiz. Cambio absoluto para: B) periodo 2035-2060 del escenario RCP 4.5, C) periodo 2074-2099 del escenario RCP 4.5, D) periodo 2035-2060 del escenario RCP 8.5, E) periodo 2074-2099 del escenario RCP 8.5 en comparación con el periodo histórico.

4. CONCLUSIONES

El cambio climático asociado al calentamiento global está causando el aumento del nivel del mar y cambios en la circulación oceánica y atmosférica. Estos cambios impactarán en las áreas costeras, donde se encuentran numerosos sitios de patrimonio cultural. El aumento del nivel del mar y los cambios en las características de las olas pueden modificar las formas de las playas, generando cambios en los peligros de erosión e inundación que afectan al patrimonio cultural emergido.

Los cambios graduales y las variaciones en la ocurrencia de eventos extremos de variables fisicoquímicas, como la temperatura, salinidad, pH y oxígeno disuelto, generará impactos en los bienes del patrimonio cultural sumergido. En este proyecto se desarrollará una metodología que permita evaluar los múltiples factores que influyen en el riesgo del patrimonio cultural sumergido.

Las proyecciones futuras del flujo de energía de las olas muestran un aumento en áreas poco profundas, debido al incremento del nivel del mar, en comparación con el periodo histórico. Estos cambios tienen varias repercusiones en los principales riesgos que amenazan al patrimonio cultural sumergido, como la descontextualización, la socavación y la erosión por abrasión. Los cambios en este último peligro generarán un aumento en el número de yacimientos que se encuentran en riesgo debido a su impacto.

Este proyecto proporciona una cuantificación del impacto del cambio climático en el riesgo del

patrimonio cultural situado en el litoral. Este estudio contribuye a mitigar una amenaza que podría borrar vestigios de la historia humana. Comprender los cambios en el riesgo sienta las bases para medidas efectivas y adaptativas para la conservación y preservación del patrimonio cultural en un contexto de cambio climático.

Agradecimientos

Este trabajo está financiado por el Plan Nacional de Investigación a través del proyecto VOLICHE (I+D+i Ref: PID2020-117812RB-I00).

REFERENCIAS

- Camus, P., Mendez, F.J., Medina, R., 2011. A hybrid efficient method to downscale wave climate to coastal areas. *Coast. Eng.* 58, 851–862. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.05.007>
- Fatorić, S., Seekamp, E., 2017. Are cultural heritage and resources threatened by climate change? A systematic literature review. *Clim. Change* 142, 227–254. <https://doi.org/10.1007/s10584-017-1929-9>
- Fernández-Montblanc, T., Bethencourt, M., Izquierdo, A., 2022. Underwater Cultural heritage risk assessment methodology for wave-induced hazards: The showcase of the Bay of Cadiz. *Front. Mar. Sci.* 9, 1005514. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.1005514>
- Fernández-Montblanc, T., Quinn, R., Izquierdo, A., Bethencourt, M., 2016. Evolution of a Shallow Water Wave-Dominated Shipwreck Site: Fougoux (1805), Gulf of Cadiz: WAVE-DOMINATED SHIPWRECK SITE, GULF OF CADIZ. *Geoarchaeology* 31, 487–505. <https://doi.org/10.1002/gea.21565>
- Garrity N. J., Battalio R., Hawkes P. J., Roupe D. (2007). Evaluation of event and response approaches to estimate the 100-year coastal flood for pacificcoast sheltered waters. *Coast. Eng.* 2006, World Scientific Publishing Company, 1651–1663. doi: 10.1142/9789812709554_0140
- IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., doi:10.1017/9781009325844.
- Kapsomenakis, J., Douvis, C., Poupkou, A., Zerefos, S., Solomos, S., Stavrakia, T., Melis, N.S., Kyriakidis, E., Kremlis, G., Zerefos, C., 2022. Climate change threats to cultural and natural heritage UNESCO sites in the Mediterranean. *Environ. Dev. Sustain.* <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02677-w>
- Mattei, G., Rizzo, A., Anfuso, G., Aucelli, P.P.C., Gracia, F.J., 2019. A tool for evaluating the archaeological heritage vulnerability to coastal processes: The case study of Naples Gulf (southern Italy). *Ocean Coast. Manag.* 179, 104876. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2019.104876>
- Quinn, R., 2006. The role of scour in shipwreck site formation processes and the preservation of wreck-associated scour signatures in the sedimentary record – evidence from seabed and sub-surface data. *J. Archaeol. Sci.* 33, 1419–1432. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2006.01.011>

Observatorio permanente del cambio climático a bordo del B/E JS ELCANO

**Autores: J.J. Gomiz-Pascual (1), S.R. Díaz Portillo (2), H. Martín León (3), B. Jiménez Barón (4),
M. Bruno Mejías (1).**

- (1) Departamento de Física Aplicada, Universidad de Cádiz. juanjesus.gomiz@gm.uca.es
- (2) Instituto Hidrográfico de la Marina.
- (3) B/E Juan Sebastián de Elcano.
- (4) National Institute of Water & Atmospheric Research Ltd.

Resumen: El proyecto Observatorio Permanente del Cambio Climático a bordo del B/E Juan Sebastián de Elcano nace como continuación del Proyecto Bandera 1519. Este primer proyecto se planteó, dentro de los actos para la conmemoración del Quinto Centenario la primera vuelta al mundo, como un experimento piloto para probar la viabilidad del uso del buque JSE como plataforma de observación oceanográfica mientras realiza sus travesías periódicas por los océanos del globo. Tras el buen éxito, se propone la continuación como un nuevo proyecto permanente siendo reconocido como actividad a ser contemplada dentro del decenio de las ciencias oceánicas para el desarrollo sostenible de la UNESCO. A bordo del JSE los Guardiamarinas y dotación, bajo la supervisión directa de los oficiales a bordo, van realizando lanzamientos de XBTs, tomando datos con una ecosonda EK80, y lanzando drifters para experimentos lagrangianos. Todo ello para, por un lado, poder estudiar la evolución de la Corriente Meridional de Retorno del Atlántico (AMOC), ayudar a mejorar los modelos oceánicos, y colaborar con el proyecto Seabed2030 para expandir nuestro conocimiento de los fondos oceánicos.

Palabras clave: B/E JSE, AMOC, Modelos de predicción, Cambio Climático, GEBCO.

1. INTRODUCCIÓN

El Proyecto “Observatorio Permanente del Cambio Climático a bordo del Buque Escuela Juan Sebastián de Elcano (A-71)” nace como continuación del Proyecto Bandera 1519 que se planteó, dentro de los actos para la conmemoración del Quinto Centenario la primera vuelta al mundo, como un experimento piloto para probar la viabilidad del uso del buque JSE como plataforma de observación oceanográfica mientras realiza sus travesías periódicas por los océanos del globo.

La tarea que se está realizando dentro de este proyecto es reconocida como actividad a ser contemplada en el programa del decenio de las ciencias oceánicas para el desarrollo sostenible de la UNESCO y tiene como objetivos principales:

1. Continuar con el Seguimiento de la variación de perfiles de temperatura en la zona ecuatorial del Atlántico y en el giro de corrientes subtropical del Atlántico.
2. Seguimiento de la biomasa de zooplancton, profundidad de piconclinas y caracterización de núcleos de corriente con sonda EK80 instalada en el buque.
3. Continuar con el programa de avistamiento de cetáceos y elaboración de inventario correspondiente.
4. Realizar pruebas de boyas de deriva de bajo coste con sensores que complementen el banco de observaciones del Observatorio Permanente.

5. Aportar datos de profundidades de fondo marino al programa de Naciones Unidas Seabed2030.

Con los datos obtenidos, primero con el proyecto Bandera y ahora con el Observatorio Permanente del Cambio Climático a bordo del B/E JSE se están obteniendo resultados satisfactorios y observaciones de una calidad al menos estándar.

Del lanzamiento de XBTs se están realizando perfiles de temperatura en la columna de agua pudiéndose así construir secciones verticales de temperatura a lo largo de las diferentes travesías realizadas. En el análisis de estos datos se ha prestado especial atención a las travesías repetitivas que se realizan a través del océano atlántico. Con ello además se está llevando a cabo un inventario histórico para la comparación de la variabilidad de la distribución de temperaturas en esas secciones entre las diferentes travesías.

Los datos de la ecosonda están sirviendo a su vez para dos objetivos. El primero, el estudio de la termoclina, en el que se comparan los resultados de las XBTs con los de la EK80 y así poder validar estos datos. De momento hay una total concordancia, pudiéndose observar la presencia de 2 termoclinas marcándonos las diferentes masas de agua. Con el volumen de datos que hemos obtenido durante los últimos dos años estamos empezando a analizar el comportamiento de las distintas masas de agua, esperando así obtener una base de datos donde podamos ir estudiando el

comportamiento de la AMOC para poder ir completando estudios como los de Caesar et al. (2018) y Sidorenko et al. (2021). El segundo, es dotar a la Carta Batimétrica General de los Océanos (GEBCO) (Kapoor, 1981) dentro del programa de Naciones Unidas Seabed2030, de los datos de profundidad que se van obteniendo de la sonda EK80. Este objetivo se está realizando por primera vez este año, y de manera periódica se están enviando los datos XYZ a GEBCO. De momento la limitación es que la sonda no mide profundidades superiores a los 2000 metros, pero dado el éxito que se está consiguiendo, en un futuro cercano se pretende dotar al barco de un nuevo transductor que le permitiría llegar hasta los 11000 metros de profundidad.

2. RESULTADOS PRELIMINARES

Con los perfiles de temperatura en la columna de agua obtenidos mediante el lanzamiento de XBTs ha sido posible construir secciones verticales de temperatura a lo largo de las diferentes travesías realizadas. En el análisis de estos datos se ha prestado especial atención a las travesías repetitivas que se realizan a través del océano atlántico (figura 1).

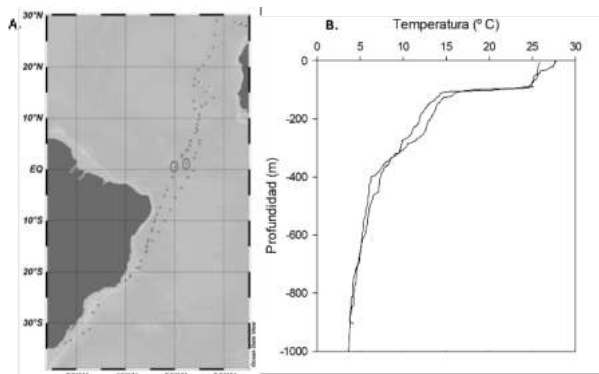


Fig. 1. A. Mapa mostrando las travesías del JSE en las que se centrará el seguimiento de las secciones verticales de temperatura repetitivas en el océano Atlántico. Los puntos indican las localizaciones de los lanzamientos de las sondas XBTs realizados. Con círculos se rodean los puntos correspondientes a los lanzamientos realizados los días 26/11/2019 y 8/9/2020. B. Comparación de perfiles de temperatura cerca del Ecuador tomados el 26/11/2019 (trazo inicia en la derecha) y el 8/9/2020 (trazo inicia en la izquierda).

Se observan cambios apreciables (de unos 2° C) en la temperatura superficial y en la termoclina principal, localizada entre los 100 y los 400 m. Los perfiles futuros, permitirán identificar si estos cambios apuntan a alguna tendencia o son debidos a cambios interanuales periódicos.

Con el funcionamiento la ecosonda EK80 se pretende evaluar la posibilidad de localizar la termoclina principal y otros fenómenos físicos que pudieran darse como ascensos de masas de aguas profundas y ondas internas. Los datos proporcionados son fundamentales para validación de modelos oceanográficos globales, por lo que la contribución esperada en la mejora de modelos de la NOAA sería

mayor de la prevista. A la misma vez se fueron lanzando XBTs que permitirían por un lado continuar con la tarea ya comenzada, pero a su vez para la obtención de perfiles de velocidad del sonido en profundidad que valieran para ir calibrando la ecosonda.

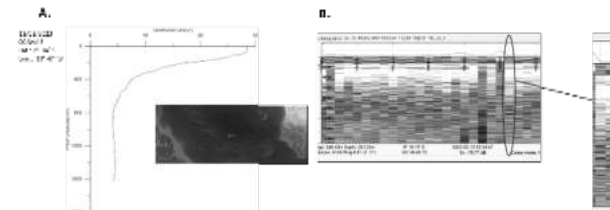


Figura 2. A. Perfil de temperatura obtenido el 13 de Febrero a las 00:34 mediante el lanzamiento de XBT. Estación localizada en mitad del Atlántico y próxima al Ecuador. B. Visualización de los datos de la ecosonda EK80 el 13 de Febrero con zoom a las 00:34 para su comparación con la A.

En la figura 2 A. se puede ver un perfil de XBT donde se puede observar la termoclina principal situada entre los 150 metros y 400 metros, y la existencia de una termoclina secundaria entre 400 metros y 800 metros aproximadamente. En la figura 8 se puede apreciar un perfil con el software de tratamiento de datos para la sonda EK80, un primer análisis con zoom (figura 8) en el mismo horario que se realizó el lanzamiento del XBT. En él se puede apreciar la existencia de estas 2 termoclinas en las profundidades analizadas resaltando así la viabilidad y el buen funcionamiento de la sonda EK80.

Con esta misma sonda, para fondos inferiores a 2000 metros, se están procesando los datos XYZ y tras un control de calidad, Latitud, Longitud y profundidad se están enviando a GEBCO para contribuir al proyecto Seabed2030. Desde el propio NIWA hemos recibido felicitaciones por los datos, y la buena calidad de los mismos, que se les están proporcionando, dándose como exitoso también este objetivo. Los datos se están tomando cada 30 segundos y de forma continua.

Del experimento lagrangiano con la suelta de un drifter pretendíamos ver la viabilidad del estudio de la corriente del Golfo y la formación de remolinos que se producen en la costa este estadounidense. Como se puede observar en la figura 3, la metodología parece funcionar y proporcionar buenos resultados.

En la misma figura 3 se puede observar cómo tras su liberación comenzó a dirigirse hacia el norte. Luego entró en un remolino que se fue descolgando hacia el sur y actualmente el drifter va viajando hacia Bahamas en contra de la corriente del Golfo.



Figura 3. Mapa extraído de Google Earth donde se puede ver la trayectoria del drifter desde su liberación.

3. CONCLUSIONES PRELIMINARES

En los primeros análisis de pre-procesado que se están realizando, se ve la necesidad de mejorar la formación puesto que se observan cortes en los perfiles y cambios de configuración con los que se han perdido datos, pero hay que agradecer la buena tarea realizada por parte de la dotación ayudando a obtener un buen volumen de datos que serán de vital importancia a la hora de entender los cambios a los que nos enfrentamos y en la mejora de los modelos globales de predicción.

Esperamos, cuando tengamos el procesado terminado, poder tener ya un buen volumen de datos con los que emprender la tarea de la validación, y si fuera necesario, mejora de los modelos de predicción.

Se observa la necesidad de aumentar el número de boyas lagrangianas a liberar y que estas a su vez estén dotadas de sensores de salinidad y temperatura.

Es necesario la instalación de una nueva campana para poder aumentar la profundidad efectiva alcanzada por la ecosonda.

Creemos firmemente que con la instalación de un correntímetro Doppler de aguas profundas, los datos y conclusiones que podríamos extraer serían de gran interés y valiosos para la investigación que se está llevando a cabo.

Agradecimientos

Queremos agradecer a toda la dotación del Buque Escuela Juan Sebastián de Elcano por tratarnos tan bien a bordo, acogernos en su casa durante los periodos que hemos tenido que embarcar, y sobre todo por el cuidado y mimo que ponen en realizar las acciones necesarias para que este proyecto funcione pese a por ello tener que sacrificar parte de su tiempo libre. En este sentido, agradecer a las promociones de Guardiamarinas que han pasado estos años, y sus profesores de Meteorología por el mimo y cariño demostrado en la toma de datos, todos los oficiales del barco por su implicación e interés, y finalmente y no por ello menos importante, al Comandante, Segundo y Tercero (Jefe de Estudios) por el apoyo, interés y cariño tanto con el proyecto como con nosotros cuando nos hemos encontrado a bordo.

REFERENCIAS

Artículos en revistas:

- Caesar, L., Rahmstorf, S., Robinson, A. et al. (2018). Observed fingerprint of a weakening Atlantic Ocean overturning circulation. *Nature* 556, 191–196. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0006-5>
- Kapoor, D. C. (1981). General bathymetric chart of the oceans (GEBCO). *Marine Geodesy*, 5(1), 73–80. <https://doi.org/10.1080/15210608109379408>
- Sidorenko, D., Danilov, S., Streffing, J., Fofonova, V., Goessling, H. F., Scholz, P., et al. (2021). AMOC variability and watermass transformations in the AWI climate model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 13, e2021MS002582. <https://doi.org/10.1029/2021MS002582>

Rapid assessment of high-resolution, large-extension, operational relief models of intertidal beaches from satellite-derived (waterline method) bathymetry: Applications for IHM mission tasks

C. J. González (1), R. J. Ramos (1), and A. Ortega (1)

(1) Instituto Hidrográfico de la Marina. Plaza San Severiano 3, 11007 Cadiz, Spain. cgonmej@mde.es

Abstract: Due to the difficulty of field measurements in intertidal flats and beaches, as well as their variable dynamics, there is a lack of reliable data on their detailed and actualized topography. A methodology for high-resolution, large-extension, rapid, low-cost, operational relief-modeling of intertidal areas is proposed. Intertidal relief is derived from Sentinel-2 multispectral imagery by applying the waterline method. Several dozens of viable images can provide coverage of about 60%-80% of the maximum tide-affected area, which can be completed by interpolating with subtidal (hydrographic) and supratidal (topographic) data. The methodology has been successfully applied to different IHM tasks on Naval Support and Hydrography. The proposed methodology provides reliable, high-resolution, large-extension intertidal relief models at low time and economic costs, and has demonstrated useful applications to operational activities related to IHM mission tasks in the coastal environment.

Key words: intertidal areas, satellite multispectral imagery, relief model.

1. INTRODUCTION

The intertidal area is defined as the shore stretch between the lowest and highest astronomical tidal levels (LAT and HAT, respectively), constituted by the lower (from LAT to mean low tide), middle (from mean low to mean high tides), and upper (from mean high tide to HAT) intertidal zones (Fig. 1). The correct characterization of intertidal beaches and marshes becomes crucial for naval and hydrographic operations in meso- and macro-tidal environments, as the location of the beaching areas in amphibious operations with LCM, SCAT, and F-470 launches, or the accurate determination of the LAT line as the hydrographic datum.

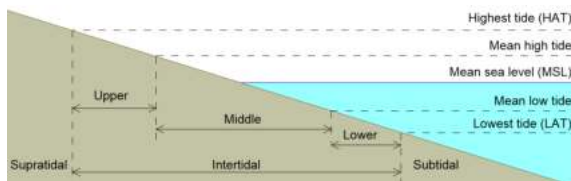


Fig. 1. Tidal levels and intertidal zonation scheme.

However, the periodical flooding/ebbing of these intertidal areas, together with their different extension depending on the 19-year-nodal period modulation of tidal amplitudes, make them difficult to be characterized for a correct and complete description of their topography. ‘Traditional’ hydrographic echosounding-based methods require very low-draft boats working during the highest possible tidal levels, while direct topographic measurements have to be conducted during low tides, frequently in hard conditions because of the mud. Recently, remote-sensing devices are being used to overcome these

difficulties, such as airborne LiDAR, multispectral/altimeter drones, and video-cameras (e.g., Andriolo et al., 2018; White et al., 2022), which can determine the topography of intertidal areas with very-high spatial resolution, but at high time-consuming and economic costs, and again restricted by the tidal phase and amplitude during the measurements, as well as by the meteorological conditions.

In this work, a methodology for a fast and low-cost assessment of large-extension and relatively high-resolution relief models of intertidal areas is described, based on the integration of satellite-derived bathymetry (SDB) with available topographic and hydrographic data. Examples of operational applications by the Spanish Marine Hydrographic Institute (IHM) in actual Naval Support and Hydrography tasks are shown as well.

2. METHODOLOGY

The intertidal relief model is elaborated by use of the so-called SDB waterline method (see, e.g., Bishop-Taylor et al., 2019). Open multispectral images from Sentinel-2A/B satellites (quasi-global coverage, 10-m spatial resolution, 5-day recurrence period; browser.dataspace.copernicus.eu) are used to obtain the normalized-difference water index (NDWI; McFeeters, 1996), which is calculated from the green (B3) and near-infrared (B8) Sentinel-2 bands as:

$$NDWI = \frac{B3 - B8}{B3 + B8} \quad (1)$$

NDWI values allow for the discrimination between land and water pixels; the edge between them is hence identified with an isobath equal to the water level

height at the time of the image acquisition (Fig. 2). This tidal level can be determined by nearby tide-gauge measures/predictions or hydrodynamic/tidal models.

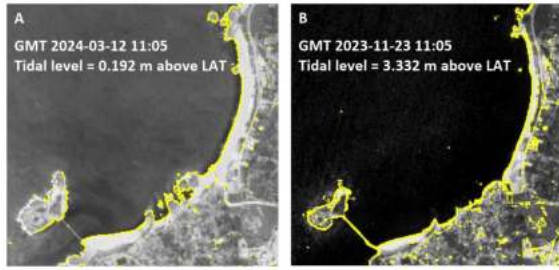


Fig. 2. Examples of NDWI waterline determination at low (A) and high (B) tides.

By experience, a random set of 15-25 viable images are able to cover about 65-85% of the maximum tidal range, while corresponding acquisition periods between several months to 1 year, depending on the typical cloud-coverage conditions of each region. The upper and lower intertidal zones not contemplated by Sentinel-2 images can be interpolated, respectively, with available topographic and hydrographic data. In the Spanish shore, it is made from IGN digital elevation models (www.ign.es) and IHM bathymetries. For regions without availability of reliable, high-resolution, topographic/hydrographic data, global open sources, such as ETOPO1 (www.ngdc.noaa.gov), GEBCO (www.gebco.net), and EMODnet (www.emodnet-bathymetry.eu) are used instead. An example of a final product for the inner Cadiz Bay (González et al., 2022) is shown in Fig.3.



Fig. 3. Intertidal relief model obtained for the inner Cadiz Bay.

Like every methodology, this one has limitations and uncertainty. At some pixels, land/water attribution by NDWI can fail because of sea foam and waves, constructions and boats, glittering, etc., and certain degree of direct supervision is necessary. Also, the horizontal resolution $\Delta x = 10$ m of Sentinel-2 images carries a related vertical error Δz depending on the beach slope β :

$$\Delta z = \beta \Delta x \quad (2)$$

This vertical uncertainty Δz typically ranges from 1-2 cm for marshes and mudflats ($\beta \approx 0.001-0.002$) to 1 m for highly reflective beaches ($\beta \approx 0.1$), where this technique is not recommended. These errors are generally assumable at most beaches, with typical $\beta \approx 0.005-0.01$, so $\Delta z \approx 5-10$ cm. The possible spatial variability of tidal amplitudes and phases, as well as sea-level contributions other than tides (e.g., air-pressure, winds), should also be taken into account when leveling SDB waterlines. Finally, this technique is obviously not applicable at micro- or non-tidal environments such as the Mediterranean Sea, inner seas and lakes, etc.

3. RESULTS AND APPLICATIONS

The described methodology has been successfully applied to Naval Support tasks of IHM, mainly related to naval amphibious operations which require detailed information about shore and beaches configuration. The obtained intertidal relief, together with the predicted (tidal) sea-level L at the operation date and time, allow for the establishment of the beaching level B for each type of amphibious launch (LCM, SCAT, and F-470) according to its draft D :

$$B = D + L \quad (3)$$

Where both B and L are referred to LAT. Fig. 4 shows actual products provided for LCM launches during the last BALTOPS24 NATO operations in 2024.

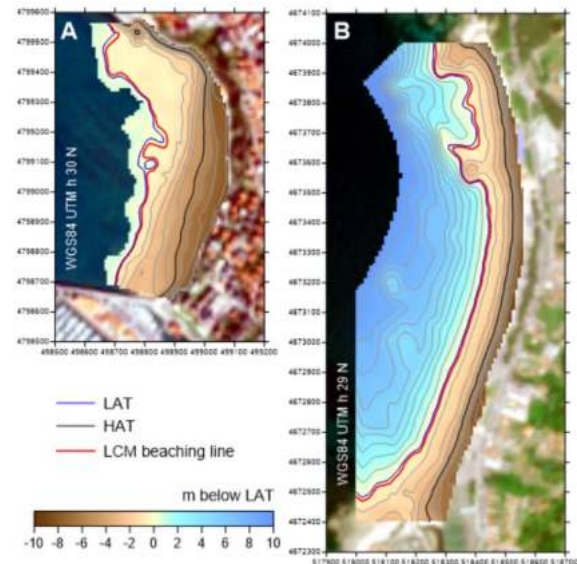


Fig. 4. Coastal relief and predicted LCM beaching line for Bilbao-Getxo (A) and Vigo-Samil (B) beaches during BALTOPS24 NATO naval operations.

A high-resolution, accurate characterization of the sea-waves breaking zone is also crucial when applying the wave models related to the SIAAMETOC-OM metocean operational system (Ortega et al., 2022) used by IHM to support naval operations. The proposed methodology provides this necessary information in places where it is not (or

poorly) available, especially in international environments. Fig. 5 shows examples for that at two beaches of the Atlantic, macro-tidal shore of France.

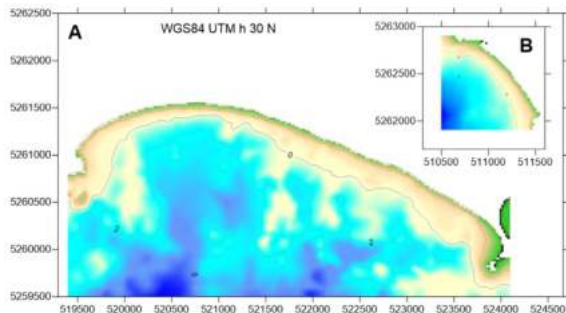


Fig. 5. Coastal relief obtained for the French beaches of Suscinio (A) and Govelins (B).

Apart from Naval Support operations, the described methodology can simply complement and/or actualize hydrographic data in places where there is a lack of them because of the commented difficulty for ‘traditional’ echo-sounding/topographic methods, such as the accretion sand-spit at San Pedro Creek’s mouth in Cadiz Bay (Fig. 6a); or where there was not hydrographic information at all as in the Mogadishu shore in Somalia (Fig. 6b). In the last case, there was not even reliable field sea-level data for leveling SDB waterlines, so it was made by use of the DTU10 global tidal model (www.space.dtu.dk).

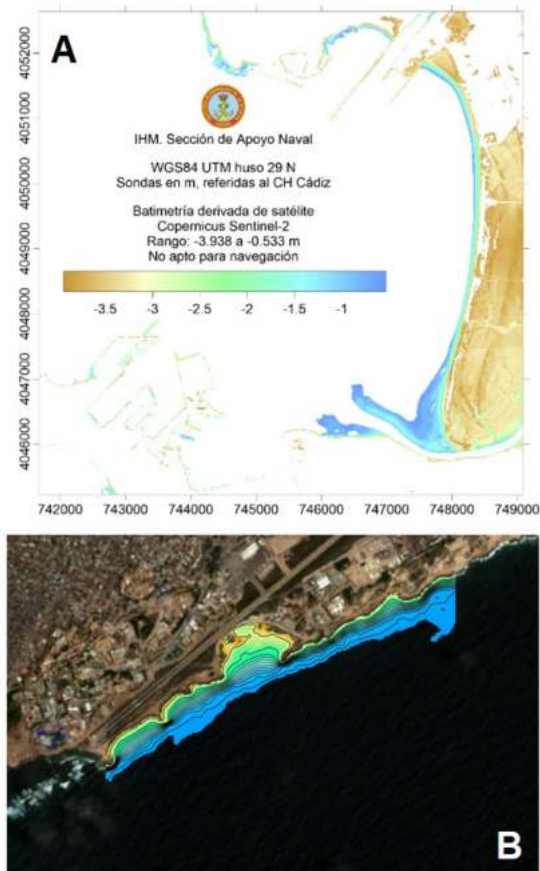


Fig. 6. Obtained intertidal relief for San Pedro Creek’s mouth (A) and Mogadishu shore (B).

Finally, this methodology, in combination with hydrodynamic modeling, has been applied to the accurate establishment of the LAT surface within the inner Cadiz Bay (González et al., 2022), drastically reducing the uncertainty of the Vertical Reference Surface for Hydrography (VRSH) previously developed (González et al., 2021), from about 10 cm to less than 1 cm in this environment (Fig. 7).

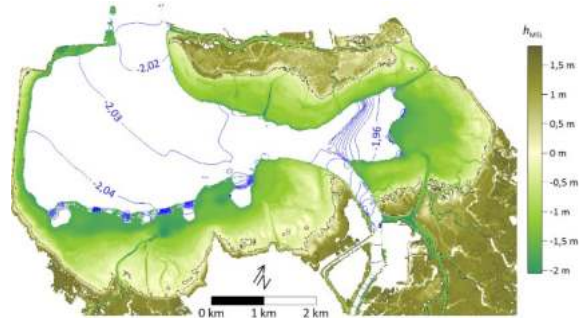


Fig. 7. Maximum intertidal relief (color map) and modeled LAT surface (blue contours) for the inner Cadiz Bay, both referred to local MSL.

4. CONCLUDING REMARKS

The methodology developed for the characterization of intertidal areas constitute a low-cost, easy, fast, and reliable technique when comparing with other procedures commonly used for this purpose: direct hydrographic and topographic measurements, drone altimetry, or airborne LiDAR. It has been successfully applied to actual Naval Support and Hydrography tasks carried out by IHM, providing useful information in a strategic environment, traditionally characterized by the lack of it. The obtained products are reliable, high-resolution, with quasi-global coverage (obviously for meso- and macro-tidal environments), and prone to high degree of automation. It is also exportable to other military, very-high resolution, multispectral satellite imagery such as Pléiades (intelligence.airbus.com), and it will be considered in future works.

Acknowledgements

This work was carried out in the framework of the Spanish Ministry of Defense Technical Project SIAAMETOC-2.

REFERENCES

- Andriolo, U., Almeida, L.P., and Almar, R. (2018). Coupling terrestrial LiDAR and video imagery to perform 3D intertidal beach topography. *Coastal Engineering*, 140, 232–239.
- Bishop-Taylor, R., Sagar, S., Lymburner, L., and Beaman, R. J. (2019). Between the tides: modelling the elevation of Australia’s exposed intertidal zone at continental scale. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 223, 115–128.

- González C. J., Torres J. R., Haro S., Gómez-Enri J., and Álvarez O. (2022). High-resolution characterization of intertidal areas and lowest astronomical tidal surface by use of Sentinel-2 multispectral imagery and hydrodynamic modeling: Case-study in Cadiz Bay (Spain). *Science of the Total Environment*, 861, 160620.
- González C. J., Torres J. R., Bernárdez P., and Ramos R. J. (2021). Validation and application of model/reanalysis sea-level data to the establishment of the Reference Hydrographic Surface in Spanish waters. *Journal of Operational Oceanography* 16 (1), 28-47.
- McFeeters, S. K. (1996). The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17 (7), 1425–1432.
- Ortega A, Díaz-Hernández G, and González-Valle A. (2022). Desarrollo de sistemas operacionales para las operaciones navales para las fases de planeamiento y predicción: Proyecto SIAAMETOC-OM. In: Gómez-Martín, M. E. (Ed.). *XVI Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos*, Editorial Universitat Politècnica de València, 183-184.
- White, S. M., Schaefer, M., Barfield, P., Cantrell, R., and Watson, G. J. (2022). Cost benefit analysis of survey methods for assessing intertidal sediment disturbance: a bait collection case study. *Journal of Environmental Management*, 306, 114386.

Spatial distribution of microplastics in the Gulf of Cadiz as a function of their density: A Lagrangian Modelling Approach

I. Laiz (1), A. Teles-Machado (2, 3), S. Plecha (3, 4), A. Peliz (3, 4), R. Sánchez-Leal (5), M. Bolado-Penagos (1)

(1) Departamento de Física Aplicada, Instituto Universitario de Investigación Marina (INMAR), Campus de Excelencia Internacional/Global del Mar (CEI-MAR), Universidad de Cádiz, Puerto Real 11519, Cádiz, Spain. irene.laiz@uca.es

(2) Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA), Avenida Alfredo Magalhães Ramalho, 6, 1495-165 Algés, Portugal, Instituto Dom Luiz (IDL).

(3) Instituto Dom Luiz (IDL), Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Campo Grande Edifício C1, Piso 1, 1749-016 Lisboa, Portugal.

(4) Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Campo Grande Edifício C1, Piso 1, 1749-016 Lisboa, Portugal.

(5) Physical Oceanography Dept, Spanish Institute of Oceanography, Cádiz Oceanographic Center, Muelle de Levante s/n, Puerto Pesquero. E-11006. Cádiz, Spain.

Abstract: Microplastics (MPs) are a major concern of marine pollution. In the Gulf of Cadiz (GoC), they have been found in the water column, seafloor, and commercial species. Their principal sources are the main estuaries in the area. This study aims to analyse the transport pathways, spatial distribution, and accumulation regions of MPs in the GoC as a function of their density and source by coupling a Lagrangian transport model to a high-resolution hydrodynamic model, considering four sources of MPs. Ten particle densities were used to represent the diversity of plastics in the GoC. Results show that low-density MPs accumulate near the coastline at the sea surface, while high-density MPs sink rapidly and are transported by coastal currents to depths below 1000 m. The main sources of low-density MPs to the continental shelf seem to be the Guadiana and Guadalquivir estuaries, the latter also being the main source of high-density MPs.

Palabras clave: microplastics transport, buoyancy, vertical distribution, CROCO, Ichthyop.

1. INTRODUCTION

Plastics, due to their durability, resistance, and low cost, are ubiquitous in daily life, with production reaching 390.70 million tonnes in 2021, predominantly from fossil sources (PlasticsEurope, 2022). Plastics constitute 85% of marine litter, making microplastics (MPs) a major marine pollution concern (Auta et al., 2017; Thompson et al., 2004). MPs, particles smaller than 5 mm, are dispersed globally, even in polar regions, transported by wind and currents (Carlsson et al., 2021; Fragão et al., 2021). They have been found in the water column, sediments, and marine organisms, impacting marine life through ecotoxicological effects upon ingestion (de Sá et al., 2018). MPs also adsorb xenobiotics, entering the food chain through bioaccumulation, potentially harming marine organisms and human health (Guzzetti et al., 2018).

Their sources of pollution are both terrestrial and aquatic, and are closely linked to human activities. About 80% of marine MPs originate from land-based sources, primarily entering the ocean via rivers, poorly managed landfills, and wastewater treatment

plants (LI et al., 2016). Extreme weather events, atmospheric emissions, and wind also transport MPs from urban and industrial areas to marine environments (Barnes et al., 2009). Rivers alone can release between 0.88 and 2.70 million tonnes of pollution into oceans annually (Meijer et al., 2021). Coastal and estuarine systems are considered MP hotspots due to high human activity (Wright et al., 2013). Marine-based sources, especially fishing activities, contribute 20% of MPs, with lost fishing gear adding approximately 640,000 tonnes annually (LI et al., 2016).

MPs behaviour and vertical distribution in the water column depend on their characteristics. While high-density polymers sink, low-density ones float, though they can also sink due to biofouling, aggregation, or zooplankton ingestion (Coyle et al., 2020).

In the Gulf of Cadiz (GoC), high MPs concentrations are found at the Guadalquivir and Guadiana estuaries and Cape Trafalgar (e.g., González-Ortegón et al., 2022; Viejo et al., 2023), although they have also been found in the upper slope canyon, on the upper open slope, and in front of Cadiz city, probably linked to marine traffic and fishing activities (Mecho et al.,

2020). Fishing grounds near San Vicente submarine canyon also contribute significantly to plastic litter in the region (Oliveira et al., 2015).

Particle-tracking Lagrangian models coupled with hydrodynamic models help understand MPs transport and accumulation in the marine environment (e.g., Cardoso and Caldeira, 2021; Collins and Hermes 2019).

The objective of this work is to analyse the potential pathways of MPs transport in the GoC as a function of the polymer density and their source onto the marine environment. For this purpose, a Lagrangian transport model has been coupled to the 3D daily fields (currents, temperature, and salinity) obtained with the Regional Ocean Modeling System (CROCO) during 2017.

2. DESARROLLO

The high-resolution hydrodynamic model Coastal and Regional Ocean COmmunity model (CROCO) was implemented on a grid covering from 35°N to 45°N and from 12°W to 1°W with 60 sigma levels and a spatial resolution of about 1.6 km to 1.9 km for the year 2017. The model was forced with data from the atmospheric reanalysis ERA5 (Hersbach et al. 2020), the heat and freshwater fluxes were internally computed using a bulk flux parameterization, and the initial and open boundary conditions for temperature and salinity were obtained from the global ocean reanalysis GLOREY12V1 (<https://doi.org/10.48670/moi-00021>). The surface currents were validated with data from the High-Frequency-Radar (HFR) data. The HFR antennas are located in the south of Portugal (Sagres, Alanzina, Vila Real de Santo António (VRSA)), and Spain (Mazagón) (blue dots, Fig. 1), resulting from a collaboration between Puertos del Estado (Spain) and the Instituto Hidrográfico (Portugal).

The CROCO 3D fields were offline coupled to the Lagrangian transport model Ichthyop (Lett et al., 2008) to study the spatial distribution of MPs in the GoC. Ten density values were used for the particles to account for the most abundant types of MPs found in the GoC (González-Ortegón et al., 2022): the first nine values ranged from 0.85 to 1.25 g cm⁻³ every 0.05 g cm⁻³, and the last one was 2.30 g cm⁻³. Their size was defined using the model's default values, i.e., a major axis of 1.4 mm and a minor axis of 0.5 mm were assumed. Both the particles size and density were kept constant during each simulation.

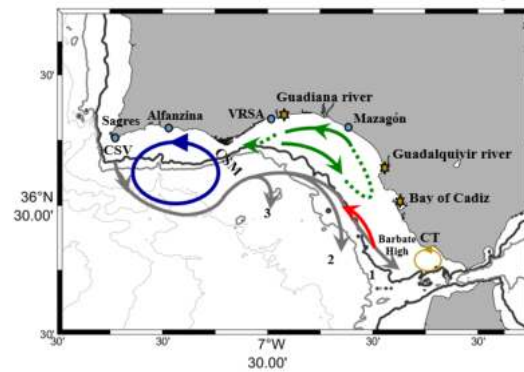


Fig. 1. Map showing the Gulf of Cadiz main circulation patterns. Blue dots indicate the location of the HFR antennas. Yellow stars show the particles release stations.

Particles were randomly released between the sea surface and 5 m depth from four release stations: three within the GoC eastern shelf (González-Ortegón *et al.*, 2022), namely the Guadiana River (GA), the Guadalquivir River (GD) and the Bay of Cadiz / Guadaleta River (BC), and one at Cape San Vicente (CSV), i.e., within the GoC western shelf (Oliveira et al., 2015; Rosas et al., 2022) (Fig. 1). Considering that CROCO does not resolve the estuary-shelf fluxes, the particles were randomly released within a 5 km circle out of the estuaries, similar to Peliz et al. (2007). The Ichthyop's beaching condition was activated to retain those particles landing at the coast or along the CROCO grid boundaries.

A Lagrangian simulation was conducted for each release station and density value. Additionally, a 'control' simulation was performed for each station without the buoyancy module, disregarding particle density. In total, 44 Lagrangian simulations were executed. Each simulation ran for 365 days in 2017, starting with the release of 10,000 microparticles per station on January 1st.

The trajectories obtained for each release station and density value were compared with the corresponding 'control' simulation as in Jalón-Rojas et al. (2019) to assess the particles' density effect on the particles horizontal and vertical transport.

3. RESULTS

The trajectories obtained considering the particles densities were very different to those of the 'control' simulations (Fig. 2), indicating that MPs horizontal and vertical distribution in the marine environment is highly dependant on their density, in agreement with previous studies (Jalón-Rojas et al., 2019).

Furthermore, our results show that particles can be grouped into low-density (particles with a density lower than the seawater) and high-density particles, with no or negligible differences in the trajectories among the low-density range or among the high-density range considered, respectively. In this sense, all the low-density particles remain at the sea surface

and tend to accumulate mainly close to the coastline, suggesting that the MPs found in that region have a local origin. In fact, our results suggest that the Guadiana and Guadalquivir estuaries could be significant sources of low-density MPs accumulating on the GoC eastern shelf, as also suggested by former studies using MPs in situ data (González-Ortegón et al., 2022). Moreover, the region surrounding Cape San Vicente could be a notable source of MPs to the GoC western shelf, but also to the Iberian western shelf, consistent with Vieira et al. (2015). Finally, while ~40% of the low-density particles released at the Bay of Cadiz/Guadalete River station seem to accumulate along the GoC eastern shelf, ~46% are transported offshore, suggesting that this station can act as a local and distant source of MPs in the ocean. It is important to highlight that the Guadalete River transports a large amount of macroplastics onto the GoC and, thus, probably also MPs (Broere et al., 2021).

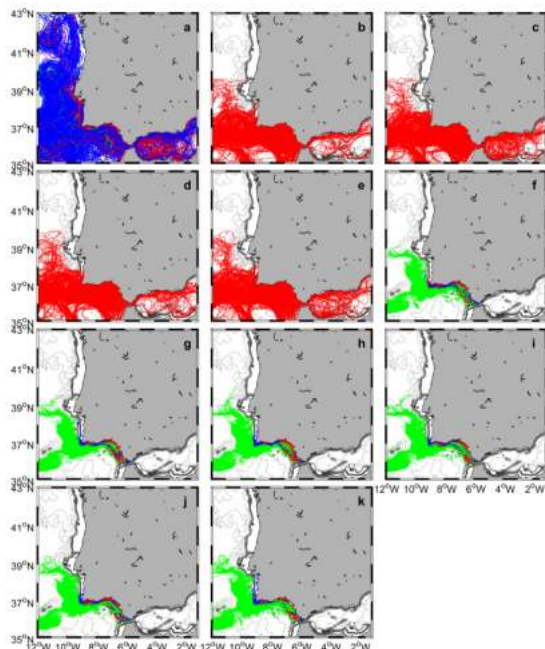


Fig. 2. Trajectories of particles released at the Bay of Cadiz/Guadalete River station for (a) the control scenario, and as a function of their density: (b) 0.85 g cm⁻³, (c) 0.90 g cm⁻³, (d) 0.95 g cm⁻³, (e) 1.00 g cm⁻³, (f) 1.05 g cm⁻³, (g) 1.10 g cm⁻³, (h) 1.15 g cm⁻³, (i) 1.20 g cm⁻³, (j) 1.25 g cm⁻³, (k) 2.30 g cm⁻³. Colors correspond to the particles' depth after one year of simulation: red (0-10 m), blue (10-700 m), cyan (700-800 m), magenta (800-900 m), green (> 900 m).

Regarding high-density particles, those that remain on the shelf sink rapidly (i.e., close to the coast) to depths between ~3.5 – 50 m and are then transported by coastal currents, with those that reach offshore waters reaching depths below 1000 m.

Finally, while all the stations considered contribute to the offshore export of high-density particles, the Guadalquivir estuary seems to be the primary source of high-density particles retained within continental

shelves, followed by the Bay of Cadiz/Guadalete River and, to a lesser extent, the Guadiana estuary.

4. CONCLUSIONES

Las conclusiones deben tener relación directa con el objetivo del ámbito de la ponencia y estar respaldadas por los datos obtenidos. En este apartado también se pueden incluir algunas recomendaciones cuando los autores consideren pertinente hacerlas.)

Agradecimientos

The authors are grateful to Puertos del Estado (Spain) and the Instituto Hidrográfico (Portugal) for freely distributing the HFR data, and to the National Oceanic and Atmospheric Administration and the Atlantic Oceanographic and Meteorological Laboratory for disseminating the XBT data. Marina Bolado-Penagos acknowledge the Project BOLA (*Análisis de la circulación superficial del golfo de Cádiz mediante el uso de BOyas Lagrangianas*, PR2023-030) funded by Plan Propio (University of Cadiz). Ana Teles-Machado acknowledges the projects PIPELINE-DITO and SARDINHA2030 (MAR-111.4.1-FEAMPA-00001).

REFERENCIAS

- Auta, H. S., Emenike, C., and Fauziah, S. (2017). Distribution and importance of microplastics in the marine environment: A review of the sources, fate, effects, and potential solutions. *Environment International*, 102, 165–176.
- Barnes, D. K., Galgani, F., Thompson, R. C., and Barlaz, M. (2009). Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Philosophical transactions of the royal society B: biological sciences*, 364(1526), 1985-1998.
- Broere S., van Emmerik T., González-Fernández D., Luxemburg W., de Schipper M., Cózar A., van de Giesen N. (2021). Towards Underwater Macroplastic Monitoring Using Echo Sounding. *Frontiers in Earth Science*, 9, art. no. 628704
- Cardoso, C., Caldeira, R.M.A. (2021). Modeling the Exposure of the Macaronesia Islands (NE Atlantic) to Marine Plastic Pollution. *Frontiers in Marine Science*, 8, 653502.
- Carlsson, P., Singdahl-Larsen, C., and Lusher, A.L. (2021). Understanding the occurrence and fate of microplastics in coastal Arctic ecosystems: The case of surface waters, sediments and walrus (*Odobenus rosmarus*). *Science of the Total Environment*, 792, 148308.
- Collins, C., Hermes, J. (2019). Modelling the accumulation and transport of floating marine

- micro-plastics around South Africa. *Marine Pollution Bulletin*, 139, 46-58.
- Coyle, R., Hardiman, G., & Driscoll, K. O. (2020). Microplastics in the marine environment: A review of their sources, distribution processes, uptake and exchange in ecosystems. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 2, 100010.
- De Sá, L. C., Oliveira, M., Ribeiro, F., Rocha, T. L., and Futter, M.N. (2018). Studies of the effects of microplastics on aquatic organisms: What do we know and where should we focus our efforts in the future? *Science of the Total Environment*, 645, 1029–1039.
- Fragão, J., Bessa, F., Otero, V., Barbosa, A., Sobral, P., Waluda, C.M., Guimarães, H. R., and Xavier, J.C. (2021). Microplastics and other anthropogenic particles in Antarctica: Using penguins as biological samplers. *Science of the Total Environment*, 788, 147698.
- González-Ortegón, E., Sendra, M., Sparaventi, E., F. Sánchez Leal, R., de los Ríos, I., Baldó, F., González-Fernández, D., and Yeste, M.P. (2022). Coastal gradients of small microplastics and associated pollutants influenced by estuarine sources. *Marine Pollution Bulletin*, 174, 113292.
- Guzzetti, E., Sureda, A., Tejada, S., and Faggio, C. (2018). Microplastic in marine organism: Environmental and toxicological effects. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 64, 164–171.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horanyi, A., Muñoz-Sabater, J. et al (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146, 1999–2049.
- Jalón-Rojas, I., Wang, X., Fredj, E. (2019). A 3D numerical model to Track Marine Plastic Debris (TrackMPD): Sensitivity of microplastic trajectories and fates to particle dynamical properties and physical processes. *Marine Pollution Bulletin*, 141: 256-272.
- Lett, C., Verley, P., Mullon, C., Parada, C., Brochier, T., Penven, P., and Blanke, B. (2008). A Lagrangian tool for modelling ichthyoplankton dynamics. *Environmental Modelling and Software*, 23(9), 1210–1214.
- LI, W. C., TSE, H. F., and FOK, L. (2016). Plastic waste in the marine environment: A review of sources, occurrence and effects. *Science of The Total Environment*, 566–567, 333–349.
- Mecho, A., Francescangeli, M., Ercilla, G., Fanelli, E., Estrada, F., Valencia, J., Sobrino, I., Danovaro, R., Company, J.B., Aguzzi, J. (2020). Deep-sea litter in the Gulf of Cadiz (Northeastern Atlantic, Spain), *Marine Pollution Bulletin*, 153, 110969.
- Meijer, L. J., Van Emmerik, T., Van Der Ent, R., Schmidt, C., & Lebreton, L. (2021). More than 1000 rivers account for 80% of global riverine plastic emissions into the ocean. *Science Advances*, 7(18).
- Oliveira, F., Monteiro, P., Bentes, L., Sales Henriques, N., Aguilar, R., Gonçalves, J.M.S. (2015). Marine litter in the upper São Vicente submarine canyon (SW Portugal): Abundance, distribution, composition and fauna interactions, *Marine Pollution Bulletin*, 97(1–2), 401-407.
- Peliz, A., Marchesiello, P., Duberta, J., Marta-Almeida, M., Roy, C., Queiroga, H. (2007). A study of crab larvae dispersal on the Western Iberian Shelf: Physical processes. *Journal of Marine Systems*, 68(1-2): 215-236.
- PlasticsEurope & European Association of Plastics Recycling (EPRO). (2022). Plásticos – Situación 2022. *Plásticos – Situación 2022*, 84.
- Thompson, R.C., Olsen, Y., Mitchell, R.P., Davis, A., Rowland, S.J., John, A.W.G., McGonigle, D., and Russell, A.E. (2004). Lost at sea: where is all the plastic? *Science*, 304 (5672), 838-838.
- Vieira, R.P., Raposo, I.P., Sobral, P., Gonçalves, J.M.S., Bell, K.L.C., Cunha, M.R. (2015). Lost fishing gear and litter at Gorringe Bank (NE Atlantic), *Journal of Sea Research*, 100, 91-98.
- Viejo, J., Cózar, A., Quintana, R., Martí, E., Markelain, G., Cabrera-Castro, R., Arroyo, G. M., Montero, E., and Morales-Caselles, C. (2023). Artisanal trawl fisheries as a sentinel of marine litter pollution. *Marine Pollution Bulletin*, 191, 114882.
- Wright, S. L., Thompson, R. C., and Galloway, T. S. (2013). The physical impacts of microplastics on marine organisms: a review. *Environmental Pollution*, 178, 483–492.

Historical evolution of the National High Frequency Radar network of continental Portugal

V. Lima (1), L. Lamas (1), I. Martins (1)

(1) Instituto Hidrográfico, Rua das Trinas, 49, 1249-093 Lisboa, Portugal. vania.lima@hidrografico.pt

Abstract: In this work, we present the historical evolution of the National High Frequency (HF) Radar network of continental Portugal, managed and operated by Instituto Hidrográfico, and currently composed of 6 HF radars of the brand CODAR Ocean sensors. Several R&D projects have promoted the acquisition and installation of these remote sensing systems, supporting, since 2012, the establishment of a near-real-time observation network, with the retrieval of surface currents, sea state, wind, and tsunami detection measurements. We give an overview of the HF radar network since the start of its operation and present the continuous challenges related to these remote observation systems and solutions adopted. We also give an overview of the current HF radar network, data status, dissemination and applications.

Key words: high frequency radar; remote sensing; continental Portugal; near-real-time.

1. INTRODUCTION

Coastal monitoring and observation demand accurate, real-time data on ocean dynamics, requiring the integration of advanced technologies such as high frequency (HF) radar to ensure comprehensive environmental management and timely response to maritime changes. High frequency surface wave radar systems, also known as over-the-horizon (OTH) radars, are advanced remote sensing detection systems that use electromagnetic waves in the radio waveband to retrieve ocean surface currents, sea state, wind, and tsunami detection measurements. These systems operate at frequencies between 3 and 30 MHz, covering wavelengths from 10 to 100 meters and measuring distances offshore that range from 100 to 200 kilometers, with resolutions between 3 and 12 kilometers. The measurement precision for current velocities is approximately 10 cm/s, with a directional accuracy of 10°.

The HF radar network of Instituto Hidrográfico (IH, the Portuguese Hydrographic Institute) started operating steadily in 2012 and is maintained as part of MONIZEE, the integrated system for real-time monitoring of the Portuguese EEZ (Martins et al., 2010). Playing a crucial role in MONIZEE, the Portuguese HF radar observation network has collected a decade-long time series of observed data, significantly enhancing the system's capacity to provide accurate and timely oceanographic information. MONIZEE is the Portuguese national contribution to the JERICO-RI.

2. THE PORTUGUESE HFR NETWORK

2.1 Background, evolution and expansion

HF radars can cover large coastal areas, providing near-real-time surface current maps, which are fundamental to support search and rescue actions,

navigation and maritime traffic, oil spill events, object drifts, as well as scientific research. As an Agency of the Portuguese Navy and a State Laboratory, Instituto Hidrográfico (founded in 1960) had been considering since 1998 the importance of promoting a project to implement a coastal HF radar system. This was later confirmed by the MV Prestige oil tanker oil spill accident in November 2002, which could have been better tackled with the support of a HF radar observation network.

A preliminary pilot study took place in 2008, involving the installation of a HF radar station near the port of Sines (west jetty near the Sines lighthouse) and another HFR station at the Cabo Sardão lighthouse. With small location differences, this pilot study spawned in 2 phases, developing afterwards in the framework of the SIMOC project: the 1st phase lasted from February to June 2008 and the 2nd phase from December 2010 to July 2011. It was found that the HFR range would frequently be reduced exclusively due to interferences in the Sines station, which presented a daily pattern. It was concluded that an unknown source, with significant power, was causing interferences in the functioning frequency of the HF radar, with a great increase in the noise levels, reduced signal to noise ratio, resulting in less valid data (Martinho, 2011). Between November and December 2011, both HF radar antennae were temporarily installed in coastal sites in Nazaré and in Óbidos, respectively. After this period, the antennae were moved and reinstalled in the Lisbon area: one station at São Julião Fort, Oeiras, and the second station in the premises of the Cabo Espichel lighthouse, Sesimbra.

With the beginning of SIMOC (Sistema de Monitorização de Correntes costeiras) project, IH started operating its HF radar observation network. SIMOC, which was a nationally funded project, kick

started in 2010, with the objective of 1) obtaining an overview of the measurements of surface currents and ocean waves at specific geographic areas, and 2) developing operational applications for the Navy. Project TRADE (Trans-regional RADARS for Environmental applications) followed in 2012 (in collaboration with Cádiz University, UC, and Puertos del Estado, PdE), focusing the HF radar stations in the South of Portugal and Spain. This project was later extended.

Since 2018, the Portuguese HF radar network has undergone expansion as part of various projects, such as the projects MyCoast, RADAR-ON-RAIA and OCASO. This was accomplished through the establishment of cross-border collaborations with several Spanish institutions. Project MyCoast aimed at building a Coordination Atlantic Coastal Operational Observatory, to improve coastal monitoring and forecasting tools to support threat and emergency response in the Atlantic area. With project RADAR-ON-RAIA, the goal was to extend the network of HF radars in Galicia (which is in operation since 2011), intending to create a transboundary observation infrastructure and to improve the knowledge on ocean dynamics from the local to the regional level, in the northwest area of the Iberian Peninsula. As a result, the most recent and northernmost Portuguese HF radar site was set in 2020, with the installation of the LPRO antenna, located in Leça da Palmeira lighthouse.

In the framework of project OCASO, a tsunami detection module was installed in one single HF radar station located in the South of Portugal, to support the decision making process which is part of tsunami warning issue alert. Initially, the tsunami detection module was operational at Sagres (SGTR) HF radar station, from September 2018 to January 2020. This location, on the southwestern tip of Portugal, was chosen due to the tsunamigenic zone proximity. Due to the complexity of the ocean dynamics at the tip of Sagres—which consequently generated many false alerts—the tsunami module was transferred, in march 2020, from Sagres to Alfanzina (AFTR), a location where the bathymetry and the sea agitation are well behaved.

The AFTR HF radar station is currently the only HF radar facility in Portugal and in the Iberian Peninsula dedicated to detecting tsunami patterns, with the main objective of its integration in the Portuguese National Tsunami Early Warning System (NTEWS).

Other R&D projects, developed with the collaboration of Instituto Hidrográfico, have used HF radar data. Examples are SIMOCEAN project, in which surface current data from HF radar were integrated in the project's geoportal, and SMART project.

2.2 Network and data status

The national HF Radar network operated by IH is now composed by 6 medium-range sites (Table 1), consisting of SeaSonde-type radars, of the brand CODAR Ocean sensors. The HF radar stations are located in coastal sites, along the Portuguese continental coastline, and include (1) Leça da Palmeira, (2) São Julião, (3) Cabo Espichel, (4) Sagres, (5) Alfanzina, and (6) Vila Real de Santo António (Figure 1).

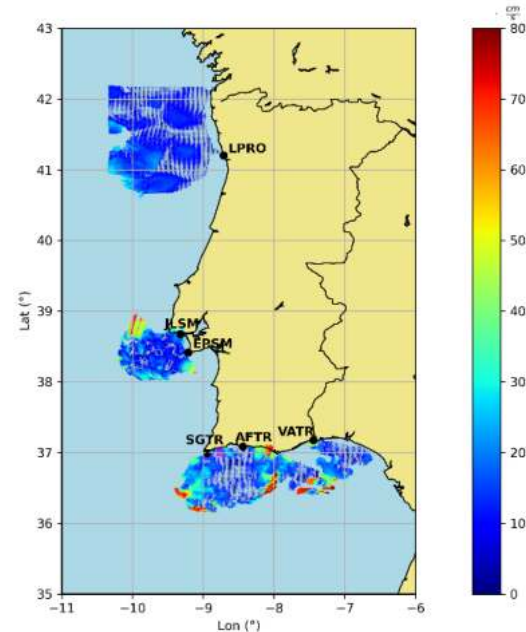


Figure 1 - HF Radar Network managed by the Hydrographic Institute. Coverage area representation. From north to south and west to east: Leça da Palmeira (LPRO), São Julião (JLSM), Cabo Espichel (EPSM), Sagres (SGTR), Alfanzina (AFTR), Vila Real de Santo António (VATR).

Table 1 – Details regarding the Portuguese high frequency radar stations.

Station (Code)	Latitude (°)	Longitude (°)	Operating frequency (MHz)	HFR Network
Leça da Palmeira (LPRO)	41.2020	-8.7128	13.500	Galicia
São Julião (JLSM)	38.6745	-9.3264	12.430	Lisbon (SIMOC)
Cabo Espichel (EPSM)	38.4155	-9.2169	12.923	
Sagres (SGTR)	36.9945	-8.9492	13.500	South (TRADE)
Alfanzina (AFTR)	37.0868	-8.4425	13.500	
Vila Real de Santo António (VATR)	37.1788	-7.4439	13.500	

The HF radar network is retrieving hourly surface currents and sea state data from all sites, and 2 min interval tsunami detection data from AFTR station, in the South of Portugal.

The timeline chart in Figure 2 represents the existing surface current data, since the beginning of the network, in 2012 (Instituto Hidrográfico, 2012), until the end of 2023. The data failures in the chart match continuous lacking registers corresponding to periods greater than at least 24 hours. Note that LPRO is active since 2020, with an inoperation period between 2022 and 2023 (Figure 2). VATR is inoperational since December 2022, due to an atmospheric electrical discharge.

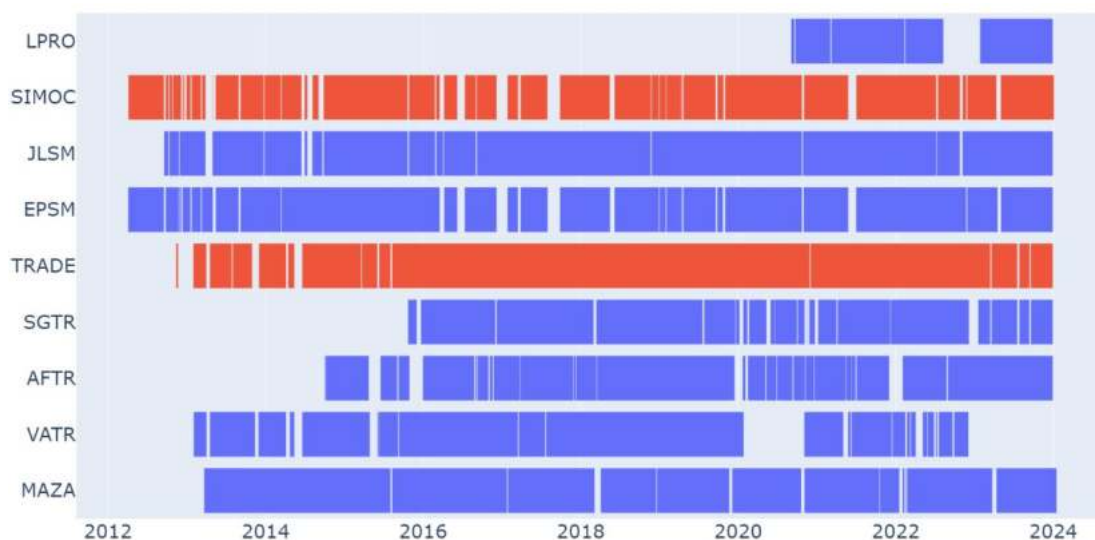


Figure 2 - Timeline of the surface currents data for HFR-Galicia (LPRO), HFR-Lisbon (SIMOC, EPSM and JLSM) and HFR-South (TRADE, SGTR, AFTR, VATR, MAZA). Timelines for radial surface currents (blue) and total surface currents (red).

In the framework of the JERICO projects, which also include JERICO-NEXT and JERICO-S3, and several other European collaborations, there has been a joint effort to establish an operational pan-European HF radar network. In this quest, the HFR data standardization and integration across various European regions, with the definition of procedures and methodologies, was promoted in JERICO. It included the development and implementation of standardized data formats and quality control procedures to ensure the consistency and reliability of the data collected from different HF radar stations. Thus, since 2019, the Portuguese National HFR network surface current data has been integrated into the European HFR node, which serves as the central hub for European HFR operators and providers, directing standardized HF radar data to both European and global data portals (Mantovani et al., 2020). As part of the EuroGOOS HFR Task Team, Instituto Hidrográfico has been attributed a single Digital Object Identifier (DOI) associated to each of the regional networks and to the total surface current datasets generated for these networks. This makes the HF radar data traceable, in accordance with FAIR

data principles. This subject and necessity had been previously discussed by operators and providers, and the DOI attribution presents itself as a way to ensure that operators and their networks receive credit and visibility for their data.

2.3 HFR data studies

The validation studies of HF radar data using the National High-Frequency Radar network of continental Portugal conducted in the past were quite sporadic (Vicente and Martinho, 2014, and Vicente and Oliveira, 2014). In recent years, the scientific research studies produced were mostly dedicated to the tsunami detection module installed in 2018 (Lima and Fernandes, 2019, 2020, 2021).

In Lima and Lamas (2024), the quality of the HF data

retrieved from the MONIZEE system, specifically from HFR-South (Instituto Hidrográfico, 2014), was analysed by applying different validation strategies. In this study, the comparison between HFR and ADCP observations retrieved satisfactory results, in good agreement with previous studies. Also, the comparison of the HF radar data with drifter velocity data was done, showing good match for the beginning of the drifter mission, and the comparison between the drifter's real trajectory and synthetic drifters simulated presented promising results.

4. CONCLUSIONS

With the establishment of a near-real-time HF radar observation network, steadily operating since 2012, Instituto Hidrográfico retrieves observations from the ocean surface currents, sea state, wind, and tsunami detection observations. This installed capacity is essential to guarantee the continuous monitoring of the Portuguese coastal areas, supporting the Navy's mission, fundamental activities and management. It also promotes scientific research and collaboration

opportunities, such as the fruitful engagement in the EuroGOOS HFR Task Team, and the integration in the HFR European network. With more than 12 years of observation data retrieved from the HF radar network, Instituto Hidrográfico has now become actively engaged in taking advantage of this data, following also a comprehensive organization of key information about the network, facilitating its effective use and integration into ongoing research and operational activities.

Acknowledgements

VL is supported by the EU-funded project Blue-Cloud 2026 (BC2026), project number 101094227, and LL collaborates in BC2026.

VL and IM collaborate in JERICO-RI, which has received funding from the European Commission's Horizon 2020 Research and Innovation programme under grant agreements No 871153 and 951799 (projects JERICO-S3 and JERICO-DS, respectively).

VL, IM and LL collaborate in project AQUARIUS, which is funded by European Union's Horizon Europe Framework Programme for Research and Innovation under grant agreement No 101130915.

The HFR surface current data from HFR-Lisbon can be cited by using:

Instituto Hidrográfico. (2012). High Frequency Radar Lisboa network (HFR-Lisboa). European HFR-Node

<https://doi.org/10.57762/v31p-h205>

The HFR surface current data from HFR-South can be cited by using:

Instituto Hidrográfico & Puertos Del Estado. (2014). High Frequency Radar South network (HFR-South). European HFR-Node.

<https://doi.org/10.57762/RNCF-D423>

REFERENCES

Instituto Hidrográfico. (2012). High Frequency Radar Lisboa network (HFR-Lisboa). *European HFR-Node.*

<https://doi.org/10.57762/v31p-h205>

Instituto Hidrográfico & Puertos Del Estado. (2014). High Frequency Radar South network (HFR-South). *European HFR-Node.*

<https://doi.org/10.57762/RNCF-D423>

Lima, V. and Santos Fernandes, C. (2019). Tsunami arrival detection with high frequency (HF) radar technology. *MarineTech2019 & International Workshop Linking Earth Observation Data and Sustainable Development across the Atlantic, CCE, 3–5 December 2019.*

Lima, V. and Santos Fernandes, C. (2020). Application of high frequency (HF) radar technology in the detection of tsunamis. *6as Jornadas de Engenharia Hidrográfica / 5as Jornadas Luso-Espanholas de Hidrografia 2020, 3–5 de novembro 2020, Instituto Hidrográfico, Lisboa, Portugal.*

Lima, V. and Santos Fernandes, C. (2021). Radares de Alta Frequência (HF) e sua utilização na Oceanografia e na monitorização de tsunamis. *Revista de Marinha, n.º 1023, edição Setembro/Outubro 2021, Lisboa, Portugal.*

Lima, V. and Lamas, L. (2024). Monitoring Ocean Currents with High-Frequency Radars along the Portuguese Coast: Overview and Challenges, *Proceedings of the 8th IAHR Europe Congress, Lisbon – Portugal, 4-7 June 2024.*

Mantovani, C., Corgnati, L., Horstmann, J., Rubio, A., Reyes, E., Quentin, C., Cosoli, S., Asensio, J.L., Mader, J., Griffa, A. (2020). Best practices on high frequency radar deployment and operation for ocean current measurement. *Frontiers in Marine Science, 7, 210, 1-21, <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00210>*

Martinho, A.S. (2011). Ponto de situação do projeto SIMOC. Instituto Hidrográfico.

Martins, I., Vitorino, J., Almeida, S. (2010). The Nazaré Canyon observatory (W-Portugal) real-time monitoring of a large submarine canyon, *OCEANS'10 IEEE, Sydney, 1-7, IEEE, <https://doi.10.1109/OCEANSSYD.2010.5603854>*

Vicente, R. and Martinho, A. (2014). Validação de correntes marítimas de superfície medidas por um sistema de radares de alta frequência na zona sul da Península Ibérica, *3as Jornadas de Engenharia Hidrográfica, Lisbon, 24, 25 e 26 June 2014.*

Vicente, R. and Oliveira, P. (2014). Análise de correntes marítimas de superfície medidas com radares de alta frequência na área de Sines durante o verão de 2008, *3as Jornadas de Engenharia Hidrográfica, Lisboa, 24, 25 e 26 June 2014.*

Estudio de la circulación superficial en el cabo de Santa María (GdC) mediante el uso de boyas lagrangianas

Luján-Amoraga, E¹., Bolado-Penagos, M¹., Román-Cascón, C¹.

¹ Departamento de Física Aplicada, Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales, Instituto Universitario de Investigación Marina (INMAR), Universidad de Cádiz, Puerto Real 11519, Cádiz, España.
esther.lujanamoraga@alum.uca.es

Resumen: La circulación oceánica superficial del Golfo de Cádiz (GdC) es compleja debido a la interacción de diversos factores como los vientos, descargas fluviales, topografía submarina y la cercanía al Estrecho de Gibraltar. Este estudio se centra en el análisis de las trayectorias seguidas por cuatro boyas lagrangianas que se lanzaron en las proximidades de la costa norte del GdC, al este del Cabo de Santa María en octubre de 2022. El objetivo de este trabajo se centra en identificar los factores que influyen en las trayectorias seguidas, con especial consideración en los forzamientos atmosféricos. Por ello, los resultados de las trayectorias se correlacionaron con datos de viento (simulaciones numéricas del modelo WRF), además de con variables oceanográficas como clorofila y temperatura superficial del mar. De manera adicional, estos resultados han permitido validar el modelo de circulación oceánica IBI (*Iberian-Biscay-Ireland*), lo que abre la posibilidad de extender este estudio con nuevos objetivos. Este estudio ha permitido mejorar la comprensión de la circulación superficial y la interacción atmósfera-océano en la zona, lo que puede servir para profundizar en la interpretación de mecanismos de transporte de diversas sustancias, como por ejemplo plásticos o larvas, entre otras muchas aplicaciones.

Palabras clave: Golfo de Cádiz, circulación superficial, boyas lagrangianas, modelo WRF

1. INTRODUCCIÓN

La circulación superficial del Golfo de Cádiz (GdC) está configurada por diversos factores forzantes, tanto meteorológicos como propios de la zona. El patrón de circulación superficial se caracteriza por un flujo anticiclónico hacia el ecuador en el Atlántico Este (que viaja hacia el sureste en esta zona) y contracorrientes costeras hacia el oeste que forman celdas ciclónicas (Relvas y Barton, 2002) en la zona norte del GdC. En esta zona, debido a estos forzamientos, se producen afloramientos costeros y estructuras de mesoescala (Criado-Aldeanueva *et al.*, 2006). Los vientos que favorecen eventos de afloramiento, son vientos del oeste-suroeste, mientras que su relajación y la aparición de vientos del este favorecen la formación de una corriente hacia el polo (Garel *et al.*, 2016). En la parte más al sur de nuestra zona de estudio, los vientos más frecuentes son los de Levante (E-SE), y asociados a eventos persistentes de estos vientos, encontramos los eddies anticiclónicos de mesoescala. Estos eddies se forman tras episodios significativos de viento de Levante durante los meses de julio-octubre (Peliz *et al.*, 2014). El desarrollo de estas estructuras, suele estar relacionado con un dipolo con una parte ciclónica.

En el estudio de Peliz *et al.* (2014), se analizaron tres periodos de tiempo en los que se desarrollaban este tipo de estructuras, sin embargo, no observaron en ninguno de los casos una señal clara de la respuesta ciclónica.

Este trabajo trata de profundizar y comprender mejor la circulación superficial previamente presentada mediante el estudio de la trayectoria registrada por cuatro boyas de deriva lanzadas al este del Cabo de Santa María, las cuales siguieron un giro ciclónico.

Para la realización del estudio, se han correlacionado dichas trayectorias con simulaciones numéricas del modelo WRF y variables oceanográficas como clorofila y temperatura superficial del mar.

2. METODOLOGÍA

2.1. BOYAS LAGRANGIANAS

Se lanzaron un total de cuatro boyas lagrangianas (<https://www.southteksl.com/>) al este del cabo de Santa María, el 12 de octubre de 2022. Estas boyas estaban provistas de una vela de ~50 cm, junto con 1 metro de cabo, para de esta forma minimizar el efecto del viento sobre la boya. Dos de las boyas fueron lanzadas en la posición 37.080 °N 7.476 °O (a la altura de la isóbata de 25 metros), y dos en la posición 36.993 °N 7.423 °O (a la altura de la isóbata de 100 metros). Todas ellas fueron programadas para obtener sus posiciones con frecuencia horaria.

En este estudio se analizaron estas trayectorias en busca de un nuevo patrón de circulación superficial y de estructuras de mesoescala no descritas hasta la

fecha, debido a los escasos datos observacionales en el área de estudio.

2.2. CARACTERIZACIÓN DEL MEDIO

Con el fin de realizar una caracterización oceanográfica de la zona de estudio para el tiempo en el que las boyas estuvieron desplegadas, se analizaron datos de batimetría, clorofila y temperatura superficial.

Los datos de batimetría fueron descargados de la base de datos *European Marine Observation and Data Network* (EMODnet). Estos se utilizaron para analizar la posible influencia de la batimetría en la trayectoria y velocidad de las boyas de deriva.

El análisis de la temperatura superficial del mar se realizó a partir del producto *European North West Shelf/Iberia Biscay Irish Seas – High Resolution ODYSSEA L4 Sea Surface Temperature Analysis* (https://data.marine.copernicus.eu/product/SST_ATL_SST_L4_NRT_OBSERVATIONS_010_025/description). Este producto ofrece datos de temperatura diarios con una resolución espacial ~2 km, y es obtenido a partir de distintos satélites.

Los datos de la concentración superficial de clorofila se obtuvieron a partir del producto *Atlantic Ocean Colour (Copernicus-GlobColour), Bio-Geo-Chemical, L4 (daily interpolated) from Satellite Observations (1997-ongoing)* (https://data.marine.copernicus.eu/product/OCEAN_COLOUR_ATL_BGC_L4_MY_009_118/description). Al igual que el producto anterior, este ofrece observaciones de distintos satélites diarias, con resolución espacial de 1 km.

Tanto para la temperatura superficial del mar, como para la concentración superficial de clorofila, se analizó el periodo de tiempo comprendido entre el 1 y el 31 de octubre de 2022, estudiando así variaciones de clorofila en la zona de estudio antes, durante y después del tiempo registrado por las boyas, tratando de caracterizar las condiciones del medio.

2.3. WEATHER RESEARCH AND FORECASTING MODEL

Para el estudio del impacto del viento en la trayectoria de las boyas se utilizaron salidas numéricas de viento del modelo atmosférico mesoescalar *Weather Research and Forecasting (WRF)*, configurado con 3 dominios anidados de 9, 3 y 1 km respectivamente, y usando condiciones iniciales del modelo NCEP-GDAS/FNL a 0.25 ° de resolución horizontal (NCAR, 2017).

Se realizó una simulación que comprendía el periodo entre el 5 y el 25 de octubre de 2022. Se analizaron las salidas numéricas (horarias) ofrecidas por el modelo, buscando patrones en los regímenes de

viento que permitieran explicar la formación de un giro ciclónico, registrado por las boyas. Se estudiaron aquellos periodos en los que predominó la formación de brisas costeras en la zona norte del GdC, así como otros periodos donde el viento procedía principalmente del este incluso en dicha zona (vientos de levante bien establecidos en todo el GdC).

2.4. ATLANTIC IBERIC BISCAY IRISH (IBI)

Con el fin de validar si el modelo *Iberian-Biscay-Ireland* simulaba bien la trayectoria descrita por las boyas y por tanto realizaba una simulación correcta de la circulación superficial del GdC, se obtuvieron datos del producto *Atlantic-Iberian Biscay Irish-Ocean Physics Analysis and Forecast* (https://data.marine.copernicus.eu/product/IBI_ANALYSISFORECAST_PHY_005_001/services). El producto ofrece datos horarios con una resolución espacial de ~3 km.

Se analizaron los datos de corrientes superficiales del 1 al 31 de octubre de 2022 en la zona de estudio ofrecidos por el producto, y se compararon los resultados obtenidos con las trayectorias registradas por las boyas de deriva utilizando un análisis lagrangiano.

3. RESULTADOS

La totalidad de las boyas desplegadas en el norte del GdC, mostraron el mismo patrón de circulación. Estas se desplazaron siguiendo circulación en sentido antihorario (ciclónico). Dicha circulación se comprueba en la Fig.1, en donde se ha representado la trayectoria de cada una de estas boyas para el intervalo temporal comprendido entre el 12 y el 24 de octubre de 2022.

Estos resultados muestran como dos de las boyas, una vez realizado el primer giro ciclónico, tienden de nuevo a girar en la misma zona, reforzando el resultado de la tendencia ciclónica establecida en la área. Por el contrario dos de las boyas, desvían su trayectoria. Una de ellas consigue, aunque más adelante en el tiempo, seguir su recorrido y volver a girar. Sin embargo, la boya denominada 'LCA00566' (Fig. 1c) es arrastrada hacia costa.

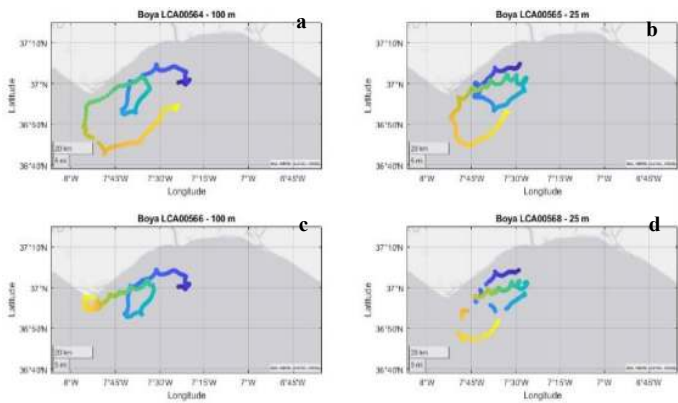


Fig. 1. Trayectorias registradas por las cuatro boyas de deriva durante el periodo de estudio. Columna de la izquierda para las boyas lanzadas en la isóbata de 100 m, y columna derecha, las boyas lanzadas en la isóbata de 25 m. La barra de colores muestra el tiempo, con colores más azules al inicio del periodo analizado.

Analizando la velocidad de las boyas frente a la batimetría de la zona de estudio (Fig. 2), se puede observar como un cambio abrupto de batimetría conlleva un aumento en la velocidad de propagación. Los resultados muestran un aumento en la velocidad de la boya (color amarillo) en el momento en el que la plataforma continental se estrecha y el gradiente de profundidad aumenta.

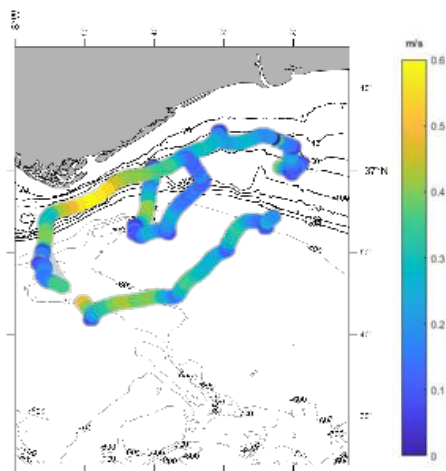


Fig. 2. Velocidad de la boya 'LCA00564' frente a la batimetría de la zona de estudio.

Con respecto de los datos de concentración de clorofila y temperatura superficial del mar, y superponiendo estos a las trayectorias de las boyas se observa, en el interior del giro ciclónico, un aumento de la concentración de clorofila, así como la presencia de agua más fría que la del resto del área de estudio (Fig. 3).

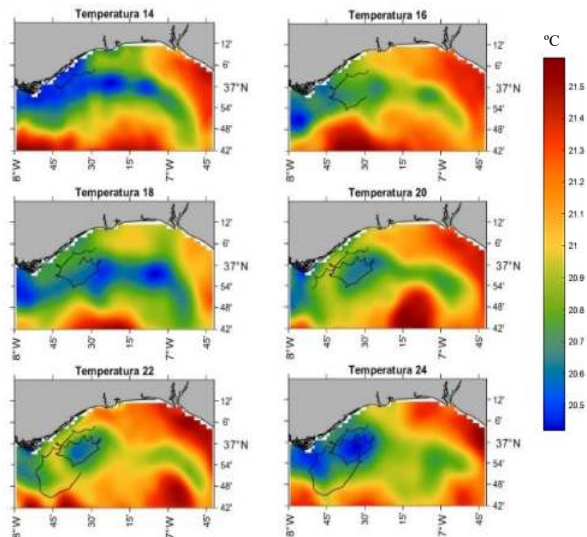


Fig. 3. Temperatura superficial del mar desde el día 14/10/2022 al día 24/10/2022. La línea negra representa la trayectoria recorrida por la boya 'LCA00565'.

En la Fig. 3, además, se muestra un aumento de la temperatura en la costa oriental del GdC, que avanza hacia el oeste, a excepción del día 18. Esta masa de agua más cálida podría estar relacionada con la presencia de la corriente invertida por forzamiento atmosférico, que viajaría hacia el polo, denominada contracorriente costera del GdC (Sirviente *et al.*, 2023).

Numerosos artículos como el de Teles-Machado *et al.* (2007), relacionan esta inversión de la corriente costera con eventos de viento provenientes del este (vientos de levante), por tanto, para relacionar estas observaciones con el forzamiento atmosférico, se analizaron las condiciones de viento días previos al lanzamiento de las boyas. Como ya se ha mencionado, la caracterización atmosférica en este trabajo se ha realizado mediante las salidas numéricas del modelo WRF.

Los resultados del análisis mostraron episodios de vientos de Levante intensos desde el día 6 de octubre de 2022, llegando a alcanzar velocidades de hasta 17 m·s⁻¹.

Como se ha indicado anteriormente, las boyas 'LCA00564' y 'LCA00566' se desviaron de la trayectoria que realizaron las otras dos boyas estudiadas. Para poder averiguar la causa del desvío en las trayectorias, se analizaron varios factores. En primer lugar las condiciones de viento en los días y las horas de este suceso, ya que cabría esperar que un viento intenso podría realizar un esfuerzo significativo que conlleva el desplazamiento de las boyas.

Se analizaron las salidas numéricas de la simulación con el modelo WRF para los días 18, 19, 20 y 21 de octubre, esperando vientos favorables a la trayectoria

desviada de las boyas, sin embargo, los resultados fueron contrarios, los vientos dominantes ofrecidos por el modelo durante esos días del estudio fueron vientos de componente sur – suroeste (Fig.4).

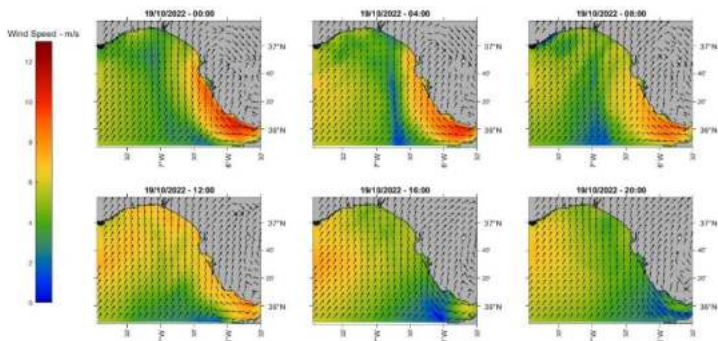


Fig. 4. Representación del viento el día 19/10/2022 cada 4 horas. Las flechas negras marcan la dirección del viento y los colores la intensidad de los mismos. Para una mejor visualización, los vectores del viento han sido normalizados.

Una vez descartado el forzamiento del viento como causante de este desvío, se pasó a estudiar otras variables del medio, como la marea. Los momentos en los que las boyas ‘LCA00564’ y ‘LCA00566’ cambiaron de rumbo coincidió con momentos de máxima velocidad en la corriente de marea. Por tanto, se asumió que el efecto de la marea tenía una mayor importancia en la trayectoria de las boyas que el viento.

Además, las salidas numéricas del modelo WRF fueron utilizadas para analizar una serie de *loops* realizados por las boyas (intentando relacionar estos con el desarrollo de brisas marinas) y otros aspectos de su trayectoria.

4. CONCLUSIONES

En este estudio se han analizado las trayectorias de cuatro boyas lagrangianas para comprender la dinámica de la circulación superficial en el Golfo de Cádiz, especialmente al este del Cabo de Santa María. La investigación se centró en la influencia de los vientos, la batimetría y otras variables oceanográficas en la formación de estructuras ciclónicas.

Los primeros resultados obtenidos mostraron que la trayectoria realizada por las boyas (rotación ciclónica), estaría relacionada con una zona de retención, capaz de acumular clorofila y agua fría en su interior y, que la batimetría en la zona de estudio influye significativamente en la velocidad de la circulación superficial.

Es importante señalar que los resultados mostrados en este resumen son provisionales, y el estudio

requiere un análisis más exhaustivo de los datos señalados en el periodo de observación.

Algunos de los próximos pasos en el estudio serán estudiar si la estructura ciclónica observada podría ser una respuesta a los giros anticiclónicos formados por eventos de viento de levante, actuando como una compensación de la vorticidad. Esto es similar a los mecanismos descritos por Santiago-García *et al.* (2019) en el Golfo de Tehuantepec (México). Además, se realizará una validación del modelo de circulación oceánica IBI y se determinará la intensidad de viento necesaria para influir en la circulación superficial del GdC.

REFERENCIAS

- Criado-Aldeanueva, F., García-Lafuente, J., Vargas, J. M., Del Río, J., Vázquez, A., Reul, A., & Sánchez, A. (2006). Distribution and circulation of water masses in the Gulf of Cadiz from in situ observations. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 53(11-13), 1144-1160.
- Garel, E., Laiz, I., Drago, T., & Relvas, P. (2016). Characterisation of coastal counter-currents on the inner shelf of the Gulf of Cadiz. *Journal of Marine Systems*, 155, 19-34.
- NCAR (2017) WRF-ARW V3: User's Guide. http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3/user_guide_V3.9/ARWUsersGuideV3.9.pdf. Accessed 5 Jul 2024.
- Peliz, A., Boutov, D., Aguiar, A. B., & Carton, X. (2014). The gulf of cadiz gap wind anticyclones. *Continental Shelf Research*, 91, 171-191.
- Relvas, P., & Barton, E. D. (2002). Mesoscale patterns in the Cape Sao Vicente (Iberian Peninsula) upwelling region. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 107(C10), 28-1.
- Santiago-García, M. W., Parés-Sierra, A. F., & Trasiña, A. (2019). Dipole-wind interactions under gap wind jet conditions in the Gulf of Tehuantepec, Mexico: A surface drifter and satellite database analysis. *Plos one*, 14(12), e0226366.
- Sirviente, S., Bolado-Penagos, M., Gomiz-Pascual, J. J., Romero-Cózar, J., Vázquez, A., & Bruno, M. (2023). Dynamics of atmospheric-driven surface currents on the Gulf of Cadiz continental shelf and its link with the Strait of Gibraltar and the Western Alboran Sea. *Progress in Oceanography*, 219, 103175.
- Teles-Machado, A., Peliz, A., Dubert, J., & Sánchez, R. F. (2007). On the onset of the Gulf of Cadiz Coastal Countercurrent. *Geophysical Research Letters*, 34(12).

Variación espacio-temporal de la Comunidad planctónica en el Golfo de Cádiz

T. Montaña (1); C. González-Cabrera(2); A. Aldarias; R(3). Sánchez-Leal(4) e F.Baldó(5)

Centro Oceanográfico de Cádiz (COCAD-IEO), CSIC, Cádiz, SPAIN.

teresa.montano@ieo.csic.es

Resumen: Understanding zooplankton dynamics is crucial for ecosystem-based management. However, this type of research in the Gulf of Cádiz is limited. To address this, we studied the composition and variability of mesozooplankton using data from 21 seasonal surveys conducted between 2016 and 2021. Samples were scanned with a ZooScan, and were analysed and processed using the Zooprocess software and Ecotaxa to estimate the mean total abundance and taxonomic composition. In this preliminary descriptive study, differences in total zooplankton abundance values are observed between sampling stations, as well as variations in the relative percentage of the main functional groups between seasons and sampling stations. Nonetheless, it is essential to continue investigating and developing sufficiently long and robust time series to determine whether these differences are significant.

Palabras clave: Mesozooplankton, Golfo de Cádiz, abundancia, composición taxonómica.

1. INTRODUCCIÓN

Las comunidades planctónicas se caracterizan por ser altamente sensibles a los cambios físico-químicos del entorno, por lo que son susceptible a los cambios provocados por el cambio climático y la acidificación de los océanos (Hays et al., 2005; Ratnarajah et al., 2023). Así mismo, debido a sus características intrínsecas y al cumplir un papel clave en el funcionamiento del ecosistema, constituyendo la base de importantes servicios ecosistémicos como son las pesquerías y el secuestro de carbono (Bedford et al., 2020), son considerados componentes esenciales en la evaluación del estado de los mismos según la comisión de OSPAR. Esto convierte a los organismos planctónicos en indicadores de vigilancia del estado de los hábitats pelágicos. No obstante, los estudios sobre variabilidad espacio-temporal en el Golfo de Cádiz son limitados.

2. DESARROLLO

Se estudió la composición de los principales grupos funcionales (copépodos, cladóceros, apendicularios y otros), así como la variabilidad espacio-temporal de la comunidad mesozooplanktónica usando datos de 21

campañas oceanográficas, realizadas dentro del marco de proyecto “STOCA”, con una frecuencia de muestreo estacional, durante el periodo de tiempo comprendido entre 2016 y el 2021. Las muestras fueron tomadas en tres puntos de muestreo distintos: costa (GD1), plataforma (GD3) y talud (GD6). Estos están distribuidos a lo largo del transecto de muestreo costa-océano denominado “Guadalquivir” que se dispone perpendicular a la costa frente al estuario del río con el mismo nombre (Fig.1).

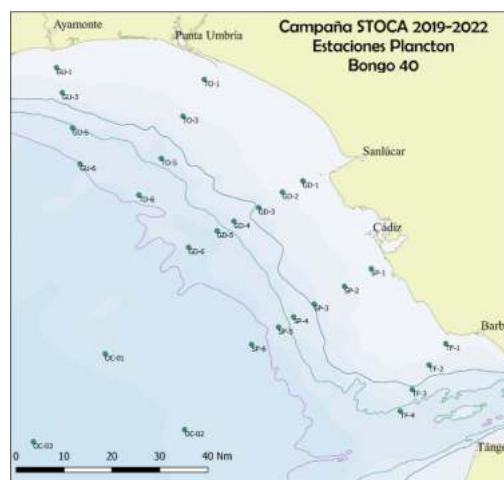


Fig.1. Parrilla de muestreo de la campaña oceanográfica “STOCA” donde se observa la radial “Guadalquivir” y las tres estaciones (GD1,3 y 6) donde se realizaron los muestreos.

Las muestras fueron recolectadas en los diferentes puntos de muestreo mediante pescas oblicuas con una red Bongo-40 de 200 micras,

mientras el barco se desplazaba a una velocidad de 2,5 nudos. La profundidad máxima a la que se tomaron las muestras fue de 200m en las estaciones más profundas. En el barco, las muestras son guardadas en botes de 250 ml y fijadas con formol al 4%. Una vez en el laboratorio, una fracción de la muestra es destinada a la estimación de la biomasa mediante peso seco (mg/m^3), mientras que otra fracción es destinada a la estimación de la abundancia y composición taxonómica. Para ello las muestras son fraccionadas y las alicuotas resultantes digitalizadas mediante un escaner llamado "ZooScan". Una vez digitalizada la imagen mediante el software "Zooprocess" cada uno de los organismos es recortado en una imagen independiente. Por último, las imágenes resultantes son subidas a la plataforma online "Ecotaxa" donde mediante IA se hará una primera clasificación de los organismos, en base a una base de imágenes ya clasificadas previamente. Esta clasificación debe ser revisada por un especialista para asegurarse de que la clasificación automática ha sido correcta.

Una vez procesadas las imágenes, se estima la abundancia total de zooplancton (ind/m^2), así como la abundancia relativa (%) de los principales grupos funcionales en cada estación de muestreo y estación del año.

3. RESULTADOS

Alguno de los resultados obtenidos en el presente estudio son:

Se ha observado que, para el periodo de tiempo comprendido entre 2016 y 2018, la mayor abundancia media de mesozooplancton total (ind/m^2) se registró en la estación intermedia GD3 ($196,853 \text{ ind}/\text{m}^2$), seguida por la estación costera GD1 ($147,285 \text{ ind}/\text{m}^2$) y la estación más alejada de la costa, GD6 ($101,092 \text{ ind}/\text{m}^2$). En la estación costera la abundancia relativa promedio de copépodos y cladóceros es similar (44 y 41 %, respectivamente), mientras que a medida que nos alejamos de costa el % de copépodos aumenta y disminuye el de cladóceros. La estación del año con mayor abundancia media de mesozooplancton total fue la primavera ($298,762 \text{ ind}/\text{m}^2$) seguido del verano, el invierno y el otoño. Los copépodos dominaron el invierno, otoño y verano (69-85%), mientras que la abundancia relativa de cladóceros mostró un incremento durante la primavera (36%) (Fig.2).

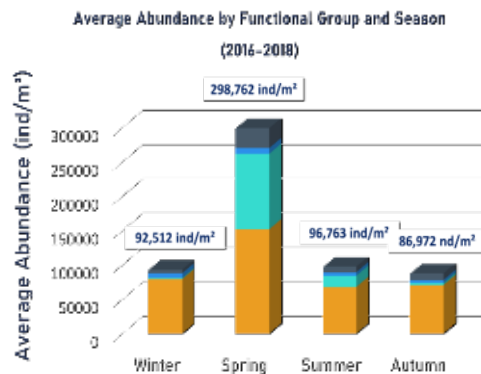


Fig.2 Abundancia relativa (%) para cada estación del año en el periodo de tiempo comprendido entre 2016 y 2018.

Si se analizan las estaciones de manera independiente se observa:

En la estación costera (GD1), para el periodo de tiempo comprendido entre 2016 y 2018, se observó que durante la primavera el grupo dominante son los cladóceros (63%), mientras que el resto del año dominan los copépodos (68-76%).

La estación intermedia (GD3), para el periodo de tiempo comprendido entre 2016 y 2021, los copépodos dominaron en otoño e invierno (70-75%), los cladóceros mostraron un incremento en primavera, y en verano tanto copépodos como cladóceros tenían abundancias relativas (%) similares (51 y 41%, respectivamente).

Por último, en la estación más alejada de la costa (GD6), el grupo funcional más abundante durante todo el año fueron los copépodos (65-89%).

4. CONCLUSIONES

Es evidente la falta de trabajos de investigación en el Golfo de Cádiz que tengan como objetivo el estudio de la dinámica de la comunidad zooplanctónica, a pesar de su importante papel en la dinámica de los ecosistemas marinos. No obstante, a partir de este estudio descriptivo y preliminar se puede observar, a priori, una variación espacial y temporal en la abundancia total de mesozooplancton, así como en la abundancia relativa (%) de los principales grupos funcionales. Es esencial continuar tomando y procesando muestras, con el objetivo de elaborar series temporales lo suficientemente largas como para poder llevar a cabo análisis estadísticos robustos que nos permitan determinar si estas diferencias que se aprecian son realmente significativas o no estadísticamente.

BIBLIOGRAFÍA

Bedford, J., Ostle, C., Johns, D. G., Atkinson, A., Best, M., Bresnan, E., ... & McQuatters-Gollop, A. (2020). Lifeform indicators reveal large- scale shifts in plankton across the North-West European shelf. *Global Change Biology*, 26(6), 3482-3497.

Hays, G. C., Richardson, A. J., & Robinson, C. (2005). Climate change and marine plankton. *Trends in ecology & evolution*, 20(6), 337-344.

Ratnarajah, L., Abu-Alhaija, R., Atkinson, A., Batten, S., Bax, N. J., Bernard, K. S., ... Yebra, L. (2023). Monitoring and modelling marine zooplankton in a changing climate. *Nature Communications*, 14(1), 564

The operational drift model of the Portuguese Navy – an approach to solve objects trajectory prediction at sea

Mota P. (1), Guerreiro M. (2), Monteiro H. (3)

(1) CGEOMETOC, Instituto Hidrográfico. paul.mota@hidrografico.pt

(2) CGEOMETOC, Instituto Hidrográfico. martha.guerreiro@hidrografico.pt

(3) CGEOMETOC, Instituto Hidrográfico. helena.monteiro@hidrografico.pt

Abstract: The Geospatial, Meteorological and Oceanographic Center (CGEOMETOC) is an operational specialized center that focuses on providing geospatial, meteorological and oceanographic information to support a wide range of operations and requirements to the Portuguese Navy and allies. Within the scope of its role, we are required to maintain an operational drift model to support Portuguese Maritime Search and Rescue Coordination Centers (MRCCs) and ensure the success of the operations carried out. The wide range of different objects at drift may imply using various particle trajectory models to simulate their movements at sea. Operationally, it makes sense to make use of a single solution capable of modelling all of them. Opendrift is an open-source python-based framework, under continuous development by the Norwegian Meteorological Institute and the scientific community. It provides a modular approach to particle modelling and is use for any type of drift simulation. We made use of this tool, and created our implementation of the Python code, to integrate it into our operational forecast system. By using the high-resolution coverage of the models we operate, we aim to test Opendrift as a tool to provide accurate modelling of different object trajectories in our areas of interest. We first compared the model's generic solution against historical data of various objects. We aimed to test how the time and spatial resolution of the forcing models affect the simulated positions of the particles. We focused on the Leeway module of Opendrift, by testing multiple combinations of the GFS (25 km), ECMWF (13 km), and NEMO (25 km) models. The Opendrift tool has been a significant improvement in day-to-day operations, and preliminary results have shown good accuracy in tracking multiple types of objects subject to the effects of wind, waves, and currents.

Keywords: oceanography, drift, particle, tracking

1. INTRODUCTION

The occurrence of drifting objects at sea is a critical concern in various maritime operations, including search and rescue (SAR) and pollution mitigation efforts. Understanding and predicting the drift of these objects is essential for effective SAR operations and environmental protection.

Simulating the drift of objects at sea involves several significant challenges. The ocean environment is highly dynamic, with varying currents, winds, and wave conditions, making accurate prediction difficult. Objects with complex shapes exhibit non-linear drift characteristics, and the immersion ratio, which influences the leeway speed, adds another layer of complexity. Asymmetric objects can have substantial crosswind motion, complicating trajectory predictions (Breivik and Allen, 2008).

Drifting objects in the sea vary widely in nature and characteristics. These include persons-in-water (PIW), who may be adrift in different postures such as upright, sitting, or facedown, each affecting their drift characteristics (Allen and Plourde, 1999; Allen *et al.*, 2005). Life rafts and survival craft often have ballast and various load conditions that affect their immersion ratio and drift behaviour. Unpowered vessels, such as small boats without propulsion, drift based on wind and currents. Shipping containers are

large, often partially submerged objects whose drift properties have been studied (Daniel *et al.*, 2003). Hazardous materials (HAZMAT) are objects containing pollutants that require precise tracking to mitigate environmental damage.

Field experiments to collect drift data are expensive and time-consuming, and older data may be based on outdated methods, reducing its reliability (Allen & Plourde, 1999). Additionally, drift characteristics can vary significantly across different sea areas due to local hydrological conditions and current systems (Zhu *et al.*, 2019; Guan *et al.*, 2021).

To address these challenges, several approaches and advancements have been made. Operational forecast models like the U.S. Coast Guard's SAROPS, Canadian CANSARP, and French MOTHY use various environmental inputs to predict drift trajectories (Kratzke *et al.*, 2010; Canadian Coast Guard, 2009; Daniel *et al.*, 2003). Leeway models, initially proposed by Allen and Plourde (1999), decompose leeway into downwind and crosswind components, aiding in more accurate predictions. Monte Carlo simulations use probabilistic methods to account for uncertainties in drift predictions, helping to delineate potential search areas (Allen, 2005). Advanced data collection techniques, such as small unmanned aerial systems (sUAS) for measuring wind speed, have improved the feasibility and reduced the cost of field experiments. Developing region-specific

databases of drift characteristics helps tailor predictions to local conditions, improving accuracy (Allen and Plourde, 1999). Advances in modelling, data collection, and regional understanding have significantly improved the ability to predict and manage drifting objects. Continued research and development of new technologies and methodologies are essential for further enhancing the precision and efficiency of these critical maritime operations.

2. METHODOLOGY

The Opendrift framework has been implemented into the Portuguese Navy's operational forecast system as a tool to provide fast and accurate drift simulations of multiple objects that are regularly tracked along the Portuguese Search and Rescue Area. This open-source, python coded framework has been under continuous development by the Norwegian Meteorological Institute for many years. Opendrift functions as an offline particle trajectory framework capable of performing all tasks common to conventional ocean and atmospheric trajectory models. The software follows a modular approach to particle tracking and is distributed with multiple sub-modules which deal with the specificities of different drifting objects. For instance, the Leeway module advances and propagates objects according to their drift properties when subject to wind and ocean currents, as described in (Dagestad, 2018). Opendrift can ingest environmental forcing fields from atmospheric, wave, or ocean models, enhancing accuracy when higher resolution models are available. The framework has undergone validation in multiple projects (Pärt, 2023; Nguyen, 2023; Crivellaro, 2022) with very positive results. Its robustness, ease of use, and ability to configure physical properties of drifting objects make it highly suitable for operational centers.

The focus of this study was to test the accuracy of the Leeway module of Opendrift against historical data from various oceanic and nearshore drifter deployments and its sensitivity to different forcing fields. The Leeway drift of an object is mainly forced by wind acting upon its buoyancy properties and the resulting movement of particles subject to ocean currents. As such, the only forcing fields used were the ones provided by the NEMO ocean circulation model and ECMWF and GFS atmospheric models.

Opendrift is fully integrated with the CMEMS platform service, offering access to the NEMO (Nucleus for European Modelling of the Ocean) model with global coverage, a spatial resolution of 0.083°, and hourly timesteps. Unfortunately, the study period did not have access to this version of the model, so the version with 6-hour timestep resolution was used instead. For each case, eastward and northward sea water velocity at the surface was utilized.

Atmospheric forcing fields were provided by archived data from the ECMWF model (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts). The version used covers an area between 40° S to 90°N and 60° W to 80° E with a spatial resolution of 0.125° and 6-hour timesteps.

The GFS (Global Forecast System), managed by NCEP (National Centers for Environmental Prediction), provides full global coverage with a spatial resolution of 0.5°. Both 3-hour and 6-hour temporal resolutions were employed. The 10-meter height eastward and northward wind components of the models were used as the forcing fields.

Ocean drifters equipped with real-time GPS-positioning offer a unique local view of the ocean surface. In total, four Wavy drifters, belonging to the Melo Consortium were released on the 15th of August and on the 9th and 16th of September 2021. While the first two were released at offshore locations, the remaining ones were released in an area nearshore (Figure 1). These small drifters, with a diameter of 12 cm, were designed for use at the ocean surface, with optimized buoyancy to minimize vulnerability to direct wind effects. They measure ocean wave heights, direction, and GPS positions every 20 minutes.

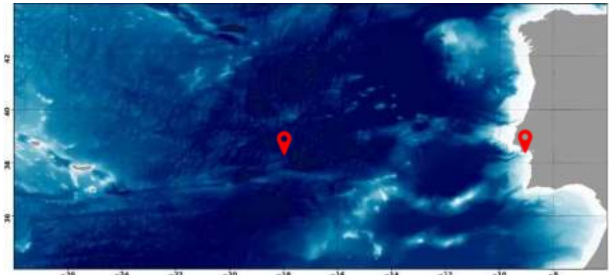


Figure 1. Approximate location of drifter deployments. Drifters 578 and 580 were released offshore, and drifters 522 and 566 nearshore.

Initially, only drifters 578 and 580 were used to determine the Wavys drift properties. This deployment occurred far from the influence of land and local orographic effects, which are typically harder to properly represent in the models. Average drift properties were determined to create a virtual drifter model that accurately simulates the real-life object. The downwind slope and standard deviation were iteratively modified, using ECMWF and NEMO forcing fields for wind and surface current parameters, respectively. The resulting simulated tracks were evaluated using the Liu-Weissberg skill score (Liu and Weissberg, 2011).

As described in Pärt (2023): this skill score (SS) evaluates the separation of drifter and model trajectories along their entire path, normalized by the total length of the path:

$$SS = \begin{cases} 1 - \frac{s}{n} & \text{if } s \leq n \\ 0 & \text{if } s > n \end{cases} \quad (1)$$

where s is the cumulative Lagrangian separation distance normalized by the associated cumulative observed trajectory length, and n is the tolerance threshold, which we set to 1, following Liu and Weisberg (2011) and Liu *et al.* (2014).

The cumulative Lagrangian separation distance, s , is calculated as the sum of the Lagrangian separation distances at each time step along the simulated trajectories, normalized by the total length of the observed trajectories:

$$s = \frac{\sum_{t=1}^N d(t)}{L} \quad (2)$$

where N is the total number of time steps, $d(t)$ is the Lagrangian separation distance at time step t , and L is the total length of the observed trajectories.

The virtual drifter was then compared against the two nearshore drifters, varying the forcing fields and comparing the skill score of each simulation. Three simulations were performed for each Wavy drifter, starting at the initial location and time for a period of 72 hours, to compare the simulated tracks with the ECMWF, GFS at 3 hours timesteps and GFS at 6 hours timesteps forcing fields

3. RESULTS

From the iterative process used to determine the virtual drifter leeway parameters, a downwind slope of 3.64 % and a downwind standard deviation of 3.89 cm/s were used for the remainder of the study. Figure 2 displays the comparison between the real-life objects and the simulated tracks obtained by adjusting the virtual drifter's response to wind forcing.

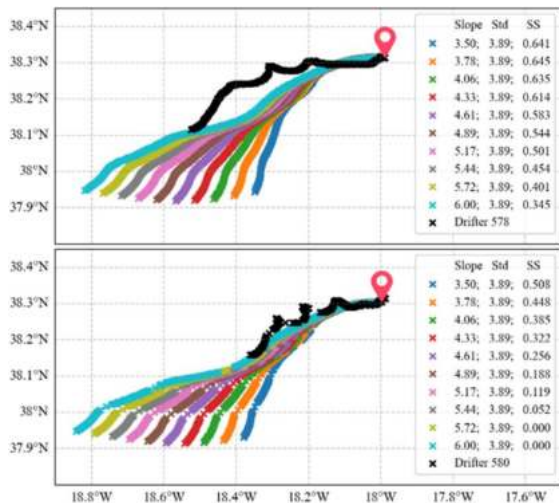


Figure 2. Virtual drifters track with varying downwind slope and standard deviation parameters, compared with the tracks of the offshore drifters 578 (top) and 580 (bottom).

The simulated tracks for the offshore positions all returned fairly similar results, with drifter 578 achieving slightly better skill scores with the GFS 3H + NEMO combination (0.66), closely followed by the GFS 6H + NEMO (0.65), and the ECMWF + NEMO simulations (0.64). Similar patterns were observed for

drifter 580, with skill scores of 0.5, 0.49, and 0.48 respectively (Figure 3).

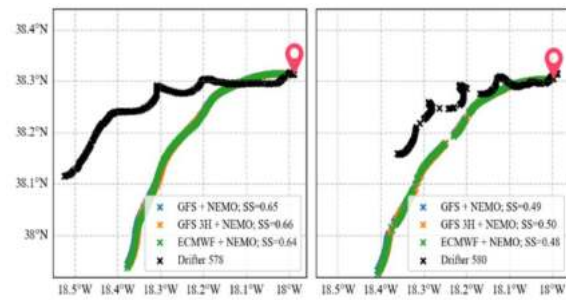
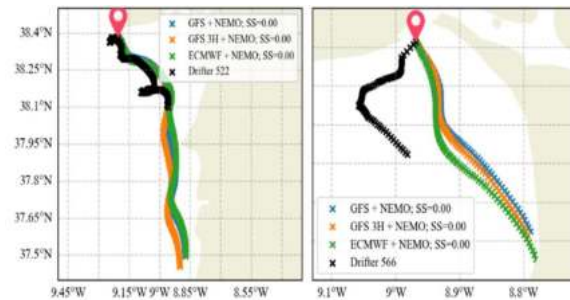


Figure 3. Comparison of tracks from offshore drifters 578 (left) and 580 (right) with forcing from GFS 3H, GFS 6H, ECMWF and NEMO combinations.

However, the simulations for the two nearshore deployments encountered challenges. The model tended to overestimate the influence of wind fields on the virtual drifter's trajectory for both the 522 and 566 drifters, resulting in simulated tracks that diverged significantly from observations. In both cases, all simulations returned a skill score of 0. Notably, for drifter 566, the virtual drifter made landfall before the simulation ended (Figure 4)

Figure 4. Comparison of tracks from drifters 522 and 566 with



forcing from GFS 3H, GFS 6H, ECMWF and NEMO combinations.

4. CONCLUSIONS

One of the main objectives of the study was to test the Opendrifter framework and its Leeway module against data from drifter deployments, evaluating its sensitivity to various forcing fields. The iterative process used to derive the drift properties provided a straightforward solution, and the simulations for the two offshore drifters performed well. However this approach may introduce biases toward the models used to force the simulations. A solution in which the drifter tracks are compared against *in-situ* wind data would've probably provided more unbiased parameters to properly describe the movement of these Wavy drifters.

Although potentially marginal, the skill score differences between the simulations for each combination of models, showed that using better temporal resolution for the forcing fields, slightly increased the quality of the results. Surprisingly, when comparing the results obtained with the GFS

(0.5° spatial resolution) model versus ECMWF (0.125°), both with a 6-hour timestep, the lowest resolution GFS performed slightly better than the latter.

The simulations for the nearshore drifters performed very poorly in this experiment. The deployment area was located south of the Arrábida mountain range, and right at the entrance of the Sado estuary, creating local conditions that the models used simply could not reproduce. One such example is drifter 566, which was deployed during an ebbing tide with its track showing a significant difference when compared with the one obtained from Opendrift. The lower resolution of the NEMO model, used as a forcing field, was not enough to transfer the appropriate tidal flow to the simulation.

The work presented in this article remains a preliminary study, with ongoing experiments yet to be concluded.

ACKNOWLEDGMENTS

To Dr. José Paulo Pinto and the Melo Consortium for providing data from the WAVY Drifters.

To the Opendrift development team in the Norwegian Meteorological Institute

This study has been conducted using E.U. Copernicus Marine Service Information; <https://doi.org/10.48670/moi-00016>

ECMWF data from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts distributed through collaboration with Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA)

GFS is openly distributed by the National Centers for Environmental Prediction (NCEP)

REFERENCES

- Allen, A. A., and Plourde, J. V. (1999). Review of Leeway: Field Experiments and Implementation. *SAR Journal*, 2(1), 1-23.
- Breivik, Ø., and Allen, A. A. (2008). An Operational Search and Rescue Model for the Norwegian Sea and the North Sea. *Journal of Marine Systems*, 69(1-2), 99-113.
- Breivik, Ø., Allen, A. A., Maisondieu, C., and Roth, J. C. (2011). Wind-induced drift of objects at sea: The leeway field method. *Applied Ocean Research*, 33(2), 100-109.
- Canadian Coast Guard. (2009). CANadian Maritime Search And Rescue Planning Tool (CANSARP). Canadian Coast Guard College CANSARP Development Group.
- Crivellaro, M.S., Candido, D.V., Lima Silveira T.C., Carvalhal Fonseca A., Segal, B. (2022) A tool for

a race against time: Dispersal simulations to support ongoing monitoring program of the invasive coral *Tubastraea coccinea*. *Mar. Pol. Bulletin*, 185. ISSN 0025-326X

- Daniel, P., Marty, F., and Josse, P. (2003). Impact of the progress in operational oceanography on oil spill drift forecasting in the Mediterranean Sea. In *Elsevier Oceanography Series* (Vol. 69, pp. 218-221). Elsevier.
- Dagestad, K.-F., Röhrs, J., Breivik, Ø., and Ådlandsvik, B.: OpenDrift v1.0: a generic framework for trajectory modelling, *Geosci. Model Dev.*, 11, 1405-1420, <https://doi.org/10.5194/gmd-11-1405-2018>, 2018.
- Guan, Y., Zhang, J., Zhang, X., Li, Z., Meng, J., Liu, G., and Cao, C. (2021). Identification of fishing vessel types and analysis of seasonal activities in the northern South China Sea based on AIS data: A case study of 2018. *Remote Sensing*, 13(10), 1952.
- Kratzke, T. M., Stone, L. D., and Frost, J. R. (2010). Search and rescue optimal planning system. In *2010 13th International Conference on Information Fusion* (pp. 1-8). IEEE.
- Nguyen DM, Hole LR, Breivik Ø, Nguyen TB, Pham NK. Marine Plastic Drift from the Mekong River to Southeast Asia. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023; 11(5):925.
- Pärt S, Björkqvist J-V., Alari V., Maljutenko I., Uiboupin R., An ocean-wave-trajectory forecasting system for the eastern Baltic Sea: Validation against drifting buoys and implementation for oil spill modeling, *Marine Pollution Bulletin* Volume 195, October 2023
- Röhrs, J., Dagestad, K.-F., Asbjørnsen, H., Nordam, T., Skancke, J., Jones, C. E., and Brekke, C.: The effect of vertical mixing on the horizontal drift of oil spills, *Ocean Sci.*, 14, 1581-1601, <https://doi.org/10.5194/os-14-1581-2018>, 2018.
- Zhu, K., Mu, L., and Tu, H. (2019). Exploration of the wind-induced drift characteristics of typical Chinese offshore fishing vessels. *Applied Ocean Research*, 92, 101916.

Metoccean support for Spanish Navy operations: The SIAAMETOC-OM operational system

A. Ortega (1), A. Lacida (1), A. Morales (1), C. J. González (1), R. J. Ramos (1), G. Díaz-Hernández (2), and A. González (2)

(1) Instituto Hidrográfico de la Marina. Plaza San Severiano 3, 11007 Cadiz, Spain. aortfel@fn.mde.es

(2) Instituto de Hidráulica Ambiental, Universidad de Cantabria. C/ Isabel Torres 15 – PTCAN, 39011 Cantabria, Spain.

Abstract: SIAAMETOC-OM is an operational metoccean system for Naval Support at IHM, able to provide reliable climatologies and predictions in practically any worldwide region, through a user-friendly, GIS-based, graphic user interface (GUI) that can be deployed onboard. Input data are taken from public/official sources through a restricted website, or manually implemented through the GUI, being selected and processed according to the kind of operation (amphibious, mine-hunting, hydrography, etc.), type of ship (by prescribing the different tolerance levels), and the support scope (hindcast/forecast). SIAAMETOC-OM uses sea-wave numerical modeling and multiple data-processing techniques, providing both graphical and numerical outputs for assisting command decision-making during naval operations. Results are validated by onboard meteorological stations, wave buoys, and specific reports. SIAAMETOC-OM constitutes a pioneer, multi-purpose, naval support system capable of providing useful metoccean information for planning and executing Navy operations, which has been applied to multiple Spanish Navy and NATO missions with considerable success.

Key words: GEOMETOC support, metoccean hindcast/forecast, numerical models, operational oceanography.

1. INTRODUCTION

The Spanish Navy is currently enhancing its ability for environmental support for naval operations. This REA support (Rapid Environmental Assessment in NATO doctrine) is based on the generation of GEOMETOC data (GEOspacial, METeorology, OCEanography) to assist command decision-making during the planning and execution of naval operations. Modern oceanic numerical models and data availability, of wide application in the civilian framework, are being applied to these military purposes as well. Because of this, the Spanish Navy's Instituto Hidrográfico de la Marina (IHM) and the University of Cantabria's and the Foundation of Instituto de Hidráulica Ambiental (IHCantabria) have been collaborating since 2017 in the development of REA tools and operational systems for supporting naval operations in the coastal environment, paying especial attention to amphibious operations because of the challenging assessment of environmental shore conditions. On the basis of the pioneer SOPROA tool (Forecasting Operational System for Amphibious Operations; Ortega, 2016), IHM and IHCantabria have developed an advanced and complex SIAAMETOC-OM system (Metoccean Support Integrated Automatic System for Maritime Operations; Ortega et al., 2022), in the framework of the "Proyecto Coincidente 2018 de la Dirección General de Armamento y Material (DGAM)". In this work, the SIAAMETOC-OM system is described,

showing real-case applications during naval operations, and the available results from the ongoing system's validation.

2. CHARACTERISTICS OF THE OPERATIONAL SYSTEM

The core of SIAAMETOC-OM is based on sea-wave regional modeling (Dalrymple et al., 1984; Booij et al., 1999) and ocean data processing techniques, both for climate hindcast (hybrid downscaling) and for forecast (dynamic downscaling), providing naval support regarding waves, winds, currents, and hydrology in the operational area from both scopes (Camus et al., 2011). The main structure of SIAAMETOC-OM system is shown in Fig. 1.

Input data (sea-level, wind, waves, currents, water temperature and salinity, bathymetry) are selected and downloaded through a specific, restricted-access website (Fig. 2), from which the operational area is defining. Data sources are public/official institutions of proved accuracy: Puertos del Estado (www.puertos.es), MeteoGalicia (www.meteogalicia.gal), Copernicus CMEMS (marine.copernicus.eu) and C3S (climate.copernicus.eu), NOAA (www.noaa.gov), DWD (www.dwd.de), EMODnet (emodnet.ec.europa.eu), GEBCO (www.gebco.net), etc., the system being dynamically able to include new data sources if necessary. For each mission, the system is programmed to periodically download,

package and send compressed ZIP files to a prescribed users e-mail list. Also, input data can be manually implemented at any time.

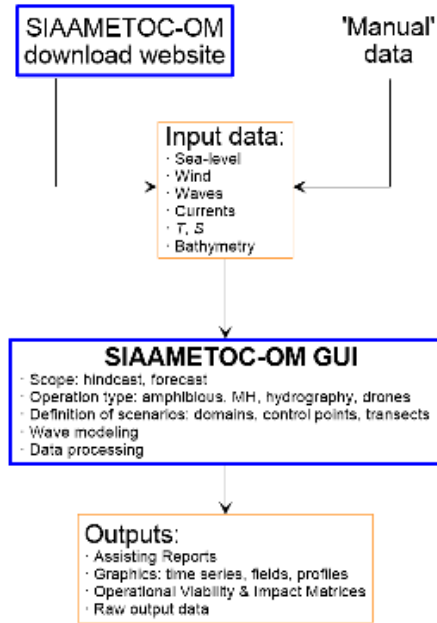


Fig. 1. Scheme of SIAAMETOC-OM structure and data flow.

Model simulations and data processing are carried out through a GIS-based, intuitive, graphic user interface (GUI; Fig. 3), which allows for the selection of input data sources and locations, establishing time intervals and resolution, definition of model grids (spatial coverage and resolution) and control points/transects, and implementation of the specific parameters for each kind of operation and vessel (tolerance levels). If necessary, a high-resolution model grid can be nested into the main simulation grid, which is especially crucial in amphibious beaching operations.



Fig. 2. SIAAMETOC-OM data selection and download website.

Currently, SIAAMETOC-OM allows for the consideration of 4 types of naval operations, with their related vessels/activities: amphibious (LCM, SCAT, F-470), mine-hunting (hunting, ROV, diving), hydrographic surveys, and unmanned surface vehicles (USV) such as Mariner. The GUI can be displayed offline by the onboard personnel during the execution of operations, who only need to download the low-weight ZIP forecast input files from their e-mail accounts.

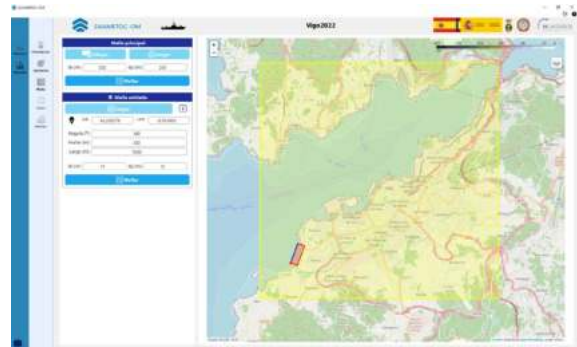


Fig. 3. SIAAMETOC-OM GUI.

SIAAMETOC-OM outputs are provided in three main different ways: raw output data (NetCDF files), graphical (JPG files: time-series, vertical profiles, spatial fields, impact matrices), and post-processed summary reports (PDF files) with all the necessary information in comprehensible and useful format. For each kind of operation, vessel, and activity, specific products are provided in order to assist command decision-making: navigability maps, impact matrices, viability indices (e.g., MSI(Modified Surf Index), for amphibious landing). When working in hindcast mode, climatologies and specific statistics are elaborated (typical and extreme conditions, seasonality, viability likelihood, etc.), while in forecast mode, daily predictions are provided during the execution of operations. Examples of SIAAMETOC-OM outputs are shown in Fig. 4.

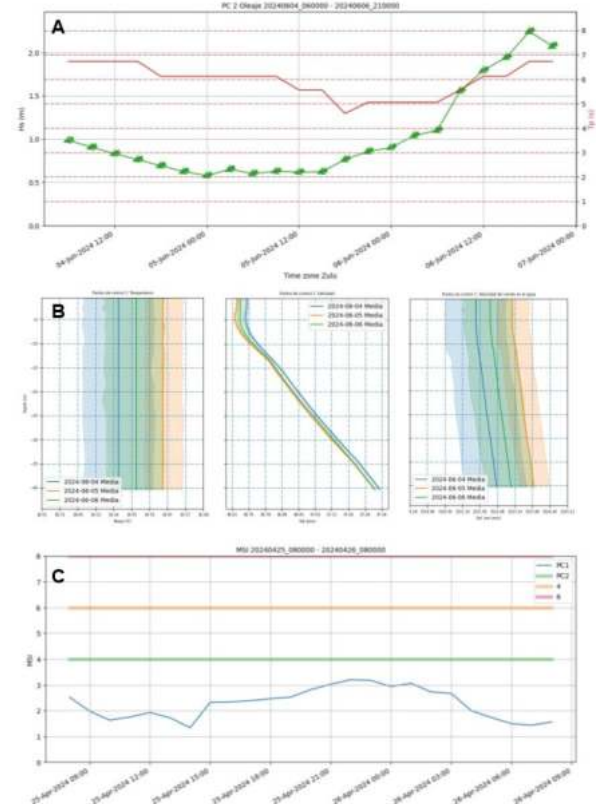


Fig. 4. Examples of SIAAMETOC-OM outputs. A: series of wave height (green line), direction (arrows), and period (red line). B: profiles of water temperature (left), salinity (center), and sound velocity (right). C: series of predicted MSI.

3. APPLICATION AND VALIDATION

To date, SIAAMETOC-OM has been successfully applied for supporting naval operations of the Spanish Navy in more than 20 military exercises involving amphibious, mine-hunting, and surface activities (GRUFLEX, FLOTEX, DEDALO, BALTOPS, SPMINEX, DYNAMIC MARINER, MARE APERTO), more than 10 IHM hydrographic survey campaigns (Fig. 5), and alternative applications for Naval Special Forces in diving operations. These supporting activities have been conducted from both IHM and onboard personnel, the latter being previously trained in the use of SIAAMETOC-OM and the interpretation of the system's outputs.

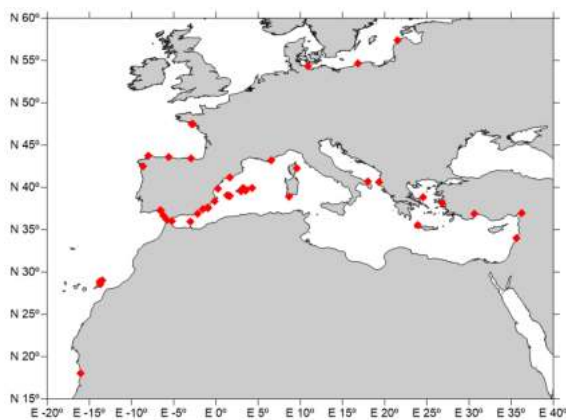


Fig. 5. Locations of last SIAAMETOC-OM naval supports.

The validation of SIAAMETOC-OM results has been made by the feedback of onboard personnel, specific field data acquisition deployments and surveys (Fig. 6), and, more recently, measured metocean data by onboard meteorological stations and wave buoys, both from the Puertos del Estado network and ad hoc moorings during the naval operations. Preliminary processing of these data points to a considerable system's ability to correctly characterize and predict the coastal metocean conditions regarding naval operations, being the quality of input data sources the key factor for the accuracy of the system. In that respect, the main application of this continuous validation process is the establishment of a hierarchy of data sources for best-fitting the actual conditions in each region, metocean regime, and purpose.

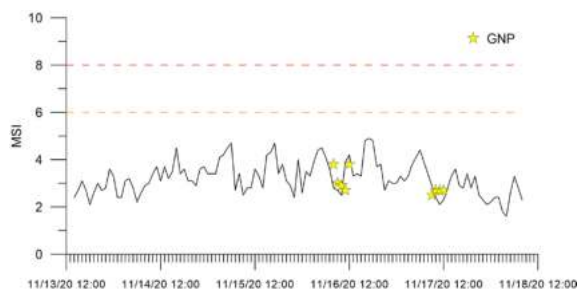


Fig. 6. Comparison between MSI predicted by SIAAMETOC-OM (black line) and measured by the Navy Beaching Group (GNP, yellow stars) at the Retin beach (Cadiz).

4. CONCLUDING REMARKS

SIAAMETOC-OM constitutes a reliable and useful tool for supporting command decision-making during naval operations, for both planning (hindcast) and execution (forecast). To date, it constitutes the only system with that characteristics among all worldwide military navies. The future development of SIAAMETOC-OM includes a deeper validation process and fully, multiplatform GIS data integration and deployment.

Acknowledgements

This work was carried out in the framework of the Spanish Ministry of Defense Technical Project SIAAMETOC-2.

REFERENCES

- Booij N., Ris R. C., and Holthuijsen L. H. (1999). A third-generation wave model for coastal regions 1. Model description and validation. *Journal of Geophysical Research*, 104-C4, 7649-7666.
- Dalrymple R. A., Kirby J. T., and Hwang P. A. (1984). Wave diffraction due to areas of energy dissipation. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 110, 67-79.
- Ortega A, Díaz-Hernández G, and González-Valle A. (2022). Desarrollo de sistemas operacionales para las operaciones navales para las fases de planeamiento y predicción: Proyecto SIAAMETOC-OM. In: Gómez-Martín, M. E. (Ed.). *XVI Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos*, Editorial Universitat Politècnica de València, 183-184.
- Ortega A. (2016). *Sistema Predicción Operacional para movimiento buque-costa*. TFG, Universidad de Cantabria.

OceanUCA: updating an operational oceanographic and atmospheric system to improve the observation and forecasting of coastal physical processes in Andalucía.

C. Román-Cascón (1), O. Álvarez (1), A. Izquierdo (1), J. Benavente (2), J. Gómez-Enri (1) & T. Fernández-Montblanc (2).

(1) Departamento de Física Aplicada, Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales, INMAR, CEIMAR, Universidad de Cádiz, Puerto Real, 11510, Spain (carlos.roman@uca.es).

(2) Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales, INMAR, CEIMAR, Universidad de Cádiz, Puerto Real, 11510, Spain.

The OceanUCA project focuses on the development of an operational platform to update current operational tools developed by the University of Cádiz, including new observational systems and high-resolution numerical models (both atmospheric and hydrodynamic), configured to reach their maximum resolution in the coast of Andalucía. The project will improve the current computational resources to respond to the societal needs, motivated by the growing spatiotemporal resolution of the models, that allow to effectively respond to specific environmental coastal problems (e.g., oil spills, marine and atmospheric heat waves, extreme events tracking).

This system aims to detect climate-change effects, enhance the environmental protection, facilitate the conservation of natural resources, develop early-warning products, or improve the short, medium, and long-term forecasts. The platform will allow to adequately use the coastal ecosystem services and will help the decision-making from institutions and third parties through the monitorization of marine and atmospheric processes in the area.

Keywords: meteorology, models, observations, oceanography, operational system.

1. INTRODUCTION

The Andalusian coast presents a complex and vulnerable hydrodynamic and topographical environment characterized by the influence of the Gibraltar Strait, important estuaries, coastal marshes, and other particularities. In terms of population, Spain has a settlement pattern on coastal areas, with 56% of the population being in the coastal zone, of which 28% of the population reside in cities in the coastal zone (de Andrés et al., 2017). Specifically, in Andalucía, the coastal zone represents the area with the highest population growth rates and, consequently, this is where the highest population densities originate. However, these areas are also exposed to overexploitation, oil spills, pollution due to industrial activities, and extreme weather events that can have devastating effects, with associated impacts on social welfare and the economy.

In this context, tools devoted to provide near real-time advice allow the design of useful contingency and emergency plans, while the user-friendly format of these tools favors the day-to-day use by society in general.

Among the environmental processes of interest in the area of study are the transport of sediments, pollutants, and oil spills, enhanced by the elevated marine traffic in some areas; the extreme-

temperatures events (heat waves); the formation of coastal winds (breezes) that can mitigate these extreme temperatures; the occurrence of intense wind events (especially close to the Strait of Gibraltar and when low-pressure systems approach to the area); etc. All these processes are impacted by the sea dynamics and the interaction between the surface (ocean and coastal land) and the atmosphere (Román-Cascón et al., 2021).

The growing international concerns for the sustainability of marine environments (Objective 14 of Sustainable Development, United Nations) request user-friendly systems that allow the presentation of all this information for different types of users. As a practical example, several urgent and quick actions should be taken after an oil spill event to help reduce its negative environmental and socioeconomic impacts. The accurate prediction of the surface currents in the area of interest and the evolution of the substances are crucial for the development of a plan that include the actions to be taken (Abascal et al., 2016; Azevedo et al., 2017; González et al., 2019). These procedures involve public and private administrations and numerous technical experts who need the commented operational tools to interpret the information adequately. Hence, the existence of an operational system that englobes numerical models and data from observational monitoring stations at high resolution in the area of interest and prepared by

experts in the topic is a mandatory requirement needed to help for better solutions during the commented operational actions. The development of this operational system (OceanUCA) is the main objective of this project.

2. PROJECT DEVELOPMENT PLANNING

The main objective of this project is the adaptation and consolidation of an operational oceanographic and atmospheric system on the Andalusian coast (with the capacity for being extrapolated to other domains). This will allow us to respond to emergencies such as oil spills, castaways, or atmospheric and oceanographic physical events monitoring in a user-friendly format, providing open data to institutions, research institutions, and society, in general.

The planned system consists of a combination of services based on numerical model output and observational data, including 9 oceanographical models at high resolution (UCA 2D, 2.5D, 3D PdE IBI/MERCATOR, Nivmar, WAM, IH WWII, SWAM, Ualg SOMA) and the atmospheric Weather Research and Forecasting (WRF) model (Fig. 1), whose operational and research use continues growing nowadays. The latter model incorporates different physical options (parameterizations) that are in continuous improvement by the scientific community. All the data from these models will need to be adapted and homogenized to the current output protocols for the interaction with the online application that will be developed.

Besides the models, the system will incorporate observational data from different sources: oceanographic buoys, satellite imagery, video-monitoring of beaches and dunes, meteorological weather stations (e.g., Fig. 2), surface fluxes instruments, high-frequency (HF) coastal radars, and all the data from the oceanographic and atmospheric field campaigns developed by different research groups. All these data and information will be incorporated into an interactive updated and state-of-the-art GIS tool.

The combined use of models and observations will also allow the continuous model evaluation, interesting from the operational point of view but also, to provide feedback to the modeling community in charge of the model development and improvement.

The last step will be the implementation of the commented data into the different layers OceanUCA web environment (Fig. 3), adapted to the new computational needs, with greater calculation and data storage capacity.

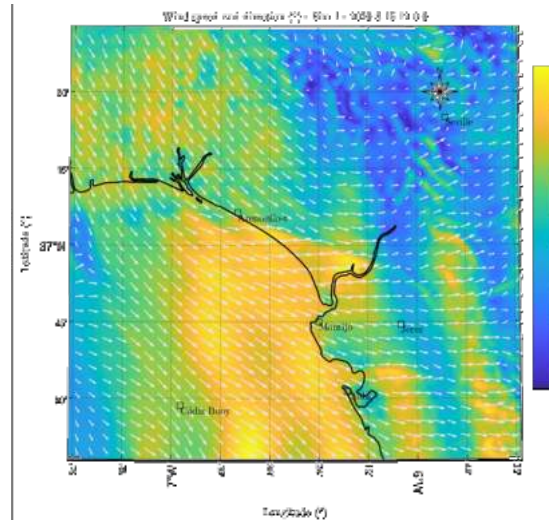


Fig. 1. Example of an atmospheric numerical output from the atmospheric Weather Research and Forecasting (WRF) model. In this case, the wind speed (colored contours, in m/s) and the wind direction (arrows, ° from North) are represented for the 15 of August 2020 at 12 UTC in the region of the North of the Gulf of Cádiz. Model simulations like this one will be included in the new platform, with updated and improved visualization tools to analyse the past, present and future conditions on the Andalusian coast. Additionally, numerical output from the atmospheric models (variables such as wind speed or wind direction) could be used as input for the hydrodynamical models.



Fig. 2. Example of coastal observations that will be included in the new OceanUCA platform. In this case, the picture shows a remote automatic weather station installed in Chipiona, providing real-time data on wind speed, wind direction, temperature, humidity, pressure, and downward short-wave radiation data. Besides, this station has a 3D sonic anemometer at its top to calculate turbulence and surface heat flux data directly from high-frequency measurements (10 Hz) through the Eddy-covariance technique. These types of observations will be also included in the system.

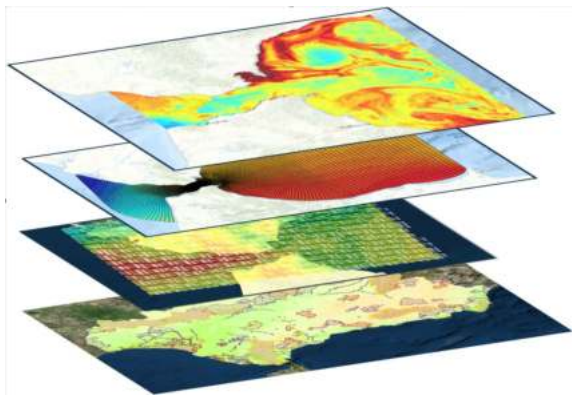


Fig. 3. Schematic representation of the idea of OceanUCA, incorporating different layers through Geographic Information System (GIS) tools that will be gathered in the website of the application that will be developed.

The last part of the project will be devoted to identifying final users, groups, and institutions (at the national and international level) through communication activities that include collaboration protocols and information sharing with third parties, as well as with other observatories. This will also include the direct transfer to society through outreach activities, including specialists and other interested users, due to the wide nature of the offered data.

3. SUMMARY AND CONCLUSIONS

The OceanUCA project aims to gather numerical model output and observational data together in an updated and singular platform to provide current, past, and future information about the oceanographic and atmospheric state of the environment on the coast of Andalucía.

This will allow for the observation and monitoring of oceanic and atmospheric physical coastal processes, as well as for their forecasting and nowcasting. The final aim is to develop a system open to all kinds of users, acting as the base for the development of early warning systems, natural resources surveillance, environmental protection, detection of climate change effects (long-term prediction) and finally helping to the decision-making of institutions that need to feed on this information.

REFERENCES

- Abascal A. J., Castanedo S., Núñez P., Mellor A., Clements A., Pérez B., Cárdenas M., Chiri H., Medina R., (2017). A high-resolution operational forecast system for oil spill response in Belfast Lough. *Mar. Pollut. Bull.* 114, 302-314. doi: 10.1016/j.marpolbul.2016.09.042.
- Azevedo A., Fortunato A. B., Epifânio B., Den Boer S., Oliveira E. R., Alves F. L., De Jesus G., Gomes J. L., Oliveira A., (2017). An oil risk management

system based on high-resolution hazard and vulnerability calculations. *Ocean Coast. Manage.* 136, 1-18. doi: 10.1016/j.ocecoaman.2016.11.014.

- de Andrés, M., Barragán, J. M., & Sanabria, J. G. (2017). Relationships between coastal urbanization and ecosystems in Spain. *Cities*, 68, 8-17.
- González, C. J., Reyes, E., Álvarez, Ó., Izquierdo, A., Bruno, M., & Mañanes, R., (2019). Surface currents and transport processes in the Strait of Gibraltar: Implications for modeling and management of pollutant spills. *Ocean & Coastal Management*, 179, 104869.
- Román-Cascón et al., (2021). Surface representation impacts on turbulent heat fluxes in the Weather Research and Forecasting (WRF) model (v.4.1.3), *Geosci. Model Dev.*, 14, 3939–3967.

ACKNOWLEDGEMENTS

OceanUCA (PCM_00032) is a project funded by the 2023 call for Marine Sciences I+D+i projects in the frame of: “*Plan Complementario de Ciencias Marinas of Junta de Andalucía*” and “*Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia*” (NextGenerationEU funding).

Some of the data that will be incorporated into the OceanUCA project will be gathered thanks to the WIND4US project (CNS2023-144885) (Disentangling the complexity of the WIND systems in coastal areas FOR a better Understanding of their impacts on Society), funded by *Convocatoria 2023 de Proyectos de Consolidación Investigadora*, as well as from the WINDABL project (PR2022-055) (How are the Surface Thermally Driven Winds influenced by the vertical structure and horizontal inhomogeneities of the Atmospheric Boundary Layer?), funded by *Plan Propio de la Universidad de Cádiz, Convocatoria 2022 de Proyectos para investigadores noveles*.

Climate change in offshore energy resources along the Spanish coasts based on a high-resolution regionally coupled model

R. Vázquez (1), W. Cabos (1), S. Ponce de León (2), J.C. Nieto-Borge (1), C. Gutiérrez (1)

(1) Departamento de Física y Matemáticas, Universidad de Alcalá, Alcalá de Henares, Spain. ruben.vazquez@uah.es

(2) Centre for Marine Technology and Ocean Engineering (CENTEC), IST, Universidade de Lisboa, Portugal.

Abstract: The evolution of offshore renewable energy platforms has accelerated recently to replace non-renewable energy sources. Hybrid platforms play a crucial role in increasing energy generation and minimizing resource variability. However, uncertainties exist about the impact of climate change on various energy resources. This study evaluates wind, solar, and wave resources at the end of the 21st century in potential Spanish locations for offshore platforms using a regionally coupled ocean-atmosphere model with high resolution and a global ocean domain. Under the RCP8.5 scenario, wind resources show significant seasonal and spatial variability, with increases in northern Spain during winter and summer, and the Canary region throughout the year, linked to changes in the Azores High and the Iberian thermal low. Wave energy will uniformly decrease, especially in the Atlantic, while solar resource variability decreases with minimal change in resource levels. This highlights the need to evaluate energy resources jointly under climate change conditions.

Keywords: climate change, offshore energy resources, regional climate system model, Spanish coasts, Wind-Wave-Solar.

1. INTRODUCTION

In recent decades, the rise in energy demand, the depletion of non-renewable energy sources, and the increasing concentration of greenhouse gases in the atmosphere have made it more crucial than ever to advance new renewable energy technologies or enhance existing ones. To this end, the Spanish government has created a legal framework to facilitate the establishment of offshore wind farms through Maritime Spatial Planning. These areas, identified for their significant potential, have been designated for the expansion of offshore wind energy (INFORMAR, 2023). One promising approach for developing offshore renewable energy technologies is to integrate multiple types of energy into a hybrid platform. This integration would mitigate the variability associated with a single energy resource. Additionally, hybrid platforms could lead to cost reductions in equipment, energy transmission, permitting, project development, operations, and maintenance monitoring (Silva et al. 2018; Vázquez et al. 2024a).

However, to promote the creation of offshore hybrid platforms, one of the main challenges and uncertainties in the energy sector is the effect of climate change on different resources. In this regard, several studies have attempted to evaluate the impact of climate change on energy resources (solar, wind, and wave) along the Spanish coasts. For instance, Gutiérrez et al. (2021), using a regional atmospheric model, found an increase in wind energy in the

Canary Islands compared to a decrease in photovoltaic energy. De la Vara et al. (2020) conducted a similar study in the Balearic Islands, finding opposite results, with a decrease in wind energy by the end of the 21st century. Regarding wave energy, Majidi et al. (2023) found a drastic decline, with a greater emphasis on the northeastern region of the Iberian Peninsula, using a spectral wave model.

Previous studies have mainly been conducted using regional models (only atmospheric or wave models) or global models that do not have sufficient resolution to accurately represent resources at the local level (Soares et al. 2017). Furthermore, the complementarity between wind, solar, and wave energy presents an opportunity to generate more energy while reducing resource variability (Vázquez et al. 2024). Therefore, in this study, we evaluate the impact of climate change on solar, wind, and wave energy resources using a high-resolution regionally coupled atmosphere-ocean model in the Spanish coastal regions. In this regard, we propose two sub-objectives:

- Evaluate the energy resources of the three energy types individually, analyzing periods of energy drought under climate change conditions.
- Analyze changes in the complementarity between energy sources, evaluating the best scenarios for hybrid platforms by the end of the century.

2. MATERIAL AND METHODS

In order to reach our objectives, we use the regional coupled system model ROM (Sein et al. 2015), composed of a global ocean model (MPIOM) coupled to an atmospheric regional model (REMO) via OASIS3 coupler and abbreviated as ROM from REMO–OASIS–MPIOM. The ROM model has previously been widely evaluated over Spanish coasts for the present climate, both in the Mediterranean sea (Parras-Berrocal et al. 2020) as the Atlantic regions (Vázquez et al. 2022). The oceanic component of ROM features a curvilinear grid with two poles, over North America and Northwestern Africa, yielding a grid size from 5 to 10 km in the studied area.

REMO is integrated over a rotated regular grid with a horizontal resolution of 25 km and its domain includes the Eastern Tropical Pacific, the Mediterranean Sea and the North Atlantic, being the only model component of ROM run in regional configuration.

In this study, 30-year time series from three different experiments have been analyzed. The first simulation, ROM_P0, was forced by ERA-Interim for the time period 1980–2012 and was used to assess the skill of ROM in reproducing the main variables associated with the energy resources.

Subsequently, in order to present an integrated vision of the impact of climate change, we dynamically downscaled the MPI-ESM-LR historical simulation, covering the period 1950–2005 (for our analysis we take ROM_P1 from 1976 to 2005), and the climate change projection for 2006–2099 (for our analysis we take ROM_P2 from 2070 to 2099) under the Representative Concentration Pathway 8.5 (RCP8.5) scenario.

SWAN model is used to obtain wave description along the Spanish coasts. SWAN is a third-generation wave model developed by the Delft University of Technology and is designed to obtain near-realistic estimates of wind-generated surface gravity waves for different regions, especially for shallow regions. Wind is the main force responsible of the gravitational waves' generation. In this study, SWAN model was forced by the wind data from ROM_P0 in order to evaluate the present climate and ROM_P1/ROM_P2 for the historical/future. The analysis is produced at 3h time step.

The future deployment of offshore power plants around Spain is regulated by the Royal Decree 363/2017, through Maritime Spatial Planning (MSP). Among the High Potential Areas for the Development of Offshore Wind Energy, 4 regions stand out, defined as:

- **Zone 1:** Northwestern Atlantic region, where the regions extend from the Asturian coast to Galicia, even including a small region near the Portuguese coast
- **Zone 2:** Southern Mediterranean region, with two regions near the coasts of Malaga and Granada
- **Zone 3:** Northern Mediterranean region, with two small areas east of Menorca and another on the Catalan coast.
- **Zone 4:** Canary Islands region, where the areas are distributed to the south of the islands of Tenerife, Las Palmas de Gran Canaria, Fuerteventura, and Lanzarote

It is worth noting that in our analysis, we use the average values over these regions, understanding that the proximity between points in the same zone results in very similar climate conditions.

Finally, we use the capacity factor (FC) to evaluate the energy resources, which is a metric defined as the ratio between the total energy output of a power plant and the theoretical

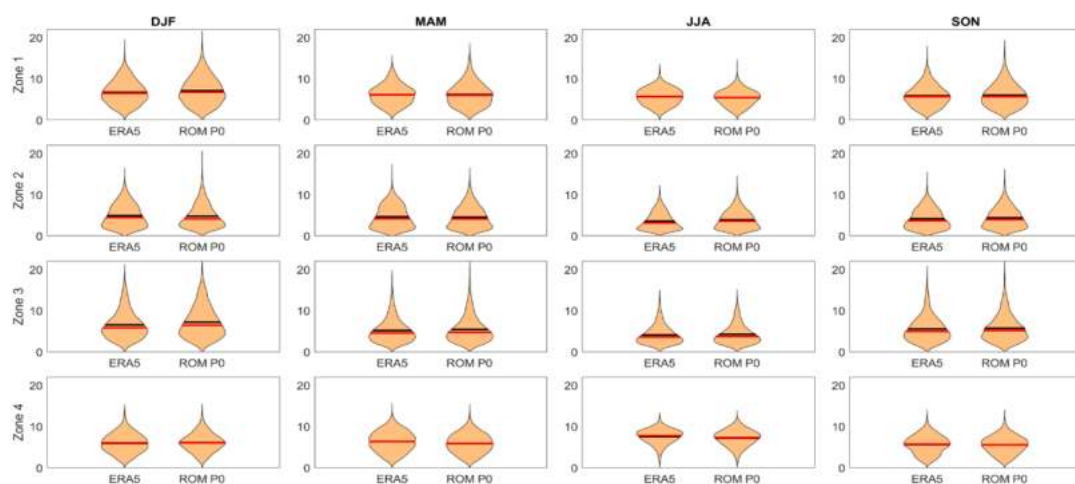


Figure 1 Wind speed violin plot of ERA5 and ROM_P0 for each zone in December, January, and February (DJF), March, April, and May (MAM), June, July, and August (JJA), and September, October, and November (SON). The black line represents the median of the distribution, and the red line represents the mean.

maximum electricity generation of the plant operating at full capacity. We have calculated the capacity factor of the different technologies as explained in Vázquez et al. (2024a).

3. RESULTS

First, an evaluation of the present time of ROM_P0 against ERA5 (Hersbach et al. 2020) was conducted, focusing on wind, 2m air temperature, radiation, significant wave height, and peak period. In this regard, we found that ROM_P0 reproduced the seasonal variability of ERA5 well for the four zones, as indicated by the violin plot (e.g. Figure. 1), which shows the distribution of each variable. However, we observed some differences in radiation. Previous studies have demonstrated an overestimation of radiation in regional models, mainly over land (Bartók, 2018). However, we found an underestimation of radiation in offshore regions. Therefore, we applied a bias correction using the quantile mapping criterion (see Canon et al. 2015), which was applied not only to ROM_P0 but also to ROM_P1 and ROM_P2.

et al. 2023) and an increase in the Iberian thermal low in summer (Vázquez et al. 2024b). In the case of CF_{wave} , there is a decrease in almost all regions and seasons in the future, with the most significant decrease found in the northeastern part of our domain. Finally, CF_{solar} shows virtually no differences in the future.

Regarding complementarity, we performed correlations between energies, finding positive values between wind energy and wave energy, and values close to zero when correlating solar energy with either wave or wind energy (not shown). In this sense, we found almost no changes in the correlations involving solar energy in the future. However, in Zone 1, the correlations between wave energy and wind energy will decrease throughout the year in the future, in contrast to Zone 4, where the values will increase in the future. For Zones 2 and 3, the changes are more seasonal, with an increase in summer months and a decrease in winter.

Finally, we calculated the CF_t based on Vázquez et al. (2024a), finding that a greater weight of wind energy in all four zones would be more

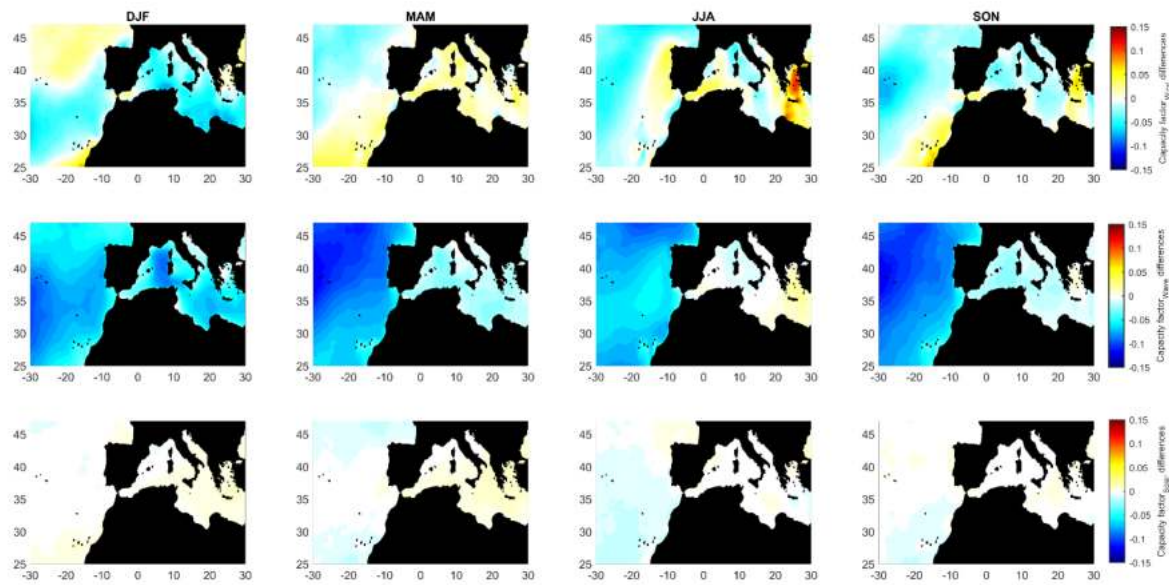


Figure 2 Differences between ROM_P2 and ROM_P1 for CF_{wind} (top), CF_{wave} (middle), and CF_{solar} (bottom) for the seasons DJF (December, January, February), MAM (March, April, May), JJA (June, July, August), and SON (September, October, November).

Once each of the variables necessary for calculating the capacity factors was evaluated, we analyzed the seasonal differences of each resource between ROM_P2 and ROM_P1 (Figure 2). In this regard, we found that CF_{wind} shows significant spatial and seasonal variability, with an almost annual increase in the Canary region (except JJA) and for DJF and JJA in the northern Iberian Peninsula. In the Mediterranean regions, we observed an increase in MAM and JJA and a decrease in DJF and SON. This is mainly associated with the intensification of the Azores High in DJF, MAM, and SON (Vázquez

et al. 2023) and an increase in the Iberian thermal low in summer (Vázquez et al. 2024b). In the future, this will increase in Zones 2 and 4. In Zone 1, a decrease in the contribution of wave energy is evident, and in Zone 3, an increase in solar energy. However, in terms of variability, wave energy will contribute less variability in the present, which will decrease further in the future. This means that although we will have lower energy generation, it will have less variability, avoiding large peaks and troughs, and promoting a more continuous flow of energy generation.

4. CONCLUSIONS

The primary objective of this work is to evaluate the solar, wind, and wave energy resources along the Spanish coasts under the RCP8.5 climate change scenario. Additionally, it aims to analyze potential changes in complementarity using a regional coupled atmosphere-ocean model.

In this regard, we found that wind energy exhibits changes with high seasonal and spatial variability, where the main factors driving these changes are the Azores High and the Iberian thermal low. Wave energy shows the greatest change, with a projected decrease in the future. Solar energy, on the other hand, shows virtually no changes. Regarding complementarity, we found that the current scenarios of energy complementarity will be reinforced in the future, where a greater contribution from solar energy will enhance overall energy generation. However, to minimize the inherent variability of the resources, the contribution of wave energy is essential.

Acknowledgements

This work has been developed within the framework of the Spanish Ministry of Science, Innovation and Universities project (I + D + IPID2021-128656OB-I00).

REFERENCES

- Bartók, B. (2018). Review of Surface Solar Radiation Projections in Bias-Corrected Euro-Cordex Regional Climate Models. *Annals of West University of Timisoara-Physics*, 60(1), 3-13.
- Cannon, A. J., Sobie, S. R., & Murdock, T. Q. (2015). Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: how well do methods preserve changes in quantiles and extremes?. *Journal of Climate*, 28(17), 6938-6959.
- de la Vara, A., Gutiérrez, C., González-Alemán, J.J., Gaertner, M.A. (2020) Intercomparison study of the impact of climate change on renewable energy indicators on the mediterranean islands, *Atmosphere* 11 1036, <https://doi.org/10.3390/atmos11101036>, 2020.
- Gutiérrez, C., de la Vara, A., González-Alemán, J.J., Gaertner, M.A. (2021) Impact of climate change on wind and photovoltaic energy resources in the canary islands and adjacent regions, *Sustainability* 13 4104, <https://doi.org/10.3390/su13084104>, 2021.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horanyi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., Thepaut, J.N. (2020) The ERA5 global reanalysis, *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 146 (730) 1999–2049, <https://doi.org/10.1002/qj.3803>.
- Majidi, A. G., Ramos, V., Giannini, G., Santos, P. R., das Neves, L., & Taveira-Pinto, F. (2023). The impact of climate change on the wave energy resource potential of the Atlantic Coast of Iberian Peninsula. *Ocean Engineering*, 284, 115451.
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (2023) INFOMAR. Sistema de Información sobre el Medio Marino (available at: <http://www.infomar.miteco.es/visor.html>) (Accessed 6 October 2023).
- Parras-Berrocal I, Vázquez R, Cabos W, Sein D, Mañanes R, Perez-Sanz J, Izquierdo A (2020) The climate change signal in the Mediterranean Sea in a regionally coupled ocean-atmosphere model. *Ocean Sci* 16:743–765. <https://doi.org/10.5194/os-16-743-2020>
- Sein DV, Mikolajewicz U, Gröger M, Fast I, Cabos W, Pinto JG, Hagemann S, Semmler T, Izquierdo A Jacob D (2015) Regionally coupled atmosphere-ocean-sea ice-marine biogeochemistry model ROM: 1. Description and validation. *J Adv Model Earth Sy* 7:268–304. <https://doi.org/10.1002/2014MS000357>
- Silva, D., Rusu, E., Guedes Soares, C. (2018) The effect of a wave energy farm protecting an aquaculture installation, *Energies* 11 2109, <https://doi.org/10.3390/en11082109>, 2018.
- Vázquez, R., Parras-Berrocal, I., Cabos, W., Sein, DV., Mañanes, R. and Izquierdo, A. (2022) Assessment of the Canary current upwelling system in a regionally coupled climate model. *Clim Dyn* 58, 69–85. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05890-x>
- Vázquez, R., Parras-Berrocal, I. M., Koseki, S., Cabos, W., Sein, D. V., & Izquierdo, A. (2023). Seasonality of coastal upwelling trends in the Mauritania-Senegalese region under RCP8.5 climate change scenario. *Science of the Total Environment*, 898, 166391.
- Vázquez, R., Cabos, W., Nieto-Borge, J. C., & Gutiérrez, C. (2024a). Complementarity of offshore energy resources on the Spanish coasts: Wind, wave, and photovoltaic energy. *Renewable Energy*, 224, 120213.
- Vázquez, R., Parras Berrocal, I. M., Cabos Narvaez, W. D., Sein, D., Mañanes, R., Bolado-Penagos, M., & Izquierdo, A. (2024b). Climate change in the Canary/Iberia upwelling region: The role of ocean stratification and wind. *Environmental Research Letters*.

An underwater scene with sunlight rays filtering through the water. A manta ray is swimming in the center. The background shows a rocky seabed with coral and other marine life.

G
E
O
L
O
G
Í
A

M
A
R
I
N
A

Multi-mineral approach to detect hydrodynamic changes in the recent sedimentary layer off Sado continental shelf (Portugal)

A. Oliveira (1,2), J. Pombo (1), N. Lapa (1), J. Duarte (1,2), A. Vinhas (1), S. Moreira (1,2) and A. Rodrigues (1,2)

(1) Instituto Hidrográfico, Rua das Trinas 49, 1249-093 Lisboa, Portugal. anabela.oliveira@hidrografico.pt

(2) Instituto D. Luiz, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Portugal.

In this study, three sediment cores, 2 to 5 m long, collected in the mid-shelf (~80m depth) adjacent to the Sado estuary, were analysed using a multi-mineral approach to detect environmental depositional changes and to identify catastrophic events along the sedimentary record, such as tsunamis. The multi-mineral analysis were obtained by X-ray diffraction in the <500 μm sediment fraction, after sieving and grinding. With a detrital nature, the analysed sedimentary column shows, from bottom to top, four major mineralogical units. All sediment cores show a siltation process (increase of clay minerals and silt) in the top layer, reflecting a notorious decrease in the local hydrodynamic energy possible due to changes in Sado river submarine ebb-tidal delta position (related with 1755 tsunami) and also confirm a reduction of sandy sediments exported by the river to the shelf in the last century (anthropogenic effect).

Key words: muddy sediments, sands, tracers, tsunamis, X-ray

1. INTRODUCTION

Despite half a century of research, the sedimentary deposits of the Portuguese continental shelf continue to be little known, in terms of its composition and ages. In this work, our purpose is to provide a detailed mineralogical and grain-size characterization of a WSW-ENE elongated middle-shelf sandy muddy deposit (IH, 2010), found near the Arrábida chain and located off Sado estuary (Figure 1). Ultimately, we aim to study, using a multi-mineral approach, environmental depositional changes and identify catastrophic events along the sedimentary record, such as tsunamis.

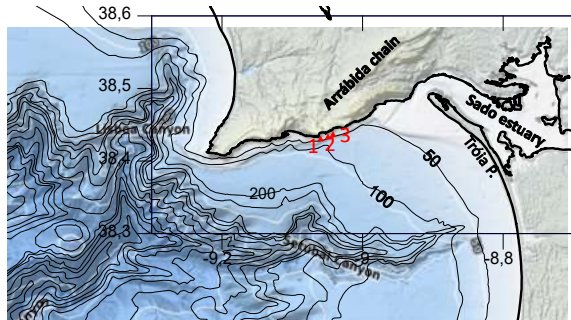


Fig. 1. Vibrocores sampling position map, superimposed on the EMODnet 3D Digital Bathymetry map.

The Sado estuary can be considered a bar built estuary, being the Tróia Peninsula the sandy barrier that separates the estuary from the ocean. It is important to notice that morphological, stratigraphic and dating evidences show that the 1755 tsunami had a strong impact on eroding and reshaping the Tróia Peninsula coast (Rebêlo *et al.*, 2013). The results documented by these authors indicate an erosion of approximately 900 years of sedimentary history, near

the northern tip and 400 years in the southern indentation.

Along the Sado river, there are currently 14 dams (Psuty and Moreira, 2000), that have contributed to the decrease of sandy particles exportation, being the terrestrial input to marine sediments dominated by fine particles transported in suspension. In the Sado saltmarshes, the total sedimentation rates, estimated through sediment production, sampling or dating, points to values approximately between 2 - 8 mm/year (Brito, P. 2009; Cunha *et al.*, 2017). García *et al.*, (2010) determined constant mean sedimentation rates for the upper, middle and deeper regions of the Lisbon-Setúbal canyon (LSC) with values of 5.1, 3.0 and 1.2 mm/year, respectively, and of 0.8 mm/year for the adjacent slope.

The continental shelf sampling area presents a narrow and steeply slope, naturally sheltered from the NW dominant wave regime.

2. METHODS

The three vertical samples were collected in the mid-shelf (71-82m depth), using a P-5C Vibrocorer Rossfelder system, extracting 5.05 m (VC2), 3.65 m (VC1) and 2.13 m (VC3) of the superficial sediments layer. After opening and sampling the sediment cores (~4 cm interval), grain-size analyses were performed using two complementary methods, laser diffraction (<500 μm) and sieving (>500 μm) (see more details *in*: Pombo *et al.*, *this issue*). The sediments grain-size classification followed the simplified Folk (seven classes) diagram (Figure 2a). The multi-mineral semi-quantification analysis was carried out on the fraction <500 μm , by X-ray diffraction (XRD), using an AERIS Panalytical benchtop system, with $K\alpha$ Cu ($\lambda=1.5406$) radiation. After sieving, the samples were

ground to obtain a fine, homogeneous powder (5-10 µm) and lay in random-oriented holders. X-ray were continuous scanned in 4° to 65° 2θ interval, step size 0.02°2θ and scan step time 149 s. Crystalline phase's semi-quantification was determined using the Rietveld refinement and the HighScore Plus software; terrigenous/biogenic and fine/coarse mineralogical ratios, were constructed.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Grain-size and mineralogy

With a typical detrital signature the mineral assemblages of the studied sediments include quartz, carbonates (calcite, dolomite, aragonite), feldspars (microcline, albite), phyllosilicates (muscovite, kaolinite and chlorite) and vestigial minerals (<5%) as augite and orthoclase (Table I). Four major sedimentary units based on textural and mineralogical characteristics were identified, except at VC3 location (Fig.1), where only the upper units (U3 and U4) were sampled (Figure 2 and Figure 3; Table I). The mentioned units are described following VC2 core:

U1 (~500-284 cm) – muddy sands sediments, where quartz (43-62%) and feldspars prevail;

U2 (~284-216 cm) – sandy sediments, exhibit an increase in quartz content (50-73%) and decrease in calcite;

U3 (~216-56 cm) – muddy sands to mixed sediments, consistent to a quartz decreasing sequence and an increment of biogenic carbonated content (calcite and aragonite);

U4 (~56-0 cm) – sandy muds sediments, consistent with an increase of clay mineral namely muscovite (7-23%), kaolinite (1-10%) and an increase of the fine/coarse ratio. This last unit can be divided in two sub-units (U4a and U4b) related with an increase of silt content and clay minerals to the top (~15-30 cm).

Among the three collected sediment cores were detected displacement in the vertical position of the four units (Figure 3), with different thickness and also local mineralogical variability (e.g. Figure 2b, Unit 2 with more phyllosilicates in VC1, mean 9%), possible due to distance to lithoclastic sedimentary sources, or signature of local creeks.

This mineralogy description agrees with the lithoclastic series sources, mainly from the Holocene to Miocene geological formations present in the Sado hydrographic basin and in the Mesozoic carbonated formations exposed at the Arrábida chain. All the three vertical samples show a siltation process (increase of clay minerals and silt) in the top layer, reflecting a notorious decrease in local hydrodynamic energy. If we considered a sedimentation rate of 5 mm/year (found in LSC head), over the last century, the finer sedimentation record of the unit U4 (~50-60 cm) can be explained by the decrease in sand supply

due to retention caused by dams constructed along the Sado river (anthropogenic effect).

Table I. VC1 (1), VC2 (2) and VC3 (3) mineralogy of the identified units (average percentage of minerals.). (Qua-quartz; Cal-calcite; Ara-aragonite; Dol-dolomite; Mic- microcline; Alb-Albite; Mus-Muscovite; Kao-kaolinite; Chl-chlorite; Aug-augite; Ort-orthoclase).

%	U1			U2			U3			U4		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Qua	50	54	-	61	58	-	42	40	41	31	34	32
Cal	13	13	-	6	8	-	17	20	18	17	18	18
Ara	4	7	-	5	10	-	11	13	11	5	6	5
Dol	9	5	-	3	9	-	10	13	12	12	10	12
Mic	11	8	-	11	10	-	9	7	8	7	4	7
Alb	5	6	-	4	3	-	4	3	3	5	6	5
Mus	6	6	-	9	1	-	6	3	5	15	15	15
Kao	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	4	4
Chl	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	1
Aug	-	-	-	1	-	-	1	-	-	-	-	-
Orth	-	2	-	1	-	-	-	-	-	-	2	-

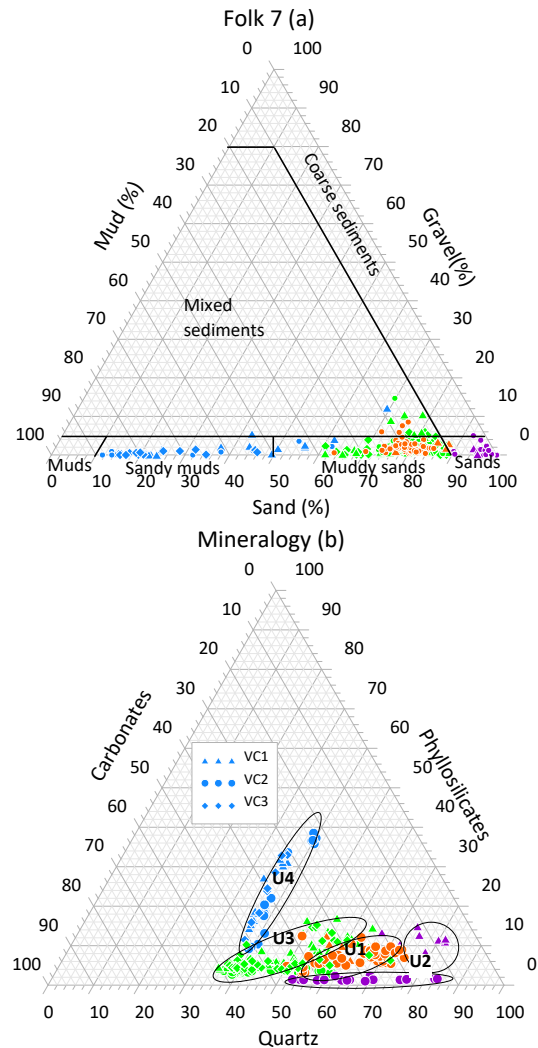


Fig. 2. Ternary diagrams with the simplified Folk classification (a) and mineralogy (b) for the analysed sediment samples. VC1- triangles; VC2 - circles; VC3 - squares; Unit 1- orange; Unit 2 - purple; Unit 3 - green; Unit 4 - blue.

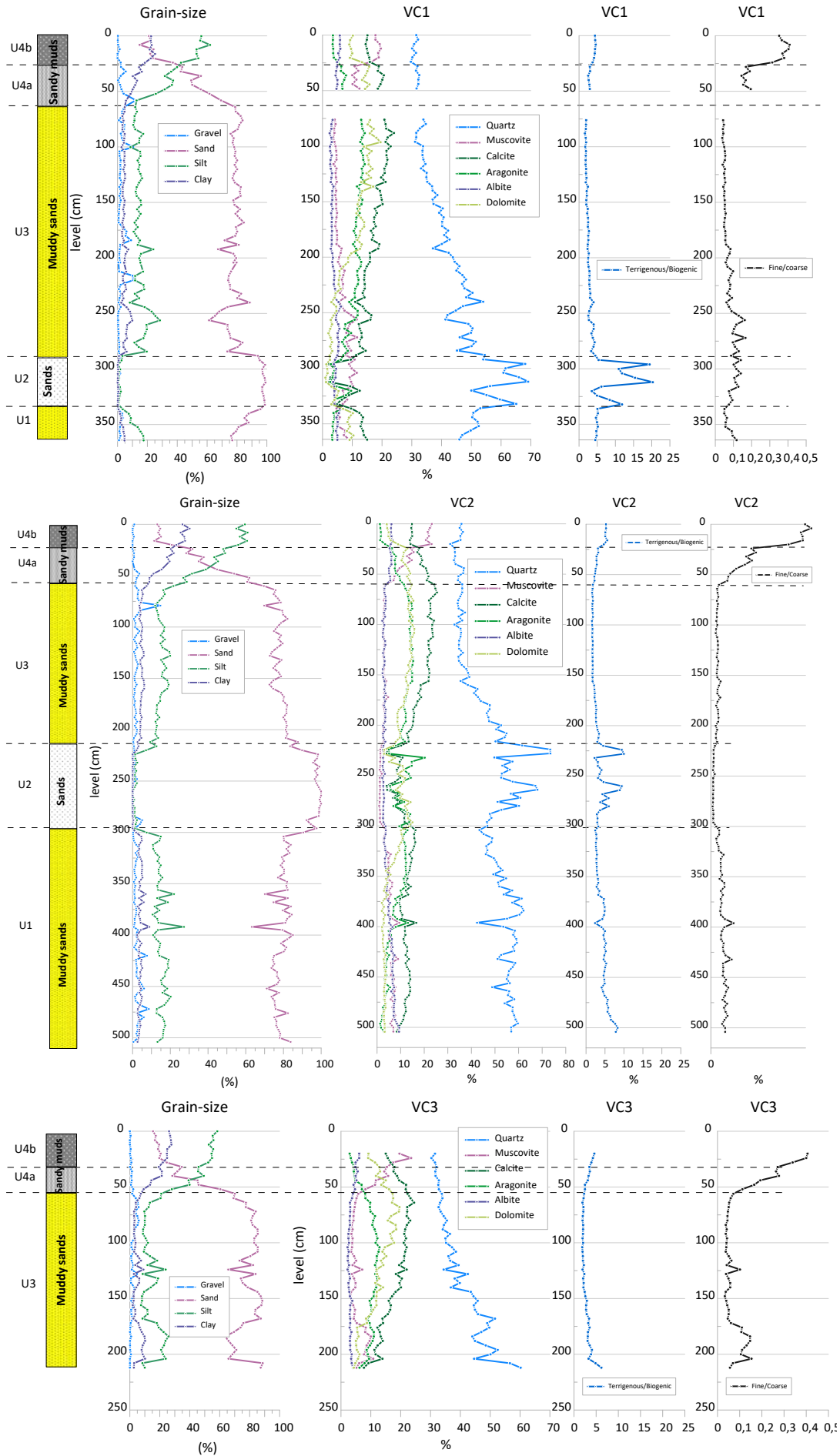


Fig. 3. Along cores variability of textural classes, mineralogy and mineralogical ratios.

Another possible explanation, for this drastic change in grain-size and mineralogy is necessary if we considered a lower sedimentation rate *e.g.* 2 - 3 mm/year (found in middle LSC), which only explain the top finer layer (0-30 cm). Instead, the beginning of fine sedimentation could be triggered by a catastrophic episode, namely tsunami associated with a seismic event (such as the 1755 earthquake), with great impact on the Tróia peninsula shoreline (Rebêlo, *et al.*, 2013), and probably also in the submarine ebb-tidal delta position, which could shift southward. From then on (last ~250 years) the coarser sediments, fails to reach the deposit under study. Nevertheless, the ebb-tidal delta dynamics is complex and can change drastically through time (Hayes & FitzGerald, 2013).

The U2 unit correspond to a sandy layer, richer in quartz, contrasting with the two adjacent muddy sandy layers (U1 and U3). Being the U3 unit compared to U1 and U2 finer and more carbonated to the top (Table I, Fig.3), possibly reflecting local increment of productivity mainly from marine organisms with carbonated shells. Based on these results several questions can be raised: can U2 be the result of a major catastrophic event (such as a tsunami)? Is this unit the imprint of a fossilized paleo-coastal environment covered by recent sediments under the present sea level scenario?

To understand the characteristics and evolution of this marine sedimentary deposit, more future work needs to be done, namely integrating C-14, and ²¹⁰Pb dating, geophysical and geochemical data.

Vinhas A. & Rodrigues A. and Pombo, J. *et al.*, (*this issue*), will present additional data and interpretations related to this area.

4. CONCLUSIONS

This preliminary work shows the importance of the use of multi-mineral approach to detect hydrodynamic changes in the Portuguese marine system during the Holocene.

The mineral composition and grain-size variability along sediment cores confirms the reduction of sandy sediments exported by the river to the shelf, over the last century, and raises the possibility of very high-energy events affecting the Sado submarine ebb-tidal delta, with the 1755 tsunami being a hypothesis to be confirmed through dating.

Acknowledgements

The authors wish to thanks the crew of the navy ship NRP “Gago Coutinho” and laboratory staff of the Marine Geology Division. This work is a contribution to the SEDMAR program.

REFERENCES

- Brito, P. (2009). *Impactos da elevação do nível médio do mar em ambientes costeiros: O caso do estuário do Sado*. PhD in Geology. Lisbon University, FCUL., 344pp.
- Cunha, A.G, Inácio, M., Freiras, M.C., Antunes, C., Silva, T., Andrade, C. Lopes, V. (2017). Response of Caldeira de Tróia saltmarsh to sea level rise, sado estuary, Portugal. *International Journal of Geological and Environmental Engineering* Vol:11, No:5, 2017, p.564.
- García, R., Thomsen, L., de Stigter, H.C., Epping, E., Soetaert, K.; Koning, E., de Jesus Mendes, P.A. (2010). Sediment bioavailable organic matter, deposition rates and mixing intensity in the Setúbal-Lisbon canyon and adjacent slope (Western Iberian Margin). *Deep-Sea Research I*, v.57, Issue 8:1012-1026.
- IH - Instituto Hidrográfico (2010). Sedimentos superficiais da plataforma continental. Cabo da Roca ao Cabo de Sines. Carta SED 5.
- Hayes, M. & FitzGerald, D. (2013). Origin, Evolution, and Classification of Tidal Inlets *Journal of Coastal Research* v. 69:14-33.
- Pombo, J., Oliveira A., Duarte, J., Moreira S., Vinhas, A., Lapa, N. Rodrigues, A. (2024). Mid-shelf depository associated with Sado and Arrábida ridge – Portugal. *This issue*.
- Psuty, N. P. & M. E. S. A. Moreira (2000). Holocene sedimentation and sea level rise in the Sado estuary, Portugal. *Journal of Coastal Research* 16(1): 125-138.
- Rebêlo, L. Costa, S., Brito, P., Ferraz, M., Prudêncio, M.I., Burbidge, C. (2013). Imprints of the 1755 tsunami in the Tróia peninsula shoreline, Portugal. *Journal of Coastal Research, Special Issue*, nº65: 814-819.
- Vinhas, A. & Rodrigues, A. (2024). Sismo-estratigrafia da cobertura sedimentar no setor da plataforma continental compreendido entre Sesimbra e a serra do Risco (cadeia orogénica da Arrábida): um depósito particularmente diferente”. *This issue*.

Identificación y cartografía de formas y paleoformas en la Bahía de Almería

R. Castillo Castillo (1), M.^a C. Fernández Puga (1), D. Palomino (2), E. Blázquez Gómez (1), J.T. Vázquez (2), G. Ercilla (3)

¹Dto. de Ciencias de la Tierra, Universidad de Cádiz (UCA), Cádiz, ESPAÑA.

raquel.castillocastillo@alum.uca.es

² Centro Oceanográfico de Málaga, Instituto Español de Oceanografía (IEO-CSIC), Málaga, ESPAÑA.

³Instituto de Ciencias del Mar (ICM-CSIC), Barcelona, ESPAÑA.

Resumen: El estudio de las características geológicas y geomorfológicas de las zonas submarinas se plantea como una importante contribución en la elaboración de modelos frente a los riesgos geológicos que potencialmente puedan afectar a infraestructuras submarinas y a la población costera. Este trabajo tiene como objetivo la identificación y cartografía de las formas y paleoformas de la Bahía de Almería a partir de los datos de ecosonda multihaz y sonda paramétrica TOPAS adquiridas en la campaña RIGEL_2_AGORA_0820, proyectos del Mar de Alborán en 2002-2003 y el proyecto ESPACE. Se identificaron formas de tipo deposicional: 1) prisma infralitoral, 2) barras sedimentarias, 3) ondulaciones sedimentarias; de tipo estructural: 4) depresiones, 5) elevaciones, y de tipo erosivo: 6) escarpes y 7) cañones, canales y surcos. Las paleoformas identificadas fueron: 1) paleocanales y 2) paleosurcos. Las formas están asociadas a procesos externos controlados por corrientes y procesos sedimentarios, así como fluctuaciones climático-eustáticas debidas a la última estabilización del mar en el Holoceno y a procesos internos controlados por actividad tectónica regional reciente. También, la presión antrópica ha favorecido los procesos intensos de erosión y posterior sedimentación.

Palabras clave: Bahía de Almería, Geomorfología submarina, Mar de Alborán, riesgos geológicos.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la comprensión y el estudio de los riesgos geológicos marinos han adquirido una relevancia creciente, impulsado en gran medida por el desequilibrio demográfico hacia las zonas costeras (Reicherter & Becker-Heidmann, 2009; Ercilla et al., 2021). Los procesos geológicos marinos pueden suponer una potencial amenaza para las actividades e infraestructuras marítimas, repercutiendo en la sociedad, la economía y el medio ambiente (Macías et al., 2015)

En el registro histórico de eventos extremos de Almería se destacan los terremotos acontecidos en Almería-Andarax de 1487 y 1522, siendo el último el desencadenante de un tsunami de intensidad IX estimado. La región Almería-Cabo de Gata, se registraron la serie de 13 terremotos en 1658 (Reicherter & Becker-Heidmann, 2009; Vázquez et al., 2022). Cabe resaltar el terremoto de 1804 en Dalías con una intensidad de VII-IX y una magnitud estimada de 6,4 produciendo destrozos en bienes inmuebles y 400 muertes en las localidades de Dalías, Berja y Roquetas de Mar.

Dada la actividad sísmica de la provincia de Almería y la magnitud que supone identificar, comprender y desarrollar estrategias para reducir la incertidumbre de recurrencia de eventos, se hace necesaria la generación de cartografía como soporte de conocimiento, prevención y herramienta futura de gestión de desastres.

2. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

El marco de trabajo está situado entre las latitudes 36°36'N y 36°46'N y las longitudes 2°38'O y 2°21'O. Se corresponde con la Bahía de Almería, concretamente, el área sumergida de plataforma y talud entre las localidades de Roquetas de Mar y Almería, donde desemboca el Río Andarax. El área de trabajo ocupa una extensión de 436 km² entre un rango de profundidades desde los 5 m hasta los 460 m y la pendiente media no supera los 1, 5°.

El presente estudio tiene como objetivo principal el estudio la caracterización de formas de fondo y otros rasgos paleomorfológicos en la Bahía de Almería.

Para llevarlo a cabo, se han utilizado datos registrados en la campaña RIGEL_2_AGORA_0820 en 2020, a bordo del B/O del IEO Ramón Margalef. En esta campaña se adquirieron datos con la ecosonda multihaz modelo SIMRAD EM710 y perfiles sísmicos de muy alta resolución (TOPAS PS18). La dirección de los perfiles con sonda paramétrica se trazó principalmente siguiendo trayectorias transversales a la posición de las estructuras, completando con líneas de control estratigráfico realizadas en dirección perpendicular a las primeras. Se han empleado, además, otros datos de ecosonda multihaz obtenidos por el IEO-CSIC y la Secretaría General de Pesca (SGP) en el Mar de Alborán en los años 2002 y 2003 en la zona del talud continental y durante el proyecto ESPACE (IEO, SGP) en la zona de plataforma continental.

Los datos de ecosonda multihaz de la campaña RIGEL_2_AGORA_0820 se procesaron utilizando el programa CARIS HIPS & SIPS permitiendo obtener un modelo digital batimétrico con una resolución de 8 metros. Los datos de plataforma y talud presentan una resolución de 5 y 50 metros, respectivamente. Estos datos han sido importados a un proyecto de ArcGIS en formato ráster. Los datos de ecosonda paramétrica adquiridos en la zona de estudio se han trabajado utilizando el programa IHS Kingdom que permite la visualización e interpretación de los resultados.

Los modelos ráster obtenidos a partir de los datos de ecosonda multihaz se han importado y utilizando diferentes herramientas de edición avanzada de ArcMAP para la interpretación de las formas de fondo. Para ello, se han obtenido mapas de sombra, que representan el sombreado producido por una fuente de luz sobre el modelo digital batimétrico, y de pendientes, que indican la dirección a la que se encuentra más inclinada cada celda hacia sus vecinos. A esta base de datos se ha incorporado otro tipo de información como los datos de sismicidad del IGN, y otros necesarios para la realización de cartografías temáticas como línea de costa, modelos digitales del terreno (CNIG).

La interpretación de perfiles de muy alta resolución TOPAS se ha realizado mediante el programa IHS Kingdom. Las líneas de navegación, así como el número de trazas asignadas durante la adquisición de los perfiles sísmicos y las distintas estructuras identificadas se han integrado en la base de datos en formato vectorial.

Para ello, ha sido necesario realizar una transformación de las coordenadas que originalmente son adquiridas en milisegundos de arco a coordenadas UTM en metros. Utilizando un script de MATLAB, que puede descargarse de manera libre en: <http://gma.icm.csic.es/es/programas>, y una vez convertidos, los archivos pueden ser importados en el proyecto IHS Kingdom.

En perfiles sísmicos de alta resolución, la identificación parte de la observación de discontinuidades en los reflectores. Los reflectores continuos y generalmente sin alteraciones indican el buen acondicionamiento del sedimento, mientras que aquellos que presentan roturas o deformaciones sugieren la influencia de procesos tectónicos.

La cartografía se ha basado en la correcta importación de archivos (shapefiles, ráster) y configuración del sistema de coordenadas. No obstante, el grueso del trabajo se ha llevado a cabo mediante el manejo de las herramientas de edición en ArcMap, las cuales han sido empleadas para la creación y modificación de las capas. Asimismo, el diseño de las leyendas de las capas, junto con la escala y la organización de forma jerarquizada de estas, ha permitido presentar la información de manera clara y sencilla.

3. RESULTADOS

La cartografía final se ha realizado en base a los dominios fisiográficos abarcados en el área de estudio: litoral, límite litoral-plataforma continental, plataforma continental, borde de plataforma continental y talud (Figura 1).

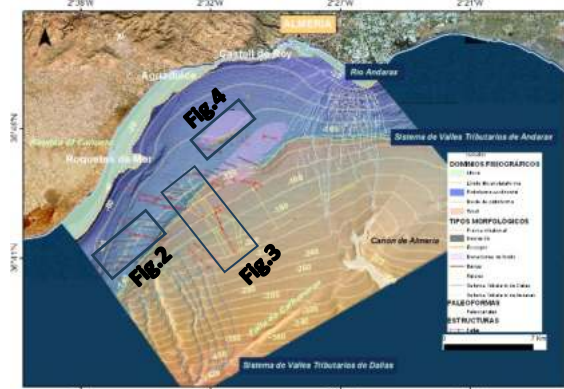


Figura 1. Cartografía del área de estudio. Se localizan las figuras 2, 3 y 4.

Las morfologías de fondo identificadas han sido formas de tipo deposicional: 1) prisma infralitoral, 2) barras sedimentarias, 3) ondulaciones sedimentarias; de tipo estructural: 4) depresiones, y 5) elevaciones, y de tipo erosivo: 6) escarpes y 7) cañones, canales y surcos. Las paleoformas identificadas fueron: 1) paleocanales y 2) paleosurcos.

En lo que respecta a las primeras, la correlación de unidades agradantes y progradantes en diferentes regiones del margen adyacente a la Península Ibérica y Baleares (Zazo, 2006; Fernández-Salas et al., 2007) demuestra que el desarrollo del prisma litoral en forma de cuña progradante (Hernández-Molina, 1995) se debe a fluctuaciones climático-eustáticas pertenecientes a la última estabilización del mar en el Holoceno (Hernández-Molina et al., 1995; Zazo, 2006). La región occidental del prisma litoral puede corresponderse en parte con la ruptura de pendiente (*offlap-break*) de los prodeltas adyacentes, ya que coincide en configuración, distancia y profundidad. La influencia antrópica es un factor de peso frente cambios en la dinámica litoral ya que favorece los procesos intensos de erosión y posterior sedimentación. Puesto que el saliente del prisma se encuentra alineado con el puerto de Roquetas del Mar, puede sugerirse que su desarrollo más actual haya derivado de esta presión antrópica costera fomentado por la zona de depresión del Campo de Dalías y la Rambla El Cañuelo en la que se encuentra (Martínez Díaz, 2000).

El ambiente litoral durante el mínimo regresivo se situaba muy próximo al borde de plataforma actual. Este mínimo eustático dio lugar a la formación de un escarpe localizado en el Cabo de Gata y la región oriental de la plataforma de Almería (Vázquez y Zamarreño, 1985). La

prolongación del escarpe descrito con los identificados en el estudio pudo haber formado parte del antiguo borde de plataforma durante esta etapa regresiva.

En la plataforma continental de la Bahía de Almería se encuentran sedimentos modernos y antiguos, es decir, aquellos formados en el último estadio del nivel del mar actual (*highstand*) y depósitos formados durante la última transgresión. A medida que la línea de costa progradaba hacia su posición actual, se desarrollaban morfologías sedimentarias típicas como las barras, la que pueden encontrarse también en el resto de la costa andaluza y murciana (Marín, 2005; Fernández-Salas et al., 2013; Ercilla et al., 2021). Estas barras sedimentarias relictas, formadas en el último ascenso del nivel del mar, presentan ondulaciones sedimentarias sobreimpuestas debidas a los procesos fluvimarineros actuales (Figura 2).

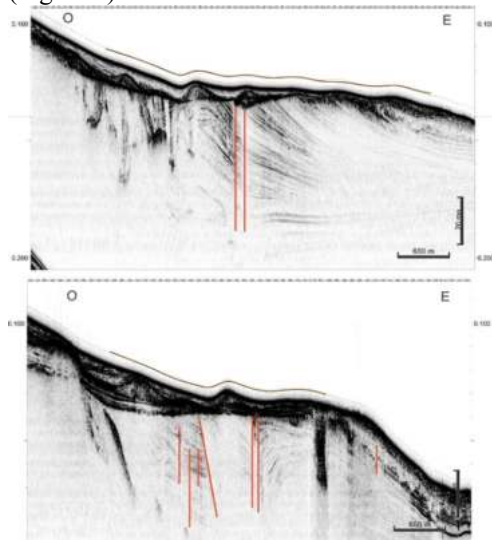


Figura 2. Barras relictas en el subsuelo con alta reflectividad y ondulaciones superficiales sobre ellas. Se identifican fallas más profundas a las formas.

La región de estudio presenta dos sistemas triburarios que alimentan al Cañón de Almería: el Sistema Tributario de Dalías y el Sistema Tributario de Andarax. En lo que respecta al Sistema Tributario de Dalías, la falta de conexión directa con un río y la colmatación de surcos cercanos al borde de plataforma, junto con la identificación de paleocanales siguiendo la misma dirección y sentido que el valle, sugieren que el sistema se extendía hacia el interior de la Bahía y que la línea de costa se ubicaba aproximadamente en el borde de plataforma actual, durante la etapa transgresiva temprana (García et al., 2006) (Figura 3).

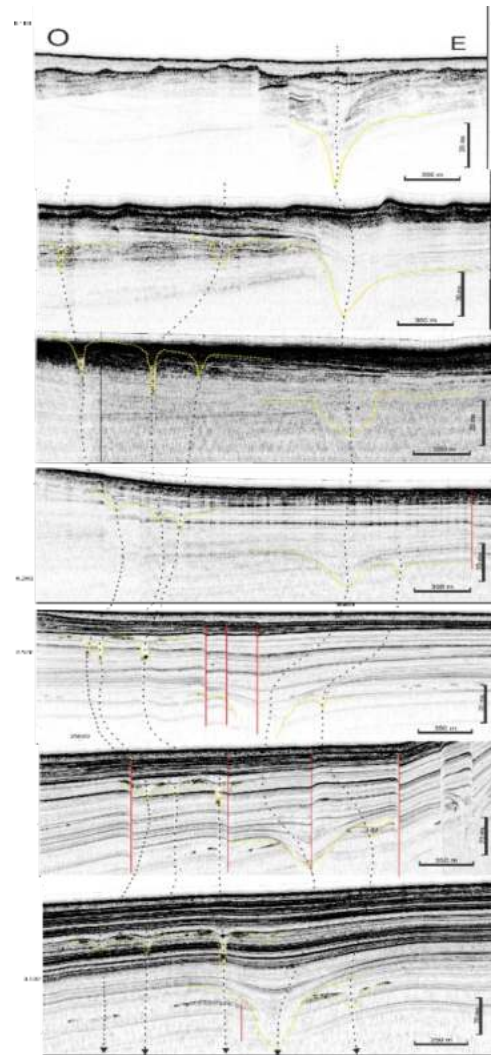


Figura 3. Paleocanales pertenecientes al Sistema Tributario de Valles de Dalías y series de fallas. Las flechas discontinuas indican la dirección del flujo.

En este contexto, el sistema estaría más próximo a las fuentes de sedimento, lo que explicaría la localización de las cabeceras en el límite del dominio, favorecidas por la inestabilidad provocada por las altas pendientes (hasta 11° en las cabeceras más occidentales). A pesar de que el origen de los valles no sea debido a procesos internos, el Sistema Tributario de Dalías se encuentra condicionado por la actividad regional de la Falla de Carboneras generando cambios de gradiente, y con un sistema de fallas en dirección NON-ESE pertenecientes al campo de Dalías (García et al., 2006).

Por otra parte, el Sistema Tributario de Andarax sí está controlado por el aporte de sedimentos del río Andarax, ya que está directamente conectado con su desembocadura. Por tanto, esto implica que su formación es reciente, ya que el sistema está activo por la descarga estacional de sedimentos, pudiendo haber comenzado a desarrollarse durante el Holoceno, después de la transgresión versiliana (García et al., 2006).

Las elevaciones y depresiones se asocian a actividad tectónicas localizándose estructuras de deformación frágil en el subsuelo asociadas a las morfologías cartografiadas.

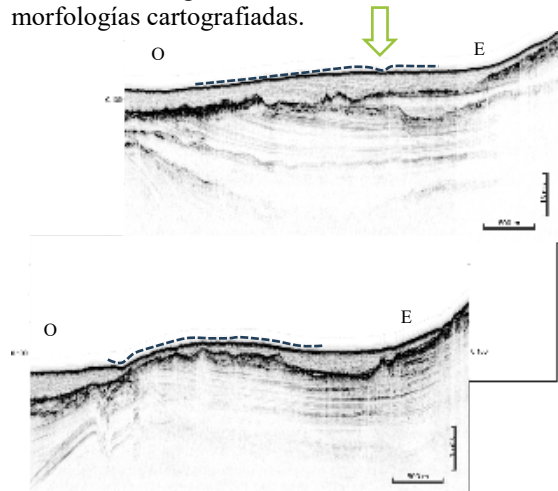


Figura 4. Deformación del fondo marino a partir de actividad sísmica. La flecha indica una depresión.

4. CONCLUSIONES

El conocimiento de las características geológicas y geomorfológicas de las zonas marinas es el primer paso para su identificación y alerta temprana para contribuir en la elaboración de modelos contra estos posibles riesgos geológicos de alerta. La cartografía identifica formas de tipo deposicional, erosivo y estructural junto con paleoformas. Las fluctuaciones climático-cuasiestáticas relacionadas con la última estabilización durante el Holoceno, la dinámica costera actual, los flujos hiperpícnicos, los procesos sedimentarios, la actividad sísmica y la presión antropogénica han explicado la evolución de las formas y paleoformas, así como las morfologías superpuestas en la Bahía de Almería.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible gracias a la financiación obtenida en los proyectos RIGEL_2 (Riesgos Geológicos en los márgenes de España, IEO-CSIC) y AGORA (P18-RT-3275), financiado por la Junta de Andalucía, así como a la beca de colaboración con Departamentos Universitarios, curso académico 2023/2024 (UCA). Es una contribución al grupo RNM-328 y al proyecto BARACA (PID2022-136678NB-I00).

REFERENCIAS

Becker-Heidmann, P., Reicherter, K., y Siva, P. G. (2007). 14C dated charcoal and sediment drilling cores as first evidence of Holocene Tsunami at the Southern Spanish coast. *Radiocarbon*, 49,2, 827-835.

Ercilla, G., Casas, D., Alonso, B., Casalbore, D., Galindo-Zaldívar, J., García-Gil, S., Martorelli, E.,

Vázquez, J.-T., Azpiroz-Zabala, M., DoCouto, D. et al. (2021). Offshore Geological Hazards: Charting the Course of Progress and Future Directions. *Oceans*, 2, 393–428. <https://doi.org/10.3390/oceans2020023>

Fernández-Salas, L. M., Bruque, G., Díaz del Río, V., López-Rodríguez, F. J., & Vázquez, J. T. (2013). Análisis de alta resolución de un campo de ondulaciones submarinas en la plataforma externa frente a Águilas (Murcia, SE España). *Geo-Temas*, 14, 175-178.

Fernández-Salas, L.M., Lobo, F.J., Sanz, J.L., Diazdel-Rio, V., Garcia, M.C. y Moreno, I. (2007): Morphometric analysis and genetic implications of pro-deltaic sea-floor undulations in the northern Alboran Sea margin, western Mediterranean Basin. *Marine Geology*, 243, 31-56.

García, M., Alonso, B., Ercilla, G., & Gràcia, E. (2006). The tributary valley systems of the Almeria Canyon (Alboran Sea, SW Mediterranean): sedimentary architecture. *Marine Geology*, 226,3-4, 207-223.

Macías, J., Vázquez, J.T, Fernández-Salas, L.M., González-Vida, J.M., Bárcenas, P., Castro, M.J.,Díaz-del-Río, V. y Alonso, B. (2015). The Al-Borani submarine landslide and associated tsunami. A modelling approach, *Marine Geology*, 361,79-95.

Martínez Díaz, J. J. (2000). Actividad neotectónica en el sureste de Almería y su incidencia en la morfotectónica de la zona (Cordilleras Béticas).

Reicherter, K. y Becker-Heidmann, P. (2009). Tsunami deposits in the western mediterranean: remains of the 1522 Almeria earthquake? *Geological Society*, 316, 217-235.

<https://doi.org/10.1144/SP316.14>.

Vázquez, J. T., Ercilla, G., Alonso, B., Peláez, J. A., Palomino, D., León, R., Bárcenas, P., Casas, D., Estrada, F., Fernández-Puga, M.C., Galindo-Zaldívar, J., Henares, J., Llorente, M., Sánchez-Guillamón, O., d'Acremont, E., Ammar, A., Chourak, M., Fernández-Salas, L. M., López-González, M y Lafuerza, S. (2022). Triggering mechanisms of tsunamis in the Gulf of Cadiz and the Alboran Sea: an overview. *Historical earthquakes, tsunamis and archaeology in the Iberian Peninsula*, 4, 65-104.

Vázquez Martínez, A., y Zamarreño, I. (1985). La migración holocena del ambiente litoral y su influencia en la génesis y distribución de las facies sedimentarias de la plataforma continental: el ejemplo de Cabo de Gata (Almería-España).

Zazo, C. (2006). Cambio climático y nivel del mar: la Península Ibérica en el contexto global.

Análisis morfodinámico de datos batimétricos y de reflectividad en las cuencas tributarias del sistema de cañones submarinos de Capbreton

I.P Díez-Gacia (1), M. Sayago-Gil (2), M. Gómez-Ballesteros (1), B. Arrese (1)

(1) Sub. General de Investigación (IEO-CSIC) Corazón de María, 8,28002 Madrid. irene.diez@ieo.csic.es

(2) Instituto Español de Oceanografía-CSIC. CO de Cádiz. Puerto Pesquero, Muelle de Levante s/n. 11006. Cádiz

Resumen: Los cañones submarinos son elementos geomorfológicos de gran importancia en el ecosistema marino. Son zonas que conectan provincias fisiográficas como la plataforma continental, el talud y la llanura abisal, actuando como vía principal para el transporte de sedimentos y materia orgánica desde la plataforma hasta las profundidades marinas. Además, definen la dinámica morfosedimentaria, influyen directamente sobre diversos procesos oceanográficos y son áreas susceptibles de albergar hábitats de especial vulnerabilidad. Por ello, profundizar en su estudio es fundamental para comprender su influencia en la conservación del entorno submarino. Este es el objetivo principal del presente trabajo, extraer la mayor información posible sobre los datos batimétricos y de reflectividad del fondo del cañón submarino de Capbreton, al norte de la Península Ibérica. El análisis se centra en la caracterización en detalle de las cuencas de los cañones tributarios que desembocan directamente sobre el canal principal de Capbreton, analizando su dinámica y estado evolutivo dentro del sistema de cañones.

Palabras clave: batimetría, cañones submarinos, morfodinámica, mosaicos de reflectividad.

1. INTRODUCCIÓN

Los cañones submarinos son el canal principal de transporte de materiales, orgánicos e inorgánicos, entre la plataforma continental y la llanura abisal. Conocer su morfología, estructura y funcionamiento permite caracterizar la dinámica sedimentaria del sistema submarino local.

En este estudio se ha elegido el sistema de cañones submarinos de Capbreton, sector oriental del Golfo de Vizcaya, al norte de la Península Ibérica. Su peculiaridad reside en su curso paralelo al margen continental a lo largo de 300 km, con un trazado que discurre desde su cabecera frente a la costa de Aquitania (Francia) hasta su desembocadura frente al litoral de Cantabria, en España (figura 1).

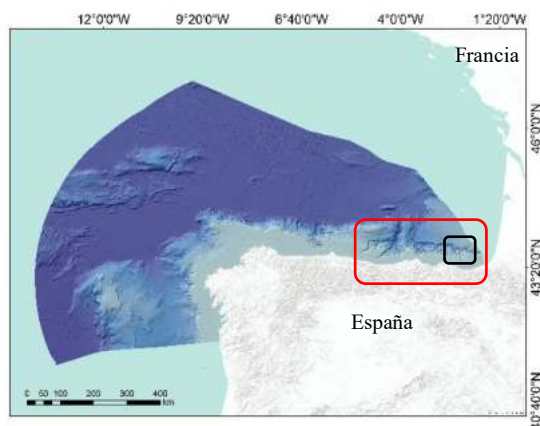


Fig. 1. Localización geográfica del cañón submarino de Capbreton, señalado dentro del recuadro rojo. El recuadro negro indica la posición de los cañones A y B.

En el marco del proyecto LIFE-IP-INTEMARES, para la mejora de conocimiento sobre zonas susceptibles de ser declaradas espacios marinos protegidos de la Red Natura 2000, se realizaron dos campañas oceanográficas entre los años 2019 y 2020, en el que se adquirieron, entre otros, datos batimétricos y de reflectividad acústica del fondo marino.

En base a dichos datos, el sistema de cañones submarinos de Capbreton ha sido descrito geomorfológicamente por Gómez-Ballesteros *et al.*, 2022, incluyendo la descripción morfosedimentaria del sistema integrado por el canal principal, las plataformas intertributarias y los canales tributarios.

Con el objetivo de profundizar en el análisis morfodinámico para la caracterización sedimentaria de dicho sistema de cañones, su evolución hasta el estado actual, se han aplicado herramientas y procesos basados en sistemas de información geográfica (GIS) a las superficies batimétricas y mosaicos de reflectividad, ampliando así sus aplicaciones en el terreno de la geología. En este caso el estudio ha estado centrado en las cuencas de los cañones tributarios, los cuales aportan materiales directamente al canal principal.

En concreto, se presentan los resultados obtenidos en dos de los cañones tributarios, que servirán para validar la aplicación de las herramientas anteriormente mencionadas.

2. DESARROLLO

El estudio se centra en la premisa de los paralelismos entre las cuencas fluviales terrestres y las cuencas de los cañones submarinos. Se han aplicado conceptos y herramientas en GIS desarrolladas para el primer caso, complementadas con una cartografía de detalle de cada cañón tributario.

Todo ello, apoyado sobre los datos batimétricos y de reflectividad adquiridos a lo largo del sistema de cañones submarinos de Capbreton a bordo del B/O Ramón Margalef. La adquisición se realizó mediante la ecosonda EM710 y procesados con el software CARIS HIPS & SIPS, obteniéndose una superficie batimétrica continua y mosaico de reflectividad a 10 m de resolución. Para el presente trabajo se han escogido dos cañones tributarios morfológicamente dispares, situados en distintas áreas a lo largo del canal principal, para comprobar la validez de la premisa inicial, nombrados a partir de ahora como cañón A y cañón B (figura 2).

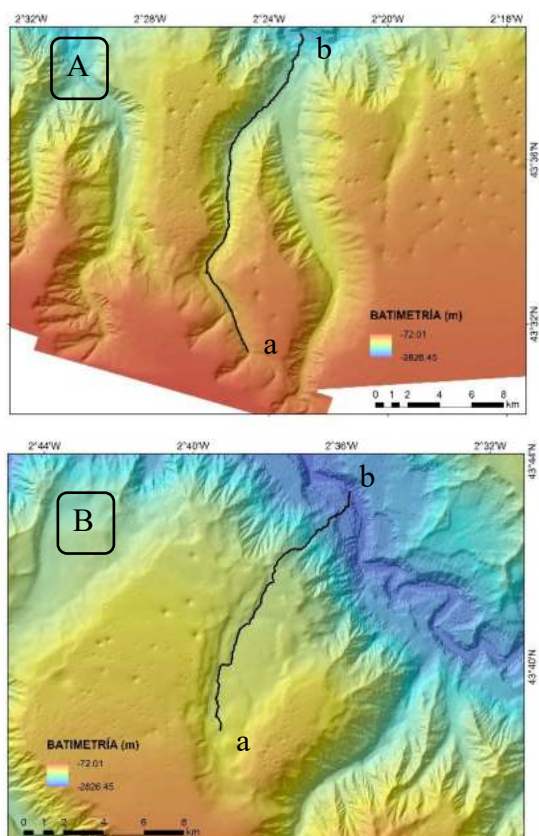


Fig. 2. Batimetrías correspondientes al cañón A, en el sector oriental (arriba) y cañón B (abajo) en el sector occidental del sistema de cañones de Capbreton. En ambos casos la línea negra representa el eje del canal principal de drenaje de las cuencas, y sobre el que se han realizado los perfiles longitudinales entre a y b.

Con el objetivo de lograr una caracterización de la cuenca en detalle, extrayendo la mayor cantidad de información posible de los datos disponibles, se dividió el trabajo en dos partes fundamentales. Primero se describió morfométricamente el área de estudio, y después se aplicaron una serie de parámetros para analizar su comportamiento

morfodinámico y definir su estado de evolución en base a los estándares definidos.

Tras el procesado previo de los datos, se realizó un cartografiado en detalle definiendo los límites de las cuencas mediante el uso de un GIS. Se delinearon los trazados de los canales principales y se extrajeron los parámetros fundamentales de cada cuenca de drenaje: área de la cuenca, longitud del cauce, perímetro, desnivel acumulado y rugosidad (Ibáñez, 2011, Tubau *et al.*, 2015). Además, se definieron los perfiles longitudinales y transversales necesarios para abarcar el total del recorrido de los canales tributarios del cañón A y B.

A continuación, se definió la jerarquía de los canales en relación al canal principal del sistema (Díez-García *et al.* 2022), con el método Strahler (Strahler, 1952), en base a dos parámetros fundamentales que definen la dinámica de flujo en la cuenca: la dirección y acumulación de flujo. Posteriormente se aplicaron diferentes índices que, por su definición, podrían aportar información adicional sobre la dinámica de drenaje de la cuenca y el canal principal del cañón tributario. En esta ocasión el estudio se centró sobre el análisis de:

- TWI (*topographic wetness index*): cuantifica la influencia de la topografía del terreno sobre los procesos de drenaje de la cuenca (Sørensen *et al.*, 2006).
- TRI (*terrain ruggedness index*): está directamente relacionado con la energía transmitida y encauzamiento de la cuenca (Tagil *et al.*, 2008).
- SPI (*stream power index*): capacidad de la cuenca para el transporte de materiales a través de la misma (De Rosa *et al.*, 2019).

Por último, se calcularon las curvas hipsométricas de ambos cañones objeto del presente trabajo. La morfología de dichas curvas indica el estadio de evolución y equilibrio de las cuencas, según lo descrito por Strahler, 1952. De esta forma, si era el caso, se podía definir una variabilidad a lo largo del cañón de Capbreton, y estudiar sus causas.

3. RESULTADOS

En base a la superficie batimétrica continua y al mosaico de reflectividad, se han podido cartografiar diversos elementos geomorfológicos como barrancos, deslizamientos locales, escarpes de fondo de cañón (CSBs) y ondas sedimentarias en forma de media luna (DCFs). Estos dos últimos elementos aportan datos reveladores sobre la dinámica del cauce principal (figura 3 y figura 4). En el caso de los CSBs, se relaciona con comportamientos más erosivos, y el posible desarrollo de un nuevo nivel de fondo de cañón y los DCFs con fondos de cañones activos a través de la removilización de sedimento.

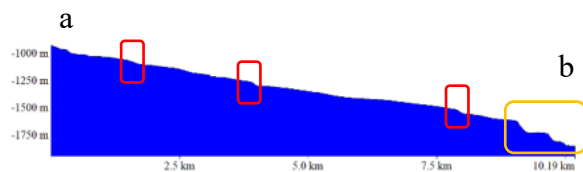
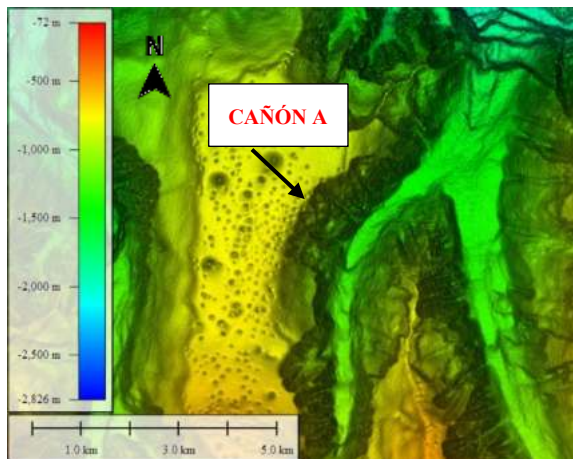


Fig. 3. Detalle del curso medio-bajo del cauce del cañón tributario A. En el fondo del cañón se pueden observar CSBs cartografiados. En el perfil longitudinal (entre a y b marcados en figura 2) pueden verse resaltados en los recuadros rojos y en el naranja las terrazas al final del cañón.

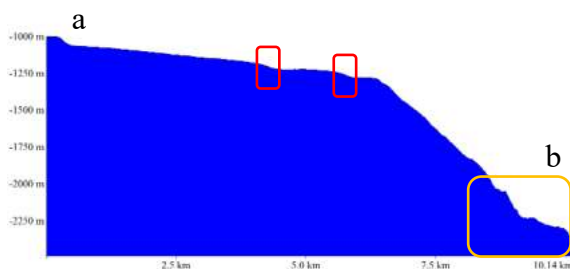
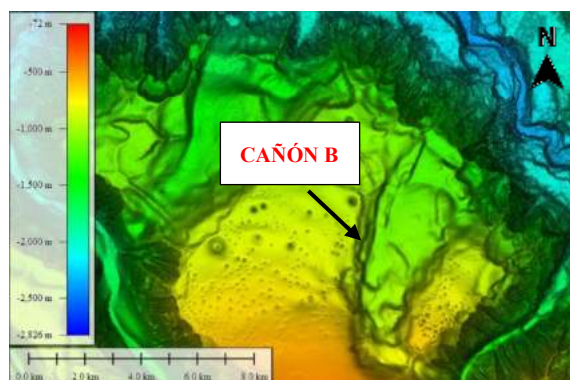


Fig. 4. Cañón tributario B Con un fondo de cañón muy diferente al anterior, puede verse nuevamente CDBs marcados en los recuadros rojos, en el perfil longitudinal inferior (entre a y b marcados en la figura 2), y las terrazas en la desembocadura sobre el canal principal de Capbreton.

Los parámetros fundamentales para la caracterización de las cuencas (Tabla I), muestran que geoméricamente son similares, exceptuando el perímetro, debido a la mayor anchura del cañón B. Si bien en este caso el flujo principal está canalizado en el extremo oeste de la cuenca, como se muestra en la

figura 2, teniendo en cuenta que la respuesta reflectiva del fondo obtenida es similar en ambos casos (figura 5), este valor de perímetro aporta un primer indicio sobre el diferente estado evolutivo de ambos cañones.

CAÑÓN	A	B
Longitud del cauce(km)	17,41	16,40
Área (km ²)	61,77	41,55
Perímetro (km)	53,12	29,78

Tabla I. Parámetros básicos de caracterización de las cuencas de drenaje. Valores comparativos para cañón A y cañón B.

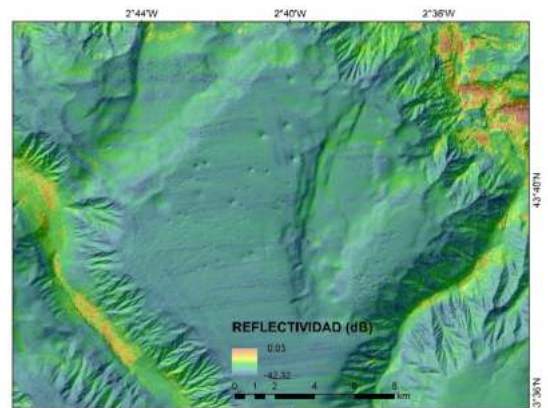
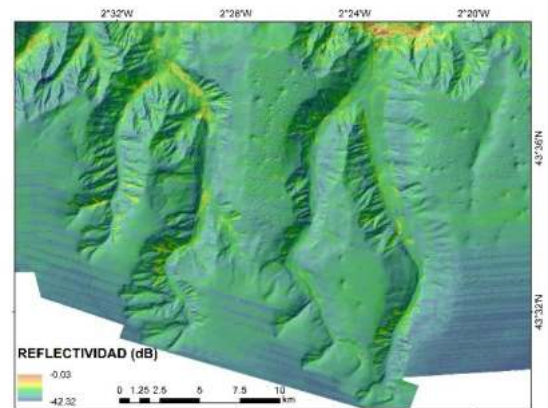


Fig. 5. Mosaicos de reflectividad correspondientes al cañón A, el (arriba) y cañón B (abajo).

En cuanto a la jerarquización, para el caso del cañón A se trata de un canal de tercer orden y el cañón B es un canal de segundo orden. Esto influye directamente en la cantidad de aportes que recibe cada uno, siendo mayor la carga en el caso del cañón A, ya que jerárquicamente tiene dos niveles superiores de canales menores vertiendo sobre él.

Para los índices calculados se observa que tanto TRI (figura 6) como TWI apoyan la cartografía realizada previamente, resaltando los diferentes elementos morfológicos del fondo de cañón. El SPI muestra un comportamiento cambiante a lo largo de ambos canales, siendo bajo en las cabeceras y alto en las desembocaduras. Se correlaciona perfectamente con el valor jerárquico de cada cañón, siendo el cañón A el que muestra un SPI más elevado.

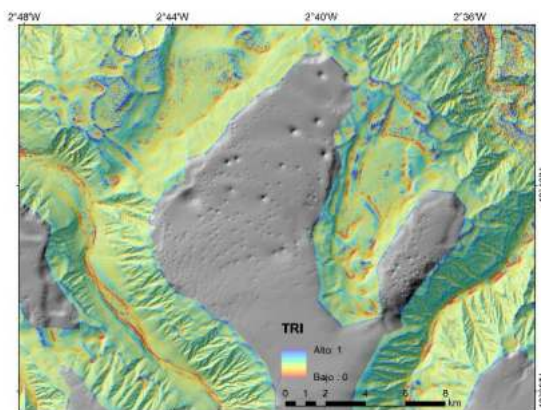
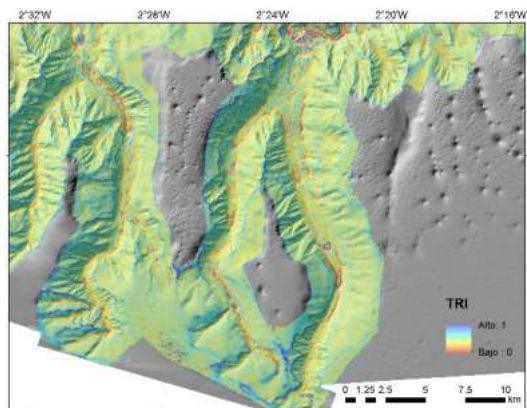


Fig. 6. Índice TRI calculado para ambos cañones. Puede observarse que perfila perfectamente las diferentes morfologías que pueden encontrarse en el fondo del cañón.

Por último las curvas hipsométricas son el elemento calculado que mayor diferencia presenta (figura 7). Definen para el caso del cañón A, una cuenca en fase de equilibrio o madurez, con mayor equilibrio entre la sedimentación y la erosión y en cañón B relleja una cuenca de gran potencial erosivo en fase de juventud, siguiendo las curvas modelo realizadas por Stahler, 1952.

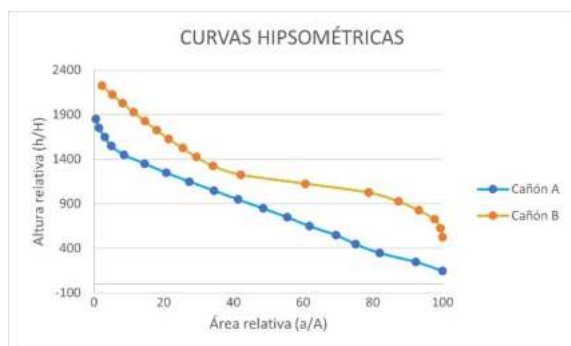


Fig. 7. Curvas hipsométricas calculadas para cada cuenca de drenaje de los cañones A y B.

4. CONCLUSIONES

Este estudio muestra el potencial de la combinación de los datos batimétricos y de reflectividad del fondo

con herramientas GIS desarrolladas inicialmente para cuencas de drenaje terrestre. Muestran la variabilidad y diversidad en la dinámica y evolución de los cañones tributarios presentes a lo largo de la plataforma continental del margen Cantábrico.

Agradecimientos

Esta investigación se ha realizado en el marco del Proyecto LIFE-INTEMARES, coordinado por la Fundación Biodiversidad del Ministerio de Transición Ecológica y Desafío Demográfico. Recibe ayuda financiera del programa LIFE de la Unión Europea.

REFERENCIAS

- De Rosa, P., Fredduzzi, A., Cencetti, C. (2019) Stream Power Determination in GIS: An Index to Evaluate the Most 'Sensitive' Points of a River. *Water*, 11.1145.
- Díez-García, I.P., Arrese, B., Gómez-Ballesteros, M., Galparsoro, I. (2022) Morphosedimentary dynamics based on channel hierarchy in the Capbreton canyon system. *X Simposio sobre el margen Ibérico Atlántico*, p 44.
- Gómez-Ballesteros, M., Arrese, B., Díez, I.P., Galparsoro, I., Sánchez-Guillamón, O., Martínez-Carreño, N., Sayago, M., López-Rodríguez, C., Rodríguez, A., Sánchez, F. (2022). Morphosedimentary characterization of the Capbreton submarine canyon system, Bay of Biscay (Cantabrian Sea). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 274.
- Ibáñez-Asensio, S. (2011) Morfología de las cuencas hidrológicas. PhD. *Universidad Politécnica de Valencia*.
- Sørensen, R., Zinko, U., Seibert, J. On the calculation of the topographic wetness index: evaluation of different methods based on field observations. (2006) *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, European Geosciences Union, vol.10 (1), pp.101-112.
- Strahler, A. (1952) Dynamic basis of geomorphology. *Bulletin of the geological society of America*, vol.63, pp. 923-938.
- Strahler, A. (1952) Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Bulletin of the geological society of America*, vol 63, pp. 1117-1142.
- Tagil, S., Jenness, J. (2008) GIS-Based Automated Landform Classification and Topographic, landcover and geologic attributes of landforms around the Yazoren Polje, Turkey. *Journal of Applied Sciences* 8 (6), pp. 910-921.
- Tubau, X., Paull, C., Lastras, G., Caress, D., Canals, M., Lundsten, E., Anderson, K., Gwiazda, R., Amblas, D. (2015) Submarine canyons of Santa Monica Bay, southern California: variability in morphology and sedimentary processes. *Marine Geology*, vol.365, pp.61-79.

Selección de Parámetros para el Cálculo del Índice de Posición Batimétrica (BPI): Tamaño y Forma del Vecindario de Análisis

L.M. Fernández-Salas (1) y A. Mena (1)

(1) Centro Oceanográfico de Cádiz (IEO-CSIC). Muelle de Levante, s/n, Puerto Pesquero 11006 Cádiz. luismi.fernandez@ieo.csic.es.

Resumen: El Índice de Posición Batimétrica (BPI, siglas en inglés) mide la posición de una ubicación georreferenciada, con una profundidad definida, en relación con el paisaje submarino circundante. Los dos parámetros más importantes en su cálculo son el tamaño y la forma del vecindario de análisis. En particular, para el parámetro de radio, que define el tamaño del vecindario, es esencial seleccionar cuidadosamente el valor óptimo, considerando tanto el tamaño de la morfología objetivo como el factor de escala, que es igual al radio en unidades de mapa multiplicado por el tamaño de la celda. Se recomienda que el valor del radio óptimo coincida estrechamente con el tamaño de la morfología objetivo. Se realizaron pruebas utilizando una forma de vecindario anular, revelando que el radio externo es el factor más influyente en el cálculo del BPI. Experimentaciones adicionales y comparaciones entre formas circulares y anulares indicaron que el uso de diferentes formas no tiene un impacto significativo en los resultados. El estudio no encontró una correlación sustancial entre los valores del BPI y otras variables del terreno examinadas, como profundidad, pendiente y curvatura. Esta falta de correlación puede atribuirse a que los valores del BPI consideran el tamaño específico del vecindario, mientras que para las variables estudiadas se utilizó el tamaño de ventana predeterminado, que es considerablemente más pequeño que el utilizado en la mayoría de los cálculos del BPI.

Palabras clave: Índice de Posición Batimétrica, BPI, Selección de Parámetros, Análisis Geoespacial

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La creciente presión humana sobre los mares ha intensificado la necesidad de mapear los hábitats del lecho marino para evaluar impactos ambientales, socioeconómicos y para desarrollar medidas de gestión sostenibles (Diesing et al., 2014). Mapear hábitats bentónicos—áreas del lecho marino asociadas a especies y comunidades específicas, según Harris y Baker (2012)—es crucial para comprender la naturaleza y distribución de estos ambientes. El avance en la accesibilidad a datos batimétricos digitales y el desarrollo de Sistemas de Información Geográfica (SIG) han incrementado el interés en técnicas geomorfométricas para estudiar el entorno marino. En la última década, se han utilizado técnicas como los atributos del terreno, la extracción de características y la clasificación automatizada para caracterizar el terreno marino, desde zonas costeras hasta regiones profundas (Lecours et al., 2016).

Un atributo clave es la geomorfología del fondo marino, que se mapea utilizando datos batimétricos y derivados como la pendiente, el aspecto, la curvatura, la rugosidad y el Índice de Posición Batimétrica (BPI). El BPI, diseñado para el mapeo de hábitats bentónicos, mide la diferencia entre la elevación de un punto y la elevación media de las celdas circundantes. Este índice puede predecir la riqueza de especies y es relevante para la biodiversidad en algunos sistemas.

El estudio realiza una comparación multiescala del BPI calculado con diversos radios, analizando cómo

el tamaño y la forma del vecindario afectan los resultados. También investiga el impacto de variables externas como la pendiente, la profundidad y la curvatura en los valores del BPI, estableciendo criterios para seleccionar parámetros óptimos para su cálculo.

2. MÉTODOS

Se seleccionaron dos áreas de estudio con diferentes dimensiones y morfologías para analizar la influencia de diversos parámetros en el cálculo del Índice de Posición Batimétrica (BPI) (Fig. 1). La primera, SA1, está en el golfo de Cádiz, abarcando 2.8 km² con profundidades de 655 a 725 m. Contiene dunas submarinas con alturas de 2 a 14 m y longitudes de onda de 40 a 200 m. Los datos batimétricos de alta resolución fueron obtenidos con un sonar Kongsberg Simrad EM710 durante el estudio marino ISUNEPCA 0618, proporcionados por el Instituto Español de Oceanografía. La segunda área, SA2, se encuentra en la pendiente continental de Murcia, cubriendo 38.2 km² con profundidades de 426 a 1690 m. Incluye cañones submarinos de 2 a 10 km de longitud y otras formaciones menores. Los datos para SA2 fueron recolectados durante el estudio INTEMARES A22M0118 con un sonar de alta resolución. Todos los datos fueron procesados con CARIS HIPS y SIPs v. 7.1, y se cuadrícularon a una resolución horizontal de 1 m para SA1 y 10 m para SA2 (Fig. 1).

Para el análisis del BPI, se aplicó un algoritmo que usa una función focal o de vecindario, comparando la elevación de cada celda con la elevación media de las celdas circundantes dentro de un rectángulo, anillo o círculo definido por el usuario. La herramienta Benthic Terrain Modeler (BTM) en ArcMap 10.8 se utilizó para calcular los valores de BPI con la forma de anillo por defecto. El algoritmo clasifica las celdas con valores positivos como características y regiones más altas, los valores negativos como depresiones y los valores cercanos a cero como áreas planas o con pendiente constante.

Para evaluar la influencia de los radios interior y exterior en el cálculo del BPI, se seleccionaron cinco perfiles: tres de SA1 y dos de SA2 (Fig. 1). Se realizaron quince pruebas para cada perfil, agrupadas en CIR (radio interior constante), COR (radio exterior constante) y CPR (radio constante en proporción). Los valores de radio fueron seleccionados según las resoluciones de los datos y las características morfológicas. Para evitar el efecto de borde, se incluyeron datos fuera del área de interés para asegurar puntos vecinos suficientes.

Dado que estudios previos a menudo usaban formas circulares o anulares sin justificación específica, se realizó un análisis comparativo entre estas formas. Se calculó la diferencia entre los BPI del grupo COR y el BPI calculado con una forma circular, utilizando el radio exterior del grupo COR. Además, se calcularon manualmente los valores del BPI para un punto específico en SA1 y SA2 con ambas formas de vecindario para verificar la precisión del algoritmo y observar la variación en los valores del BPI debido al cambio en la forma del vecindario.

Finalmente, se examinaron las relaciones entre el BPI y otras variables derivadas de la batimetría (rugosidad, pendiente, curvatura). Se calcularon coeficientes de correlación y se creó una matriz conjunta de los rásters de cada variable utilizando Rasterio en Python. Un mapa de calor generado con la biblioteca Seaborn visualizó la correlación entre las variables y los valores del BPI, usando el coeficiente de correlación de Pearson para identificar qué variables afectan significativamente los valores del BPI.

3. RESULTADOS

El estudio investigó la influencia del tamaño del vecindario en el BPI (Índice de Posición Batimétrica) al variar los radios interno y externo en dos áreas de estudio, SA1 y SA2. Se crearon cinco perfiles para esta investigación: el Perfil A, con dunas de longitud de onda aproximadamente de 200 m y altura de 10 m; el Perfil B, que muestra dunas con longitudes de onda entre 20 y 200 m y alturas de 1 a 10 m; el Perfil C, que incluye dunas asimétricas y empinadas; el Perfil D, con un cañón de 2000 m de longitud; y el Perfil E, que presenta barrancos de unos 200 m de longitud.

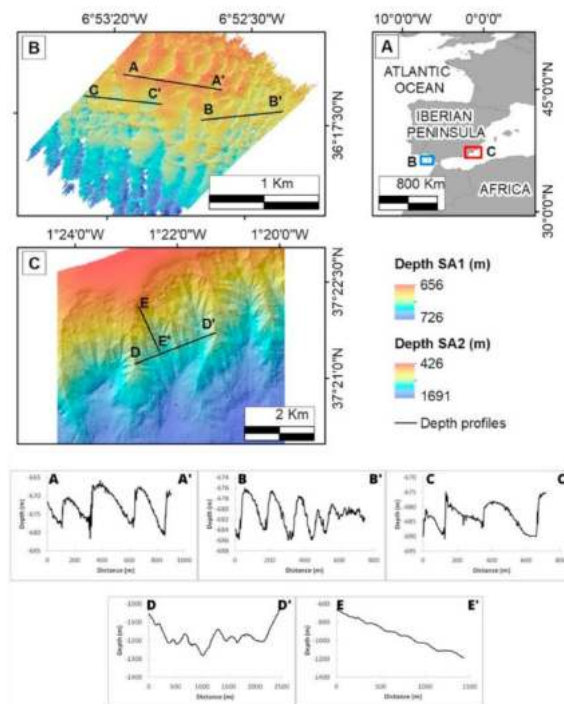


Fig. 1. A) Ubicación general de las 2 áreas de estudio. B) Muestra la batimetría en el área de estudio 1 (SA1), un campo de dunas ubicado en el Golfo de Cádiz, y la ubicación de los tres perfiles de profundidad situados en el área. C) Muestra la batimetría en el área de estudio 2 (SA2), que se encuentra en la pendiente continental de Murcia con cañones de aproximadamente 2 km de largo como principal geomorfología, y los dos perfiles de profundidad situados en el área. Los perfiles de profundidad de ambas áreas de estudio se encuentran en la parte inferior de la figura.

El análisis mostró que la variación espacial del BPI es mínima cuando el radio externo (COR) se mantiene constante. Sin embargo, se observaron diferencias significativas al variar el radio externo (CIR) y mantener constante la proporción entre ambos radios (CPR). Radios más pequeños (por ejemplo, 10_25, 10_50, 20_40, 2_10) identifican eficazmente formas cortas del fondo marino como crestas y depresiones. En contraste, radios más grandes (por ejemplo, 10_1000, 1000_2000) producen valores de BPI relativamente constantes. Los radios intermedios (por ejemplo, 10_200, 10_400, 20_200, 40_200, 80_160, 160_320) muestran variaciones mínimas, sugiriendo que radios externos similares producen cálculos de BPI consistentes, incluso con variaciones en el radio interno.

Los datos de BPI fueron trazados a lo largo de la profundidad para cada prueba y perfil. La Figura 2 ilustra que los radios externos más grandes (por ejemplo, 10_1000, 2_500) dificultan la clasificación de la morfología, mostrando altos valores de BPI, como en el perfil A, donde todos los valores son positivos. Por el contrario, radios más pequeños presentan ligeras oscilaciones en áreas altas o profundas pero valores cercanos a cero, especialmente en SA1. Los radios intermedios (por ejemplo, 10_200 y 10_400) parecen más adecuados para identificar la profundidad del perfil, mostrando

valores positivos en dunas y negativos en áreas profundas para SA1. En SA2, estos radios intermedios mantienen valores negativos en el cañón submarino, facilitando su clasificación.

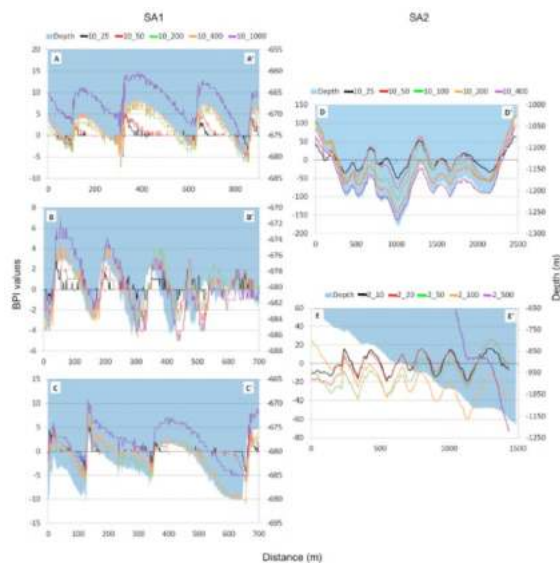


Fig. 2. Valores del Índice de Posición Batimétrica en los tests CIR, cuando el radio externo se varía en los perfiles A, B, C, D y E.

En los test COR, los resultados fueron similares, aunque los casos con radios internos mayores mostraron valores ligeramente más positivos o negativos. Sin embargo, esta diferencia no afectó significativamente los resultados. Los valores intermedios también se ajustaron bien a los perfiles de profundidad en los test CPR. En el perfil D, el cañón submarino se representó mejor con radios de 200 y 400, mostrando valores negativos de BPI en todo el cañón. Para los barrancos en el perfil E, los radios de 2_10 y 2_20 fueron los más adecuados para identificar la morfología independientemente de la profundidad.

Para evaluar la influencia de la forma del vecindario en los valores de BPI, se crearon gráficos que comparan la distribución estadística de los rásters con formas circulares y anulares (Figura 3). Los radios seleccionados del grupo de pruebas COR mostraron poca variación en los resultados. Los radios más pequeños no mostraron diferencias significativas entre las formas de vecindario en ambas áreas de estudio. Con el aumento del radio interno, la variación en los valores se hizo más evidente, especialmente en SA2. La prueba t-Student, con un intervalo de confianza del 95%, no reveló diferencias significativas entre cálculos de ráster utilizando formas circulares y anulares en ninguna de las áreas de estudio.

El análisis de la influencia de variables derivadas de la batimetría en los valores de BPI mostró una fuerte correlación entre valores de BPI calculados con diferentes radios. Los radios externos grandes (10_100 y 1000_2000) mostraron la menor correlación con el resto, pero la mayor correlación con la profundidad. También hubo alta correlación

entre valores de BPI con radios externos similares, y una relación significativa entre variables de curvatura.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Las pruebas realizadas en este estudio subrayan la importancia crítica de determinar el valor óptimo del radio para calcular el BPI. No se encuentra un criterio estándar en la literatura para seleccionar este parámetro. Nuestros hallazgos sugieren que el radio ideal debería ser aproximadamente equivalente al tamaño de las características morfológicas específicas bajo estudio. Cuando se emplea la forma de anillo para el vecindario, esto se aplicaría al radio externo (OR). Por ejemplo, para el perfil A, donde las ondas miden aproximadamente 200 m y la resolución es de 1 m, el valor de radio de 200 proporciona el mejor ajuste para caracterizar la morfología. Tendencias similares se observan para el cañón submarino y los barrancos en los perfiles D y E, respectivamente, cada uno con una resolución de 10 m. Estos resultados concuerdan con estudios previos de Dorokhova et al. (2021) y Secomandi (2017).

El análisis de los resultados reveló que el radio externo (OR) juega un papel crucial en los cálculos, con una variación mínima en los valores de BPI dentro del grupo de pruebas COR a través de diferentes valores de radio interno (IR). La representación visual consistente de los valores de BPI al usar valores de OR similares refuerza esta conclusión. Además, los análisis estadísticos, incluyendo la verificación con la prueba t-student, no mostraron diferencias significativas entre los cálculos de BPI usando formas circulares y de anillo. Se determinó que la forma de anillo no es necesaria, ya que requiere un parámetro adicional (IR) sin impacto significativo en los resultados.

Recomendamos estrategias para calcular eficientemente el BPI utilizando una forma de vecindario circular y ajustando el radio para que coincida con la morfología de interés, considerando la resolución de la imagen. Estas sugerencias se basan en los hallazgos del estudio y la necesidad de adaptar el método a las características específicas del área de estudio y la escala de los datos utilizados. Ajustando el radio del vecindario, podemos optimizar la sensibilidad del BPI para identificar y caracterizar características topográficas significativas en el paisaje submarino, mejorando así nuestra comprensión de la distribución y ecología del hábitat marino.

Este estudio propone criterios para optimizar los parámetros en el cálculo del BPI, establecidos mediante una revisión exhaustiva de la literatura relevante y una serie de pruebas de ensayo y error. Se analizó la relación entre los valores de BPI y diversas variables morfológicas, lo cual ayuda a construir modelos donde se puedan eliminar variables

redundantes o altamente correlacionadas. La selección del valor de BPI más adecuado se basó en su capacidad para categorizar con precisión la morfología deseada.

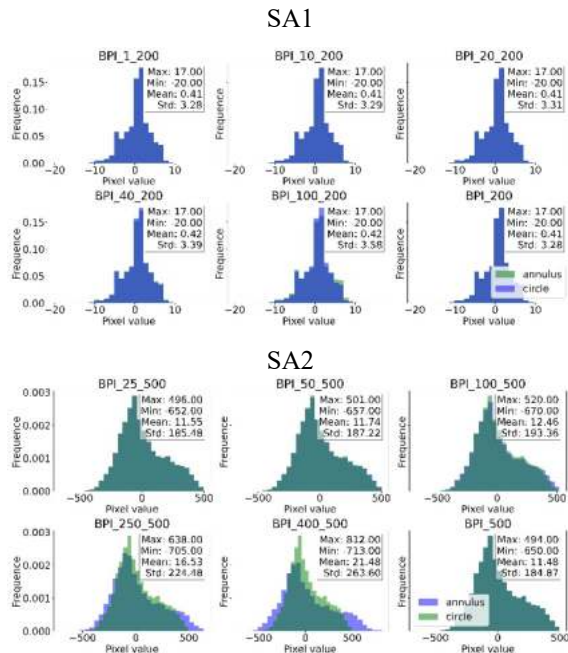


Fig. 3. Conjunto de gráficos que representan la distribución estadística de los valores de BPI calculados con vecindarios circulares y anulares del grupo de pruebas COR, con sus estadísticas descriptivas.

Para mejorar la eficiencia del cálculo del BPI, se pueden realizar más pruebas para desarrollar criterios para diferentes tipos de paisajes del fondo marino. Una alternativa que podría mejorar los resultados es considerar la fórmula propuesta por Wilson et al. (2007), que elimina el redondeo en la fórmula TPI para proporcionar una diferenciación más precisa de los valores de BPI a diferentes radios.

Agradecimientos

Agradecemos a los proyectos INTEMARES, INDEMARES e ISUNEPCA por la obtención de la información necesaria para este estudio. Así como a la Junta de Andalucía y su programa de Garantía

Juvenil a través del cual Alberto Mena ha podido ser contratado en el Centro Oceanográfico de Cádiz y así llevar a cabo este trabajo.

REFERENCIAS

- Diesing, M., Green, S.L., Stephens, D., Lark, R.M., Stewart, H.A., Dove, D., 2014. Mapping seabed sediments: comparison of manual, geostatistical, object-based image analysis and machine learning approaches. *Continental Shelf Res.* 84, 107–119. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2014.05.004>.
- Dorokhova, E.V., Rodríguez-Tovar, F.J., Dorokhov, D.V., Kuleshova, L.A., Mena, A., Glazkova, T., Krechik, V.A., 2021. Landscape mapping, ichnological and benthic foraminifera trends in a deep-water gateway, discovery gap, ne atlantic. *Geosciences* 11 (11), 1–24. <https://doi.org/10.3390/geosciences11110474>.
- Harris, P.T., Baker, E.K., 2012. Why map benthic habitats? Seafloor Geomorphology as Benthic Habitat, December 3–22. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385140-6.00001-3>.
- Lecours, V., Dolan, M.J.F., Micallef, A., Lucieer, V.L., 2016. A review of marine geomorphometry, the quantitative study of the seafloor. *Hydrological Earth System Science* 20, 3207–3244. <https://doi.org/10.5194/hess-20-3207-2016>.
- Secomandi, M., Jones, E., Terente, V., Comrie, R., Owen, M., 2017. Application of the bathymetric position index method (BPI) for the purpose of defining a reference seabed level for cable burial. *Offshore Site Investigation Geotechnics 8th International Conference Proceedings*, July 904–913. <https://doi.org/10.3723/osig17.904>.
- Wilson, M.F.J., O'Connell, B., Brown, C., Guinan, J.C., Grehan, A.J., 2007. Multiscale terrain analysis of multibeam bathymetry data for habitat mapping on the continental slope. *Mar. Geodesy* 30 (Issues 1–2). <https://doi.org/10.1080/01490410701295962>

Proyecto Antártico ElGeoPower

Autores: M. Catalán[†] (1) y J. Fiz (2).

- (1) Anteriormente Real Instituto y Observatorio de la Armada (ROA).
(2) ROA. Email: jfizbar@fn.mde.es

Resumen: ElGeoPower tiene su origen en un artículo científico publicado en 1982 por el geólogo Walter Alvarez, conocido mundialmente por proponer que el impacto de un meteorito en el Yucatán hace 65 Ma fue la causa de la extinción de los dinosaurios. En dicho artículo, postulaba la existencia de zonas geográficas por las que el océano Pacífico surtía de magma a otros océanos, posibilitando de esa manera la expansión de océanos como el Atlántico y proponía la existencia de corrientes astenosféricas desde el Pacífico hacia el Atlántico. Estas teorías constituyeron la base fundamental de una de las líneas de investigación que llevó a cabo hasta sus últimos días el Dr. Manuel Catalán Morollón. Al objeto de arrojar luz sobre la existencia de las corrientes astenosféricas y de la geodinámica de la Cuenca Powell (CP), en ElGeoPower se realizó un estudio mediante técnicas clásicas geofísicas y técnicas novedosas para España, mediante la realización de perfiles de magnetismo profundo, levantamiento magnético con dron y medidas de flujo de calor. Asimismo, en la ponencia en memoria de M. Catalán, J. Fiz presentará una de las áreas de investigación de su proyecto de tesis doctoral, la Isla Decepción, en el marco del proyecto ElGeoPower.

Palabras clave: anomalía magnética, flujo de calor, corrientes astenosféricas, geodinámica.

1. INTRODUCCIÓN

La investigación científica de España en la Antártida se inició a finales de los años 80, cuando nuestro país decidió invertir en este campo, uniéndose así a un grupo de naciones. Al principio, los trabajos estuvieron relacionados con el Buque de Investigación Oceanográfica (BIO) Las Palmas. No obstante, la presencia española en la región está fuertemente asociada al BIO Hespérides, que llevó a cabo su primera campaña antártica en el verano austral de 1991-1992. Desde aquel momento, se han llevado a cabo numerosos proyectos de investigación, abarcando tanto las ciencias biológicas como las de la Tierra. El ROA, en las ciencias de la Tierra, contribuye a través de su Sección de Geofísica.

Todos estos proyectos de investigación científica se han realizado en la península Antártica, donde España mantiene operativas dos bases cada verano austral, Juan Carlos I localizada en la Isla Livingston y Gabriel de Castilla en la Isla Decepción.

El proyecto Estructura Litosférica y Geodinámica de Powell-Drake-Bransfield Rift (ElGeoPower) fue un proyecto otorgado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades (convocatoria 2018, referencia RTI2018-099615-B-I00) y aprobado en mayo de 2019, el cual se realizó en la Campaña Antártica 2021-2022.

El propósito de este proyecto surge de la separación entre la Antártida y Sudamérica, que comenzó hace más de 40 Ma no solo supuso un cambio drástico en los patrones de circulación oceánica global. Desde el comienzo de la ruptura continental, la ausencia de

barreras litosféricas, y la ruptura de una zona de subducción que se extendía desde Sudamérica a la Antártida, permitió la transferencia de flujo astenosférico desde el Pacífico al Atlántico. Por ello, hace aproximadamente 12 Ma se desarrolló un relieve tectónico en el fondo marino que atraviesa el Paso del Drake desde Sudamérica a la Península Antártica que finalmente dio lugar a la zona de Fractura Shackleton. Esta zona de fractura generó una raíz litosférica que afectó al material astenosférico. Ello dividió ese canal de corrientes astenosféricas en dos ramales: uno circularía al N y el otro al S de la Placa de Scotia. En paralelo tiene lugar el proceso de formación de un pequeño océano, la Cuenca Powell (CP), como consecuencia de la separación de un bloque continental que actualmente conforma el microcontinente de las Orcadas del Sur. Cuando se originó este pequeño océano y cuándo cesó no existe acuerdo en la comunidad científica. Después su evolución probablemente quedó condicionada por el acceso de un ramal de flujo astenosférico que penetraría por la zona N de la cuenca. En la misma zona se encuentra la Cuenca del Bransfield que también presenta una situación geodinámica indefinida (Martos et al., 2014, 2019).

Los objetivos que inicialmente se plantearon en el proyecto fueron:

- Evolución geodinámica de la CP.
- Identificar evidencias que apoyen la existencia de un trasvase astenosférico entre el océano Pacífico y el Atlántico mediante técnicas geofísicas y mediciones de flujo de calor.
- Evolución magnética del volcán Isla Decepción.

Al finalizar la campaña ElGeoPower y tras un exhaustivo análisis y estudio, el cual quedó reflejado en Catalán et al. (2023), los objetivos finales del mismo fueron arrojar luz sobre:

- Estado térmico de la CP.
- Anomalías magnéticas de baja amplitud observadas.
- Existencia de corrientes astenosféricas.

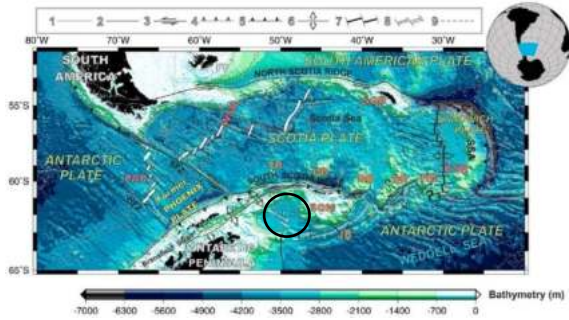


Fig. 1: Esquema general de los principales elementos tectónicos y geográficos del Mar de Scotia:

1) falla transformante inactiva; 2) falla transformante activa; 3) sentido de movimiento; 4) subducción inactiva; 5) subducción activa; 6) eje de expansión; 7) dorsal de expansión oceánica activa; 8) dorsal de expansión oceánica inactiva; 9) límite corteza oceánica-continental. El círculo negro indica la localización de la CP (modificado de Martos et al., 2014).

2. DESARROLLO

Entre el 4 y el 20 de enero se llevó a cabo ElGeoPower en aguas antárticas a bordo del Buque Oceanográfico (B/O) Sarmiento de Gamboa. Este proyecto estuvo liderado por el ROA y contó con la colaboración de diversas instituciones académicas españolas como la Universidad Complutense de Madrid (UCM) y la Universidad de Zaragoza (UNIZAR), centros científicos nacionales como el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) y el Instituto Español de Oceanografía (IEO), e internacionales como el Goddard Space Flight Center de la NASA y el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (Baja California, México). El investigador principal del proyecto fue el CF. Manuel Catalán y contó con la participación de varios oficiales del ROA, como el CC. Roberto Cabieces, el TN. Víctor de Ory y el TN. Julián Fiz.



Fig. 2.1: Oficiales del ROA en el Aeropuerto de Jerez de la Frontera (Cádiz) momentos antes de iniciar su viaje para llevar a cabo el Proyecto Antártico ElGeoPower.



Fig. 2.2: Personal científico de ElGeoPower, antes de embarcar en el B/O Sarmiento de Gamboa, en el Puerto de Ushuaia (Argentina).

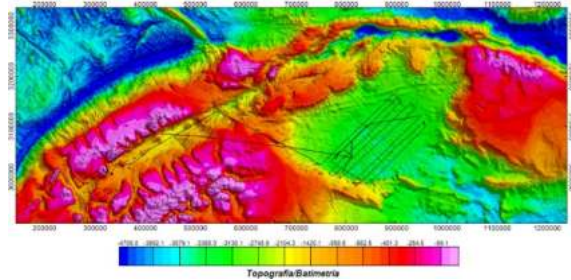


Fig. 2.3: Topografía y batimetría (Becker et al., 2009). En trazo negro se muestra la derrota seguida durante ElGeoPower adquiriendo datos geofísicos.

Con el fin de aclarar la existencia de dicho ramal de flujo astenosférico procedente del Pacífico, y de conocer la geodinámica de la Cuenca Powell, este proyecto realizó un estudio mediante técnicas geofísicas clásicas, como el magnetismo marino en superficie, gravimetría, sísmica de refracción con sismómetros de fondo marino (OBS, por sus siglas en inglés) y batimetría multihaz. Asimismo, se utilizaron técnicas novedosas para nuestro país, como la realización de perfiles de magnetismo profundo, el uso de un dron con el que se realizó un levantamiento magnético de la Isla Decepción y medidas directas de flujo de calor, con el fin de obtener indicios que confirmasen la existencia del trasvase de flujo astenosférico.

3. RESULTADOS

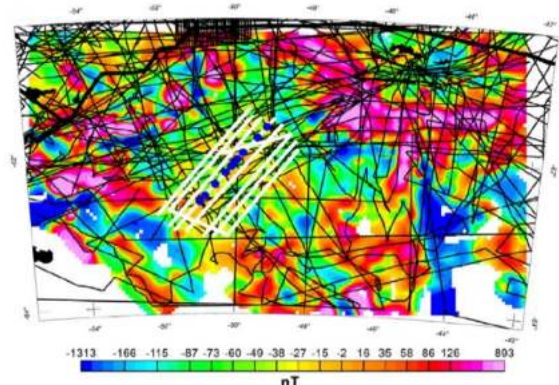


Fig. 3.1: Líneas negras: datos del WDMAM (Lesur et al., 2016) y de ocho campañas a bordo del BIO Hespérides entre 1992 y 2013. Líneas blancas: levantamiento magnético en la CP durante ElGeoPower. Círculos azules: mediciones (diez) de flujo de calor.

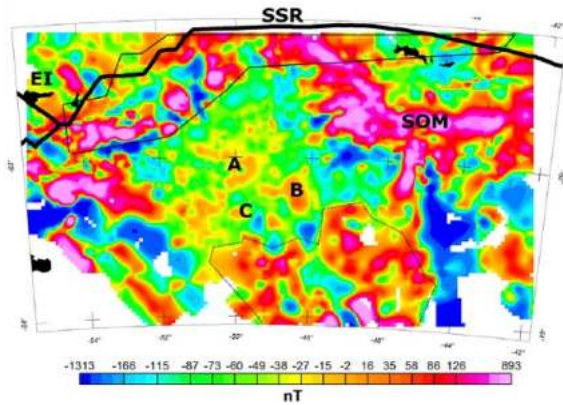


Fig. 3.2: Mapa de anomalías magnéticas de la CP (5 km de resolución). Una línea delgada y sólida negra rodea la Anomalia del Margen del Pacífico (PMA). Cordillera del Sur de Scotia, SSR; Microcontinente de las Orcadas del Sur, SOM; Isla Elefante, EI (SSR, SOM Y EI por sus siglas en inglés). A, B y C resaltan tres anomalías magnéticas centrales en la CP (modificado de Catalán et al., 2023).

En la Fig. 3.2 observamos que la parte NO, N y NE de la CP se caracteriza por presentar altas anomalías magnéticas. En cuanto al mapa de anomalías magnéticas de Catalán et al. (2020), el obtenido en Fig. 3.2 muestra diferencias principalmente en su área central (A, B, y C) debido a la inclusión de las nuevas líneas obtenidas en EIGeoPower.

Las anomalías magnéticas son una consecuencia de las propiedades magnéticas de las rocas y tienen dependencia directa de la temperatura. Las rocas pierden sus propiedades magnéticas a medida que la temperatura aumenta con la profundidad. Esto se conoce como la profundidad de Curie. Esta profundidad podría ser más profunda o superficial dependiendo de la propia actividad del entorno geológico/geodinámico.

Es comúnmente aceptado que la respuesta magnética de la corteza oceánica se debe a la contribución de dos capas: una formada por basaltos extrusivos (<1 km de espesor), cuya componente principal es la titanomagnetita, y otra capa (~5 km de espesor) formada por gabro, dolerita y, en algunos casos, peridotitas serpentinizadas. Los basaltos extrusivos y los gabros tienen diferentes temperaturas de Curie. La titanomagnetita tiene un rango de temperatura de Curie entre 100°C–550°C, mientras que para la magnetita es de 580°C.

Catalán et al. (2023) propone que la pequeña amplitud de las anomalías magnéticas es el resultado de la dependencia de las propiedades magnéticas de las rocas con la temperatura. En particular, la capa de basalto extrusivo que cubre esta área. La corriente astenosférica penetra en la CP a través de su área N (Martos et al., 2019; Catalán et al., 2020) y actuaría como una fuente de calor adicional afectando las propiedades magnéticas y debilitando las anomalías y la magnetización.

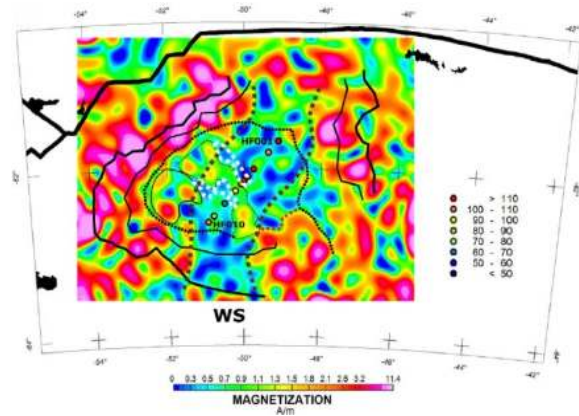


Fig. 3.3: Mapa de la amplitud de magnetización cortical de la CP. Las mediciones de flujo de calor son de HF001 a HF010, enumeradas de NE a SO (modificado de Catalán et al., 2023).

Esto está respaldado por la existencia de una correspondencia entre las mediciones de flujo de calor y los valores de magnetización alcanzados a lo largo de la CP. El área donde se alcanzan las mediciones máximas de flujo de calor (HF001-HF005) corresponde a la parte oriental donde la amplitud de magnetización es muy baja o prácticamente nula. De manera similar, las mediciones de flujo de calor HF009 y HF010 corresponden a valores que aumentan hacia el O, alcanzando HF010 un valor similar a los obtenidos en la región NE (Catalán et al., 2023).

4. CONCLUSIONES

En este estudio, se ha investigado la evolución de la CP utilizando datos magnéticos, flujo de calor, batimetría, gravedad y espesor de sedimentos. Los resultados muestran que las bajas amplitudes de las anomalías magnéticas se concentran, principalmente, en la parte E, SE y SO de la CP. Las bajas amplitudes se deben a la dependencia de las propiedades magnéticas de las rocas con la temperatura. El flujo de la astenosfera que penetra en la cuenca por el N actúa como una fuente adicional de calor, causando una respuesta magnética débil. Los resultados muestran una buena correlación entre las anomalías magnéticas de pequeña amplitud y los altos valores de flujo de calor, validando la hipótesis de Catalán et al. (2023) sobre la disminución de la magnetización debido al impacto del flujo de la astenosfera y las variaciones laterales del espesor de la corteza. Esto abre nuevas preguntas sobre la dinámica del manto superior y la distribución de las corrientes astenosféricas en la región.

Agradecimientos

J. Fiz agradece sinceramente a la familia de Manuel Catalán por brindarle la oportunidad de hablar en su memoria.

REFERENCIAS

- Alvarez, W. (1982). Geological evidence for the geographical pattern of mantle return flow and the driving mechanism of plate tectonics. *Journal of Geophysical Research*, 87(B8), 6697–6710.
- Becker, J. J., Sandwell, D. T., Smith, W. H. F., Braud, J., Binder, B., Depner, J., et al. (2009). Global bathymetry and elevation data at 30 arc seconds resolution: SRTM30 PLUS. *Mar. Geod.* 32 (4), 355–371. doi:10.1080/01490410903297766
- Catalán, M., Martos, Y. M., Galindo Zaldivar, J., Pérez, L. F., & Bohoyo, F. (2020). Unveiling Powell Basin's tectonic domains and understanding its abnormal magnetic anomaly signature. Is heat the key? *Front. Earth Sci.* 8, 580675. doi:10.3389/feart.2020.580675
- Catalán, M., Negrete-Aranda, R., Martos, Y.M., Neumann, F., Santamaría, A., & Fuentes, K. (2023). On the intriguing subject of the low amplitudes of magnetic anomalies at the Powell Basin. *Frontiers in Earth Science*, 11(October). doi:10.3389/feart.2023.1199332
- Lesur, V., Hamoudi, M., Choi, Y., Dyment, J., & Thébaud, E. (2016). Building the second version of the world digital magnetic anomaly map (WDMAM). *Earth, Planets Space* 68, 27. doi:10.1186/s40623-016-0404-6
- Martos, Y. M., Galindo-Zaldívar, J., Catalán, M., Bohoyo, F., & Maldonado, A. (2014). Asthenospheric Pacific-Atlantic flow barriers and the West Scotia Ridge extinction. *Geophysical Research Letters*, 41(1), 43-49. doi:10.1002/2013GL058885
- Martos, Y. M., Catalán, M., & Galindo-Zaldívar, J. (2019). Curie depth, heat flux and thermal subsidence studies reveal the Pacific mantle outflow through the Scotia Sea. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. doi:10.1029/2019JB017677

Avances en la caracterización geomorfológica de la Provincia Volcánica de las Islas Canarias y su relación con los hábitats bentónicos

M. García (1), D. Palomino (2), L.M. Fernández-Salas (1), O. Sánchez-Guillamón (2), N. Martínez-Carreño (3) y J.T. Vázquez (2)

(1) Centro Oceanográfico de Cádiz (IEO-CSIC). Muelle de Levante, s/n, Puerto Pesquero 11006 Cádiz. marga.garcia@ieo.csic.es.

(2) Centro Oceanográfico de Málaga (IEO-CSIC). Explanada San Andrés s/n. Puerto de Málaga 29001 Málaga.

(3) Instituto Español de Oceanografía (IEO-CSIC). Corazón de María, 8, 28002 Madrid.

Resumen: Los montes submarinos de la Provincia Volcánica de las Islas Canarias se han estudiado mediante métodos acústicos de alta resolución, la adquisición de muestras sedimentarias y la observación directa con equipos controlados de forma remota. Este estudio muestra el predominio de los procesos de origen volcánico y de transporte de masas en los montes de las zonas suroeste y noreste. También se pone de manifiesto la interrelación con la dinámica de las aguas intermedias y profundas.

Palabras clave: Montes submarinos, Archipiélago Canario, Volcanes submarinos.

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La Provincia de Montes Submarinos de las Islas Canarias (Fig. 1) es un área prioritaria en los estudios científico-técnicos para el seguimiento de la biodiversidad y caracterización de áreas marinas protegidas realizados por el Instituto Español de Oceanografía (Proyecto BIODIV). Este trabajo presenta los resultados preliminares de las exploraciones realizadas en este proyecto, cuyo objetivo es mejorar el conocimiento de las características morfosedimentarias del sustrato marino, los procesos geológicos y oceanográficos relacionados y la conservación de las comunidades bentónicas que lo habitan.

2. MÉTODOS

Este estudio se basa en datos directos e indirectos adquiridos a lo largo de sucesivas campañas oceanográficas. En primer lugar, se ha adquirido batimetría de alta resolución con ecosonda multihaz EM712 a bordo del B/O Ángeles Alvariño, operando a frecuencias entre 40 y 100 kHz barriendo hasta 5.5 veces la profundidad de la columna de agua. Los datos de batimetría y reflectividad se han procesado mediante el software Caris HIPS and SIPS, produciendo mosaicos de resoluciones máximas de 5 m. La batimetría de base regional utilizada en este trabajo ha sido extraída de GEBCO (General Bathymetry Chart of the Oceans; <https://www.gebco.net>).

La adquisición de perfiles del subsuelo se ha realizado con la sonda paramétrica TOPAS PS18. Los perfiles se han visualizado e interpretado mediante el software IHS Kingdom. También se han obtenido muestras de sedimento superficial con

draga shipek a las que se va a someter a análisis granulométrico y de materia orgánica. El estudio se complementa con el análisis de grabaciones de vídeo y toma de imágenes extensiva HD con el ROV-T Tasifé 2013 y grabación de vídeo HD y de muestreo dirigido del fondo marino con el ROV Liropus.

Este trabajo toma los topónimos definidos en el catálogo de Topónimos de Demarcaciones Marinas Españolas (Palomino et al. 2023).

3. MARCO GEOLÓGICO Y OCEANOGRÁFICO

La Provincia de Montes Submarinos de las Islas Canarias está formada por numerosos edificios volcánicos resultado de la actividad magmática derivada de la dinámica del manto e interpretada de forma clásica como de magmatismo oceánico intraplaca de punto caliente. La provincia es activa al menos desde hace 142 Ma (van den Bogaard, 2013), lo que dificulta su interpretación en un modelo geodinámico único.

Las Aguas Superficiales ocupan la columna de agua entre la superficie y los 100-300 m de profundidad. Hasta los 700 m se sitúa el Agua Central Noratlántica. Las profundidades intermedias están ocupadas por el Agua Intermedia Antártica y el Agua Mediterránea, mientras que el Agua Profunda Noratlántica se encuentra a profundidades superiores (Pérez-Velchí et al., 2017). En cuanto a la dinámica oceanográfica, en la parte más superficial de la columna se han caracterizado la Corriente de Canarias, que fluye hacia el sur, y la Corriente del Afloramiento de Canarias. A niveles intermedios, fluye el agua Mediterránea y la Corriente Intermedia que fluye hacia el polo, a profundidades en torno a

1000 dbar y con gran variabilidad estacional (Fig. 1; Pérez-Velchí et al., 2021).

4. RESULTADOS

Los montes submarinos de la zona suroeste de la provincia incluyen grandes edificios como

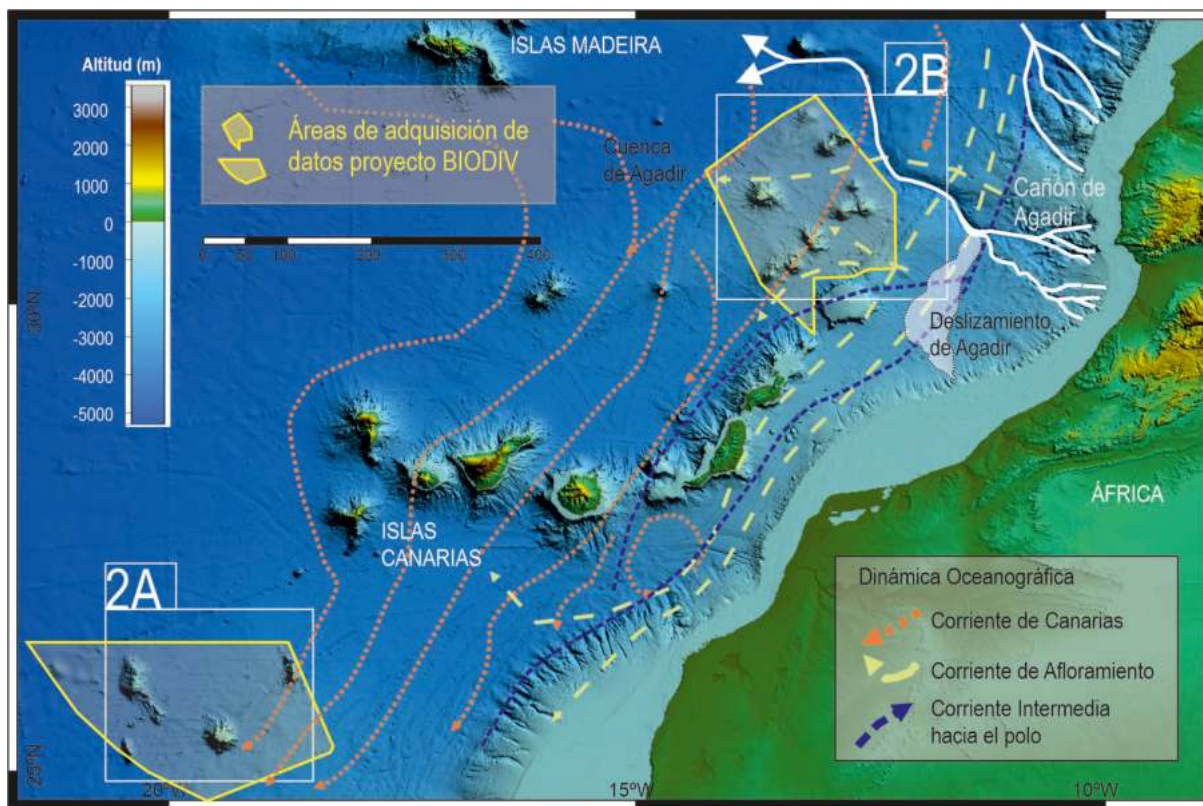


Figura 1. Mapa de la zona de estudio mostrando la localización de las zonas suroeste y noreste de la Provincia de Montes Submarinos de las Islas Canarias estudiadas en este trabajo. Se muestran asimismo los principales rasgos morfosedimentarios en la zona (deslizamiento y cañón de Agadir), y la distribución de las principales corrientes en la zona. La batimetría de fondo procede de GEBCO.

Ico, The Paps, Drago, Echo y Bimbache, con cimas entre los 250 y más de 2000 m de profundidad y numerosas colinas submarinas (Fig. 2A), controlados por procesos volcánicos e inestabilidades sedimentarias (Palomino et al., 2016). De éstos, Echo se encuentra en estado de guyot, mostrando una cima plana, mientras que el resto tienen cimas cónicas o irregulares. En la zona noreste, hasta el momento mucho menos estudiada, se encuentran edificios como Nico, Bentor, Ancor, Fayna, Rybin y Dacia (Fig. 2B), siendo este último el más somero, con profundidades de menos de 70 m. En esta zona predominan los edificios en estado de guyot (Nico S y N, Dacia, Ancor y Fayna) sobre los cónicos (Bentor y Rybin). The Paps ha sido datado con una edad de 91 Ma, mientras que Dacia cuenta con 47 Ma, y Rybin con 55 Ma (van den Bogaard, 2013).

Los resultados muestran el predominio de rasgos erosivos en los flancos de los montes, incluyendo *gullies* y escarpes, entre los que se localizan frecuentemente conos volcánicos de menor entidad. En las cimas de los montes se encuentran cuerpos sedimentarios en forma de cuña hacia los bordes de

los montes. Se han identificado campos de ondas de sedimento en las cimas planas de los montes en estado guyot, y áreas sedimentarias erosionadas con canales o *moats* producidos por el efecto de las corrientes.

Las muestras de las zonas sedimentarias consisten en arenas medias y gruesas con restos bioclásticos. En la cima de los montes se encuentran también pequeños conos volcánicos, y en ocasiones pequeños montículos de origen biogénico. Por lo general, los hábitats identificados en sustrato rocoso están dominados por corales y esponjas, mientras que el sustrato sedimentario abundan los celenteros.

5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Este trabajo explora las características morfosedimentarias de los montes y su relación con los procesos gravitacionales y oceanográficos y se aproxima al estudio del vínculo entre tipos de fondo y la distribución de hábitats bentónicos.

Por un lado, los montes se encuentran en las cercanías del Cañón de Agadir y en una zona caracterizada por grandes deslizamientos (Fig. 1; Li

et al, 2018). Los montes pueden suponer una importante fuente de aporte de carga sedimentaria al sistema turbidítico, a través de los procesos erosivos, fundamentalmente las inestabilidades y los sistemas de *gullies* y cañones de los flancos. Por otro lado, la relación entre los montes y las corrientes de fondo se manifiesta por la presencia de campos de ondas sedimentarias y posiblemente por la ocurrencia de determinados hábitats bentónicos que pueden ser favorecidos por la dinámica oceanográfica. También la topografía compleja del talud debida a la presencia de los montes puede interactuar con las corrientes de fondo, afectando a la circulación de la

masa de agua Antártica Intermedia que circula entre el archipiélago canario y el talud africano, favorecida por la dinámica de la Corriente del Afloramiento Canario (Jiménez-Rincón et al, 2023).

Agradecimientos

Este trabajo está financiado por el proyecto BIODIV “Asesoramiento científico-técnico para el seguimiento de la biodiversidad marina: espacios y especies marinos protegidos de competencia estatal (2022-2025) PRTR-Next Generation EU-MITERD).

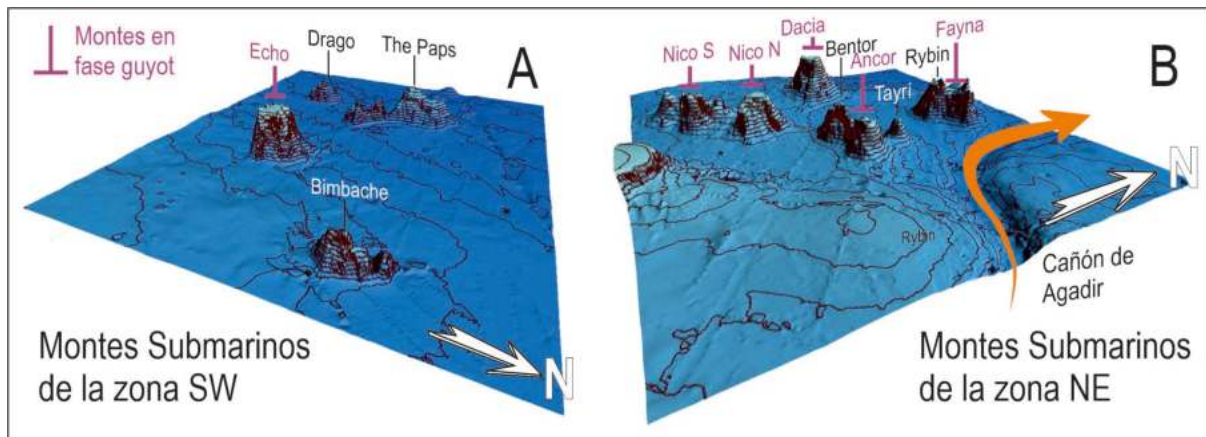


Figura 2. Modelos 3D de las dos zonas estudiadas, mostrando la morfología de los montes submarinos y los ambientes fisiográficos en los que se encuentran. La localización de las áreas y la leyenda de color de la batimetría pueden verse en la Figura 1.

REFERENCIAS

- Jiménez-Rincón, J.A., Cianca, A., Ferrero-Martín, C., e Izquierdo, A. (2023). A Glider View of the Spreading and Mixing Processes of Antarctic Intermediate Water in the Northeastern Subtropical Atlantic. *Journal of Marine Science and Engineering* 11(3), 576. doi: 10.3390/jmse11030576.
- Li, W., Krastel, S., Alves, T.M., Urlaub, M., Mehringer, L., Schürer, A., Feldens, P., Gross, F., Stevenson, C.J., y Wynn, R.B. (2018). The Agadir Slide offshore NW Africa: Morphology, emplacement dynamics, and potential contribution to the Moroccan Turbidite System. *Earth and Planetary Science Letters*, 498, 436-449. doi: 10.1016/j.epsl.2018.07.005.
- Palomino, D., Vázquez, J.-T., Somoza, L., León, R., López-González, N., Medialdea, T., Fernández-Salas, L.M., González, F.J. y Rengel, J.A. (2016). Geomorphological features in the southern Canary Island Volcanic Province: The importance of volcanic processes and massive slope instabilities associated with seamounts *Geomorphology* 255, 125-139. doi: 10.1016/j.geomorph.2015.12.016.
- Palomino, D., Fernández-Salas, L.M., Ercilla, G., y Vázquez, J.T., 2023. Topónimos de los principales elementos fisiográficos y geomorfológicos de las demarcaciones marinas españolas [Dataset]; DIGITAL.CSIC; <https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/15497>.
- Vélez-Belchí, P., Caínzos, V., Romero, E., Casanova-Masjoan, M., Arumí-Planas, C., Santana-Toscano, D., González-Santana, A., Pérez-Hernández, M. D., y Hernández-Guerra, A. (2021). The Canary Intermediate Poleward Undercurrent: Not Another Poleward Undercurrent in an Eastern Boundary Upwelling System. *Journal of Physical Oceanography*, 51(9), 2973-2990. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-20-0130.1>
- Vélez-Belchí, P., Pérez-Hernández, M.D., Casanova-Masjoan, M., Cana, L. y Hernández-Guerra, A. (2017). On the seasonal variability of the Canary Current and the Atlantic Meridional Overturning Circulation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122, 4518-4538, <https://doi.org/10.1002/2017JC012774>.
- van den Bogaard P. (2013). The origin of the Canary Island Seamount Province - new ages of old seamounts. *Scientific Reports* 3, 2107.

Caracterización de tipos de sustrato combinando datos de reflectividad e imágenes de trineo y ROV

C. Juan (1), M. Sayago (1), L.M. Fernández-Salas (1), N. López-González (2), C. López-Rodríguez (2), E. Guijarro-García (3)

(1) Centro Oceanográfico de Cádiz. Instituto Español de Oceanografía (IEO-CSIC), Cádiz, ESPAÑA (carmen.juan@ieo.csic.es).

(2) Centro Oceanográfico de Málaga. Instituto Español de Oceanografía (IEO-CSIC), Fuengirola (Málaga), ESPAÑA.

(3) Centro Oceanográfico de Murcia. Instituto Español de Oceanografía (IEO-CSIC), San Pedro del Pinatar (Murcia), ESPAÑA.

Resumen: Se ha desarrollado una metodología que combina datos de reflectividad del fondo marino de distinto origen (buque y ecosonda) y condiciones ambientales (climáticas y marinas), así como muestreos directos realizados mediante dragas y testigos, e información registrada en video mediante vehículos submarinos remotos. La cartografía obtenida mediante este protocolo cuenta con una mayor solidez que clasificaciones realizadas únicamente mediante técnicas directas (muestreos sistemáticos) o técnicas indirectas (mapas de reflectividad), puesto que permite considerar la presencia de un sustrato primario y otro secundario superpuestos, así como identificar sustratos de fango consolidado que producen una alta reflectividad, similar a la que resultaría de un fondo rocoso.

Palabras clave: Reflectividad, Trineo, ROV, Análisis de imagen, Tipos de sustrato.

1. INTRODUCCIÓN

Con el objeto de desarrollar una metodología consistente que permita clasificar los tipos de sustrato en base a diversas fuentes de información, se ha trabajado con datos de reflectividad del fondo marino, muestreos directos realizados mediante dragas, e información registrada en video mediante vehículos submarinos remotos. Estos datos fueron

obtenidos a bordo de los buques *Ramón Margalef* y *Ángeles Alvariño* durante las campañas INTEMARES-A22M-0118, -0819 y -0720 a lo largo del Escarpe de Mazarrón y en la plataforma intratalud ubicada frente a las costas de Murcia, entre el Cabo de Palos y Torrevieja, la cual abarca distintas provincias fisiográficas, desde la plataforma hasta la llanura abisal (Figura 1) (Guijarro et al., 2024).

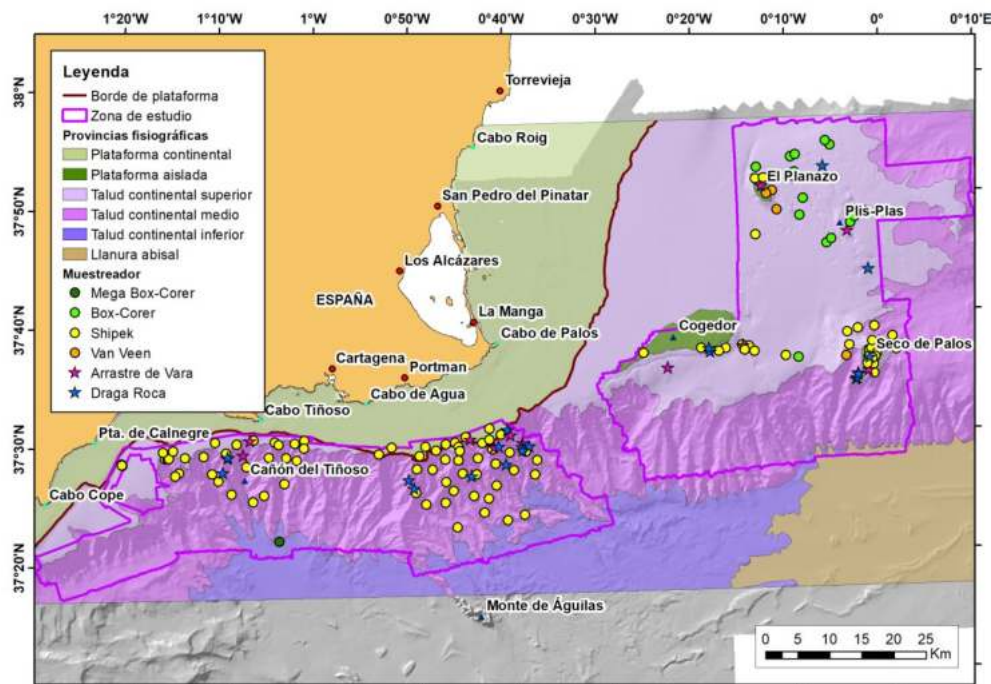


Fig. 1. Zona de estudio mostrando las provincias fisiográficas identificadas, y la ubicación de las muestras de sedimento.

La capa base para este trabajo será la cartografía de reflectividad obtenida en paralelo a los datos batimétricos. La reflectividad del sustrato es consecuencia directa de las morfologías del fondo y su orientación, así como de la naturaleza del sustrato que conforma la superficie y los primeros centímetros del subfondo. Al comparar la reflectividad con otras fuentes de información, es necesario tener en cuenta cómo es el proceso de adquisición de datos y la información que proporciona como resultado. Los muestreos directos parecen *a priori* una fuente fiable de datos sedimentológicos, pero es posible que durante el muestreo, por ejemplo, se recupere un sustrato secundario (una capa centimétrica de arena) sin obtener información alguna del sustrato primario (una laja rocosa enterrada), que realmente caracteriza la superficie del fondo estudiado (Figura 2).

Por ello, es necesario el análisis conjunto de la reflectividad y las muestras de sedimento junto con todas aquellas fuentes de información que puedan aportar datos adicionales, siendo las imágenes de vídeo las que pueden proporcionar evidencias más consistentes de la presencia de un sustrato primario subsuperficial, al aparecer elementos tales como escalones, grietas, madrigueras endurecidas, etc. (Figura 2).

2. METODOLOGÍA

2.1. Metodología de adquisición de datos

Los datos batimétricos fueron registrados mediante la ecosonda multihaz EM-710 Kongsberg, con un rango de frecuencias entre 40 y 100 kHz, un solape mínimo del 50% de la anchura de barrido y una apertura de haces de entre 45 y 60°. Estos datos se procesaron mediante el programa Caris HIPS &

SIPS v.10, utilizando los algoritmos de interpolación *CUBE* o *Swath Angle*, según el caso. Una vez se eligió la resolución y el algoritmo de interpolación, la superficie creada pasó por un control de calidad donde se limpiaron los ecos falsos registrados durante la adquisición. Una vez se procesaron las superficies batimétricas, se les aplicó el procesamiento de los datos de reflectividad del fondo marino mediante el módulo de Mosaicos de SIPS, concretamente aplicando el algoritmo “*Geocoder*” (Gujarro et al., 2024).

Para la obtención de muestras de sedimentos y rocas se utilizaron diferentes tipos de muestreadores: i) dragas Shipek, Van Veen y *box-corer* para la recuperación de los sedimentos superficiales; ii) draga *box-corer* para el muestreo de la columna sedimentaria; y iii) draga de roca y arrastre de vara (beam trawl) para la toma de muestras de roca y fauna en los fondos rocosos o mixtos (Gujarro et al., 2024). La ubicación de las muestras (Figura 1) corresponde al compromiso necesario dada la gran extensión del área de estudio, el reducido tiempo de buque y el hecho de que las campañas de 2019 y 2020 estaban principalmente dirigidas al muestreo de fauna. Las muestras de sedimento recuperadas fueron sometidas a análisis texturales -%GAF- y geoquímicos (%MO y carbonatos).

Para el procesamiento y visualización de los vídeos de TASIFE y ROV desde un punto de vista sedimentario se empleó la aplicación de vídeo instalada de serie con Windows10-Pro, que permite el avance cada 30 segundos y el retroceso cada 10 segundos (Gujarro et al., 2024). Esta herramienta presenta, además, la ventaja de enlazar con la aplicación de edición de fotos, donde se pueden guardar fotogramas del vídeo sin pérdida de calidad.

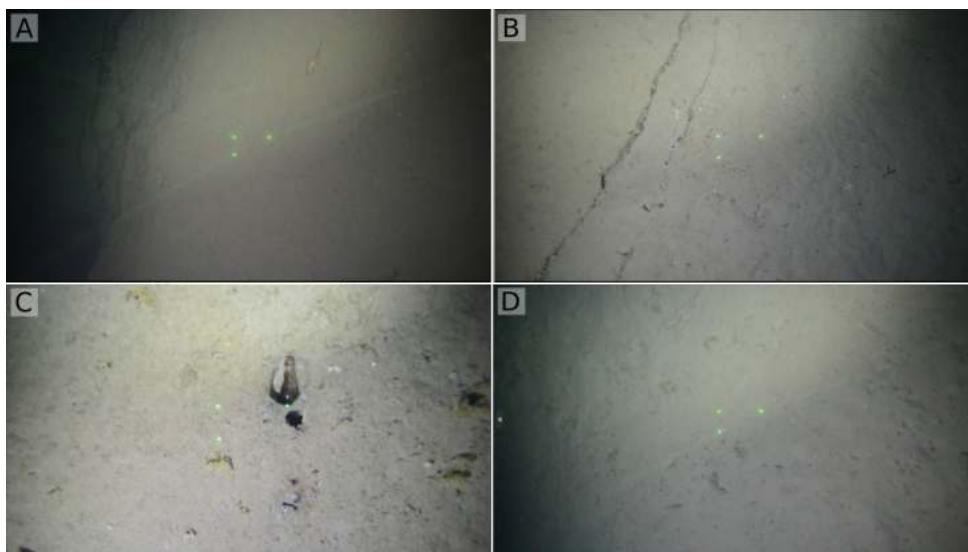


Fig. 2. Ejemplos de imágenes obtenidas mediante el trineo TASIFE, en las que se distingue un sustrato primario consolidado enterrado total o parcialmente por sustrato no consolidado. A) Escalón. B) Grieta. C) Botella encajada dentro de una madriguera endurecida. D) Relieve muy irregular, con madrigueras muy abundantes y fragmentos de coral parcialmente enterrados.

El procesado y visualización de los videos de TASIFE y ROV requieren del criterio experto de un analista para la correcta obtención de información, ya que es de carácter multidisciplinar. Para evitar cualquier posible sesgo individual durante el análisis posterior a la campaña, cada transecto de video fue analizado en paralelo desde un punto de vista geológico por tres especialistas independientes de distintas áreas de conocimiento (sedimentología, geofísica, bentos) para asegurar un análisis multidisciplinar. Posteriormente los resultados (Figura 2) fueron puestos en común y consensuados, observándose un muy alto grado de coincidencia.

2.2. Metodología específica para determinar el tipo de sustrato

Los datos de reflectividad acústica exportados desde CARIS en los formatos ASCII y GeoTiff se incorporaron al software ArcGIS. Para lograr la homogeneización de capas de reflectividad de distinto origen (buque y ecosonda) y condiciones ambientales (climáticas y marinas) se modificó la visualización de cada capa ajustando el *display* en la ventana de *Image Analysis*, por ser el método que permite realizar variaciones de un mayor número de parámetros. Una vez que los distintos ráster presentan una visualización homogénea sin artefactos, es necesario exportar el conjunto para integrar las distintas capas en un solo GeoTiff continuo a 1000 dpi. Esta nueva capa tendrá una escala continua de valores de color (variando de 0 a 255), perdiendo la información de los histogramas originales (en dB).

Por último, la caracterización de los tipos de sustrato se realizó combinando toda la información anteriormente descrita mediante el paquete *Image Classification* de ArcGIS, que permite entrenar un algoritmo para clasificar porciones de un ráster (nos referiremos de ahora en adelante como patrón de píxeles) en base a datos procedentes de otras capas. Los patrones de píxeles fueron seleccionados, por tanto, en base a la ubicación de muestras de sedimento, o de datos de video geolocalizados. La subdivisión más básica consiste en agrupar aquellos sustratos duros y consolidados por una parte, y los sustratos no consolidados por otra. Una vez calculados los polígonos de cada categoría, es posible separar el ráster original utilizando la herramienta *Extract by Polygon*, y trabajar con cada categoría por separado. Posteriormente, se realizó una clasificación más detallada empleando de nuevo la información de muestreos directos y videos mediante el paquete *Image Classification* de ArcGIS, e incorporando el cálculo de la rugosidad del fondo mediante el módulo externo *Benthic Terrain Modeler* desarrollado para ArcGIS, lo que dio lugar a la clasificación final de tipos de sustrato: sustratos no consolidados por una parte (arena y arena fangosa, fango y fango arenoso, mixto y grava), y sustratos duros de alta (roca, bloques,

zonas mixtas) y baja rugosidad (fangoso, arenoso y mixto consolidados) por otra.

3. RESULTADOS

Una vez generado el mapa de tipos de sustrato, encontramos:

- i) Zonas que, aunque en promedio muestren una clara predominancia de un tipo de sustrato, muestran píxeles de otros tipos de sustrato (el equivalente a encontrar parques en el centro de una gran ciudad, aunque siga siendo zona urbana) (Figura 3);
- ii) Bordes muy irregulares (el equivalente a encontrar casas dispersas a las afueras de una ciudad) (Figura 3);
- iii) Artefactos causados por el bandeo de las pasadas del barco.

Todos estos problemas y artefactos deben ser convenientemente tratados para obtener un mapa funcional. Para ello, se han aplicado distintos filtros y herramientas de ArcGIS (*Focal Statistics*, *Boundary Clean*, *Majority Filter*, la combinación de *Region Group* y *Extract by Attribute* para generar una máscara, y finalmente utilizar esa máscara con *Nibble*) que, combinados, permiten calibrar el peso real de estos píxeles dispersos y promediarlos en función de la mayoría de píxeles que los rodea. Todos y cada uno de los filtros han requerido un análisis pormenorizado del grado de mejora en función de los distintos parámetros testeados, obteniendo finalmente un protocolo de trabajo sólido. Por último, se eliminan en base a criterio experto los artefactos orientados según la trazada del barco.

El resultado es un mapa de distribución de tipos de sustrato más limpio, claro y útil. Sin embargo, no hay que olvidar que cualquier corrección conlleva la pérdida de parte de la información. En el caso que nos ocupa, posiblemente se ha minimizado ligeramente las clases con menor distribución, ya que sus bordes estarán frecuentemente rodeados de una mayor proporción de otras clases.

4. CONCLUSIONES

La distribución de los muestreos no homogénea, ha afectado de forma significativa al resultado: la fiabilidad de la definición de los tipos de sustratos es mayor en aquellas zonas con mayor concentración de muestras de sedimento, y la fiabilidad es menor en aquellas zonas con menor concentración de muestreos.

Por último, ha sido significativo calibrar la representatividad de cada patrón de píxeles del ráster respecto a su entorno al entrenar la herramienta *Image Classification* de ArcGIS, ya que un patrón

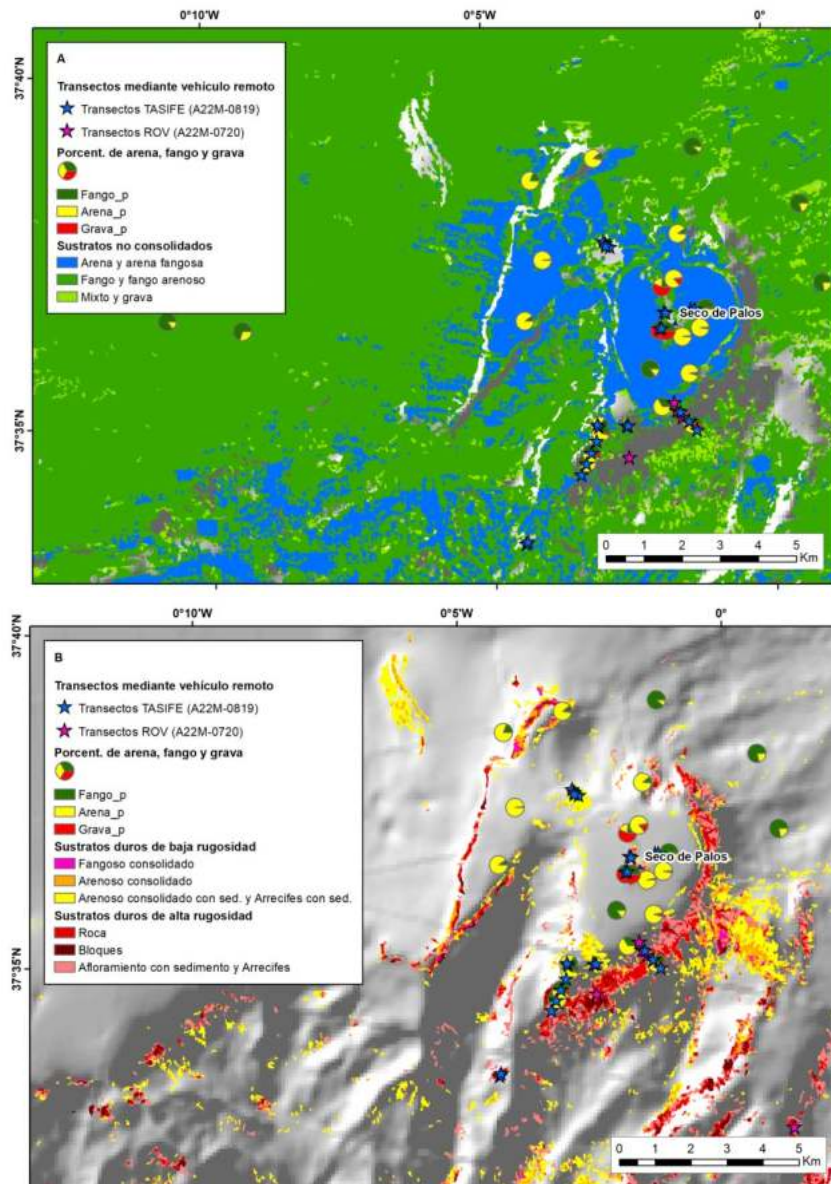


Fig. 3. Cartografía del sustrato en la zona del Seco de Palos, clasificado en dos categorías de tipo de sustrato: (A) No consolidado; (B) Duro o consolidado. A su vez, cada categoría muestra distintos tipos de sustrato.

de píxeles tomado en un entorno homogéneo será representativo de una extensión de terreno mayor que un patrón de píxeles tomado en un entorno abrupto.

Se concluye que la cartografía de tipos de sustrato obtenida mediante este protocolo cuenta con una gran solidez, puesto que permite considerar la presencia de un sustrato primario y otro secundario superpuestos, así como identificar sustratos de fango consolidado que producen una alta reflectividad, similar a la que resultaría de un fondo rocoso.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido posible gracias al Proyecto INTEMARES, donde se desarrolló inicialmente la metodología, y al proyecto BIODIV_A10, en el marco del cual se está perfeccionando.

REFERENCIAS

Guijarro, E.; Cobo, A.; Escudero, P.; Juan, C.; Sayago, M.; Fernández-Salas, L.M.; López-Fernández, N.; López-Rodríguez, C.; Tello, O.; Mata, D.; Bruque, G.; Barcala, E.; Bellido, J.M.; Giménez-Casalduero, F.; Ramos, A. (2024). *Memoria final de la Acción A22M: Caracterización, cartografiado y estado de conservación de los hábitats vulnerables del sistema de cañones entre Cabo Palos y Cabo Tiñoso, Seco de Palos y campo de pockmarks adyacente*. Proyecto LIFE IP INTEMARES, coordinado por la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Instituto Español de Oceanografía (IEO, CSIC), 224 pp.

Paleoambientes sedimentares na plataforma continental ao largo do rio Tejo: contributo da análise composicional de depósitos arenosos

N. Lapa (1), A. Vinhas (1), A. Rodrigues (1,2)

(1) Instituto Hidrográfico, Rua das Trinas 49, 1249-093 Lisboa, Portugal; nuno.lapa@hidrografico.pt

(2) Instituto Dom Luiz, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal

Resumo: A plataforma continental portuguesa entre o Cabo Raso e o Cabo Espichel apresenta uma área coberta por depósitos grosseiros, cuja origem não é compatível com a dinâmica sedimentar atual. Na sequência do trabalho iniciado por Lapa *et al.* (2020), foi analisada a composição da fração arenosa de amostras representativas de depósitos arenosos da zona costeira (< 50 m) e da plataforma externa (> 150 m). Os resultados indicam que os depósitos costeiros são principalmente terrígenos, sendo o quartzo a fração dominante (~84%), seguido por partículas biogénicas (≤13%). Os depósitos da plataforma externa são predominantemente biogénicos (48-86%), com as partículas terrígenas (12-38%) a desempenharem um papel secundário. Para complementar o estudo, foi analisado um excerto de um perfil de reflexão sísmica transversal à morfologia da plataforma, até cerca de 150 m de profundidade. Concluiu-se que o depósito na plataforma externa é muito pouco expressivo.

Palavras-chave: análise composicional, depósitos arenosos, plataforma continental, reflexão sísmica, Tejo.

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

A área de estudo localiza-se entre o Cabo Raso e o Cabo Espichel, e cinge-se fundamentalmente aos depósitos arenosos da zona costeira e da plataforma externa (Fig. 2). Este sector da plataforma continental portuguesa é caracterizado por ser particularmente estreito (20-34 km), definindo-se, em média, até cerca dos 150-180 m de profundidade (Vanney & Mougenot, 1981). É neste contexto geomorfológico que desagua o Rio Tejo, cuja importância, como fonte sedimentar terrígena, se expressa na dimensão do seu delta submarino, um dos maiores da margem Ibérica (Paiva *et al.*, 1997). Abaixo do bordo da plataforma, a vertente é recortada por dois canhões submarinos que se prolongam até à Planície Abissal Ibérica: o Canhão de Cascais, o mais curto, com apenas 8 km de comprimento; e o Canhão de Lisboa que se estende por 18 km (Dias, 1987).

De acordo com trabalhos anteriores sobre as características da cobertura sedimentar deste setor da margem portuguesa (Lapa *et al.*, 2020; Vinhas *et al.* 2020), a distribuição dos sedimentos em frente ao estuário do Tejo, obedece a um nítido controlo batimétrico e oceanográfico, podendo distinguir-se grandes grupos de depósitos sedimentares:

- **Depósitos arenosos costeiros**, localizados até ~50 m de profundidade, numa faixa onde o regime de ondulação promove a ressuspensão e o transporte das partículas mais finas. Nestes depósitos, o tamanho de grão varia entre -1 φ e 4 φ (areia muito grosseira a muito fina) e são compostos, na sua maioria, pela fração areia, medianamente a bem calibradas e, com assimetria variável (entre negativa a positiva e simétrica);

- **Depósitos silto-argilosos do Tejo**, localizados na faixa entre os 50 e aproximadamente 150 m, formados por partículas silto-argilosas, transportadas maioritariamente em suspensão desde a embocadura do estuário do Tejo, que se depositam devido à diminuição da energia do meio ambiente;
- **Depósitos arenosos de plataforma externa e bordo da plataforma**, localizados abaixo dos 150 m de profundidade, formados por sedimentos arenosos. As partículas apresentam granulometria entre 1 φ e 4 φ (areia média a muito fina). Estes depósitos diferem dos depósitos costeiros, por serem muito mal a extremamente mal calibrados e apresentarem uma assimetria extremamente positiva (enriquecimento em partículas finas).

Neste trabalho, pretende-se descrever, em termos composicionais, os depósitos arenosos, que se encontram na zona litoral e na plataforma externa da área em estudo, para melhorar o conhecimento sobre os processos de dinâmica sedimentar que justificam a sua origem e padrão de distribuição.

2. DADOS E MÉTODOS

Os dados utilizados neste estudo foram extraídos do programa SEPLAT “*Cartografia Sedimentar da Plataforma Continental Portuguesa*”, executado no Instituto Hidrográfico. As amostras superficiais de sedimentos foram colhidas no decurso de campanhas de amostragem realizadas entre 1980 e 1995.

Para aferir a composição dos sedimentos, foi necessário realizar a análise composicional da fração arenosa de 13 amostras representativas dos depósitos a estudar. Nesse sentido, subdividiram-se as amostras

em classes de tamanho de grão de ϕ em ϕ , e observou-se à lupa binocular as frações entre areia muito grosseira (-1ϕ a 0ϕ) e areia muito fina (3ϕ a 4ϕ). Em cada fração, foram observados à lupa 300 grãos, para determinar a frequência das principais classes composicionais. Este número é estabelecido para tornar a identificação, e respetivas frequências, mais precisas do ponto de vista estatístico, apesar da quantidade e tipo de classes composicionais poder variar conforme os objetivos de cada estudo. Neste caso, foram adotadas as 11 classes definidas por Dias (2004): terrígenos; quartzo; micas; agregados (grãos polimineriais); outros terrígenos (feldspatos, minerais pesados, entre outros); moluscos; equinodermes; foraminíferos bentônicos; foraminíferos planctônicos; outros biogénicos (corais, ostracodos, briozoários, entre outros); glauconia e grãos não identificados. A frequência de cada classe composicional, para cada fração granulométrica, foi convertida em frequências totais, multiplicando a percentagem de peso de cada fração granulométrica e somando os valores classe por classe (Dias, 2004). A representação espacial e análise dos dados sedimentológicos foram realizadas nos programas ArcGIS da ESRI® e Grapher®.

Foi também analisado um excerto de um perfil de reflexão sísmica obtido em 2021, com o equipamento *sub-bottom profiler*.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Estrutura do depósito sedimentar da plataforma externa

O excerto do perfil de reflexão sísmica representado na figura 1 mostra a estrutura na zona do depósito arenoso da plataforma externa. Nele é possível distinguir a base da unidade sísmica superficial, marcada a vermelho, que atinge o fundo marinho na zona menos profunda do registo.

A fácies sísmica desta unidade superficial caracteriza-se pela aparente transparência, ausência de reflexões internas e média refletividade. Estas características são típicas de uma resposta acústica, de uma camada sedimentar, mais ou menos homogénea, sem intercalações de materiais sedimentares diferentes.

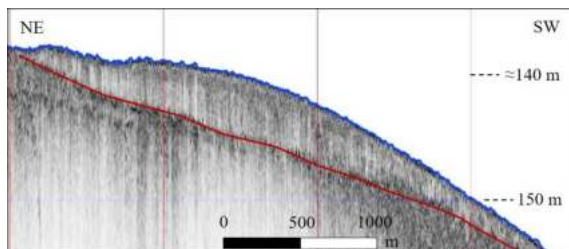


Fig. 1. Extrato de um perfil sísmico que atravessa parte do depósito da plataforma externa. A linha vermelha representa a base do depósito. Localização do perfil na Fig. 2.

3.2. Composição da areia

A figura 2 representa a distribuição percentual média das principais classes composicionais da areia das amostras analisadas, em contraste com a distribuição textural dos depósitos (cascalho+areia e silte+argila).

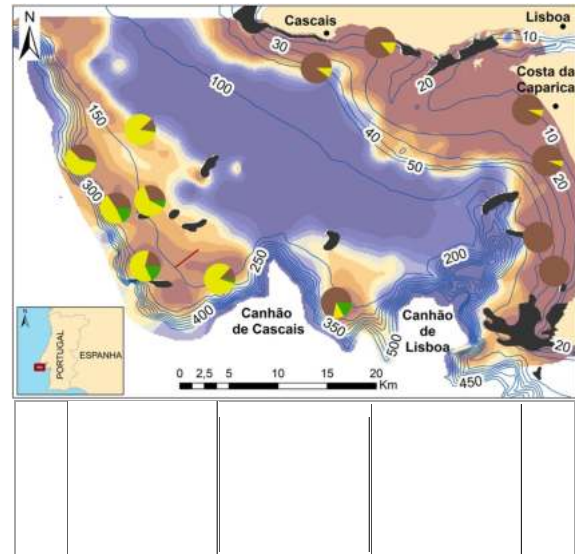


Fig. 2. Distribuição das principais classes composicionais da areia vs. distribuição espacial da textura dos sedimentos (segundo Lapa et al., 2020, as frações cascalho+areia (grosseiros) representadas em tons de castanho; as frações silte+argila (finos) em tons de azul).

É possível observar que existe uma diferença composicional evidente, sendo que, nas amostras mais próximas da costa, predomina o material terrígeno proveniente do continente, enquanto nas amostras mais afastadas da costa, as partículas são predominantemente biogénicas.

Olhando com mais detalhe a variação das classes composicionais analisadas ao longo da profundidade (Fig. 3), é reforçado o aumento da componente biogénica com o aumento da profundidade e, com um comportamento inverso, os grãos terrígenos vão diminuindo desde o litoral até ao bordo da plataforma.

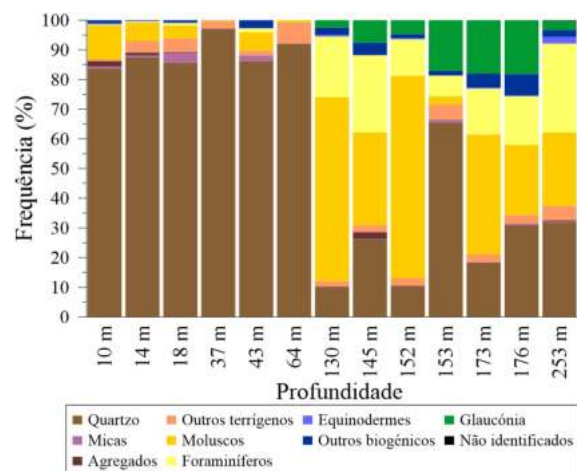


Fig. 3. Distribuição percentual média das classes composicionais da areia desde os 10m até aos 253m de profundidade.

Em termos composicionais, verifica-se um domínio do quartzo, na componente terrígena, desde a linha de costa até cerca dos 64 m de profundidade. No que diz

respeito à componente biogénica, os moluscos surgem como a classe mais importante, nas amostras analisadas, a partir da batimétrica dos 130 m, apesar dos foraminíferos também serem frequentes. Já a glaucónia, só se torna significativa (cerca de 20 %) nos depósitos de plataforma externa (dos 150 e os 180 m de profundidade).

3.3. Depósitos costeiros

Demonstrando a proximidade à fonte das partículas, nos depósitos costeiros, a percentagem de elementos terrígenos é superior a 86,7 %, enquanto que a componente biogénica varia entre os 0,4 % e os 13,3 % (Fig. 3). Em concreto, o quartzo, até cerca dos 60 m de profundidade, é a principal classe composicional com uma percentagem média de 88,7 %. A sua distribuição ao longo do sector litoral parece refletir o contributo fluvial do Tejo para a cobertura sedimentar marinha, assim como o elevado hidrodinamismo da faixa costeira. Em parte das amostras analisadas, os grãos de quartzo que surgem nas frações de maiores dimensões (-1 a 1 ϕ) apresentam uma patine amarelada, evidenciando possível exposição subaérea, e são rolados a sub-rolados, enquanto que nas frações mais finas (> 1 ϕ) os grãos são mais angulosos e “limpos”.

A segunda classe mais representativa neste sector, é a classe dos moluscos, com um valor percentual médio de 4,9 %. Na maioria dos moluscos observados, inteiros ou fragmentados, é possível visualizar, ainda, alguma ornamentação. No geral, os moluscos concentram-se sobretudo nas frações entre -1 e 1 ϕ (69,2 %), enquanto que o quartzo predomina nas dimensões entre 1 e 4 ϕ (67,9 %).

Para além destas classes principais, foram observados minerais ferromagnesianos e algumas partículas de calcário, incluídos na classe composicional “outros terrígenos”, que variam entre 0,51 % e 7,12 %. A classe composicional dos equinodermes, bem como a dos foraminíferos têm pouca expressão nestes depósitos, registando percentagens médias de 0,16 e 0,45 % respetivamente. A análise das restantes classes composicionais revelou valores percentuais escassos: agregados 0,50 %; micas 1,09 %; outros biogénicos 0,80 %. Não foi observado nenhum grão de glaucónia.

As marcas de ornamentação das carapaças dos moluscos, inteiras e fragmentadas, e os grãos angulosos de quartzo compatíveis com a granulometria do sedimento, parecem indicar um fornecimento atual de partículas para o depósito (origem recente).

3.4. Depósitos da plataforma externa

A presença da fração terrígena diminui consideravelmente com o aumento da profundidade (Fig. 3). Desta forma, os depósitos localizados em profundidades acima dos 130 m, apresentam um valor

médio de 31,5 %, enquanto a componente biogénica se torna predominante, com um valor de 58,3 %.

No geral, os depósitos têm como classe composicional dominante, os moluscos, que apresentam uma frequência média de 36,1 %. Cerca de 80,0 % dos clastos de moluscos foram observados nas frações entre -1 e 2 ϕ . Nestas dimensões, as carapaças dos moluscos encontram-se naturalmente fragmentadas e com marcas de desgaste, apresentando uma tonalidade acinzentada.

A segunda classe composicional mais bem representada, é o quartzo, com um valor médio de 27,5 %, apesar de, aos 150 m entre os canhões de Cascais e de Lisboa, ter sido registada uma amostra com 66 % deste mineral. O quartzo está distribuído, principalmente, pelas frações de 1 a 4 ϕ (73,4 %), com especial realce para a dimensão entre 3 e 4 ϕ com uma percentagem média de 44,3 %.

Os foraminíferos surgem como a terceira classe composicional mais importante dos depósitos de plataforma externa, com um valor médio de 18,3 %, divididos entre foraminíferos planctónicos (6,8 %) e bentónicos (11,4 %). Estão presentes, na sua maioria, entre as frações 1 e 3 ϕ (86,9 a 88,0 %).

A quarta classe composicional mais importante, é a glaucónia, com uma frequência média de 10,1 %. Aproximadamente 86,0 % dos clastos estão, à semelhança da classe dos foraminíferos, distribuídos pelas frações 1 a 3 ϕ . A glaucónia neste sector é caracterizada por ser de cor esverdeada escura e com morfologia lobada ou oval. Também foram observadas carapaças de foraminíferos em processo de glauconitização, atribuindo à glaucónia uma origem autigénica (Freitas *et al.*, 1993).

3.5. Modelo de formação dos depósitos arenosos

Do ponto de vista hidrodinâmico, a dimensão média dos clastos que compõem os depósitos costeiros (areia média a fina, ou seja, de 1 a 3 ϕ) e sua composição, maioritariamente terrígena, aponta para uma origem recente, associada ao fornecimento de partículas terrígenas, pelo estuário do rio Tejo ou oriundas dos processos erosivos da orla costeira, mantidas em movimento pelos processos costeiros fortemente energéticos, e que promovem o seu transporte longilitoral, expresso no padrão cartográfico paralelo à linha de costa

No que diz respeito aos depósitos arenosos de plataforma externa, a sua origem não é tão simples e contemporânea. Considera-se que eles incluem uma herança de anteriores ciclos sedimentares em que as partículas de quartzo com pátina e aspeto rolado, podem constituir seus testemunhos. A classe dos moluscos influencia diretamente o carácter grosseiro dos sedimentos, pois a maior distribuição de moluscos concentra-se entre as frações -1 e 2 ϕ . As características observadas, nomeadamente clastos

fragmentados, marcas de desgaste, e cor acinzentada parecem indicar, também, uma origem mais antiga, não devendo ser descartada a associação genética destas partículas aos afloramentos rochosos do Esporão da Estremadura (mais a norte) e posterior transporte para sul. A estas partículas, retrabalhadas pelos processos dinâmicos do atual ciclo sedimentar, são adicionadas partículas mais recentes de geração local, essencialmente de origem biogénica (foraminíferos, moluscos e equinodermes), e outras de origem autigénicas que poderão ser mais antigas (glauconia).

É importante frisar que o fenómeno da glauconitização só ocorre em ambientes marinhos específicos, sendo necessário haver taxas de acumulação baixas ou negativas, microambientes semi-confinados com pH ligeiramente alcalino e a existência de material orgânico suficiente para promover condições redutoras e a concentração elevada dos componentes químicos específicos (Müller, 1967; Odin & Matter, 1981). O bordo da plataforma, e a plataforma externa da margem portuguesa ao largo do Tejo, são locais propícios para este processo ocorrer, visto os depósitos sedimentares se caracterizarem pelo enriquecimento progressivo de carapaças de foraminíferos, as quais se constituem como microambientes geradores das condições ideais para a formação da glauconia (Freitas *et al.*, 1993).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise composicional dos depósitos grosseiros existentes no litoral e na plataforma externa permitiu verificar que, embora sejam semelhantes em termos texturais, a sua composição é bem distinta.

Os depósitos costeiros, que abrangem a plataforma continental adjacente ao estuário do Tejo, até sensivelmente à batimétrica dos 50-60 m, são constituídos na maioria por quartzo. A sua distribuição espacial reflete o contributo fluvial do Tejo e erosão costeira, bem como as condições hidrodinâmicas típicas da orla costeira portuguesa.

Já os depósitos da plataforma externa, localizados a profundidades acima dos 130 m, são caracterizados pelo *deficit* em partículas terrígenas, nomeadamente o quartzo, mas com predominância da componente biogénica (moluscos e foraminíferos). Os moluscos surgem nas frações arenosas mais grosseiras (-1 a 2 ϕ) e apresentam-se fragmentados, com marcas de desgaste e tonalidade acinzentada. A glauconia é a quarta classe composicional mais importante. Tanto a glauconia, como os foraminíferos, concentram-se entre as dimensões 1 e 3 ϕ do sedimento.

A análise de excerto de um registo sísmico permitiu concluir que a unidade mais superficial apresenta características acústicas compatíveis com este tipo de depósitos, correspondendo a uma camada depositada sobre uma superfície progradante junto ao bordo da plataforma.

Foram observadas várias evidências de que os depósitos grosseiros da plataforma externa não são compatíveis com a hidrodinâmica existente aquelas profundidades. As características singulares que os clastos de moluscos apresentam, bem como a sua dimensão, sugerem uma origem mais antiga. A presença de glauconia e outras partículas biogénicas (tal como foraminíferos de menores dimensões), indiciam uma sedimentogénese típica de ambiente de plataforma externa, em que os depósitos antigos são alimentados continuamente por partículas de origem mais recente e também autigénica. As baixas taxas de acumulação permitem que as partículas herdadas ainda se encontrem à superfície dos depósitos e proporcionem a formação de glauconia. Neste contexto, considera-se que a origem dos depósitos da plataforma externa é anterior aos processos de dinâmica que atuam atualmente naquele sector.

REFERÊNCIAS

- Dias, J. M. A. (1987). Dinâmica Sedimentar e Evolução Recente da Plataforma Continental Portuguesa Setentrional. Tese de doutoramento, Univ. Lisboa, 384pp. (não publicado).
- Dias, J. M. A. (2004). A análise sedimentar e o conhecimento dos sistemas marinhos (Uma Introdução à Oceanografia Geológica). Ebook: http://w3.ualg.pt/~jdias/JAD/eb_Sediment.html
- Freitas, M.C., Magalhães, F. Dias, J.M., Andrade, C. (1993). Sobre o grau de evolução da glauconia. Alguns exemplos portugueses. *Gaia*, nº6, pp. 30-37.
- Lapa, N.; Vinhas, A.; Rodrigues, A. (2020). Os padrões de distribuição das partículas sedimentares ao largo do Rio Tejo, deduzidas a partir de parâmetros sedimentológicos. 6^{as} JEH. Lisboa.
- Müller, G. (1967). Diagenesis in argillaceous sediments. In Larsen, G. and Chilingar, G.V., (eds.). *Diagenesis of Sediments*. Elsevier Publishing Co., New York, 128-177.
- Odin, G.S.; Matter, A. (1981). De glaucoranium originae. *Sediment.*, 28, 611-641.
- Paiva, P.; Jouanneau, J. M.; Araujo, F., Weber, O.; Rodrigues A.; Dias, J. M. A. (1997). Elemental distribution in a sedimentary deposit on the shelf off the Tagus estuary (Portugal). *Water Air and Soil Pollution*, 99:507-514p.
- Vanney, J. R.; Mougnot, D., (1981). La plateforme continentale du Portugal et les provinces adjacentes: Analyse Geomorphologique. *Mem. Serv. Geol. Portugal*. 28, 86 p.
- Vinhas, A.; Rodrigues, A. (2020). Evolução morfo-sedimentar da plataforma adjacente ao sistema fluvial do Tejo desde o Último Máximo Glaciário. 6^{as} JEH. Lisboa.

Analog to digital: retrieval of geological information

Luz, C. (1), Saramago, A.S. (1), Melo, R. (1), Rodrigues, A. (1)

- (1) Instituto Hidrográfico. Rua das Trinas 49, 1249-093 Lisboa, Portugal
(2) cecilia.luz@hidrografico.pt.

Abstract: For the past 60 years, the Portuguese Instituto Hidrográfico (IH) has strived to understand the seabed's geological nature. The evolution of sediment samplers, position systems and laboratory protocols allowed data acquisition to become more robust, increasing the value of its reuse in the context of new projects and applications. Before 2009, data collected on the scope of seabed dynamics and characterization projects, once analysed and processed, were stored as analogue data, in digital floppy disks or computers. Recognizing the advantages of storing data in digital format for reuse and reprocessing in other products, Oracle databases (DB) were developed at IH. The "Nautilus" software, following the development of specific functionalities, serves as the interface for feeding the DB. Used by IH since 2009, Nautilus permits to retrieve, store and access all the information collected and processed in the field, laboratory or office, as it will be presented in this study.

Keywords: Bases de Dados sedimentos marinhos, dados analógicos, dados digitais, metadados,

1. INTRODUÇÃO

Localizado no extremo sudoeste da Península Ibérica, Portugal apresenta uma posição geográfica determinante para a Europa, fazendo fronteira a norte e a leste com Espanha, mas possuindo uma extensa área em ambiente marinho na sua fronteira oeste e sul, o Oceano Atlântico (portal.diplomatico.mmne.gov).

O território português inclui ainda duas regiões autónomas, os arquipélagos da Madeira e dos Açores, o que permite aumentar significativamente a sua Zona Económica Exclusiva (ZEE).

A longa extensão de costa que Portugal possui dá-lhe o privilégio de ser uma das principais rotas comerciais com o ocidente, assim como porta de entrada de cabos submarinos e infraestruturas que alimentam o tráfego digital europeu (Marvão, 2022).

Atualmente a indústria emergente, baseada em inovação tecnológica, na proteção ambiental, na mudança das necessidades dos consumidores, ou outros fatores socioculturais que potencializem o aproveitamento e exploração de novos produtos ou serviços, tem sofrido um forte incremento na exploração dos recursos marinhos e atividade marítima. Os elevados investimentos em aquacultura, tecnologias associadas à energia eólica *offshore*, energia das ondas e marés ou mesmo a mineração dos fundos oceânicos têm tido uma forte visão política para o investimento nacional e estrangeiro (Marvão, 2022).

A Convenção das Nações Unidas para o Direito do Mar no seu artigo 56 define os direitos, jurisdição e deveres do Estado costeiro (da qual Portugal faz parte) na ZEE, atribuindo no ponto 1.a) "direitos de soberania para fins de exploração, aproveitamento,

conservação e gestão dos recursos naturais vivos ou não vivos das águas sobrejacente ao leito do mar, do leito do mar e seu subsolo (...)" (jornal das comunidades europeias).

A extensa plataforma continental que Portugal possui, integrada no nosso mar territorial, é longa (cerca de 700 km) e estreita (podendo variar entre 5 e 60 km de largura) possuindo uma área aproximada de 21.000 km². Ao longo da plataforma continental portuguesa é possível encontrar um elevado número de relevos submarinos, com especial destaque para os canhões submarinos (Porto, Aveiro, Nazaré, Cascais, Lisboa, Setúbal, S. Vicente, Lagoa, Portimão e Faro), importantes estruturas morfológicas que influenciam os processos das zonas envolventes e promovem a diversidade dos ecossistemas marinhos.

Ao longo dos anos, e no âmbito de trabalhos realizados sobre a cobertura sedimentar, a informação colhida foi preservada e armazenada em formato analógico, consistindo em registos de campo, registos laboratoriais e relatórios técnicos finais de projeto, tendo este formato sofrido uma natural evolução, acompanhando a inovação tecnológica e científica. Assim, no âmbito das suas responsabilidades, o Instituto Hidrográfico (IH) investiu na recuperação da informação analógica existente, a fim de preservar os dados em Base de Dados (BD) Oracle e permitir, após verificação e validação, a sua acessibilidade.

O objetivo desta comunicação é apresentar e descrever o desenvolvimento das funcionalidades desenvolvidas usando como recurso o software "Nautilus" (*Laboratory Information Management System*), que permitiram a recuperação de dados anteriores a 2009 e respetivos metadados.

2. IMPORTÂNCIA DA RECUPERAÇÃO DE DADOS

Ao longo dos anos o IH realizou cruzeiros de cariz científico, justificados pela necessidade de colheita de dados ao longo da extensa plataforma continental portuguesa. Estes cruzeiros, motivados pela necessidade de compreender a dinâmica dos fatores oceanográficos que influenciam a variabilidade da camada sedimentar marinha (deposição de sedimentos atuais e existência de sedimentos reliquia), bem como a sua erosão e transporte de partículas, tiveram como principal finalidade a colheita de milhares de amostras representativas do leito marinho permitindo a sua análise a elaboração de uma variedade de produtos finais consoante o fim pretendido (cartas, mapas).

Em 1940 foi elaborada a 1ª carta litológica submarina da costa de Portugal, compilada a partir das cartas realizadas pela Missão Hidrográfica da Costa de Portugal (Ministério da Marinha) (Biblioteca Nacional Digital).

Com a II Guerra Mundial verificou-se um desenvolvimento das técnicas de deteção e reconhecimento remoto dos fundos marinhos, métodos novos que permitiam um melhor conhecimento das unidades morfológicas, da natureza das camadas sedimentares e a sua interação com as correntes oceânicas. Assim, e com uma conjectura internacional favorável, em 1960 foi criado o IH da Marinha de Guerra Portuguesa, que apostou no conhecimento do fundo marinho da plataforma continental e desenvolveu em 1974 um programa que visava o levantamento sistemático, caracterização, estudo e cartografia da natureza dos fundos. Este programa, apelidado de “Sedimentos da Plataforma Continental Portuguesa (SEPLAT)”, consistiu na obtenção de dados dos fundos marinhos, tanto a nível de colheita de sedimentos e análise laboratorial com os métodos vigentes à altura, como se procederam a levantamentos com Sonar de Varrimento Lateral e Sísmica de reflexão ligeira. A quantidade de dados processados e interpretados permitiu a edição de um conjunto de cartas sedimentológicas que abrange toda a plataforma continental portuguesa.

Ao longo dos anos, o IH manteve como objetivo uma permanente atualização dos dados de natureza diversa, mantendo-se sempre em linha com as evoluções de equipamentos de recolha e nos procedimentos laboratoriais. Foram realizados cruzeiros científicos a bordo dos navios oceanográficos da Marinha com o objetivo não apenas de realizar a cartografia dos fundos (SEPLAT), mas também contribuir para outros projetos em que a aplicação e interpretação dos dados colhidos fossem incorporados na análise da natureza da camada sedimentar.

Considerando o grande volume de informação que o IH possuía, a capacidade de armazenamento dos dados também teve de se ajustar e atualizar, sofrendo alterações e sendo prioritário o desenvolvimento de

uma BD Oracle (BD) que permitiu o armazenamento digital da informação sedimentológica.

3. A FERRAMENTA: O LIMS “NAUTILUS” NA GEOLOGIA

Em 2006 foi adquirido pelo IH uma ferramenta que permite a interface à BD e promove a sua alimentação: o software “Nautilus” (*Laboratory Information Management System*). Este sistema, aberto, é configurável, respondendo aos diversos requisitos de gestão laboratorial (incluindo os ensaios efetuados), e cumprindo com os requisitos técnicos exigidos pelo Sistema de Gestão da Qualidade do IH.

Assim, de modo a refletir o trabalho laboratorial atual e a recuperação de dados analógicos anteriores a 2009, procederam-se a diferentes desenvolvimentos:

- Criação de campanhas de amostragem e respetivos metadados;
- Criação de alíquotas (subamostras) setoriais;
- Introdução, por alíquota, de resultados analíticos e respetivos metadados.

Após o desenvolvimento de específica programação no software “Nautilus” foi possível a recuperação, armazenamento e arquivo digital da informação analógica histórica, refletindo a dinâmica que existe desde a colheita da amostra (campanha) até à exportação dos resultados finais (Figura1).

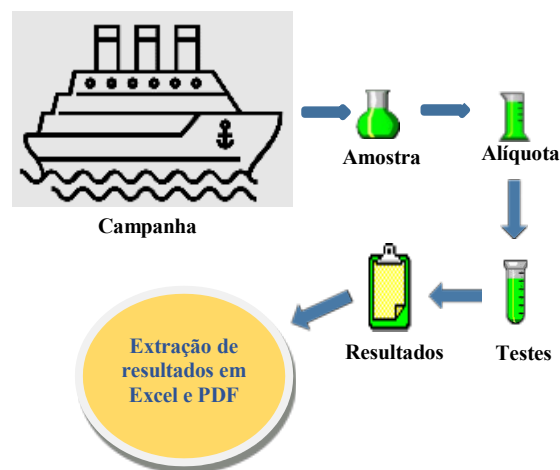


Fig. 1. Modelo “Nautilus” adaptado aos dados históricos

Para a sua utilização foi também necessário proceder-se à compilação de dados que se encontravam em formato analógico e transformá-los em ficheiros de extensão .csv.

3.1. Do analógico para o digital – criação de ficheiros .csv

Já com o software “Nautilus” em pleno uso no laboratório de sedimentologia, em 2012 foi iniciada a recuperação da informação analógica referente ao programa SEPLAT. No entanto, a intenção era a recuperação de projetos catalogados como “Dados

Históricos” pelo que foi necessário um novo desenvolvimento na ferramenta “Nautilus”.

No processo de compilação e verificação de dados e metadados foi utilizada a informação constante dos relatórios finais de projeto, folhas de bordo (profundidade, localização, data/hora colheita, equipamento...) e boletins de ensaio correspondentes às análises laboratoriais efetuadas para determinação da granulometria, teor em carbono e mineralogia (valores obtidos, data da análise, equipamento e método utilizado) (Figura 2). A informação obtida foi transcrita para ficheiros excel (extensão .csv). Estes ficheiros permitem a introdução automática dos resultados e respetivos metadados na BD.

Fig. 2. Exemplo de Folha de Bordo, Impresso de registo laboratorial

3.2. Desenvolvimento do LIMS para recuperação dos dados históricos

Em 2016 foi necessário proceder a um novo desenvolvimento na BD de modo a refletir toda a informação compilada de diversas campanhas realizadas entre 2002 e 2008. Para esta nova inserção de informação na BD criaram-se novos atributos ao nível dos dados administrativos e dos resultados:

- Campanha: identificação do projeto, título, objetivo, descrição, data de início e fim de cruzeiro, navio, bibliografia;
- Amostra: nome da amostra, nome do cruzeiro, latitude, longitude, profundidade, data/hora da colheita, tipo de colhedor, descrição da amostra *in situ*, cor da amostra, preservação e embalagem, observações;

- Aliquota/Testes: frequências individuais, estatísticas (percentis, média, moda, assimetria, desvio padrão), teor em carbono orgânico total, teor em carbono inorgânico total, teor em carbono total, teor em carbonato, mineralogia (minerais de argila), método e equipamento utilizados, data de fim da análise e operador.

O processo de introdução de amostras individuais na BD não é efetuado aleatoriamente, mas sim definindo-se um lote de amostras associado a um projeto. O processo é então iniciado com a criação de uma campanha, introduzindo os respetivos metadados na informação inicial.

A cada amostra é atribuída uma identificação única, gerada automaticamente aquando da criação da campanha. Contudo, é também necessário que os metadados que identificam cada amostra sejam inequivocamente introduzidos. São assim associados a cada amostra:

- Atributos *standard* - identificação externa, projeto, data/hora da colheita, profundidade, navio e tipo de colhedor, ...
- Aliquota/teste - ensaio(s) a efetuar que permitem a entrada dos resultados
- Localização - as coordenadas geográficas

O grande desafio, no entanto, foi adaptar e programar o sistema de modo a refletir todas as metodologias da época em que foram efetuadas as colheitas e análises laboratoriais das amostras. Procedeu-se assim ao desenvolvimento de fluxos de trabalho (*workflows*) que refletissem os parâmetros e resultados/unidades das análises realizadas, conforme trabalho em rotina, pelo que se procedeu ao desenvolvimento de testes que abrangessem as diferentes áreas identificadas (granulometria, teor em carbono e mineralogia) e respetivos equipamentos. (Figura 3)

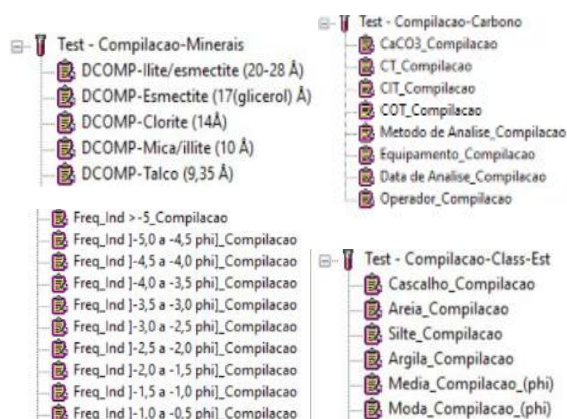


Fig. 3. Modelo “Nautilus” – exemplos de Testes

Foi também desenvolvida programação para a introdução automática de resultados e dos respetivos metadados, de modo a reduzir a ocorrência de erros e tempo despendido pelo operador.

Para introdução automática da informação foi disponibilizado ao operador um ficheiro tipo com extensão *.csv* que reflete os dados analógicos para preenchimento. (Figura 4).

Entry Name	Command	Integer 1	Integer 2	Text 1	Text 2
test_array	Set Value				Complaciao Carbono
result_array	Set Value				CaCO3_Compilacao
result_array	Add Value				CT_Compilacao
result_array	Add Value				CIT_Compilacao
result_array	Add Value				CO2_Compilacao
result_array	Add Value				Metodo de Analise_Compilacao
result_array	Add Value				Equipamento_Compilacao
result_array	Add Value				Data de Analise_Compilacao
result_array	Add Value				Operador_Compilacao

Entry Name	Command	Integer 1	Integer 2	Text 1	Text 2
Use Instrument Worksheet		0	0		
Find Test Name					test_array
Set Aliquot List					aliquot_ids
Store Results from Grid				result_array	result_grid

Fig. 4. Modelo "Nautilus" – Programação para inserção automática da informação

Para esta introdução houve a necessidade de criar uma área onde são colocados os ficheiros a serem lidos pelo equipamento (pasta IN) e uma outra área na qual é guardado o *backup* dos dados introduzidos na BD, ficheiro com a extensão *.bak* (pasta OUT).

Estes ficheiros, onde estão incluídas as diferentes variáveis para inserção dos resultados nas diversas áreas, são de dois tipos (Figura 5):

- Atributos da amostra;
- Ficheiros distintos para a inserção de resultados das diversas áreas.

As grandes vantagens da inserção automática da informação são:

- Maior fiabilidade na transferência dos dados aquando da inserção dos mesmos;
- Maior rapidez e facilidade na inserção dos dados.

	CaCO3	Cc	CT	Comp	CIT	Comp	CO2	Com	Metodo de Analise	Equipamento	Compilacao	Data de Analise	Compilac	Operador	Compilac
2002/01562	76,64	9,73	9,2	0,53	Espectrometria de Absorção	STRÖHLEIN C-MAT 5500	2007-09-27 00:00	Aida Seabra							
2002/01564	64,31	8,14	7,72	0,43	Espectrometria de Absorção	STRÖHLEIN C-MAT 5500	2007-09-27 00:00	Aida Seabra							

Fig. 5. Modelo Nautilus – Exemplo dos ficheiros de extensão *.csv* e *.bak*

4. APLICAÇÃO PRÁTICA

Face à riqueza e quantidade de dados que o IH possui de atividade de investigação desenvolvida ao longo da plataforma continental e ilhas, e sendo esta informação de valor estratégico para a Marinha e para o país, considerou-se que era premente a recuperação dos dados anteriores a 2009 e a sua introdução em BD. Assim, posteriormente à recuperação do SEPLAT em 2012, em 2016, foram iniciados os trabalhos de compilação de projetos desenvolvidos antes de 2009. O *software* "Nautilus" e o desenvolvimento específico efetuado foi a ferramenta

utilizada no armazenamento dos dados na BD Oracle da geologia marinha.

Tratando-se de um trabalho metucioso e de consulta de projetos que satisfaçam os requisitos considerados essenciais, procedeu-se inicialmente à leitura de relatórios finais de trabalho existentes na biblioteca do IH, e posteriormente à consulta de folhas de bordo e registos laboratoriais associados. Toda a informação encontrada foi compilada e transcrita para formatos de extensão *.csv*, garantindo a fiabilidade e robustez dos dados.

Foram recuperados 15 projetos de investigação científica realizados na plataforma continental e arquipélago da Madeira, entre os anos de 2002 e 2008, num total de 4719 dados referentes a análises laboratoriais realizadas a 1573 amostras de sedimentos superficiais de fundo.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O armazenamento e guarda dos dados colhidos nos cruzeiros científicos e trabalhados em laboratório ao longo dos tempos sempre foi um fator primordial e obrigatório para o IH. Ao longo dos anos, a forma como os dados ficavam guardados e registados para a posteridade foram evoluindo, passando do papel (registo analógico) e da disquete, às BD criadas para o meio marinho. O armazenamento dos dados em BD permite que os mesmos fiquem acessíveis e sejam usados em trabalhos ao longo dos tempos, refletindo a evolução dos meios e métodos.

Sendo o IH detentor de 60 anos de dados geológicos, considerou-se que estes deveriam ser preservados nos formatos atuais de BD e assim procedeu-se ao início da recuperação dos mesmos. Os trabalhos efetuados passaram pela pesquisa e obtenção dos registos e relatórios relativos aos diversos projetos que foram desenvolvidos ao longo dos anos, e procederam-se a desenvolvimentos específicos para alimentação das BD através do *software* "Nautilus".

Os dados da plataforma continental portuguesa e insular (Madeira e Porto Santo) ainda se encontram em recuperação.

REFERENCIAS

Marvão, S. (2022). Portugal e o poder de uma Plataforma Continental alargada. <https://www.jornaldenegocios.pt/negocios-iniciativas/detalhe/portugal-e-o-poder-de-uma-plataforma-continental-alargada> consultado em 03.07.2024

<https://portaldiplomatico.mne.gov.pt/sobre-portugal>
[https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:21998A0623\(01\)&from=EL](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:21998A0623(01)&from=EL) consultado em 03.07.2024

<https://permalinkbnd.bnportugal.gov.pt/records/item/16448-carta-litologica-submarina-da-costa-de-portugal?offset=47> consultado em 03.07.2024

Valores de referência regionais de Cr, Ni, Cu e Zn para a plataforma sul da Ilha da Madeira

S. Moreira (1,2), D. Carinhas (1,3), A. Rodrigues (1,2), A. Oliveira (1,2) e C. Palma (1)

- (1) Instituto Hidrográfico, Lisboa, Portugal. E-mail: sandra.moreira@hidrografico.pt
- (2) Instituto Dom Luiz, Lisboa, Portugal.
- (3) CIMA/IIFA e DMAT/ECT, Universidade de Évora, Évora, Portugal

Resumo: O estabelecimento de valores de referência de metais associados a problemas de cariz ambiental em sedimentos marinhos é fundamental para estabelecer tendências temporais de variação da concentração desses elementos e para quantificar contributos antropogénicos. A análise da distribuição espacial das concentrações de crómio (Cr), níquel (Ni), cobre (Cu) e zinco (Zn) em sedimentos superficiais, colhidos na plataforma sul da Ilha da Madeira na primeira década do século XXI, demonstrou que estes surgem em concentrações mais baixas no setor a leste da Ponta do Garajau. Neste setor, dada a ocorrência de condições favoráveis ao desenvolvimento de organismos calcificadores, existe uma componente bioclástica significativa que promove a diluição das concentrações destes metais; porém, nas amostras cujo sedimento é de origem predominantemente terrígena o Cr, o Ni, o Cu e o Zn surgem em concentrações mais elevadas e com valores similares aos referidos na literatura científica para rochas aflorantes na Ilha da Madeira.

Palavras-chave: contaminação ambiental, ilha vulcânica, metais vestigiais, sedimentos marinhos

1. INTRODUÇÃO

Os ambientes marinhos de plataforma continental e insular funcionam como zonas de acumulação de sedimentos, sendo comumente designados por sumidouros. As principais fontes sedimentares deste tipo de ambiente são a erosão fluvial e costeira, sendo a composição dos sedimentos fortemente influenciada pelas litologias aflorantes nas bacias de drenagem e das zonas costeiras em erosão.

Metais como o crómio (Cr), níquel (Ni), cobre (Cu) e zinco (Zn) ocorrem naturalmente nas formações rochosas erodidas e, conseqüentemente, também estão presentes nos sedimentos marinhos. Porém, estes metais também podem ser introduzidos nos ambientes marinhos em resultados de diversas atividades antrópicas (e.g. atividade mineira e portuária), conduzindo a uma degradação da qualidade ambiental.

Para avaliar o contributo antropogénico de metais nos sedimentos é necessário estabelecer valores de fundo (*background*), para cada metal, a partir de amostras de sedimento representativas de condições pristinas (*i.e.* sem influência humana). Na ausência de valores de fundo, o estabelecimento de valores de referência (*baseline*) para um determinado período e área geográfica, é fundamental para identificar alterações temporais e espaciais das concentrações desses metais nos sedimentos e estabelecer tendências de evolução da qualidade ambiental do meio.

No presente trabalho pretende-se estabelecer os valores de referência de Cr, Ni, Cu e Zn, para a primeira década do séc. XXI, nos sedimentos

superficiais da plataforma sul da Madeira com recurso a técnicas de regressão estatística de modo a ter em conta a variabilidade natural de cada elemento em função das características dos sedimentos.

2. ENQUADRAMENTO REGIONAL

A Ilha da Madeira, situa-se no Oceano Atlântico, na placa tectónica africana, a cerca de 1000 km a sudoeste de Lisboa (Portugal) e a cerca de 700 km a oeste da costa de Marrocos.

A edificação desta ilha é resultante de vulcanismo do tipo *hot-spot* e, em termos litológicos, corresponde à acumulação de material piroclástico e de lavas predominantemente alcalinas, cuja composição varia desde basanitos (e picrobasaltos) a mugearitos (Mata *et al.*, 2004). É escassa e dispersa a ocorrência de rochas sedimentares.

O regime de agitação na Ilha da Madeira é dominado por ondulação proveniente do quadrante Norte, com altura significativa entre 1 e 6 m. Embora a costa sul da ilha se encontre abrigada do regime de ondulação descrito verifica-se a ocorrência de um forte gradiente hidrodinâmico com diminuição de energia de oeste para leste (Rodrigues *et al.*, 2006), em resultado de processos de refração e difração das ondas.

Os sedimentos terrígenos depositados na plataforma sul da Ilha da Madeira correspondem ao material erodido nas bacias hidrográficas, veiculado pelas linhas de água de carácter torrencial e sazonal, e ao resultante da erosão costeira.

3. MÉTODOS

O Instituto Hidrográfico efetuou, em 2002 e em 2007, ao abrigo de protocolos com a Direção Regional da Madeira, duas campanhas de amostragem de sedimentos superficiais da plataforma sul da Ilha da Madeira (PSIM) (Fig. 1). As amostras foram colhidas com recurso a um amostrador do tipo Smith-McIntyre a bordo do N/I S. Roque (setor ocidental) e do NRP Auriga (setor oriental).

Um total de 166 amostras de sedimento foram analisadas por espectrometria de absorção atômica com chama, após a digestão total (ácido fluorídrico +

água régia) da fração <2 mm, para a quantificação de alumínio (Al), ferro (Fe), crómio (Cr), níquel (Ni), cobre (Cu) e zinco (Zn). Complementarmente, um subconjunto de 100 amostras foi analisado quanto ao teor em carbono inorgânico total (CIT) por espectroscopia de infravermelho não dispersivo, possibilitando a estimativa do teor em carbonato de cálcio (CaCO₃-estimado) de acordo com a expressão $\text{CaCO}_3 = 8,333 \times \text{CIT}$.

A análise exploratória dos dados foi efetuada no *software IBM SPSS Statistics*.

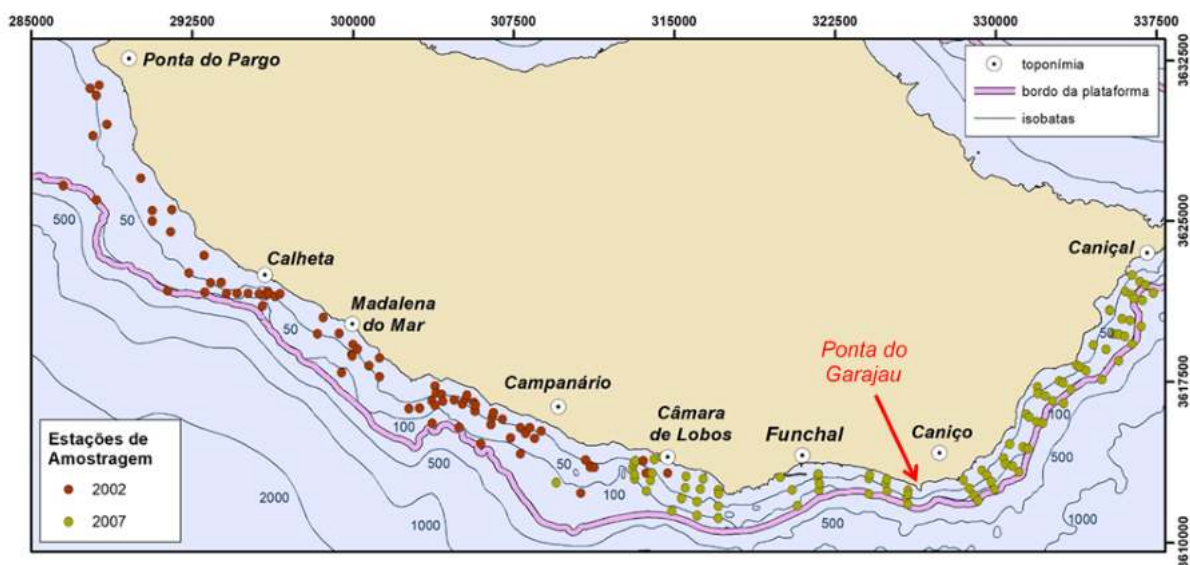


Figura 1 – Localização das estações de amostragem de sedimento superficial na plataforma Sul da Ilha da Madeira.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os intervalos de concentração de Al, Fe, Cr, Ni, Cu, Zn e CIT nos sedimentos da PSIM estão expressos na Tabela I e refletem a elevada dispersão destes parâmetros ($CV < 31\%$) nos sedimentos depositados na área de estudo.

Adicionalmente, verificou-se que os metais exibem curvas de distribuição de frequências assimétricas (Fig. 2) com enviesamento negativo, exceto o Cr e o Ni que apresentam enviesamento positivo. De acordo com o teste de Shapiro-Wilk ($\alpha = 0,05$) nenhum dos parâmetros exibe uma distribuição gaussiana.

Os gráficos de dispersão do teor dos metais, associados a problemas de cariz ambiental (Cr, Ni, Cu e Zn), em função da longitude (Fig. 3) demonstram que as concentrações mais baixas tendem a ocorrer

predominantemente a leste da Ponta do Garajau. É neste setor oriental onde ocorrem as concentrações mais elevadas de CaCO₃-estimado.

Tabela I – Intervalo de concentrações dos parâmetros analisados e respetivo Coeficiente de Variação (CV) para os dois conjuntos de amostras considerados (conjunto de dados originais: $n = 166$, subconjunto de dados CaCO₃-estimado <20%: $n = 84$).

	[Min] - [Máx]		CV (%)	
	$n = 166^*$	$n = 84$	$n = 166$	$n = 84$
Al	1,2 – 10,5	4,8 – 9,7	33,4	16,0
Fe	0,6 – 14,2	7,4 – 12,1	31,1	11,6
Cr	13 – 1145	261 – 1029	48,0	33,5
Ni	5 – 332	96 – 332	46,1	32,1
Cu	2 – 66	26 – 66	34,0	19,0
Zn	6 – 178	88 – 178	36,2	15,7
CIT	$\leq 10,8$	$\leq 2,4$	134,7	65,8

* $n = 100$ para o CIT

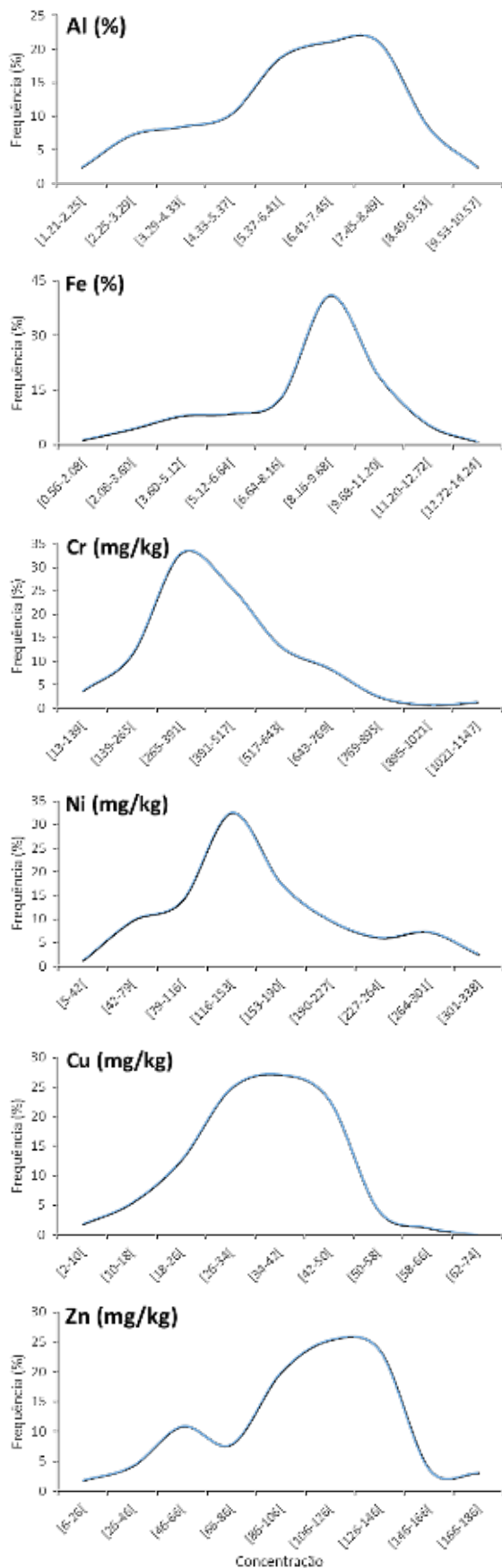


Figura 2 – Curvas de distribuição de frequências das concentrações de crómio (Cr), níquel (Ni), cobre (Cu) e zinco (Zn) nos sedimentos superficiais da plataforma sul da Ilha da Madeira.

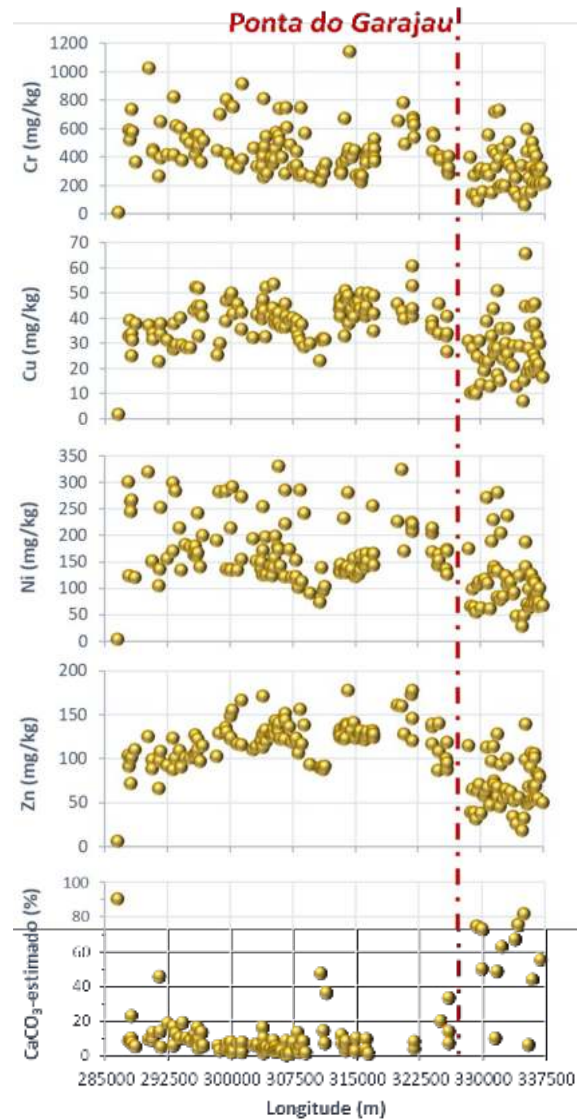


Figura 3 – Variação da concentração em crómio (Cr), níquel (Ni), cobre (Cu) e zinco (Zn) em função da longitude (sistema de coordenadas: WGS84 UTM 28N) da estação de amostragem.

As concentrações de todos os elementos analisados exibem, de modo grosseiro, uma relação inversa à concentração de CaCO₃-estimado (Fig. 4), refletindo um efeito de diluição da concentração dos elementos de origem terrígena em resultado da presença de uma componente bioclástica carbonatada. Ressalva-se que o eventual contributo terrígeno de minerais carbonatados para os sedimentos que cobrem a plataforma insular é negligenciável, sendo a produção biogénica a principal fonte de carbono inorgânico dos sedimentos. No setor a leste da Ponta do Garajau existem condições favoráveis ao desenvolvimento de organismos calcificadores, tais como: fraco hidrodinamismo, reduzida contribuição de material terrígeno e possível ocorrência de fenómenos de *upwelling* (Belvisi, 2024).

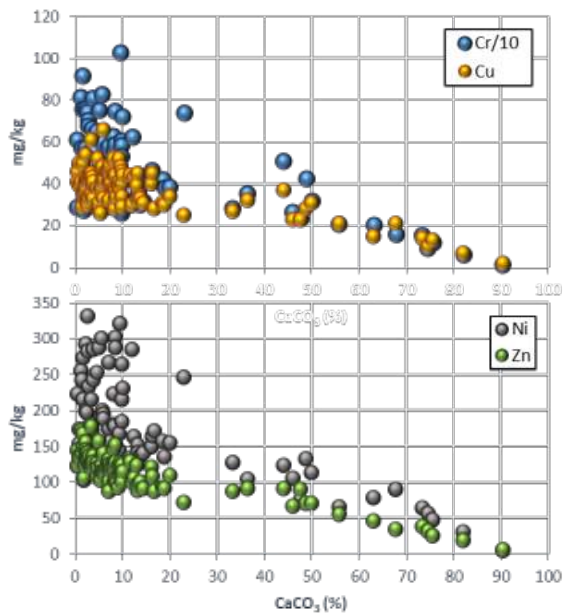


Figura 4 – Variação da concentração em crómio (Cr), níquel (Ni), cobre (Cu) e zinco (Zn) em função do teor estimado de carbonato de cálcio (CaCO_3).

Consequentemente, procedeu-se à redução do conjunto de dados inicial de modo a que as amostras de sedimento neste estudo correspondessem predominantemente a sedimentos terrígenos ($n = 84$, Tab. I). Para tal, foram excluídas as amostras cujo teor em CIT é desconhecido e, através da análise empírica dos gráficos da Figura 4, aquelas cujo teor estimado de CaCO_3 excede os 20%.

Da análise da Tabela I, onde estão expressos os intervalos de concentração de todos os parâmetros analisados para este subconjunto de dados, é possível constatar os sedimentos com teor em CaCO_3 -estimado $<20\%$ apresentam concentrações de Cr, Ni, Cu e Zn compatíveis com as obtidas em rochas aflorantes na ilha da Madeira (Cr = 172 – 782 mg/kg, Ni = 110 – 435 mg/kg, Cu = 31 – 86 mg/kg e Zn = 90 – 120 mg/kg (Mata *et al.*, 1989 e 1998)). Embora a variabilidade dos parâmetros analisados seja menor (CV = 11 – 66%), comparativamente à obtida para o conjunto de dados inicial, de acordo com o teste de Shapiro-Wilk ($\alpha = 0,05$) somente o Zn passou a ter uma distribuição gaussiana. Porém, para definir retas de regressão robustas e intervalos de predição que representem de forma fiável as concentrações de referência de Cr, Ni, Cu e Zn na primeira década do séc. XXI, em função dos elementos de referência (Al e Fe), é necessário garantir que os valores observados seguem uma distribuição normal em torno da linha de regressão. Assim sendo, procedeu-se à transformação logarítmica de base natural dos valores do subconjunto de dados, verificando-se a normalidade para todos os elementos analisados (exceto o Ni).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo ainda está em desenvolvimento e, numa próxima etapa, será verificada a relação existente entre o Cr, Ni, Cu e Zn com o Al e/ou Fe para estabelecer as respetivas linhas de regressão e, consequentemente, os valores de referência regionais destes quatro metais. Estes cálculos são essenciais à determinação quantitativa dos contributos de metais com origem antropogénica para os sedimentos marinhos e à monitorização da variação das concentrações de metais ao longo do tempo.

O conhecimento da variabilidade natural e dos processos de dispersão de Cr, Ni, Cu e Zn ao longo da PSIM é fundamental para a tomada de decisões informadas que visam a proteção e preservação do meio marinho da Ilha da Madeira e para o estabelecimento de regulamentações eficazes para a exploração dos recursos marinhos naturais (e.g., agregados marinhos) e para a realização de atividades de dragagem.

Agradecimentos

Os autores agradecem: ao Governo Regional da Madeira pela cedência dos dados, às guarnições do N/I S. Roque e do NRP Auriga e a todos os elementos das Divisões de Geologia Marinha e de Química e Poluição do Meio Marinho envolvidos nas campanhas de campo e no trabalho laboratorial.

REFERÊNCIAS

- Belvisi, V. (2024). Sedimentary dynamics on the southern insular shelf of Madeira Island: Insights from geophysical and sediment sampling data. Tese de Doutoramento - Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, p.
- Mata, J.; MacRae, N. D., Wu, T.-W & Munhá, J. (1989). Petrogênese das lavas da ilha da Madeira: Nota preliminar. *Comunicações dos Serviços Geológicos de Portugal*, 75, 73–87.
- Mata, J.; Kerrich, R.; MacRae, N. D. & Wu, T.-W. (1998). Elemental and isotopic (Sr, Nd, and Pb) characteristics of Madeira Island basalts: evidence for a composite HIMU - EM I plume fertilizing lithosphere. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 35 (9), 980–997. doi: <https://doi.org/10.1139/e98-046>
- Mata, J. & Munhá, J. (2004). Madeira Island alkaline lava spinels: petrogenetic implications. *Mineralogy and Petrology*, 81, 85–111. <https://doi.org/10.1007/s00710-004-0029-5>
- Rodrigues, A.; Oliveira, A.; Fonseca, R.; Taborda, R. & Cascalho, J. (2006). Sedimentary Dynamics of the Southern Shelf of Madeira (Portugal). *Journal of Coastal Research*, SI 39, Vol. I, 454-458. <http://www.jstor.org/stable/25741615>.

Mid-shelf depository associated with Sado River and Arrábida Ridge - Portugal

J. Pombo (1), A. Oliveira (1,2), J. Duarte (1,2) S. Moreira (1,2), A. Vinhas (1), N. Lapa (1) & A. Rodrigues (1,2)

(1) Instituto Hidrográfico, Rua das Trinas, 49, 1249-093 Lisboa, Portugal. joaquim.pombo@hidrografico.pt

(2) Instituto Dom Luiz, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal.

Abstract: The main objective of this paper is to understand the sedimentation regime and infer about past sedimentological processes based on the analysis of three cores collected between 71 m and 82 m depth offshores the Arrábida Ridge. The sediment column was described using a multi-analyses approach, including magnetic susceptibility and P-wave velocities, grain size analysis, carbonates and water content determination.

Preliminary results allow the individualization and characterisation of five sedimentary units, present in the three locations. The deepest units (Unit A and B) correspond to a muddy fine sand with an average water content of 30% and p-waves of about 1750 m/s. The Unit C, present only in the longer cores (VC01 and VC02) corresponds to a coarse sand. The muddy component is practically absent in this unit (<2%) and an increase of P-wave velocity (average 1900 m/s) was observed. The Unit D corresponds to a medium to fine sand, slightly muddy, with an average water content of 30%. The P-wave velocity is around 1750 m/s. Finally, the shallowest Unit E corresponds to a sandy muddy sediment with a water content above 50% and a P-wave velocity around 1600 m/s.

Key words: Sediment properties, Continental shelf, Grain-size.

1. INTRODUCTION

The coastal orientation of Espichel cape and Setúbal (W-E) shelters the study area from the NW swells that dominate along the West Portuguese coast. It is sporadically affected by southerly swells, although less frequently (Andrade et al., 2006).

To the east of the study area is located the Sado River mouth, about 6 km from the delta. Its submarine delta is an area of coarse sediment accumulation and its shape reflects the dynamic balance between different factors: sediment availability, tidal currents and wind waves (Rebêlo & Silva, 2018; Brito & Rebêlo, 2013). If we consider its geographic location, the study area (Figure 1) is still under the influence of the turbiditic plume of the Sado River, which probably is the main source of terrestrial particles to the marine shelf.

The inner and middle continental shelf is, in general, covered by sandy deposits, that becomes finer with the increasing distance to the coastline. Off the Sado deltaic front, a muddy deposit with parallel orientation to the Arrábida coast allows the settling of the riverine particles (IH, 2010).

The purpose of this paper is to describe the downcore variation of the sedimentary cover, in order to understand the recent evolution of marine systems and the impact of high energetic processes.

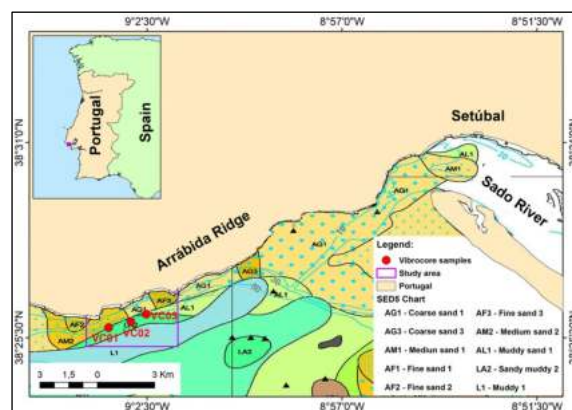


Fig. 1 – Location of the three vibrocores superimposed on the SED 5 chart.

2. DATA AND METHODOLOGY

Three cores (Figure 1) were collected in 2021, using a vibrocorer system, on board the NRP Gago Coutinho, as part of the SEDMAR project (IH internal program aiming to the recognition and mapping of the sedimentary cover observed in the Portuguese Margin).

Core VC01, collected at 82 m water depth, is 3.65 m long. Core VC02 was collected at the same depth as VC01 and is 5.05 m long. Core VC03, the smallest, was collected at 71 m water depth and is 2.13 m long.

Laboratory analysis were performed in the Sedimentology Laboratory of the Hydrographic Institute following international standards:

- Grain size analysis was carried out according to ISO 13320:2020 and ISO 13322-2:2021, and the results were coupled with Gradistat v.9.1 (Blott and Pye, 2020).
- The water content was determined following the ISO 17892-1:2014.
- Magnetic susceptibility and the P-Waves following the ODP Technical note 26 (Blum, 1997).
- The total carbonate content (CaCO_3) and the total organic carbon content (TOC) was determined according to IH internal accredited methods, based on EN 15936:2022.

Geotechnical tests were executed immediately after the end of the survey.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Laboratory results allowed the identification of five distinct sediment sequences, which were observed on VC01, VC02 and VC03 (Figures 2, 3 and 4, respectively), described below, from the bottom to the top of the sedimentary column, corresponding to the seafloor (units in meters).

Unit A

The deepest layer (Unit A), is present only in the VC02 (4.20 to 5.05 meters below sea floor - mbsf) is a very fine sandy sediment. The sand fraction varies between 74% and 83%, the mud fraction (silt + clay) around 20%, the gravel fraction was practically absent and modal grain-size is 3.25ϕ .

The P-Wave records show little variation, with the mean values being 1740 m/s. The magnetic susceptibility record is constant (mean value of about 2.5×10^{-6} SI).

The CaCO_3 content varies between 17 and 26%, and the TOC is less than 0.4%.

The water content of this layer is around 30%.

Unit B

Unit B is present in the cores VC01 (3.40 to 3.7 mbsf) and VC02 (3.0 to 4.20 mbsf) and corresponds to a sandy layer. The sand fraction varies from 74 to 90 % (mean 80%), the mud fraction (silt + clay) is around 18% and the gravel fraction was practically absent (mean 2%).

The CaCO_3 content is about 25% and the TOC is around 0.36%.

The mean value of the water content is 28% in VC02 and 22% in VC01.

The P-Waves record shows little variations along the unit: in core VC01 the mean value is 1860 m/s and 1740 m/s in the VC02.

The magnetic susceptibility record is regular along the layer, with mean values around 1.8×10^{-6} SI in VC02 and 5.1×10^{-6} SI in core VC01.

The transition to Unit C is erosive/abrupt marked in the textural classes, average grain size, CaCO_3 , TOC graphics and shows little variations in the magnetic susceptibility and P-Wave records.

Unit C

This unit is present in the cores VC01 (2.88 to 3.40 mbsf) and VC02 (2.24 to 3.00 mbsf) and the sediments correspond to a coarse sand. The sand fraction is greater than 95% (average 98%) and the mud and gravel fractions were practically absent.

The CaCO_3 content is low in relation to the content of units A and B (average 5%). The total organic carbon content is similar to that of units A and B ($< 0.22\%$).

The water content is 17% in VC01 and 27% in the core VC02, these values reflecting the grain-size of the layer, which is lower in VC02.

The mud fraction is practically absent ($< 2\%$) and corresponds to an increase of P-waves velocity (average 1790 m/s in VC02 and 1930 m/s in VC01), reaching typical values clean sands (Hamilton, 1970; Hamilton & Bachman, 1982).

Unit D

This unit, characterized by muddy sands, is present in all three vibrocores - VC01: from 0.61 to 2.88 mbsf, VC02: from 0.64 to 2.24 mbsf, and VC03: from 0.61 to 2.08 mbsf. The sand fraction varies from 74 to 89 % (average 78%), the mud fraction (silt + clay) is around 20% and the gravel fraction was practically absent ($< 2\%$).

The CaCO_3 content in this layer is on average 35%, 38%, and 34% in VC01, VC02, and VC03, respectively. Total organic carbon content is similar in all three cores and, with values $< 0.84\%$.

The water content reflects the sediments type present in this layer, namely, the muddy component. The values are 30% in VC01, 34% in VC02 and 28% in VC01.

The P-Waves record shows little variations along the unit, with mean values of 1750 m/s. The magnetic susceptibility record is very different in all cores. The mean values are 6×10^{-6} SI (VC01), 2×10^{-6} SI (VC02) and 15×10^{-6} SI (VC03); these values, and the similarity of the curve trends, reflect the proximity to the particles sources.

Unit E

The shallowest unit (upper 60 cm in all cores) corresponds to sandy mud sediments.

There is an increment towards the surface of the mud fraction, reaching a maximum of $\sim 90\%$ in all cores. The gravel fraction is practically absent.

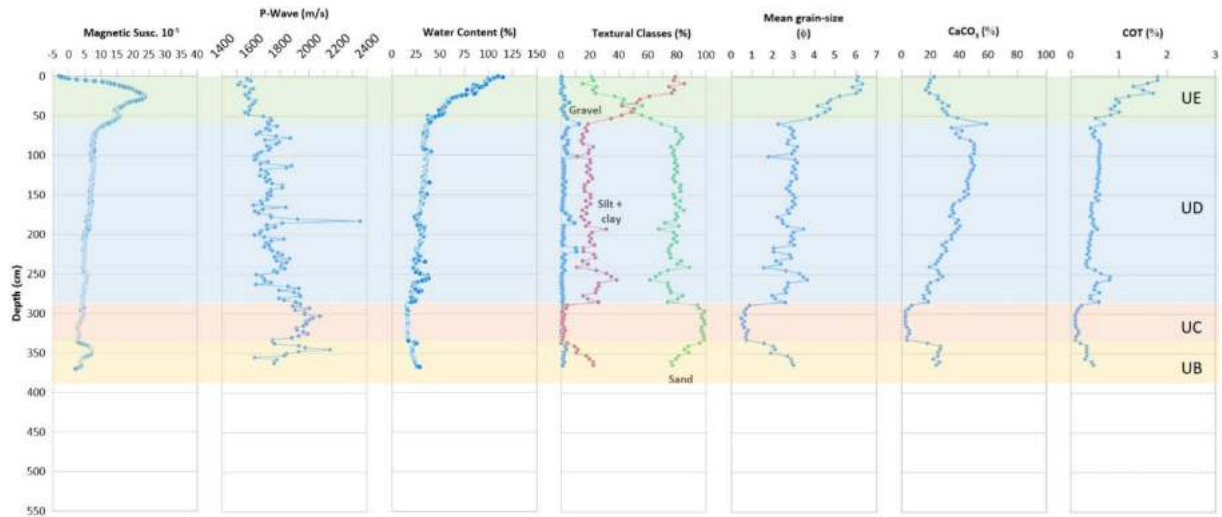


Fig. 2 – Downcore variation of sedimentological parameter of VC01

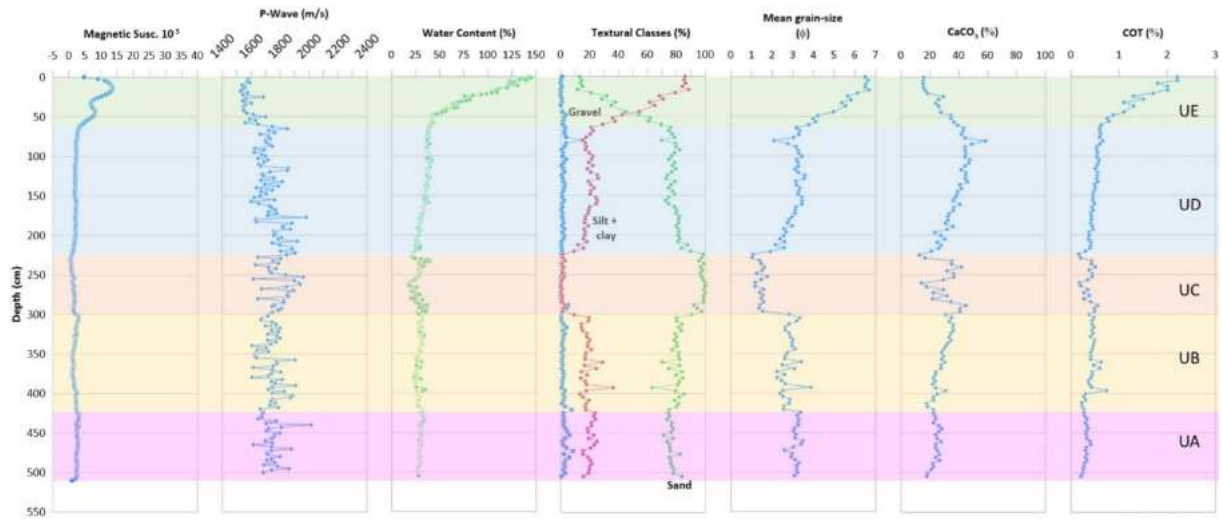


Fig. 3 – Downcore variation of sedimentological parameter of VC02.

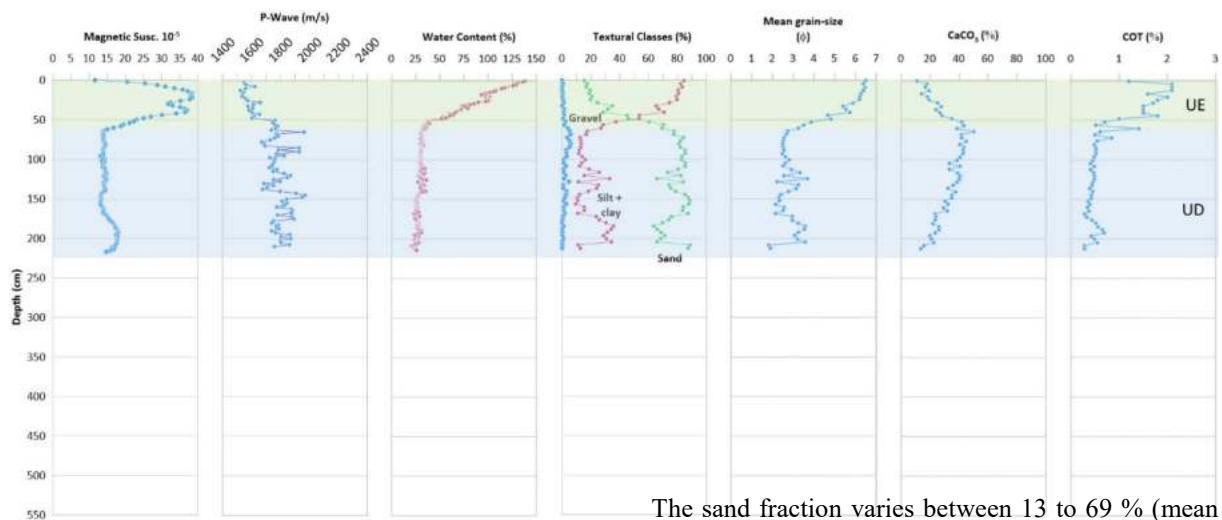


Fig. 4 – Downcore variation of sedimentological parameter of VC03.

The sand fraction varies between 13 to 69 % (mean 34%) and the mud fraction (silt + clay) presents values between 18 to 88% (mean 65%).

The CaCO₃ decreases towards the top, with values around 20%. TOC shows the opposite behaviour, increasing towards the surface, with values of around 2%.

With values higher than 50%, the water content reflects the dominant textural class (muddy type particles). Also, the p-waves values, around 1600 m/s, is consistent with the superficial muddy sedimentary layer (Hamilton, 1970; Hamilton & Bachman, 1982).

In this unit the magnetic susceptibility values are higher when comparing to the underlying units (A, B, C, D). This was associated with the relatively high concentration of finer particles with a more magnetic character (clay minerals).

4. CONCLUSION

Three vertical samples were collected southward the Arrábida chain, in the centre of a muddy deposit mapped in the middle continental shelf. Given the general sandy nature of the shelf sedimentary cover, the study of these samples will contribute to understand the origin and evolution of this particular deposit, especially in what regards the Sado River contribution.

The vertical description of those cores, allowed the individualization of five distinct sedimentary units, based on the observed physical, sedimentological, and compositional properties.

The oldest sedimentary units (A, B, and D) generally correspond to carbonated muddy sandy sediments, whereas the most recent unit (E) is finer and has a clear terrigenous signature.

The C Unit (52 cm-thick in core VC01 and 76 cm-thick in core VC02) is a very contrasting layer to the others, being composed by coarse sand (more than 95%) with low CaCO₃ (especially in VC01, where the values are negligible). The origin of this sandy layer is still unknown, but the absence of finer and carbonated particles indicate a high energetic process.

More research is needed to clarify the regional distribution of these internal sequences and to assess the possible mechanisms for their formation, distinguishing between the role of Atlantic climatic evolution and the impacts of terrestrial sedimentary inputs (both river discharge and coastal erosion) variation since the Last Glacial Maximum.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work is a contribution to the SEDMAR program.

REFERENCES

Andrade, C.; Freitas, M.C.; Brito, P.; Amorim, A.; Barata, A.; Cabaço, G. (2006). Estudo de caso da

região do Sado, zonas costeiras. In: F.D. Santos e P. Miranda (Editors), Alterações Climáticas em Portugal. Cenários, Impactos e Medidas de Adaptação. Projecto SIAM II, pp 385-479. Gradiva. Lisboa.

Blum, P. (1997). *Physical properties handbook*. ODP Tech. Note, 26. doi:10.2973/odp.tn.26.1997.

Blott, S.J. and Pye, K. (2001). GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surface Processes and Landforms* 26, 1237-1248

Brito, P. & Rebêlo, L. (2013). Geologia do Portinho da Arrábida. In: Desassoreamento da Arrábida – Causas e soluções, pp49-66, Atas do colóquio, 16 de Novembro de 2011. Lisboa. Estrutura de Missão para os Assuntos do Mar.

EN 15936 (2022). Soil, waste, treated biowaste and sludge - Determination of total organic carbon (TOC) by dry combustion. European Standards.

Hamilton, E. L. & Bachman, R.T. (1982) - Sound velocity and related properties of marine sediments. *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol 72, N° 6, 1891-1904.

Hamilton, E. L. (1970) - Sound velocity and related properties of marine sediments, North Pacific. *J. of Geophysical Research*. Vol. 75, N° 23. 4423-4446.

Instituto Hidrográfico (2010). Sedimentos superficiais da plataforma continental. Cabo da Roca ao Cabo de Sines. Carta SED 5.

ISO 13322-2 (2021). Particle size analysis — Image analysis methods - Part 2: Dynamic image analysis methods. ISO 2021. Switzerland.

ISO 13320 (2020) – Particle size analysis – Laser diffraction methods. ISO 2020. Switzerland.

ISO 17892-1 (2014) - Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil - Part 1: Determination of water content. ISO 2014. Switzerland.

Rebêlo & Silva, 2018. Evolução recente da baía do Portinho da Arrábida: Contributos da geologia para uma correta gestão ambiental. *Journal of Integrated Coastal Zone Management / Revista da Gestão Costeira Integrada* 18(2):111-133 (2018). http://www.aprh.pt/rgci/pdf/rgci-n158_Rebello.pdf | DOI:10.5894/rgci-n158.

Cartografía semiautomática de cañones submarinos mediante un Sistema de Información Geográfica: caso de estudio del *Escarpe de Mazarrón* (Murcia, España)

M. Sayago-Gil (1), I. Díez-García (2), C. Juan (1), E. Guijarro-García (3) y L.M. Fernández-Salas (1)

(1) Instituto Español de Oceanografía-CSIC. CO de Cádiz. Puerto Pesquero, Muelle de Levante s/n. 11006. Cádiz. miriam.sayago@ieo.csic.es.

(2) Instituto Español de Oceanografía-CSIC. Servicios Centrales. C. del Corazón de María, 8, Chamartín. 28002. Madrid.

(3) Instituto Español de Oceanografía-CSIC. CO de Murcia. Varadero 1. 30740. San Pedro del Pinatar (Murcia).

Resumen: La interpretación geológica basada en datos geofísicos a menudo está sujeta a factores subjetivos. Este trabajo aúna técnicas de análisis geomorfológico, empleando un Sistema de Información Geográfica (ArcGIS) para determinar las características morfológicas de un sistema de cañones submarinos (*Escarpe de Mazarrón*, Murcia, España) a partir de un Modelo Digital del Terreno, pero con un flujo determinado y optimizado para este propósito específico. El objetivo principal de este trabajo es cartografiar y caracterizar el sistema de cañones submarinos de manera semiautomática reduciendo al mínimo la subjetividad en la interpretación. Con este proceso se consigue que a partir de la definición de las características más importantes que determinan el sistema se puedan calcular parámetros e índices de manera confiable, que sentarán las bases de estudios posteriores. Con la aplicación de este flujo de trabajo, además, se minimiza el tiempo de obtención de resultados y se incrementa la eficiencia.

Palabras clave: Cartografía Semiautomática, Sistema de Información Geográfica, Sistema de Cañones Submarinos.

1. INTRODUCCIÓN

El análisis geomorfológico a partir de datos obtenidos de manera indirecta, como es el caso de las batimetrías, es muy útil y efectivo para obtener productos cartográficos del fondo marino. Las características morfométricas de las cuencas hidrográficas que componen un sistema de cañones submarinos están basadas en estudios geomorfológicos y permiten establecer relaciones entre ellas (Bühlig *et al.*, 2022). La morfología de cada una, las condiciones del régimen de corrientes que actúan sobre ellas, la acumulación y/o erosión de sedimento, la profundidad, la pendiente, entre otros factores. son parámetros fundamentales para el estudio del comportamiento morfodinámico así como para establecer comparaciones evolutivas entre ellas (Fernández *et al.*, 2012; Quesada y Barrantes, 2017).

El análisis de estos parámetros nos permite estudiar los ambientes geomorfológicos a través de índices y medidas sencillas que sean susceptibles de tratarse de forma matemática, sin la interferencia de la subjetividad del experto. De esta manera, también se pueden establecer correlaciones entre dichos parámetros estableciendo propiedades concretas que permitan minimizar el esfuerzo de adquisición de datos (Espinosa-Martínez, 2020).

Los sistemas de cañones submarinos presentan en la mayoría de los casos una alta complejidad de formas y de estructuras con límites difusos en ocasiones o que plantean dudas razonables al experto para identificar el cauce principal y la geometría de las diferentes formas de fondo, aplicando siempre el mismo criterio para toda la zona de estudio, en ocasiones, de gran extensión.

Para la obtención de los índices necesarios para la caracterización de las cuencas individuales dentro del sistema de cañones, tales como perímetro, área, sinuosidad, longitud del cauce principal, jerarquía hidrológica, altura y longitud de la cuenca, índice de encajamiento, compacidad, hipsometría, entre otros, hace falta una interpretación, lo más objetiva posible, de las principales morfologías que componen el sistema de cañones. Estas morfologías incluyen los límites de cada cuenca que compone el sistema, el eje (o cauce) principal de cada una de ellas, los puntos de máxima y mínima profundidad, la anchura media de la cuenca, la pendiente media, etc.

Este estudio es el compendio de una serie de técnicas basadas en la cartera de herramientas del Sistema de Información Geográfica (SIG) (ArcGIS v10.8), ordenadas y optimizadas para obtener de manera semiautomática los valores de los parámetros principales que determinan las cuencas de un sistema de cañones submarinos. De esta manera se amplía el uso de las técnicas utilizadas

para el estudio de cuencas individuales a sistema de cañones completos, donde la complejidad de la interpretación crece de manera exponencial. Además, se elimina un alto porcentaje de la subjetividad del experto a la hora de cartografiar las

diferentes morfologías que se pueden establecer en una red compleja de cañones y establecer la jerarquía hidrológica de cada una de las cuencas individualmente y de manera automatizada.

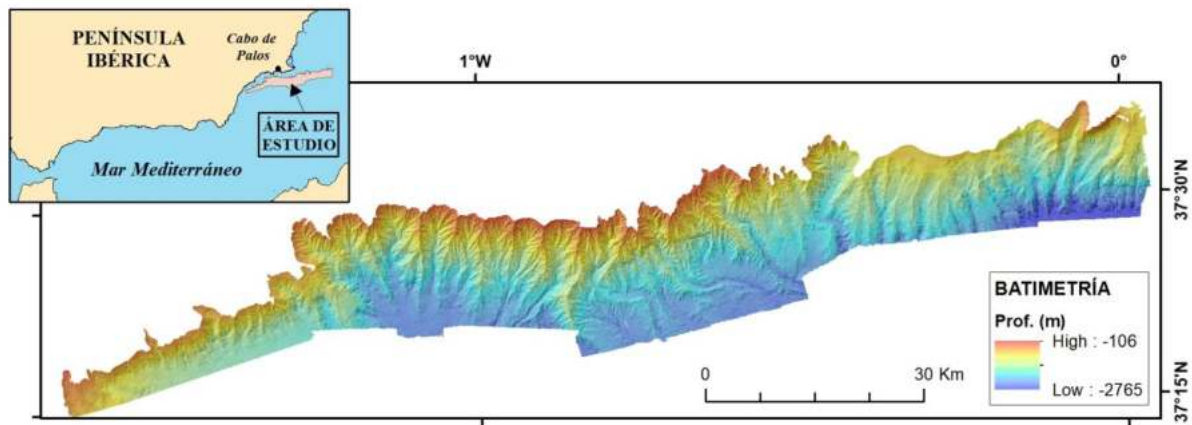


Fig. 1. Localización del área de estudio –Sistema de cañones submarinos del Escarpe de Mazarrón– sobre la que se ha realizado el trabajo de cartografiado semiautomático para validar el proceso.

Los datos batimétricos utilizados en este estudio para la aplicación y validación de este flujo de trabajo se han obtenido en el sistema de cañones submarinos del *Escarpe de Mazarrón* (Murcia, España) (Fig. 1), pero la metodología es aplicable a cualquier otro sistema de cañones submarinos.

2. METODOLOGÍA

Este trabajo se ha realizado a partir de batimetrías (*Modelos Digitales del Terreno*, MDT) obtenidas con ecosonda multihaz EM710 a bordo de los *BO Ángeles Alvariño* y *Ramón Margalef*, en diferentes campañas dentro del marco de los proyectos LIFE-INTEMARES y ESMARES2 (Estrategias Marinas de España) del Instituto Español de Oceanografía (CN-IEO-CSIC). La batimetría utilizada tiene una resolución de 10 x 10 m y se distribuye en un rango de profundidad que abarca desde 100 m a 1800 m aproximadamente.

Para la consecución del objetivo de este trabajo se ha optimizado un flujo de procesos y usos de herramientas del SIG ArcGIS, utilizados en diferentes trabajos basados en estudios de cuencas individuales marinas y terrestres. Estos procesos se han organizado y optimizado para su aplicación en diferentes etapas de trabajo (Fig. 2): (1) la preparación de los datos, (2) determinación de la red de drenaje y establecimiento la jerarquía de los cauces, determinación de las cuencas de drenaje principales que soporta el sistema de cañones, (3) obtención de los cauces principales de cada cuenca de manera automática, así como las características morfométricas que lo definen. Como complemento a la interpretación geomorfológica del sistema de cañones, se han aplicado variantes de estos métodos

semiautomáticos para cartografiar las principales divisorias de aguas.

3. RESULTADOS

Como resultado de este trabajo, se presentan los pasos necesarios a seguir para obtener una cartografía detallada de cada elemento que compone el sistema (acompañada de los valores de cada parámetro y/o índice) partiendo del MDT de un sistema de cañones submarinos de manera semiautomática. Los pasos y herramientas utilizadas se han organizado en una serie de etapas (Fig. 2):

- (1) **Preparación de los datos.** Para ello se debe acotar la zona de estudio al sistema de cañones concreto y eliminar los posibles "sumideros" de manera que no queden celdas sin datos.
- (2) **Cartografiado de la red de drenaje y cuencas principales.** Para establecer la red de drenaje del sistema completo así como su jerarquía se aplica el flujo de herramientas *Hydrology* (www.esri.com), de donde se obtiene un archivo vectorial de la red de drenaje. La determinación de las cuencas principales se obtiene en función de la jerarquía establecida en el paso anterior, así los órdenes mayores serán los que más peso aporten para su determinación ya que serán los que tengan una acumulación de flujo mayor. De este proceso se obtiene un archivo vectorial de las cuencas principales que componen el sistema de cañones.
- (3) **Identificación y extracción de los cauces principales y cálculo de los parámetros que determinan el sistema.** Basados en el ráster de dirección del flujo y el archivo vectorial del cartografiado de las cuencas principales, se determina automáticamente (paquete de herramientas de *ArcHydroTools*

(www.esri.com)) cuál es el cauce principal de cada una de las cuencas, siendo éste el más largo. De este proceso se obtiene un archivo vectorial con cada uno de los cauces principales identificado y cartografiado como un elemento único -sin secciones- de cada una de las cuencas. Una vez identificado cada elemento del sistema, se calculan los parámetros que los caracterizan como son el perímetro de la cuenca, área, altura, longitud del cauce principal, etc., siempre utilizando las herramientas propias de ArcGIS.

Con los productos de este flujo de trabajo podemos obtener valores de parámetros válidos (que servirán para el posterior cálculo de índices) obtenidos de manera semiautomática y eliminando la subjetividad del experto que realiza la cartografía. El proceso requiere siempre supervisión del experto para validar los resultados y fijar los umbrales necesarios para establecer el grado de detalle.

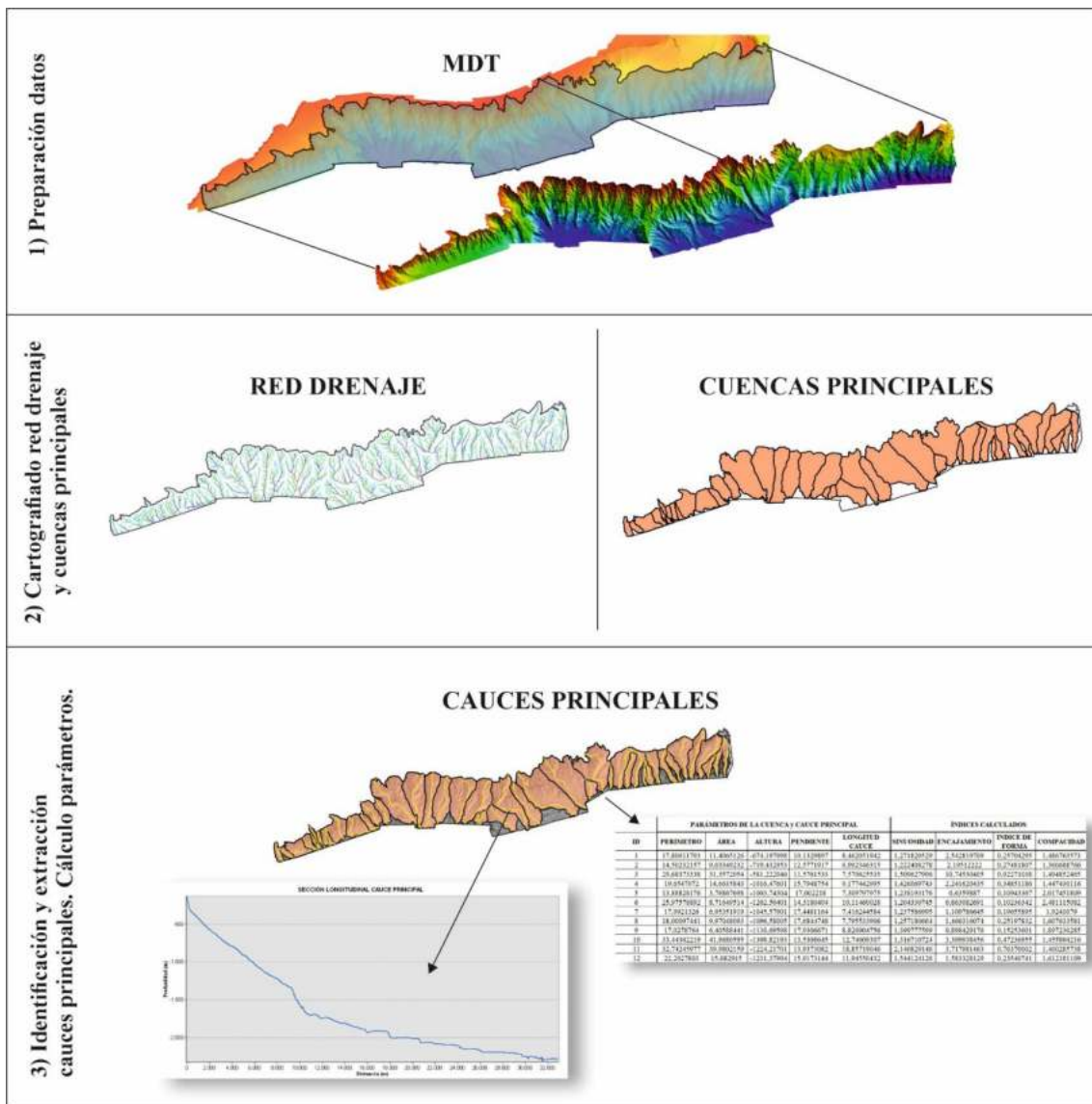


Fig. 2. Esquema de las principales etapas del proceso de cartografiado y obtención de parámetros de caracterización del sistema de cañones submarinos de manera semiautomática.

Para completar el mapeado de las morfologías del área de estudio, se aplica el paquete *Hydrology* a la inversa de la batimetría para obtener el cartografiado de detalle de las divisorias de agua, lo que aportará información relevante y ayudará a la interpretación de la geomorfología de la zona.

del sistema de cañones submarinos de forma semiautomática, eliminando la subjetividad del proceso de cartografiado manual y reduciendo de manera muy notoria el tiempo de trabajo para la obtención de resultados (Fig. 3). A partir de estos parámetros, se pueden establecer modelos de evolución, zonas de mayor erosión/acumulación de sedimento, clasificación de ambientes sedimentarios, zonas de mayor riesgo geológico, etc.

Con la aplicación de este flujo de trabajo se obtiene tanto la cartografía completa como la caracterización

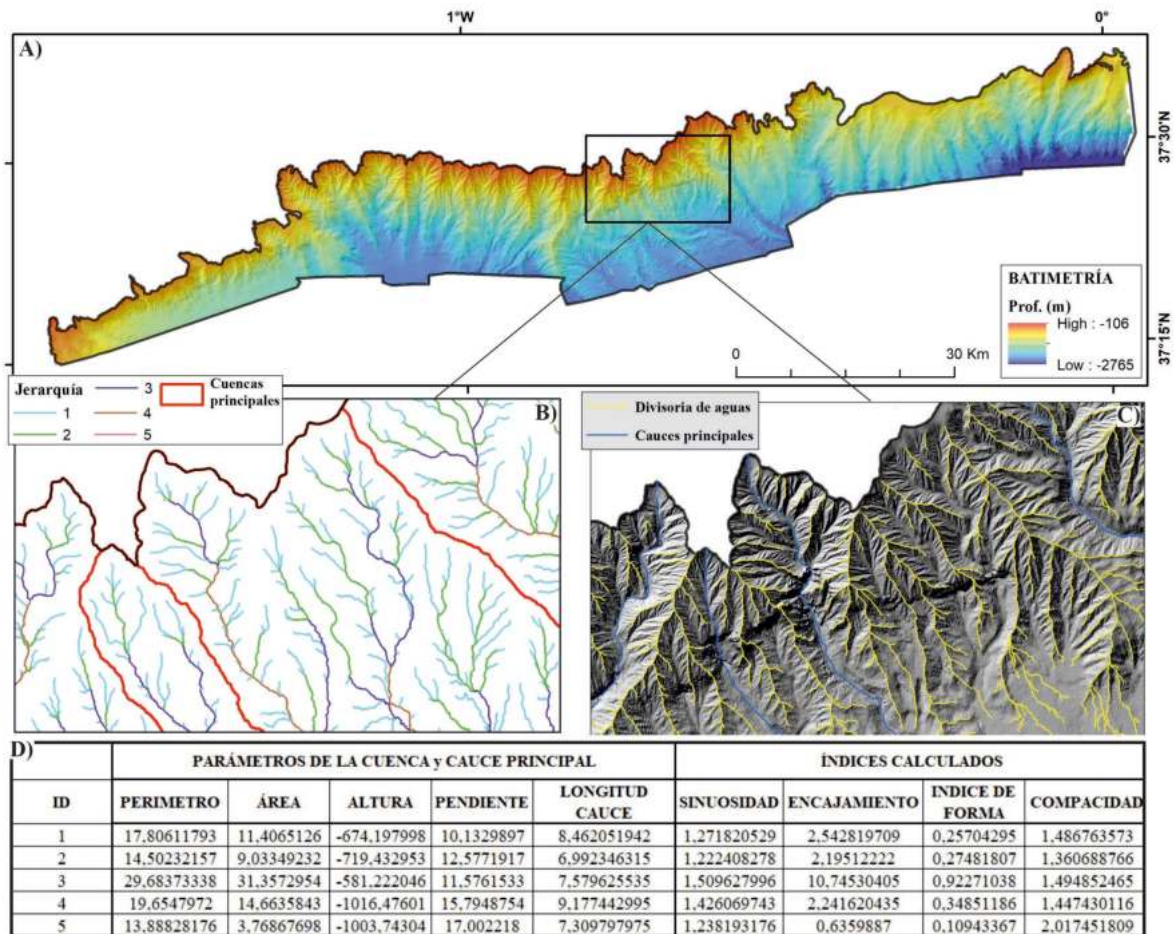


Fig. 3. Ejemplo de los resultados donde a partir de un MDT se obtienen tanto la cartografía de los principales elementos que componen el sistema como los valores de los parámetros que lo caracterizan. (A) MDT del sistema de cañones submarinos; (B) Red de drenaje (indicando la jerarquía de cauces) y límites de las cuencas principales; (C) Cauces principales de cada cañón y principales divisorias de agua sobre la batimetría iluminada (Hillshade); (D) Tabla de datos que pueden obtenerse a partir de la cartografía de los elementos definidos anteriormente.

4. CONCLUSIONES

Con la aplicación de este proceso se consigue que a partir de la obtención de un MDT de la batimetría de un sistema de cañones submarinos se obtenga el cartografiado de los elementos más importantes que definen el sistema así como los parámetros morfométricos a partir de los que se podrán realizar estudios posteriores. De esta manera se pueden calcular el área de cada cuenca, el perímetro, profundidades, pendientes, longitud del cauce principal, sinuosidad, hipsometría, compacidad, etc. de manera fiable, semiautomática y reduciendo al mínimo la subjetividad y tiempo empleado por el experto.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la tripulación de los *BO Ángeles Alvariño* y *BO Ramón Margalef* su labor durante la adquisición de los datos necesarios para la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

- Espinosa-Martinez, C.D. (2020). Correlación entre geología y parámetros morfométricos de cuencas sedimentarias en Colombia. https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_civil/883
- Bührgig, L.H., Colombera, L., Patacci, M., Mountnet, N.P. y McCaffrey, W.D. (2022). A global analysis of control on submarine-canyon geomorphology. *Earth-Science Reviews*, 233, 104150.
- Quesada, A y Barrantes, G. (2017). Morphometric model to determine susceptible areas to hillslope processes. *Investigaciones Geográficas*, 94, 1-37.
- Fernández, S., Álvarez-Marrón, J. y Menéndez-Duarte, R. (2012). Average denudation rates, morphometry and hypsometry of coastal catchments in Northern Spain. *Sociedad Geológica de España*. oai:digital.csic.es:10261/87636.

Sismo-estratigrafia da cobertura sedimentar no setor da plataforma continental compreendido entre Sesimbra e a serra do Risco (cadeia orogénica da Arrábida): um depósito particularmente diferente

A. Vinhas (1), A. Rodrigues (1,2)

- (1) Instituto Hidrográfico, Rua das Trinas 49, 1249-093 Lisboa, Portugal. andre.costa@hidrografico.pt
(2) Instituto Dom Luiz, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal.

Abstract: In the seismic-stratigraphic sequence of the continental shelf between Serra do Risco and Sesimbra, established from the interpretation of 37 seismic lines obtained with the Boomer and Sub-Bottom Profiler (SBP) system, an extensive deposit with an average thickness of 8 ms (td) and a chaotic internal structure was highlighted. This deposit is described in this paper and some considerations are given as to the mechanism of their origin.

Palavras chave: movimento de massa, sismo-estratigrafia, UMG.

1. OBJETIVOS

Este estudo, inserido no Programa de Mapeamento dos Sedimentos Marinhos (SEDMAR) executado pelo Instituto Hidrográfico desde 2010, descreve a sismo-estratigrafia do setor da plataforma continental adjacente ao troço Sesimbra - serra do Risco (sul da península de Setúbal), setor onde se evidencia uma unidade sedimentar discordante (denominada DV), ainda de origem desconhecida.

2. ENQUADRAMENTO GERAL

A área de estudo está delimitada pelos paralelos 38°27'21"N e 38°24'47"N, e os meridianos 9°5'28"W e 8°59'57"W (Figura 1).

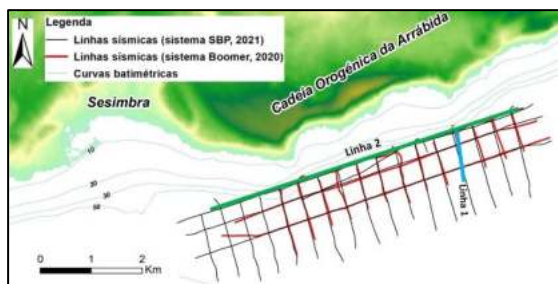


Fig. 1. Localização dos perfis de reflexão sísmica.

Geologicamente, a plataforma continental a sul da cadeia da Arrábida insere-se no setor meridional da Bacia Lusitaniana, estrutura criada durante o Mesozóico, no contexto da abertura do Atlântico Norte, marcada pela sedimentação do Jurássico superior ao Cretácico inferior. As formações litoestratigráficas que constituem a cadeia orogénica exposta variam de pelítico-evaporíticas a carbonatadas e, na área submersa as unidades geológicas são mais recentes, sendo constituídas pelas formações detríticas terciárias (Miocénico ao Quaternário) e plio-quadernárias (paleovales preenchidos). Sobre estas formações, e até aos 50 m

de profundidade, a cobertura sedimentar recente é composta por diversos depósitos, de areias grosseiras a lodos (Figura 2).

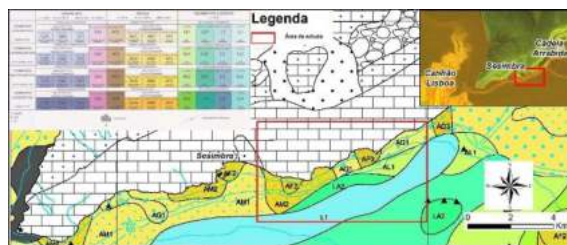


Fig. 2. Excerto da Carta Sedimentológica SED 5(IH, 2010). No interior da área de estudo: AM2 – areia média litobioclástica, AF2 – areia fina litobioclástica, AG1 – areia grosseira litoclástica, AF3 – areia fina biolitoclástica, AL1 – areia litolodosa, LA2 – lodo litobioarenoso, L1 – lodo litoclástico.

Em termos de dinâmica sedimentar, a principal fonte de partículas sedimentares é o rio Sado que, com um percurso de 180 km e uma bacia hidrográfica que cobre 7606 km², desagua em Setúbal (a 4 km a NE da área de estudo). As partículas fluviais e as que resultam da erosão das arribas (por efeito da ação da ondulação que, neste setor tem amplitude dominante variando entre 1 e 4 m), são afetadas igualmente pela ação das marés semidiurnas (alturas de 1,3 a 3,9 m).

3. DADOS E METODOLOGIA

Os levantamentos de dados de sísmica de alta resolução com sistema *Boomer* e *Sub-Bottom Profiler* (SBP) realizaram-se em março de 2020 e abril de 2021, a bordo da lancha hidrográfica NRP "Auriga" e do navio oceanográfico NRP "Almirante Gago Coutinho", respetivamente, obtendo-se no total das duas campanhas 37 linhas sísmicas numa malha regular (Figura 1). O processamento dos dados incluiu filtros passa-banda, ganhos TVG, correção de maré, e remoção de ruído. A interpretação foi realizada de acordo com os critérios sismo-estratigráficos formalizados por Mitchum & Vail (1977) e permitiu a descrição das várias unidades

sísmicas, bem como a elaboração de um mapa de isopacas da subunidade DV (em milissegundos tempo duplo – *ms td*).

4. RESULTADOS

4.1. Caracterização das unidades sísmicas

A partir da interpretação das linhas de reflexão sísmica foi definida a unidade sísmica superficial S1, depositada discordantemente sobre a unidade sísmica mais profunda SR (Figura 3).

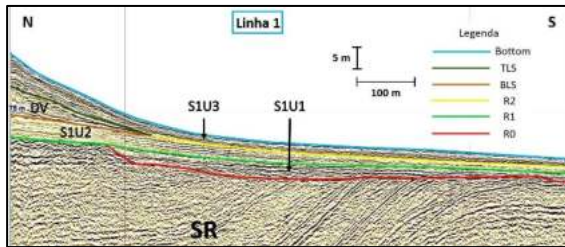


Fig. 3. Perfil de reflexão sísmica ilustrando a estrutura sismo-estratigráfica do setor estudado. Localização na Fig. 1.

De acordo com Vinhas (2018), a **unidade sísmica S1** é formada pelo empilhamento de 3 subunidades sísmicas (S1U1, S1U2 e S1U3), delimitadas no topo pelos refletores R1, R2 e *Bottom*. A unidade mais antiga, **unidade sísmica SR** (soco acústico ou *bedrock*), foi identificada em todas as linhas analisadas. Apresenta reflexões internas paralelas, com boa continuidade, de amplitude e frequência média a elevada, estando, localmente, afetadas por deformações frágil e dúctil. É limitada no topo pelo

refletor R0 (amplitude média a elevada, com boa continuidade lateral).

De forma geral a **subunidade sísmica S1U1**, distribuída pela plataforma até uma profundidade absoluta de cerca -90 m, é caracterizada por reflexões internas de média a elevada amplitude, com configuração paralela a sub-paralela. A **subunidade sísmica S1U2**, apresenta reflexões internas com amplitudes baixas a médias e frequência média, bem como configuração paralela e quase transparente. S1U2 é delimitada na base pelo refletor R1 (boa continuidade e amplitude média), sendo diacrónico de R0 em alguns locais. Esta unidade é limitada no topo pelo refletor R2. A **subunidade sísmica S1U3**, compreendida entre os refletores *Bottom* (de boa continuidade e elevada amplitude) e R2 (com boa continuidade e amplitude média, diacrónico de R1 nalguns locais), apresenta reflexões de continuidade, amplitude e frequência variáveis.

A configuração paralela e horizontal dos seus refletores internos torna-se sub-paralela e ondulada, como resultado de uma grande estrutura, que surge na sua base, sob a forma da **subunidade sísmica DV**, e afeta a estrutura sedimentar da zona de estudo (Figura 4). A subunidade DV está delimitada pelos refletores BLS (diacrónico de R2, de baixa amplitude e continuidade variável, difícil de identificar nalguns setores) e TLS (refletor bastante irregular e de amplitude baixa, nem sempre bem visível), sendo caracterizada por reflexões internas de elevada frequência e bastante difusas, apresentando alguma transparência e configuração caótica.

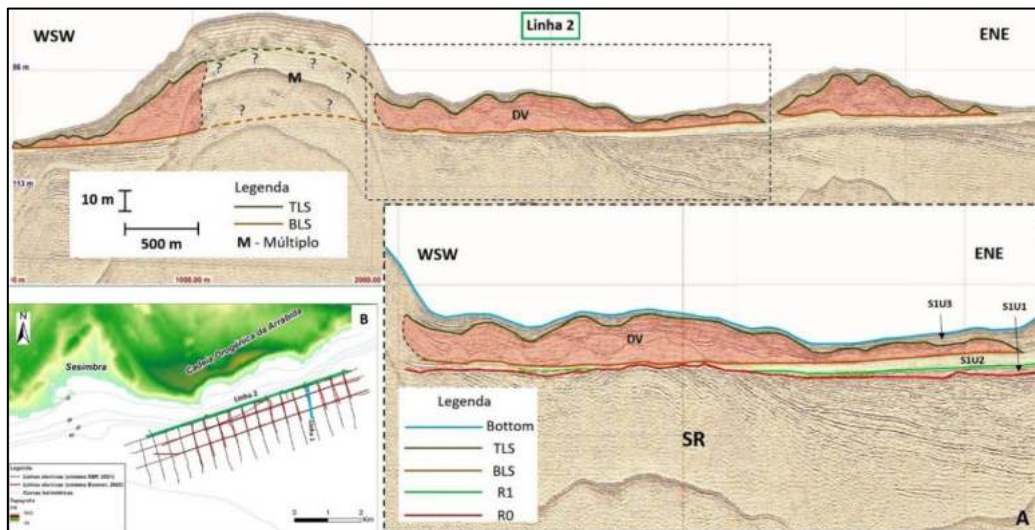


Fig. 4. Perfil de reflexão sísmica paralelo à linha de costa, com delimitação da estrutura sedimentar DV (área avermelhada) e detalhe na secção central do perfil onde se observa o enquadramento estratigráfico do depósito.

A estrutura DV está confinada a uma área compreendida entre Sesimbra (oeste) e a serra do Risco (este), apresentando uma direção geral NE-SW, sub-paralelo à linha de costa, apesar da sua

distribuição espacial, na zona de proteção total do parque marinho Luiz Saldanha, não ser conhecida.

Por se tratar de uma subunidade sísmica com atributos sísmicos bem distintos, esta unidade destaca-se das unidades sísmicas envolventes.

Considerando-se o tipo de processos que caracterizam o ambiente marinho atual, este tipo de fácies está frequentemente associado a deformações dúcteis provocadas por ascensões diapíricas e vulcânicas, ou a depósitos sedimentares gerados por eventos catastróficos de movimentos de massa (e.g. queda de

blocos, *landslides* (s.l.), *debris flow*, *slump*, entre outros). Nesse sentido, procurou-se conhecer a real distribuição do depósito DV, através da elaboração do mapa de isopacas da Figura 5, e identificar os possíveis mecanismos para a sua formação.

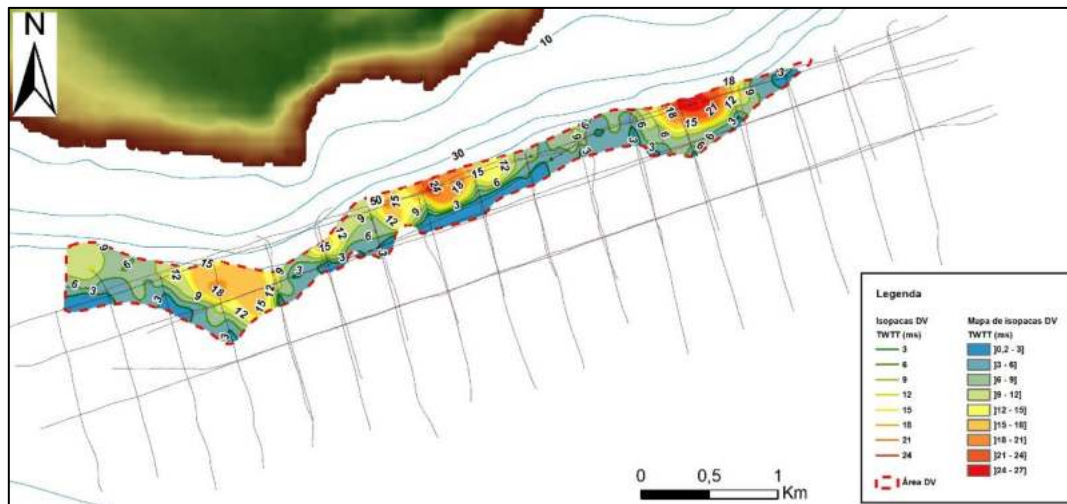


Fig. 5. Mapa de isopacas da subunidade sísmica DV, delimitada pelos refletores TLS e BLS, ilustrando a distribuição espacial do depósito, na área coberta pelos perfis da Figura 1 (assinalados a cinza na figura). Indicadas as linhas batimétricas (a azul) com espaçamento de 10m.

Através da análise expedita deste mapa observa-se que o depósito DV se estende por uma área de cerca de 1,8 km², sendo a sua espessura bastante variável ao longo da plataforma estudada. Tendo uma espessura média de 8 ms (td), é de chamar a atenção para a existência de duas áreas mais proeminentes, com espessuras superiores a 20 ms (td), tendo sido medido o valor máximo de 27 ms (td). Esta configuração permite avançar com a hipótese de a frente deste depósito ser extensa e apresentar, pelo menos, duas frentes de propagação sedimentar.

5. PROPOSTA DE MODELO EVOLUTIVO

Diversos estudos ao longo das décadas têm investigado a plataforma continental portuguesa e sua evolução pós-glacial. Dias (1987) foi o primeiro investigador português a estabelecer uma curva de variação do nível médio do mar (NMM) para a plataforma continental norte-portuguesa, tendo posteriormente sido estendida para os restantes setores setentrionais (Dias *et al.*, 2000). Na área adjacente à cadeia da Arrábida, os trabalhos de Brito (2009) e Vinhas (2018), focaram a evolução das sequências sedimentares, tendo colmatado no modelo evolutivo pós-miocénico para a área entre o cabo Espichel e o delta do rio Sado apresentado por Vinhas (2018).

Assim, as unidades sísmicas identificadas na zona em estudo (S1U1, S1U2, S1U3) foram formadas durante a sucessão das diferentes fases eustáticas posteriores ao último máximo glacial (UMG) há 18.000-20.000 anos, período em que a linha de costa

se encontrava abaixo dos 130 m de profundidade e as formações mais antigas (*bedrock*) da zona de estudo se encontravam totalmente expostas aos agentes de erosão subaéreos. Este período de aplanção está materializado pelo refletor R0.

Com o início da deglaciação, o NMM começou a subir em cota, provocando a lenta migração dos ambientes litorais e deposição da unidade S1U1 sobre a superfície R0, nas áreas imersas da plataforma. De acordo com a curva de Dias (1987), a estabilização do NMM, aos -100 m, permitiu a construção da superfície R1, tendo este período sido propício à formação de arribas de baixo relevo e à acumulação de cordões litorais. A rápida subida do NMM (60 m em 2000 anos) resultou na deposição da unidade S1U2 sobre R1, tendo este processo sido interrompido pela crise climática do *Dryas Recente*, durante a qual o NMM desceu 20 m (em cerca de 1000 anos). Este movimento regressivo ficou marcado pela superfície R2, coberta pela unidade S1U3, formada durante o Holocénico, com início há 10.000 anos, período em que o NMM subiu desde os 60 m de profundidade até à cota atual.

Relativamente à subunidade sísmica DV, que se encontra na base de S1U3 (início do Holocénico), várias hipóteses se podem avançar para a sua formação, tendo sempre em conta que a sua estrutura interna indicia um evento de elevada energia. Assim, a formação de DV pode resultar de: 1) processo de desmantelamento da arriba da Serra do Risco, no final do *Dryas Recente*, altura em que o NMM se encontrava a -60 m; 2) processo de instabilidade sedimentar, intra-unidade S1U3, provocada por

evento sísmico; 3) fase de maior sedimentogénese, ocorrida há cerca de 8.000 anos e posterior instabilidade sin-sedimentar; 4) processo de instabilidade sedimentar, causada por ajuste no processo de migração do NMM e eventual colapso de estrutura de acumulação costeira (paleo-litoral). Após a sua formação, a estabilização da taxa de subida do NMM permitiu a fossilização do DV, não se tendo verificado outros eventos semelhantes.

Para os mecanismos apontados podem ainda contribuir, isoladamente ou não, outros aspetos especificamente associados ao enquadramento da área de estudo, nomeadamente: a geomorfologia costeira, a estrutura e geologia da cadeia da Arrábida, a eventual acumulação excessiva de água na rede de fracturas e nos aquíferos das formações geológicas, a variabilidade espacial das taxas de sedimentação e da descarga fluvial do rio Sado, a atividade sísmica da região. Relativamente a este último mecanismo, existem estruturas sedimentares semelhantes na zona deltaica do Tejo e na planície abissal do Tejo e que foram atribuídas a evento sísmico ocorrido há cerca de 8.000 anos (Masson *et al.*, 2011; Terrinha *et al.*, 2019).

Não obstante os dados apresentados, aos quais se adicionam os de Oliveira *et al.* e de Pombo *et al.* (este volume), ainda não é possível confirmar nenhuma das hipóteses apresentadas, sendo necessária a aquisição de dados adicionais.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para compreender as características da camada sedimentar marinha na plataforma adjacente à cadeia da Arrábida e auxiliar o seu mapeamento, objetivos do programa SEDMAR, foram analisados e interpretados 37 perfis sísmicos de alta resolução.

Na sequência sísmo-estratigráfica foi evidenciado, na base da unidade sísmica mais superficial, um extenso depósito com espessura média de 8 ms (td) e estrutura interna caótica. O mapa de espessuras revelou grande variabilidade morfológica, com duas áreas de espessura superior a 20 ms (td), sugerindo duas frentes de progradação.

Várias hipóteses estão em análise, tendo em vista a compreensão da origem desta unidade sedimentar, tão marcante na estrutura da camada sedimentar e com implicações nos modelos evolutivos do ambiente costeiro após o Último Máximo Glaciário. Apesar de não estar descartado um desmantelamento da cadeia adjacente, em ambiente subaéreo (durante o episódio do *Dryas Recente*), a hipótese mais viável parece ser um movimento de massa ocorrido em ambiente imerso, como resultado, combinado ou não, dos efeitos de um sismo e de ajustes nos ambientes sedimentares de plataforma interna, em franca evolução até à estabilização do nível médio do mar na sua posição atual.

REFERÊNCIAS

- Brito, P. (2009). Impactos da elevação do nível médio do mar em ambientes costeiros: O caso do estuário do Sado. Tese de doutoramento, Departamento de Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (*não publicado*).
- Dias, J. M. A. (1987). Dinâmica sedimentar e evolução recente da plataforma continental setentrional. Dissertação para obtenção do grau de Doutoramento. Universidade de Lisboa, Lisboa. 384 pp. (*não publicado*).
- Dias, J.M.A.; Boski, T.; Rodrigues, A.; Magalhães, F. (2000). Cost line evolution in Portugal since the Last Glacial Maximum until present – a synthesis. *Marine Geology* 170, PII: S0025-3227(00)00073-6, 177-186.
- Instituto Hidrográfico (2010). Sedimentos superficiais da plataforma continental. Folha SED5 (Cabo da Roca ao Cabo de Sines), esc. 1:150 000, 1ª Edição.
- Masson, D.G., Arzola, R.G., Wynn, R.B., Hunt, J.E., Weaver, P.P.E. (2011). Seismic triggering of landslides and turbidity currents offshore Portugal. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 12, Q12011, doi: 10.1029/2011GC003839.
- Mitchum, R. M. Jr.; Vail, P. R. (1977). Seismic stratigraphy and global changes of sea level, part 7: Seismic stratigraphic interpretation procedure. In: Seismic Stratigraphy-Applications to Hydrocarbon Exploration. Payton, C. E. (Ed.). *American Association of Petroleum Geologists, Memory* 26, 135 – 143.
- Terrinha, P.; Duarte, H.; Brito, P.; Noiva, J.; Ribeiro, C.; Omira, R.; Baptista, M.A.; Miranda, M.; Magalhães, V.; Roque, C.; Tagusdelta cruise team (2019). The Tagus River delta landslide, off Lisbon, Portugal. Implications for Marine geohazards. *Marine Geology* 416, 105983, p. 16. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2019.105983>
- Vinhas, A. (2018). Estratigrafia sísmica da plataforma continental ao largo da cadeia da Arrábida: contributo para o conhecimento da evolução pós-miocénica. Dissertação de mestrado, Dep. de Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 80pp. (*não publicado*).

A microscopic view of numerous blue, spherical cells or bubbles of varying sizes, some with internal structures, set against a dark blue background. The cells are arranged in a somewhat organized pattern, with some larger cells and many smaller ones. The lighting creates highlights and shadows, giving the cells a three-dimensional appearance.

**M
E
D
I
C
A
M
B
I
E
N
T
E**
**Q
U
Í
M
I
C
A
M
B
I
E
N
T
E**

Evolution of Water Quality surrounding the CTRSU Valorsul (Tagus Estuary, 1999-2023)

L. Duarte (1), C. Borges (1), C. Macedo (1), J. Almeida (1), C. Palma (1)

(1) Instituto Hidrográfico, Rua das Trinas, 49 1249-093 LISBOA, PORTUGAL. leila.duarte@hidrografico.pt

Abstract: This study presents the results obtained from the first 25 years of the monitoring program of the Tagus estuary area surrounding the solid waste treatment facilities of Lisbon's metropolitan area, focusing on a selected set of parameters considered key elements for evaluating the environmental quality of the studied area. The obtained results show that, in general, for the period under analysis, it is possible to observe a trend in the average concentration of the physico-chemical parameters, which can be assumed as an indicator of the improvement of the water quality of the area during the analysed period. The results also allow us to conclude that the operations of the CTRSU facilities have no significant negative impact on the water quality of the studied area.

Keywords: long-term monitoring, Tagus estuary, trends evaluation, water quality.

1. INTRODUCTION

Since 1999, the Portuguese Hydrographic Institute carries out a monitoring program on the area of the Tagus estuary surrounding the solid waste treatment facilities of Lisbon's metropolitan area (CTRSU Valorsul) in order to evaluate the possible impacts of these facilities in the Tagus estuary environmental quality. The program started one year before the facilities started to work in routine, to set the reference situation, and is conducted uninterruptedly until the present day. One of the program's components involves the periodic monitoring of the water quality in three points of the estuary (Table i and Figure 1), with the analysis of a vast set of physico-chemical parameters, either naturally occurring and/or of possible anthropogenic origin, such as nutrients and trace metals. The nutrients analysed for the present study include nitrates, nitrite, reactive phosphorus, and ammonia. The metals analysed encompass cadmium, copper, lead, nickel, zinc, arsenic, and mercury. Classical parameters like temperature, pH, dissolved oxygen, oxygen saturation percentage and salinity were also analysed. These physico-chemical parameters are critical for evaluating the quality of different water samples, as high concentrations of nutrients and metals serve as indicators of pollution sources and, consequently, lower water quality (Palma and Valença, 2016).

Table i. Coordinates of the Tagus estuary sampling stations (referred to the WGS84 datum)

Sampling Station	Latitude	Longitude
LA1	38-52-36.65 N	009-01-16.05 W
LA2	38-49-39.76 N	009-04-44.13 W
LA3	38-49-05.66 N	009-03-02.02 W



Fig. 1. Location of the Tagus estuary sampling stations (implanted over a Google Earth image).

2. EXPERIMENTAL

Since its implementation, the monitoring program has been periodically evaluated, and adjusted when necessary. This has led, e.g., to the introduction of ammonia analysis in 2003 and to adjustments in the periodicity of the sampling campaigns. For the period 1999-2003, the program was conducted on a monthly basis, from 2004 to 2009, it was conducted once every two months, and since 2010, it has been conducted once every three months. Sampling was carried out during neap tide conditions at the standing periods of high and low tides. Water samples were collected at 1m depth using 5- or 8-liters Niskin bottles. In situ measurements were performed at the same depth.

Nutrient analysis was performed by UV/Vis Spectroscopy – segmented flow analysis (SFA), using methods specifically developed and validated

for the analysis of saline waters; for the period 1999-2023. Temperature was determined by inversion thermometers (1999-2007) and thermistors (2008 onwards); pH was determined using pH-meters with glass electrodes; salinity using high resolution salinometers; and dissolved oxygen was determined using the Wikler method (predominant in 1999-2010), and by the electrochemical method (predominant from 2011 onwards). Trace metals were determined by Atomic Absorption Spectrometry (cold vapor technique for mercury, hydride generator for arsenic and flame for the other trace metals).

3. RESULTS

All results are presented using annual averages over the period from 1999 to 2023. The dotted lines visible in the next graphs represent the trend lines for each sampling stations.

3.1. Nutrients

Over the 25-year period, an analysis of different nutrients, including nitrates (NO_3), nitrite (NO_2), reactive phosphorus (PO_4), and ammonia (NH_3), was conducted. The results indicate that, regardless of the nutrient, concentrations show higher values during low tide than during high tide, which is consistent with the inflow of nutrient-richer freshwater in the first tidal situation; seasonal variations are also observed, with higher concentrations in winter and

lower concentrations in summer. Additionally, it was also possible to observe that the concentration of nutrients shows a tendency to decrease over time. This trend was observed both under low and high tide conditions, with the negative slope being more pronounced under high tide conditions for all nutrients. This occurs because of the smaller influx of freshwater (which is richer in nutrients) under high tide conditions, and the greater influx of saline water, resulting in the observable lower concentration of nutrients over time. An example of this decrease can be seen in Figure 2 for the mean of nitrates concentration from 1999 to 2023, in which we can see that over time, the water quality of the Tagus estuary has been improving, given the decrease in the concentration of nutrients, and considering that a low concentration is indicative of better water quality.

Furthermore, the analysis of nutrient levels in water samples collected from the Tagus River estuary revealed that, similarly to NO_3 , the concentration of NH_3 also decreased over time. However, an intriguing observation was made when comparing NH_3 levels across different sampling stations. As depicted in Figure 3, station La2 exhibits substantially higher NH_3 concentrations compared to stations La1 and La3. This suggests that either tidal conditions have a particular influence at this station, or that runoff from a nearby drainage ditch (station Lb, a station not representative of this work, but illustrated in Figure 1) may directly influence the behaviour observed on station La2, given its proximity.

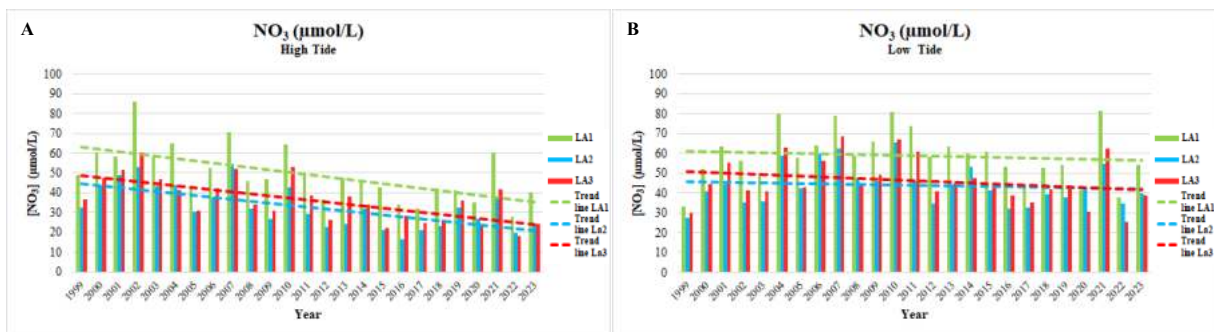


Fig. 2. Annual mean concentration of dissolved oxidized nitrogen in high (A) and low tide (B) over the period from 1999 to 2023.

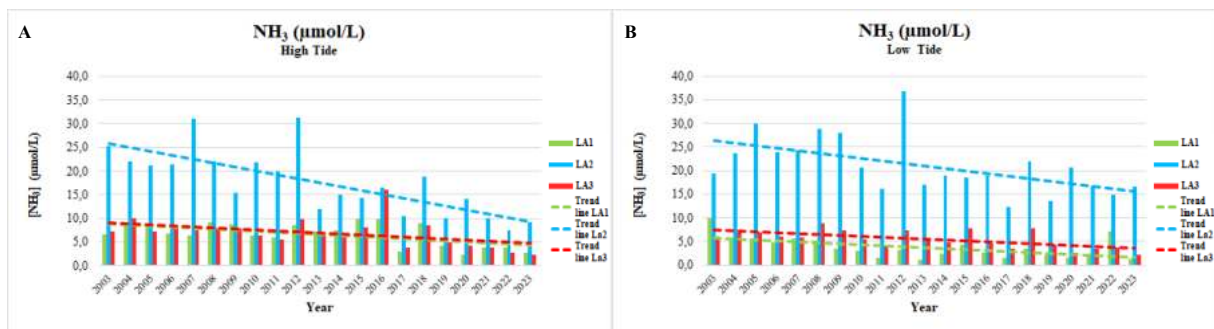


Fig. 3. Annual mean concentration of ammonia in high (A) and low tide (B) over the period from 1999 to 2023.

3.2. Classic Parameters

Regarding the classical parameters, analysed, notable results were observed. Concerning the determination of dissolved oxygen, this is discussed in terms of oxygen saturation percentage (%O₂) to enable comparison between different estuary stations (La1, La2 e La3), independently of temperature and salinity effects. Under high tide conditions, the average %O₂ values range from 85,7% to 106,0% for La1, 78,5% to 99,8% for La2, and 87,5% to 106,0% for La3. Under low tide conditions, the average %O₂ values range from 81,0% to 107,0% for La1, 85,2% to 101,8% for La2, and 85,5% to 102,3% for La3.

As per Decreto-Lei no. 236/98, dated august 1, 1998, the minimum permissible value of oxygen saturation in coastal or shellfish waters is 80% (DL 236, 1998). Although this reference value does not directly apply to the types of water in this study, it remains a reliable indicator of trophic status. Given that, in general, the average dissolved oxygen values are above 80%, it can be noted that we are dealing with an oxygenated environment. Additionally, based on the analysis of Figure 4, it is evident that the mean values of %O₂ have been progressively increasing over the past 25

years. This trend indicates an enhancement of oxygenation and, consequently, an improvement in the water quality of the estuary.

Still regarding classical parameters, it was found that the temperature remained stable over the course of the 25 years, while pH exhibited a slight decrease, within normal variations, for saline and transitional waters (data not presented). In terms of the determination of salinity in the waters of the Tagus estuary, it has been observed that salinity increases during high tide conditions and decreases during low tide conditions over time (see Figure 5). These results are consistent with the tidal regime and the findings obtained for nutrients, considering that, since the content of nutrients decreases over time, it was expected that salinity would increase during high tide, given that the tidal regime is characterized by a lower nutrient influx and higher saline water input. Conversely, during low tide, with a higher influx of freshwater and an increased nutrient content, salinity was expected to decrease. Furthermore, from the observation of salinity results, it was noted that the station La2, in the Tagus River estuary, exhibits higher salinity compared to stations La1 and La3.

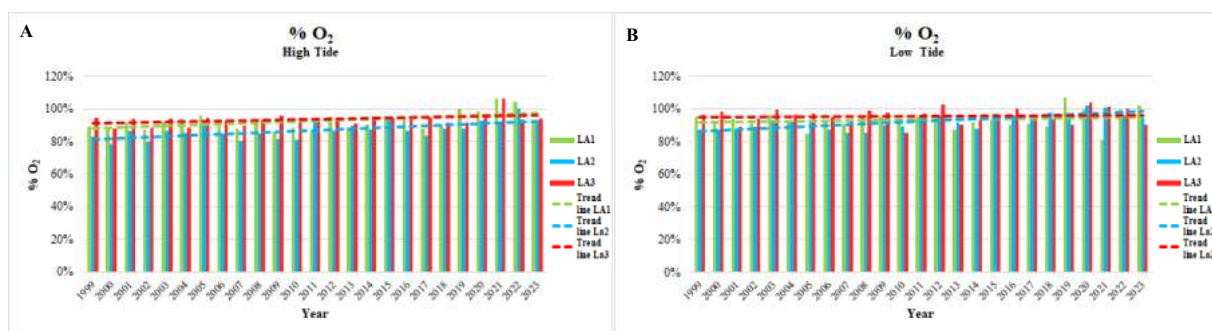


Fig. 4. Annual mean concentration of %O₂ in high (A) and low tide (B) over the period from 1999 to 2023.

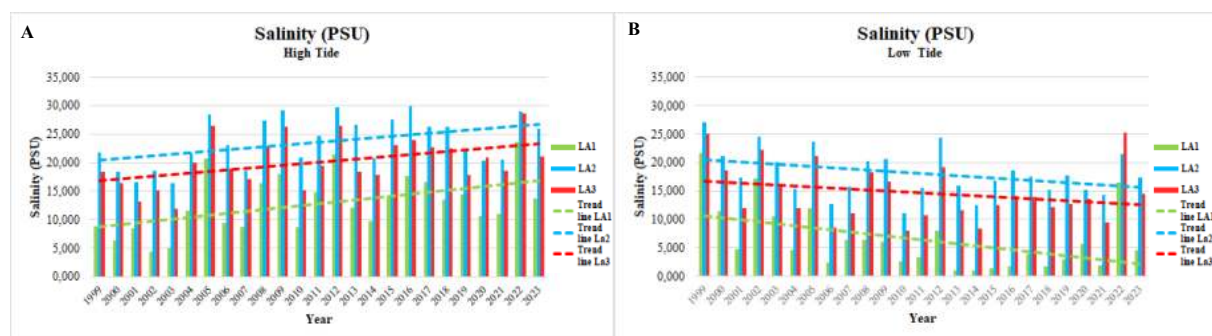


Fig. 5. Annual mean of salinity values in high (A) and low tide (B) over the period from 1999 to 2023.

3.3. Metals

Over the past 25 years, in general, a reduction in the concentration of metals, notably in arsenic (As) and lead (Pb) has been noted, being this trend indicative of an improvement in the estuarine water quality during this period of time (see Figures 6 and 7).

Additionally, based on the annual analysis of As concentrations in water samples collected from the Tagus estuary, average levels during high tide range between 0,939 to 4,020 µg/L for La1, 0,786 to 3,160 µg/L for La2, and 0,271 to 2,963 µg/L for La3. During low tide, these levels vary between 0,378 to 3,458 µg/L for La1, 0,976 to 3,160 µg/L for La2, and 0,894 to 3,315 µg/L for La3. Regarding Pb

concentrations in water samples, annual average concentrations during high tide range between 0,015 to 1,623 $\mu\text{g/L}$ for La1, 0,057 to 1,383 $\mu\text{g/L}$ for La2, and 0,015 to 1,565 $\mu\text{g/L}$ for La3. During low tide, these concentrations range between 0,015 to 1,283 $\mu\text{g/L}$ for La1, 0,015 to 1,216 $\mu\text{g/L}$ for La2, and 0,015 to 1,559 $\mu\text{g/L}$ for La3.

According to the Ecotoxicological Assessment Criteria (EAC), established by OSPAR in 2000 (OSPAR, 2000), As levels in water samples should be

within the range of 1 to 10 $\mu\text{g/L}$, and Pb levels should fall between 0,5 and 5 $\mu\text{g/L}$. Considering this criterion and conducting a comparative analysis with the observed ranges for the different stations La1, La2, and La3 over the past 25 years, it can be concluded that the annual average concentrations of these metals fall within the specified EAC reference levels, whereby these findings do not suggest a significant adverse impact on the water quality of the Tagus estuary.

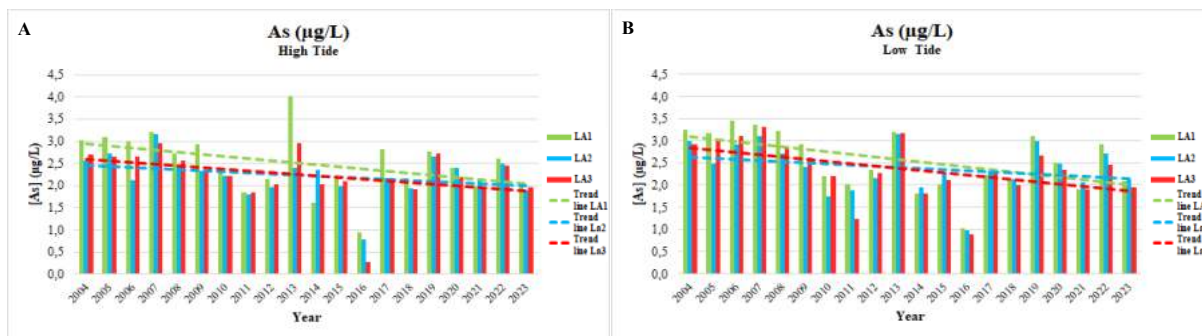


Fig. 6. Annual mean concentration of As in high (A) and low tide (B) over the period from 2004 to 2023.

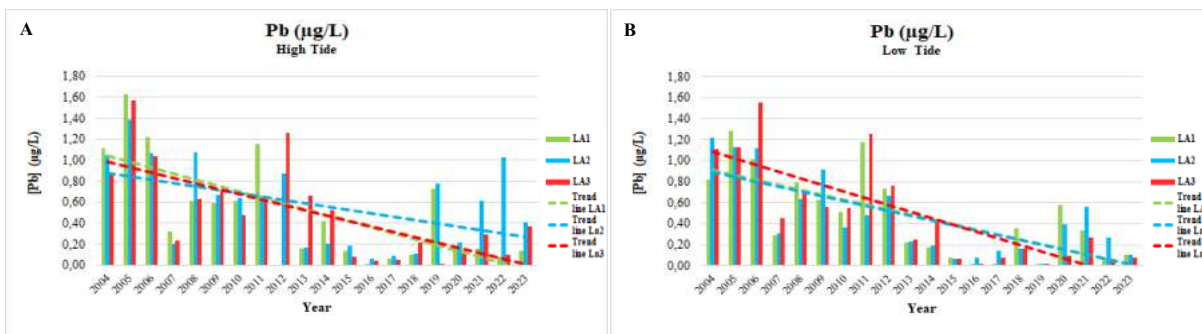


Fig. 7. Annual mean concentration of Pb in high (A) and low tide (B) over the period from 2004 to 2023.

4. CONCLUSIONS

This study presents the results obtained from the first 25 years of the monitoring program, for a selected set of parameters, including temperature, dissolved oxygen, nutrients and trace metals, all of them considered key elements for the evaluation of the environmental quality of the studied area of the Tagus estuary.

When the results are analysed in terms of their evolution along the period under analysis, it is possible to observe a temporal trend in the average concentration of almost all parameters (e.g. nutrients and metals), which can be interpreted as an indicator of the improvement of the water quality in the area of interest, during the specified time period.

The results also allow us to conclude that the operations of the CTRSU facilities have no

significant negative impact on the water quality of the studied area of the Tagus estuary.

Acknowledgements

We would like to thank Valorsul, S.A for authorizing the use of their data in this work.

REFERENCES

- Decreto de Lei n.º 236/1998, de 1 de Agosto. D.R. I Série 176, 3676-3721.
- OSPAR Commission (2000) Quality Status Report. OSPAR Commission. 108 pp.
- Palma, Carla, Valença, Manuela (2016), Programa de monitorização da qualidade das águas e dos sedimentos da CTRSU – Valorsul (1999-2015), Instituto Hidrográfico, 26 pp.

Persistent organic pollutants level assessment in surface sediments from Portuguese marine environment

Brás Gomes, G. (1); Neto, C. (1); Santos, P. (1); Rocha, A. C. (1); Palma, C. (1)

(1) Instituto Hidrográfico, rua das Trinas, 49, 1249-093 Lisboa, Portugal

Abstract: Persistent organic pollutants (POPs) are hazardous chemical contaminants that persist for long periods in the environment after their release. They are easily transported and dispersed by air and ocean currents and are capable of accumulating in biological tissues and propagating along the food chain.

In order to monitor these compounds, the Hydrographic Institute collected and analysed samples of marine sediment to assess their presence: polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), polychlorinated biphenyls (PCBs) and organochlorine pesticides (OCPs). Gas chromatography with mass spectrometry and electron capture detectors were used to analyse PAHs, and both PCBs and OCPs, respectively.

Results were used to evaluate the spatio-temporal POPs distribution and the contamination level of the analysed sediments by comparison with applicable international guidelines and national legislation. The results indicate that sediments from the Portuguese marine environments are clean or, in the worst-case scenario for some samples, have trace levels of POPs.

Keywords: Persistent organic pollutants, marine sediment, gas chromatography.

1. INTRODUCTION

Marine pollution has escalated over the past 70 years, affecting the entire marine environment – from surface waters to the deepest sediment. One critical concern is the presence of Persistent Organic Pollutants (POPs). They are organic compounds that resist degradation through chemical, biological, and photolytic processes. These toxic substances persist in the environment, accumulating in living organisms and posing risks to both human health and the ecosystem worldwide (Understanding POPs - ECHA, s.d.). They can be transported across international borders by air, water, or migratory species, reaching regions where they were never produced or used. Three significant categories of POPs (European Union, 2019; UNECE POPs Protocol, 1998) are:

1. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs): These compounds have natural or anthropogenic source. The anthropogenic source result from activities like petrochemical industry processes, combustion, and oil spills. PAHs contamination is widespread, with crude oil introducing over 800 million liters annually into the marine environment (Catania et al., 2020).
2. Organochlorine compounds: These are synthetic chemicals containing carbon, hydrogen, and chlorine atoms. Examples include the organochlorine pesticides (OCPs), such as dichlorodiphenyltrichloroethanes (DDTs), hexachlorobenzene (HCB), and dieldrin.

3. Polychlorinated biphenyls (PCBs). PCBs are a group of 209 structurally related compounds. They were used in electrical equipment, hydraulic fluids, and other industrial applications. Despite being banned or restricted, organochlorines persist in the environment due to their stability and lipophilic nature.

To address these risks, international treaties like the Stockholm Convention and the Aarhus Protocol regulate POPs globally. The Stockholm Convention is a multilateral environmental agreement that aims to protect human health and the environment from POPs, seeking to eliminate or restrict the production and use of POPs globally. It plays a crucial role in safeguarding our planet by addressing these hazardous substances. In the European Union, the POPs Regulation (European Union, 2019) aims to protect human health and the environment by controlling POPs by prohibiting or restricting their production, market placement, as well as minimizing environmental releases, managing restricted stockpiles, and ensuring proper disposal of POP-contaminated waste. Monitoring and coordinated efforts are essential to mitigate the impact of these persistent pollutants.

In order to monitor these compounds, the Hydrographic Institute (IH) collected and analysed samples of marine sediment and to assess the level of pollution in accordance to applicable international guidelines (OSPAR, 2014). In this work, IH assesses levels of POPs, namely PAHs, PCBs and OCPs, in samples from monitoring projects AQUIMAR and AQUASADO. AQUIMAR project consisted in several sampling campaigns of five coastal areas and

four Portuguese inland waters: Ria de Aveiro, Ria Formosa, Mira and Mondego rivers. AQUASADO project consisted in several campaigns in Sado estuary.

2. EXPERIMENTAL

The process of collecting, preparing, and preserving marine sediment samples involves several steps. Samples from estuarine areas (Fig. 1) were collected using a *Petite Ponar* Grab and samples from ocean stations of the Portuguese coast (Fig. 1) were collected with a *Smith-McIntyre* dredge.

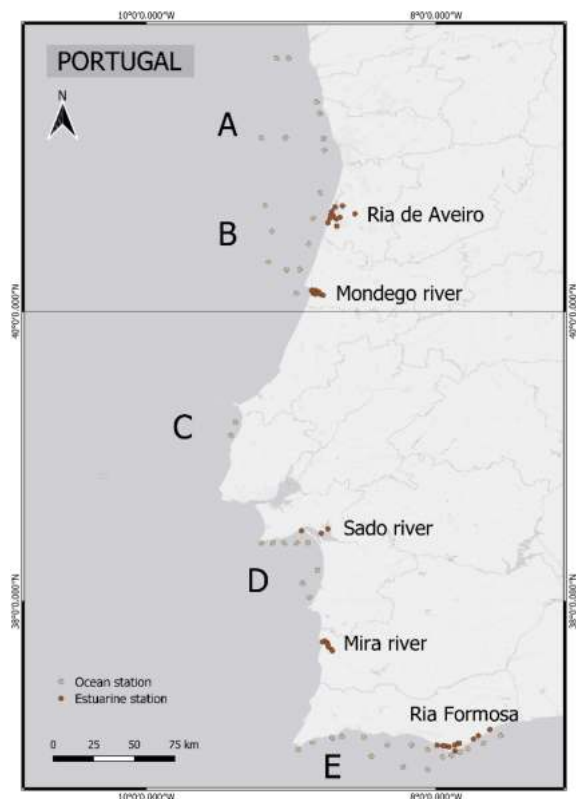


Fig. 1. Sediment sampling stations: ● – Ocean Station; ● – Estuarine station.

These samples are then transferred into clean plastic containers and preserved under freezing if not immediately forwarded for pretreatment. Then, the sediment is sieved passing through a sieve with 2 mm of mesh size. The 2 mm mesh size fraction was lyophilized and grounded with mortar mill to remove water and achieve uniform particle size and homogeneity.

After pretreatment, sediment samples are submitted to the analytical procedure, according to methods developed by the laboratory, which includes: (1) extraction using pressurized liquid extraction (PLE), (2) purification of extracts using adsorption chromatography with silica gel and basic aluminum oxide, and (3) instrumental analysis by gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) for PAHs analysis, and gas chromatography with an electron capture detector (GC-ECD) for OCPs and PCBs analysis. Since the methods for determining

PAHs, PCBs and the pesticide HCB are accredited according to ISO/IEC 17025:2018, a strict quality control on the analyses was carried out which included analysis of blanks and recovery tests, as well as duplicate analysis and analysis of samples from proficiency tests.

3. RESULTS

In this study, 68 samples of marine sediment (43 oceanic samples and 25 estuarine samples) were analysed, representing a total effort of 131 aliquots analysed, since PAHs and OCPs do not share the same analysis method.

It was possible to verify, in the samples with quantifiable amounts of PAHs, that the greatest contribution to the sum of PAHs (triphenylene and 16 priority PAHs of United States Environmental Protection Agency (EPA)), henceforth Σ PAHs, is from high molecular weight (HMW; Benzo(b)fluoranthene, Benzo(k)fluoranthene, Benzo(a)pyrene, Indeno(1,2,3-c,d)pyrene, Dibenzo(a,h)anthracene and Benzo(g,h,i)perylene) PAHs. For instance, the sum of HMW (Σ HMW) is, in all analysed samples, higher than the sum of low molecular weight (LMW; Naphtalene, Acenaphthylene, Acenaphthene, Fluorene, Phenanthrene, Anthracene, Fluoranthene, Pyrene, Benzo(a)anthracene, Chrysene) PAHs (Σ LMW) which is below the quantification limit (LOQ) in many samples. This means that the presence and concentration of PAHs with 4 and 5-6 rings in their composition is far more relevant (Fig. 2). Of these PAHs, the following stand out: Fluoranthene, Pyrene, Benzo(a)pyrene, Indeno(1,2,3-c,d)pyrene, and Benzo(g,h,i)perylene.

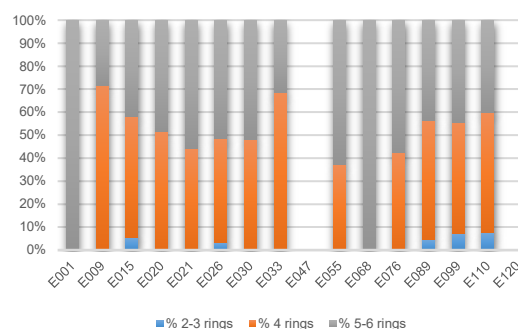


Fig. 2. Distribution of PAHs by number of rings in samples from Area E (absence of values (<LOQ): <27.0 $\mu\text{g}/\text{kg dw}$).

In Area E, for instance, out of 16 samples analysed, 14 of them contain HMW PAHs, and of these 14 only 5 contain LMW PAHs. This area was where the highest Σ PAHs was verified, 1101 $\mu\text{g}/\text{kg dw}$ (E110). In this area, concentrations varied between <27.0 $\mu\text{g}/\text{kg dw}$ and 1101 $\mu\text{g}/\text{kg dw}$ (Fig. 3). In areas A and D, maximum Σ PAHs of 266 $\mu\text{g}/\text{kg dw}$, 14.7 NM away from the coastline, and 647 $\mu\text{g}/\text{kg dw}$ 700 yd from shore, were verified, respectively.

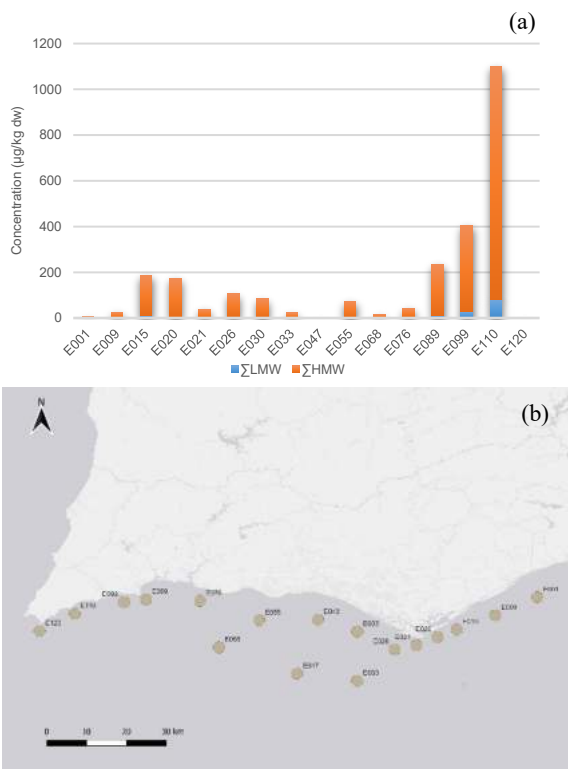


Fig. 3. Contribution of Σ LMW and Σ HMW to total concentration of PAHs in Area E (a) and sampling points (b) (absence of values (<LOQ): <27.0 $\mu\text{g}/\text{kg dw}$).

It was also in Area E where the highest number of samples with OCPs was verified, for example DDTs. In some samples, DDTs are the only group of OCPs present. In Area D, on the other hand, PCBs are the predominant group of analysed POPs, with PCB 138 and PCB 153 standing out. The maximum value of the sum of OCPs, Σ OCPs, in areas D and E are, respectively, 3.71 $\mu\text{g}/\text{kg dw}$ and 2.20 $\mu\text{g}/\text{kg dw}$.

Also in the estuarine samples, the dominant presence of HMW PAHs is verified. However, the presence of LMW PAHs is transversal to all analysed samples. For example, in ria de Aveiro, the LMW PAHs represent half of the Σ PAHs in 2 out of 11 samples analysed. It is also possible to verify higher concentrations in rias compared to rivers. For instance, rias of Aveiro and Formosa concentrations varied between minimums of <27.0 $\mu\text{g}/\text{kg dw}$, for both estuarine areas, and maximums of 408 $\mu\text{g}/\text{kg dw}$ and 489 $\mu\text{g}/\text{kg dw}$, respectively, where in Mondego and Mira rivers concentrations varied between minimums of <27.0 $\mu\text{g}/\text{kg dw}$ and 25.1 $\mu\text{g}/\text{kg dw}$, and maximums of 4.62 $\mu\text{g}/\text{kg dw}$ and 64.3 $\mu\text{g}/\text{kg dw}$, respectively. The exception is the estuary of the Sado river, whose maximum concentration is 860 $\mu\text{g}/\text{kg dw}$.

As for the OCPs, ria de Aveiro is the estuarine region with the highest concentrations in PCBs (Fig. 4). It is also where the Σ OCPs is highest, 2.02 $\mu\text{g}/\text{kg dw}$, double the second estuarine region with the highest concentrations in OCPs, the Mira river with 1.02

$\mu\text{g}/\text{kg dw}$. It is also in these two regions where the Σ DDT is highest.

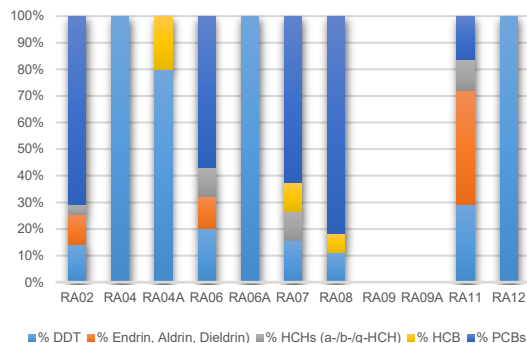


Fig. 4. Distribution of OCPs in ria de Aveiro samples by group of compounds (absence of values (<LOQ)).

The presence of HCB is also verified in several samples from the estuarine regions, contrasting with the oceanic samples with HCB content below LOQ.

The results obtained from the study were used to assess the spatio-temporal distribution of POPs in the environment. This involves understanding how these pollutants are dispersed across different geographical locations and how their concentrations change over time. The importance of this evaluation lies in its ability to provide insights into the movement and persistence of these pollutants, which can have significant implications for environmental health and policy.

4. CONCLUSIONS

The study was part of the projects known as AQUIMAR and AQUASADO. One of the key findings from these projects was related to the sediment quality in the Portuguese marine environments. The results indicate that the sediments in the studied regions are predominantly clean. This study is a positive sign, suggesting that the marine ecosystems in Portugal is relatively free from the harmful effects of POPs.

However, it is important to note that in the worst-case scenarios, some samples did show trace levels of POPs. While these levels are significantly lower compared to other regions, their presence cannot be ignored. Trace levels can accumulate over time and potentially pose a risk to the marine life and the overall health of the marine ecosystem.

In conclusion, the results from the study and the AQUIMAR and AQUASADO projects provide valuable data on the presence and distribution of POPs in the Portuguese marine environments. They highlight the importance of continuous monitoring and evaluation to ensure the health and sustainability of our marine ecosystems.

Acknowledgments

This work was supported by the Instituto Hidrográfico through the Operational Program Mar2020 through project “AQUIMAR – Caracterização geral de áreas aquícolas para estabelecimento de culturas marinhas”

(MAR2020 n° MAR-02.01.01-FEAMP- 0107) <https://aquimar.hidrografico.pt/> and Operational Program Mar2020 through project “AQUASADO – Promoting Sustainable Aquaculture in the Sado Estuary” (MAR-02.01.91-FEAMP-0051REF) <https://aquasado.pt/project/>

REFERENCIAS

- Catania, V., Cascio Diliberto, C., Cigna, V., & Quatrini, P. (2020). Microbes and Persistent Organic Pollutants in the Marine Environment. *Water, Air, & Soil Pollution*, 231(7).
- Jones, K. C., & de Voogt, P. (1999). Persistent organic pollutants (POPs): state of the science. *Environmental Pollution*, 100(1-3), 209–221.
- European Union (2019). Regulation (EU) 2019/1021 of the European Parliament and of the Council of 20 June 2019 on persistent organic pollutants.
- OSPAR (2014). Levels and trends in marine contaminants and their biological effects - CEMP Assessment Report 2013. OSPAR Commission, 631/2014, 20-21.
- Understanding POPs - ECHA. (s.d.). Homepage - ECHA. <https://echa.europa.eu/understanding-pops>.
- UNECE POPs Protocol, (1998). Available at <https://unece.org/environment-policy/air/protocol-persistent-organic-pollutants-pops>. (accessed on July 15, 2024).

Evolution of Sediment Quality in the Tagus Estuary (2002-2023)

J. Almeida (1), C. Macedo (1), P. Santos (1), C. Rocha (1) e C. Palma (1)

(1) Instituto Hidrográfico, R. Trinas 49, 1249-093 Lisboa, Portugal. Vaz.Almeida@hidrografico.pt

Abstract: Sediments are crucial to the structure and function of aquatic ecosystems. An effective monitoring of sediment quality can be used to provide relevant data concerning aquatic environment health, particularly in estuarine areas, where the influence of human activity tends to be noticeable. The water and sediment quality monitoring program at the Urban Solid Waste Treatment Center (CTRSU) implemented in the Tagus estuary by Valorsul S.A. has been carried out by the Hydrographic Institute in order to monitor and evaluate the environmental quality surrounding the CTRSU. We present and discuss the results obtained over the period 2002-2023 regarding pollutants content in surface sediments, in particular heavy metals, polycyclic aromatic hydrocarbons, polychlorinated biphenyls and organochlorinated pesticides, and compare it with sediment quality guidelines. Evaluation of the spatio-temporal distribution of the various pollutants shows a general tendency for clean sediments or with trace pollution according to national environmental legislation for dredged materials.

Keywords: environmental quality, estuary, monitoring, pollutants, sediments.

1. INTRODUCTION

Estuaries are preferential sites of human settlement due to relatively stable weather conditions and access to fresh water. The development of urban areas, industrial and agricultural activities has resulted in a progressive accumulation of pollutants in various estuarine systems. Metals and Persistent Organic Pollutants (POPs) are of global concern due to their potential for long-term accumulation in sediments (Chapman and Wang, 2001).

Although effluents treatment has been improved in the latest decades, the Tagus estuary represents a sink of historically accumulated metals, metalloids and organic compounds (Duarte *et al.*, 2008). An analysis of historical data allows for an assessment of the evolution of sediment quality.

The company Valorsul, S.A., is responsible for the urban solid waste treatment in the Great Lisbon and West areas. The water and sediment quality monitoring program at the Urban Solid Waste Treatment Center (CTRSU) implemented in the Tagus estuary has been carried out by the Hydrographic Institute (IH) in order to monitor and evaluate the environmental quality. In this study, a large data set on sediment metals and POPs collected over the 2002-2023 period is used to reconstruct the temporal distribution of these pollutants and to assess the evolution of sediment quality surrounding the CTRSU in the Tagus estuary.

2. STUDY AREA AND SAMPLING

The Tagus estuary is located on the densely populated west coast of Portugal, in the Iberian Peninsula (38°36'–39° N, 08°54'–09°24' W; Fig. 1). The estuary is a relatively shallow and wide mesotidal lagoon-type estuary, connected with the Atlantic Ocean via a

narrow and deep channel. Hydrographic conditions are mainly determined by a considerable riverine input from the Tagus River and the inflow of saline water from the Atlantic (Guerreiro *et al.*, 2015).

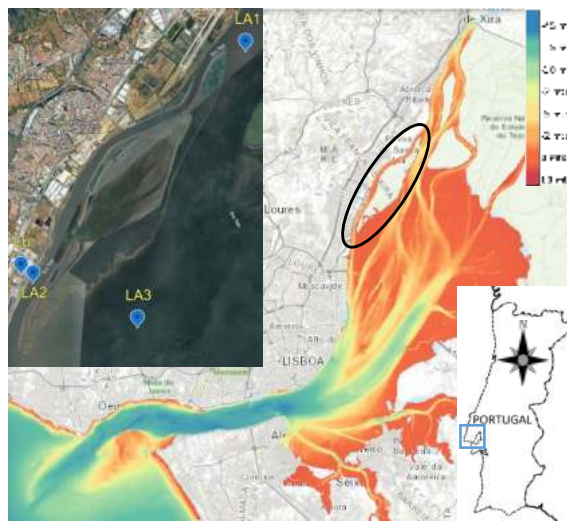


Fig. 1. Location of the sampling stations.

Surface sediment samples (0–10 cm) were collected in four locations of the Tagus estuary (Fig. 1) using a *Petit Ponar* grab. The sediments were analyzed for metals (Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn, Al, Fe and Mn), metalloid (As), polycyclic aromatic hydrocarbons (Σ PAHs), polychlorinated biphenyls (Σ PCB₇) and organochlorine pesticides (OCPs, namely hexachlorobenzene (HCB)). The samples were freeze-dried, homogenized and reduced to a fine powder (< 2 mm) in a ball mill. For metal analysis, two different acid digestion were performed to estimate the total or acid-extractable mass fraction of metals. The elements were quantified in the sample solution by flame atomic absorption spectrometry

using a calibration curve obtained from external calibration. The Σ PAHs and the Σ PCB₇ and OCPs were analyzed by gas chromatography coupled to a mass spectrometry and to an electron capture detector, respectively, after extraction by pressurized liquid extraction and purification of the extracts by adsorption chromatography using silica gel and aluminum oxide.

The concentrations in the samples were compared with Sediment Quality Guidelines (SQGs). These SQGs include Environmental Assessment Criteria (EAC; OSPAR, 2008), Effect Range Low (ERL; Long *et al.* (1995), OSPAR (2009)), and national legislation for dredged sediments (Portaria 1450/2007). Concentrations below the EAC Low value should not give rise to any toxicological effects and no immediate management action is required. Between the EAC Low and High values, toxicological effects are possible and may require additional evaluation. Above the EAC High value, long-term toxicological effects are likely and management action is required. ERLs are estimated concentrations under which toxicity is least likely to occur. In the case of concentrations between the ERL and the Effects Range-Median (ERM), there is a moderate risk of toxicity. The SQGs in Portaria 1450/2007 define sediment quality classes, according to the degree of contamination based on their concentrations in metals and POPs.

3. RESULTS

As an example for metals, the distribution of Hg concentration is shown in Fig. 2. The distributions of POPs are represented in Fig. 3 for Σ PAHs (a), Σ PCB₇ (b) and HCB (c).

Throughout the 21-year period, concentrations in general tended to be relatively constant, with some exceptions that will be addressed.

Comparing the concentrations of metals and POPs with the SQGs from the Portaria 1450/2007, the vast majority of the samples were in Classes 1 and 2 (Clean sediment and sediment with Trace contamination, respectively).

The exceptions to this generalization can be found in LA2 in 2019 for Σ PCB₇ (30.7 μ g/kg; Fig. 3(b)), LA2 in 2002 for Hg (Fig. 2), and all the stations for Cd in 2002 (1.5 mg/kg). These exceptions reached Class 3 (Slightly contaminated sediment). There were also four samples in Lb in which the Cu concentrations from 2012 to 2014 were in Class 3 (between 184 and 225 mg/kg), and in 2015 in Class 4 (431 mg/kg; Contaminated sediment).

The EAC and ERL values and the number of campaigns for each station that fall in each respective category are presented in Tab. i.

Considering the EAC values for Hg (Fig. 2), most of the samples were below the EAC High value, with exceptions occurring in 2018 and 2020, where levels reached 1.11 mg/kg (2018) and 1.53 mg/kg (2020) for LA2, and 0.53 mg/kg in Lb (2020).

Concerning Cr, Ni and Zn, the results show that all samples were below the EAC High value. Regarding Cd, Cu and Pb, most of the samples were below the EAC High value (n (Cd) = 80, n (Cu) = 73, n (Pb) = 68), with the samples in Lb being an exception for Cu and Pb. As for As, the majority of the samples were above the EAC High value (n = 46) in stations LA2, LA3 and Lb.

For Σ PAHs and HCB, the results in the four stations for all campaigns were below the respective ERL value. Regarding Σ PCB₇, there was one campaign in LA2 (2019) and two in Lb (2013 and 2015) which surpassed the ERL (Fig. 3(b)).

A Principal Component Analysis (PCA) was resorted to analyze correlations between campaigns and the contaminants analyzed (Fig. 4).

Both LA1 and LA3 stations have similar situations, in which the variables do not justify the variance of the vast majority of the campaigns. The few exceptions are Fe in 2021 for LA1 and Cd in 2002 in both LA1 and LA3. The concentrations in these stations tend to be rather constant throughout the period, which may justify their distribution in the PCA.



Fig. 2. Concentrations of Hg (mg/kg).

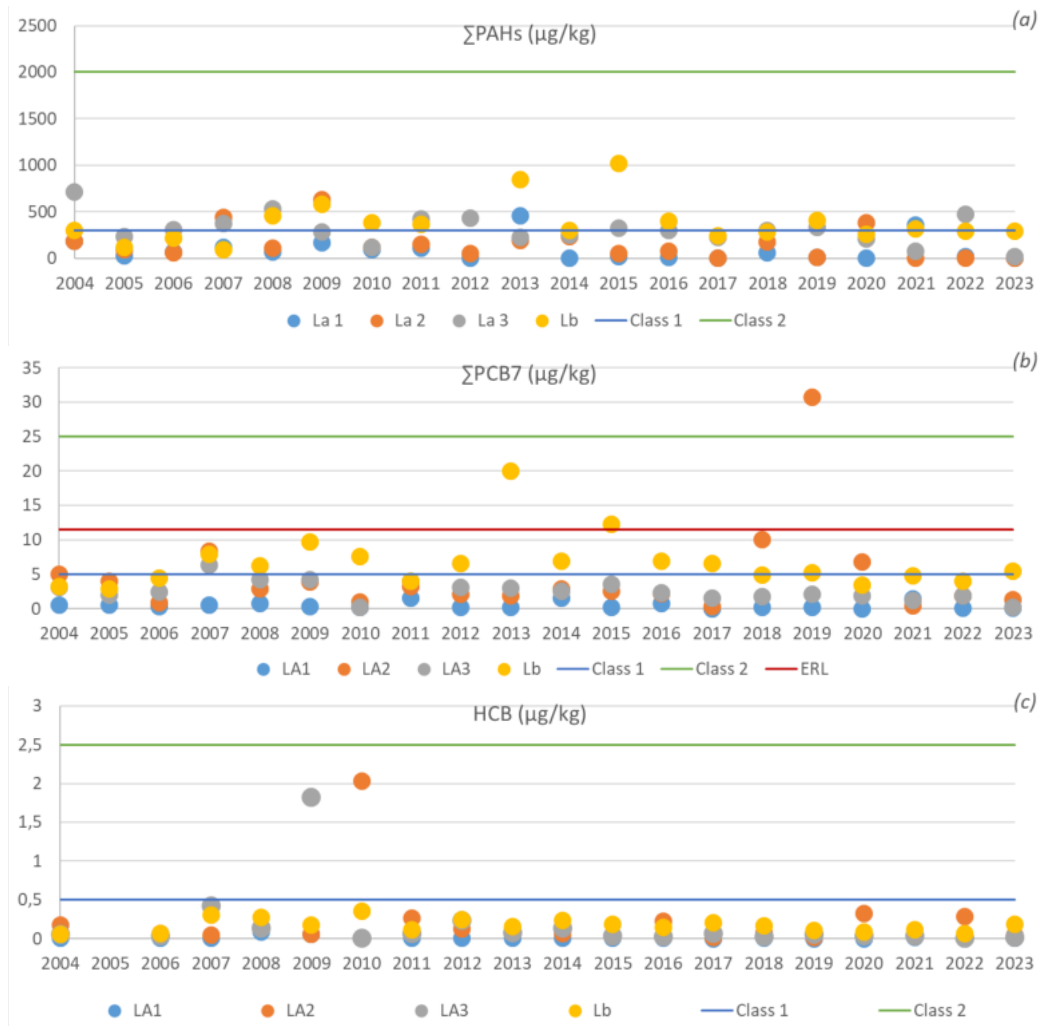


Fig. 3. Concentrations of (a) Σ PAHs ($\mu\text{g}/\text{kg}$), (b) Σ PCB₇ ($\mu\text{g}/\text{kg}$), (c) HCB ($\mu\text{g}/\text{kg}$).

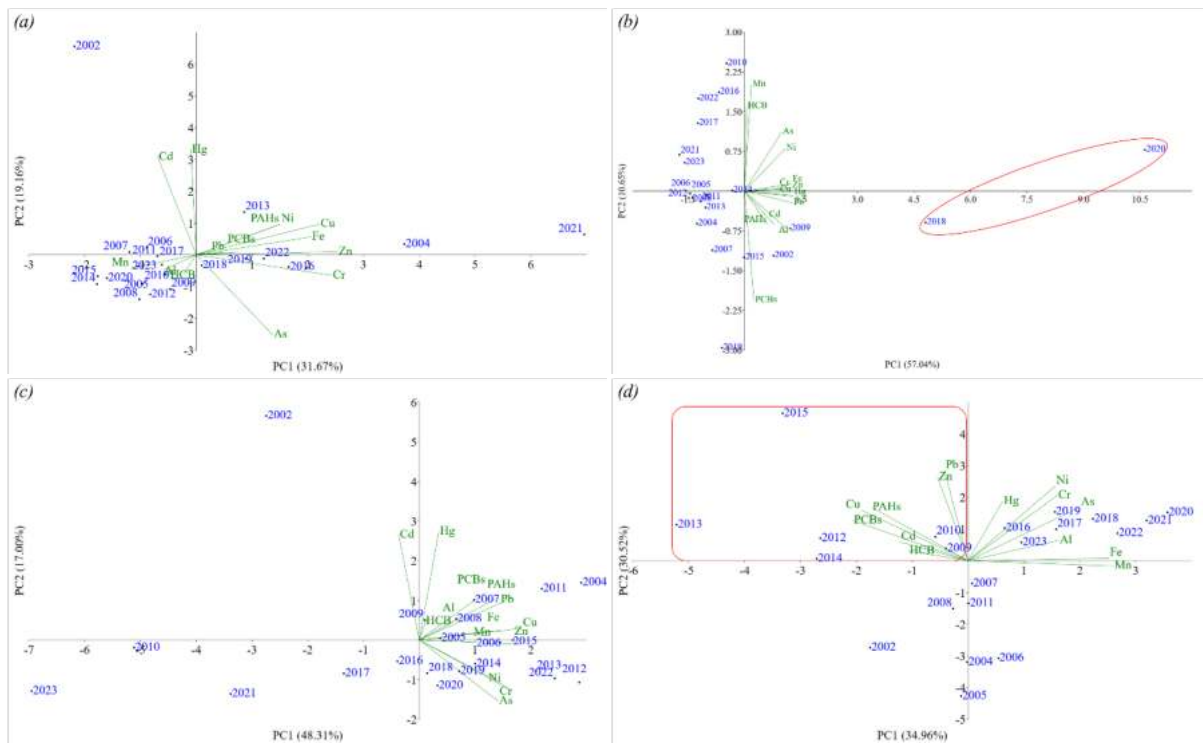


Fig. 4. PCAs for stations (a) LA1, (b) LA2, (c) LA3, and (d) Lb.

Tab. i. Number of campaigns for metals in the categories: below/between/above EAC range, and for Σ PAHs, Σ PCB₇ and HCB in the categories below/above ERL (2002 – 2023 period).

Station	EAC (mg/kg)									ERL (µg/kg)																		
	As			Cd			Cr			Cu			Hg			Ni			Pb			Zn			Σ PAH	Σ PCB ₇	HCB	
	1 - 10	10 - 20	20 - 100	0.1 - 10	10 - 100	100 - 1000	5 - 50	50 - 100	100 - 500	0.05 - 0.5	0.5 - 1	1 - 5	5 - 50	50 - 100	100 - 500	5 - 50	50 - 100	100 - 500	5 - 50	50 - 100	100 - 500	4022	11.5	20				
LA1	0	21	0	6	14	1	9	12	0	16	5	0	16	5	0	15	6	0	1	20	0	19	2	0	20	0	20	0
LA2	1	7	13	5	15	1	1	20	0	1	20	0	0	19	2	7	14	0	0	19	2	5	16	0	20	0	19	1
LA3	1	3	17	4	16	1	1	20	0	2	19	0	13	8	0	2	19	0	0	21	0	1	19	0	20	0	20	0
Lb	1	4	16	0	20	1	1	20	0	0	10	11	0	20	1	2	19	0	0	7	14	0	21	0	20	0	18	2

below EAC Low value
 between EAC Low and High value
 above EAC High value

below ERL
 above ERL

For the station LA2, the PCA separated the campaigns of 2018 and 2020 along the xx axis, in which the distribution is justified mostly by variations in the concentrations of Cr, Cu, Fe, Hg, Pb and Zn. In these two campaigns, the granulometry of this station changed from its usual sand predominance to silted sand and clayed silt, respectively (data not shown), which justifies the higher values as metals tend to adhere more easily to finer sediments (Freitas *et al.*, 2008). Higher values of HCB were registered in the 2010 campaign and of Σ PCB₇ in the 2019 campaign, which is observable in the PCA.

The PCA for the Lb station shows a more complex situation regarding metals and POPs in the second quadrant. The campaigns of 2013 and 2015 registered higher values of Cd, Cu, Pb, Zn, Σ PAHs and Σ PCB₇. The other campaigns present in that quadrant present varying situations depending on the year: in 2009 higher concentrations of Zn, Σ PAHs and Σ PCB₇, in 2010 of Zn and HCB, in 2012 of Cu and in 2014 of Cd and Cu.

One aspect that distinguishes the LA2 and Lb stations from LA1 and LA3 is their location. LA2 and Lb are located in the channel close to the CTRSU, where the depth is lower and the hydrodynamics are weaker, which favors the settlement of contaminants in the sediments (Caeiro *et al.*, 2005).

4. CONCLUSIONS

The analyses by comparison with SQGs and with PCAs reveal similar conclusions. The stations sampled around the CTRSU show that concentrations of metals and POPs have been relatively constant during the 21-year period analyzed. However, some attention is required to stations LA2 and Lb, as these are prone to higher concentrations of these pollutants. The continuation of monitoring campaigns proves to be quite important as a way of detecting specific pollution events and, if necessary, taking management actions.

Acknowledgements

We would like to thank Valorsul, S.A for authorization to use the data used in this work.

REFERENCES

- Caeiro, S., Costa, M.H., Ramos, T.B., Fernandes, F., Silveira, N., Coimbra, A., Medeiros, G., Painho, M. (2005) Assessing heavy metal contamination in Sado Estuary sediment: An index analysis approach. *Ecological Indicators*, 5, 151–169.
- Chapman, P.M., Wang, F. (2001) Assessing sediment contamination in estuaries. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 20(1), 3-22.
- Diário da República. Série I. N.º 217. Portaria n.º 1450/2007 de 12 de Novembro. Despacho Conjunto dos Ministérios do Ambiente e Recursos Naturais e do Mar. Portugal.
- Duarte, B., Reboreda, R., Caçador, I. (2008) Seasonal variation of extracellular enzymatic activity (EEA) and its influence on metal speciation in a polluted salt marsh. *Chemosphere*, 73(7), 1056-1063.
- Freitas, M.C., Andrade, C., Cruces, A., Munhá, J., Sousa, M.J., Moreira, S., Jouanneau, J.M., Martins, L. (2008) Anthropogenic influence in the Sado estuary (Portugal): a geochemical approach. *Journal of Iberian Geology*, 34(2), 271-286.
- Guerreiro, M., Fortunato, A.B., Freire, P., Rilo, A., Tabora, R., Freitas, M.C., Andrade, C., Silva, T., Rodrigues, M., Bertin, X., Azevedo, A. (2015) Evolution of the hydrodynamics of the Tagus estuary (Portugal) in the 21st century. *Revista de Gestão Costeira Integrada-Journal of Integrated Coastal Zone Management*, 15(1), 65-80.
- Long, E.R., MacDonald, D.D., Smith, S.L., Calder, F.D. (1995) Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments. *Environmental Management* 19(1): 81-97.
- OSPAR Commission (2008) Co-ordinated Environmental Monitoring Programme-Assessment manual for contaminants in sediments and biota. OSPAR Commission. 39 p.
- OSPAR Commission (2009) Background Document on CEMP Assessment Criteria for QSR 2010. OSPAR Commission. 25 p.



C
O
N
T
A
M
I
N
A
C
I
Ó
N

Are scrubber water discharges safe for the marine environment? Testing the potential effects on the model marine microalgae *Phaeodactylum tricorutum*

E. Bautista-Chamizo¹, J. Moreno-Andrés¹, L. Romero-Martínez and E. Nebot¹

¹ Department of Environmental Technologies, INMAR, University of Cádiz, SPAIN

Abstract: Exhaust gas cleaning systems (EGCSs), commonly known as scrubbers, are currently used as an alternative solution to reduce atmospheric shipping emissions of sulphur dioxides, according to the MARPOL - Annex VI. Through this technology, a large amount of atmospheric pollutants is transferred because of wash water from vessels to marine ecosystems. With the aim of testing scrubbers' water toxicity, an approach to these waters has been replicated under laboratory conditions, mixing a selection of the main particulate pollutants (PAHs, Alkyl-PAHs and metals) found on them, mimicking also the acid condition of these waters. On this purpose, four different concentrations of artificial scrubber's water will be tested using the marine microalgae *Phaeodactylum tricorutum*. The microalgae endpoints that have been tested, alternatively to the traditional ones, include cell density, cell size and complexity, autofluorescence, cell viability and metabolic activity. The results obtained in this work will be useful to estimate the cost/benefit relationship between the advantages of the use of scrubbers while reducing atmospheric emissions and the threat that represents to marine ecosystems.

Key words: ecotoxicology, marine pollution, maritime transport, microalgae, scrubber.

1. INTRODUCTION

The maritime transportation industry mainly uses fuel oil as energy source for the ships, consequently, their exhaust gases contain carbon dioxide, carbon monoxide, sulphur oxides, nitrogen oxides and many other substances such as heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) (García-Gómez et al., 2023). Exhaust gas cleaning systems (EGCSs), commonly known as scrubbers, are currently used as an alternative solution to reduce atmospheric shipping emissions of sulphur dioxides, according to the MARPOL - Annex VI. Although this technology has been proved as a feasible alternative to reduce SO₂ emissions into the atmosphere, a large amount of atmospheric pollutants is transferred through wash water from vessels to marine ecosystems, without further control (Picone et al., 2023). Apart from the pollutants, one of the main risks associated with scrubber discharges is water acidification, due to the low pH of these wash waters, which can reach a pH of 3.8.

Microalgae are responsible for around half of the global carbon fixation and constitute the basis of the biological carbon pump (Falkowski, 2012). Marine phytoplankton's responses to global changes will have consequences on marine food webs and global nutrient cycles (Collins and Bell, 2004). Phytoplankton have some valuable characteristics such as rapid cell division (short cycle) and wide population sizes, which allow them to evolve in response to global climate change on different timescales (Collin et al., 2014). Cytotoxic responses of microalgae to environmental stress factors or

pollutants are diverse and affected by external conditions but also by the species tested (Franqueira et al., 2000). The response of microalgae to environmental alterations has been usually measured through growth rate as toxicity indicator (Moreno-Garrido, 1997). Heretofore, there is a lack of information about intracellular processes related to stress biomarkers in microalgae affected by scrubber's discharges. To this end, flow cytometry techniques allow the rapid characterization of the microalgal response at cellular levels (Prado et al., 2012b).

With the aim of testing scrubbers' water toxicity, an approach to these waters has been replicated under laboratory conditions, mixing a selection of the main particulate pollutants (PAHs, Alkyl-PAHs and metals) found on them, mimicking also the acid condition of these waters. Toxicity tests have been run using the marine microalgae *Phaeodactylum tricorutum*. The microalgae endpoints that have been tested, alternatively to the traditional ones, are cell density, cell size and complexity, autofluorescence, cell viability and metabolic activity.

2. MATERIAL AND METHODS

Microalgae from the species *Phaeodactylum tricorutum* (Bohlin, 1897) (Bacillariophyceae) were obtained from Institute of Marine Sciences of Andalusia (CSIC). Toxicity tests were run in triplicate using Erlenmeyer flasks, previously sterilized with HNO₃ (10%) and autoclaved at 120 °C for 20 min. The experimental procedure was

developed following the guidelines from The Organization for Economic Co-operation and Development (OECD) (OECD, 1984).

Prior to the main experiment, different dilutions of acid water were tested starting from pH 3.8 (0, 25, 50 and 75%). Experiments with *P. tricornutum* were performed in triplicate for 96 hours. In addition, a control assay was developed (non-acidified seawater). Acidification was manipulated by adding H₂SO₄.

After that, microalgae cultures were exposed to four different concentrations (dilutions) of artificial scrubber's water and a control. For artificial scrubber's water, a solution of PAHs (including naphthalene, fluorene, phenanthrene, acenaphthene and pyrene), alkyl PAHs (including 1-methylfluorene, 1-methylphenanthrene and 2-methylnaphthalene) and metals (vanadium, iron, nickel and zinc) was prepared, according to the concentrations found in literature (Picone et al., 2023). Flow cytometry analyses (FCM) were performed in an Attune® NxT Acoustic Focusing Cytometer (Thermo Fisher) equipped with a 488 nm excitation argon laser, detectors of forward scatter (FS) and side scatter (SS), light scatter and four fluorescence channels corresponding to four wavelength intervals: FL1 (505-550 nm), FL2 (550-600 nm), FL3 (600-645) and FL4 (> 645 nm). The cytometer is controlled by the Attune® NxT Software. For each parameter investigated, at least 50,000 *P. tricornutum* cells were collected per sample. To exclude non-algal particles, microalgae autofluorescence was used as a reference (Prado et al., 2012a). Different fluorochromes were used to analyse cell changes, except for the inherent cell properties. Aliquots of the reagents were prepared prior to the experiments, dissolved in DMSO and stored at -20 °C. The endpoints measured by flow cytometry were cell density and abundance, the inherent cell properties (cell size, cell complexity and autofluorescence), cell viability and metabolic activity.

Statistical analyses were performed with the software SPSS 15.0

3. RESULTS

Preliminary results testing the effects of pH on growth of *P. tricornutum* show that cell density decreased under all pH treatments, in a dilution-dependent manner after 96 h of exposure, compared with the control. The inhibitory effects of low pH are shown in Fig. 1.

Low pH effect on phytoplankton is a species-specific issue (Hinga, 2002). These results are in agreement with previous works where diatom growth was also negatively affected on reduced pH

scenarios (Gao et al. 2012; Herve et al. 2012). However, field-based experiments showed that diatoms growth was positively influenced by acidification (Tortell et al. 2008; Feng et al. 2009). But cell density as a toxicity endpoint is a ubiquitous response and it is not strongly representative by itself for testing toxicological effects on unicellular microalgae (González-Barreiro et al., 2006). Thus, it is critical to complement these results with additional data. However, the parameters evaluated on this work could be considered as early warning effects since the cell was physiologically affected but they were still viable.

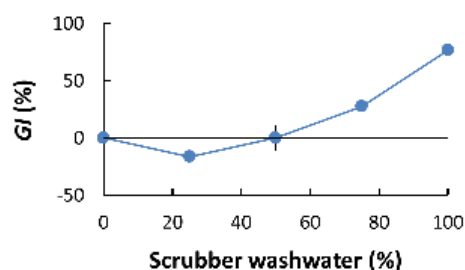


Fig. 1. Percentage of growth inhibition (GI) of *P. tricornutum* after 96 hours exposed to different dilutions of acidified seawater.

4. CONCLUSIONS

The results of this study suggest that low pH from scrubber water discharges may cause oxidative stress on *P. tricornutum* population. Further experiments testing the influence of PAHs and metals from wash waters on the development of *P. tricornutum* are necessary to understand the potential negative effects of these waters on the aquatic environment. The findings of this research will be of great importance to estimate the cost/benefit relationship between the effectiveness of the use of scrubbers to reduce atmospheric emissions and the threat that represent to marine ecosystems.

Acknowledgments

This work has been supported by the project CLEANSCRUB. Project PID2021-123155OB-I00 funded by MICIU/AEI/10.13039/501100011033 and by ERDF/EU.

References

- Bohlin, K. 1897. Die Algen der Ersten Regnell'schen Expedition. I. Protococcoideen. Bihang til Kongliga Svenska Vetenskaps Akademiens Handlingar 23: 3-47.
- Collins, S. and Bell, G. 2004. Phenotypic consequences of 1000 generations of selection at elevated CO₂ in a green alga. Nature, 431: 566-569.

- Collin, S., Rost, B. and Rynearson, T.A. 2014. Evolutionary potential of marine phytoplankton under ocean acidification. *Evolutionary Applications*, 7: 140-155.
- Falkowski, P. 2012. The power of plankton. *Nature*, 483 (Suppl 7387), S17.
- Feng, Y. and others. 2009. The effects of increased pCO₂ and temperature on the North Atlantic spring bloom: I. The phytoplankton community and biogeochemical response. *Marine Ecology Progress Series* 388: 13-25.
- Franqueira, D., Orosa, M. and Torres, E. 2000. Potential use of flow cytometry in toxicity studies with microalgae. *Science of the Total Environment*, 247: 119- 126.
- Gao, K. and others. 2012. Rising CO₂ and increased light exposure synergistically reduce marine primary productivity. *Nature Climate Change*, 2: 519-523.
- García-Gómez E, Gkotsis G, Nika MC, Hassellöv IM, Salo K, Hermansson AL, Ytreberg E, Thomaidis NS, Gros M, Petrović M. 2023. Characterization of scrubber water discharges from ships using comprehensive suspect screening strategies based on GC-APCI-HRMS. *Chemosphere*, 343: 140296.
- González-Barreiro, O., Rioboo, C., Cid, A. and Herrero, C., 2004. Atrazine-induced chlorosis in *Synechococcus elongatus* cells. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 46: 301-307.
- Herve, V., Derr, J., Douady, S., Quinet, M., Moisan, L. and Lopez, P. J. 2012. Multiparametric analyses reveal the pH-dependence of silicon biomineralization in diatoms. *PLOS One* 7: e46722.
- Hinga, K. R., 2002. Effects of pH on coastal marine phytoplankton. *Marine Ecology Progress Series*, 238: 281-300.
- Moreno-Garrido, I., 1997. Toxicidad y acumulación de metales pesados en microalgas marinas usadas en acuicultura. Doctoral Thesis, Universidad de Cádiz (Spain).
- OECD (Organization for the Economic Cooperation and Development). 1984. "OECD Guideline for Testing of Chemicals: Alga Growth Inhibition Test", OECD Publications, Paris, adopted 7 June 1984. 201 pp.
- Picone, M., Russo, M., Distefano, G.G., Baccichet, M., Marchetto, D., Volpi Ghirardini, et al. 2023. Impacts of exhaust gas cleaning systems (EGCS) discharge waters on planktonic biological indicators, *Marine Pollution Bulletin*, 190: 114846.
- Prado, R., Rioboo, C., Herrero, C., and Cid, A. 2012a. Screening acute cytotoxicity biomarkers using a microalgae as test organism. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 86: 219-226.
- Prado, R., Rioboo, C., Herrero, C., Suarez-Bregua, P. and Cid, A. 2012b. Flow cytometric analysis to evaluate physiological alterations in herbicide-exposed *Chlamydomonas moewusii* cells. *Ecotoxicology*, 21: 409-420.
- Tortell, P. D. and others. 2008. CO₂ sensitivity of Southern Ocean phytoplankton. *Geophysical Research Letters*, 35: L04605.
- Yu L, Xia W, Du H. 2024. The toxic effects of petroleum pollutants to microalgae in marine environment. *Marine Pollution Bulletin*, 201: 116235

DEGRADACION DEL ACIDO DOMOICO MEDIANTE PROCESOS FOTO-DIRIGIDOS

M. E. Ibáñez-López (1); L. Romero-Martínez (1); E. Nebot (1); J. Moreno-Andrés (1)

(1) Departamento de Tecnologías del Medio ambiente, Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales. INMAR-Instituto de Investigación Marina, Universidad de Cádiz, España. mariaeugenia.ibanez@uca.es

Resumen: Las biotoxinas marinas, representan una preocupación significativa para las aguas costeras y las industrias acuícolas. Estas toxinas son principalmente producidas por las conocidas Floraciones Nocivas de Microalgas. Entre ellas, destaca el ácido domoico, una potente neurotoxina producida por diatomeas del género *Pseudo-nitzschia*, que puede acumularse en distintos organismos marinos. Esta toxina puede causar intoxicación amnésica lo que subraya la importancia de controlar este tipo de compuestos. Por ello, se planteó, evaluar procesos foto-dirigidos como una posible estrategia para el control del ácido domoico a través del uso de nueva tecnología, usando un diodo emisor de luz (LED) como fuente de radiación ultravioleta (UV). Se determinó la capacidad de fotólisis de este compuesto bajo radiación UV-LED, obteniendo una constante de degradación de 0.0118 min^{-1} , y alcanzando una degradación de hasta un 36 % en muestras expuestas a 1.8 J/cm^2 .

Palabras clave: ácido domoico, aguas marinas, HPLC-UV, UV-LED.

1. INTRODUCCIÓN

Las biotoxinas marinas, representan una preocupación significativa para las aguas costeras y las industrias acuícolas, principalmente debido a su impacto perjudicial en la salud humana derivada de la acumulación de estos compuestos en la cadena alimenticia. Estas toxinas son mayormente producidas por las conocidas Floraciones Nocivas de Microalgas (HABs). Europa ha determinado diversas directivas para regular los niveles de las toxinas, y reevaluar sus límites regulatorios. Actualmente, la legislación vigente contempla la regulación de toxinas marinas en base al reglamento (CE) nº 854/2004 (Costa et al., 2017), definiendo límites de las principales toxinas marinas en organismos de interés comercial.

Tanto moluscos bivalvos, equinodermos, tunicados, gasterópodos marinos y crustáceos entre otros, actúan como vectores de estas biotoxinas actuando como acumuladores de estas.

Entre las biotoxinas presentes en las aguas marinas que tienen su origen en las microalgas se pueden encontrar tres tipos de toxinas principales, dependiendo de los síntomas.

Por tanto, encontramos las de intoxicación amnésica por mariscos (ASP), la intoxicación parálitica por mariscos (PSP) y la intoxicación diarreaica por mariscos (DSP) (Costa et al., 2017). Cada síndrome tiene asociada una toxina de referencia.

Entre estas toxinas, destacan el Ácido Domoico para ASP, el Ácido Okadaico para DSP y la Saxitoxina para PSP (Costa et al., 2017).

El ácido domoico, una potente neurotoxina producida por diatomeas del género *Pseudo-nitzschia*, puede acumularse en distintos organismos marinos (Bouillon et al., 2006). Cuando los humanos consumen estos organismos contaminados, la toxina puede causar intoxicación amnésica (ASP) lo que subraya la importancia crítica de controlar este tipo de biotoxinas en entornos acuáticos para proteger la salud pública y asegurar la sostenibilidad de la acuicultura.

Por ello, se plantea como objetivo principal, la evaluación de procesos foto-dirigidos como una posible estrategia para el control del ácido domoico a través del uso de nueva tecnología, un diodo emisor de luz (LED) como fuente de radiación ultravioleta (UV).

2. DESARROLLO

Se ha escogido el ácido domoico como toxina diana, y se ha sometido a un proceso foto-dirigido, evaluando la sensibilidad de esta biotoxina a la degradación con LED-UV.

Se adquirió un patrón estándar de referencia del ácido domoico (Laboratorios CIFGA).

La cromatografía líquida de alta resolución con detección ultravioleta (HPLC-UV) es el método analítico comúnmente usado para detectar el ácido domoico (EU-Harmonised). La detección del ácido domoico se realiza a una absorbancia de 242 nm (Quilliam et al., 1995).

Por tanto, se realizó una recta de calibración en el HPLC basándose en el método de cuantificación de Quilliam et al., 1995 y en condiciones isocráticas para poder determinar la concentración de ácido domoico (Quilliam et al., 1995) (EU-Harmonised).

Se prepararon cuatro soluciones, con concentraciones iniciales de ácido domoico; 750 ppb, 500 ppb, 100 ppb y 50 ppb.

Estas soluciones fueron analizadas inicialmente y a varias dosis de radiación para observar la degradación. Estas dosis están calculadas en base al tiempo de exposición con un máximo de 1.8 J/cm², que se alcanzó tras 30 minutos de exposición continuada.

Tras esto las muestras fueron analizadas en el HPLC, según el método anteriormente descrito y las curvas de degradación se obtuvieron representando el parámetro C/C_0 ; siendo la concentración de ácido domoico para cada tiempo de exposición (C) y C_0 la concentración inicial de cada experimento. Éstas se ajustaron a un modelo lineal para poder obtener las tasas de degradación.

3. RESULTADOS

Evaluando factores como la concentración inicial de biotoxina, y pH del agua, se determinó la capacidad de fotólisis de este compuesto bajo radiación UV-LED.

Se testearon cuatro concentraciones iniciales, con el fin de observar si la concentración de partida influye en la degradación del compuesto. Como se observa en la figura 1, se han obtenido distintas degradaciones en función de la concentración de partida. Se han obtenido constantes de degradación entre 0.0054 min⁻¹ y 0.0131 min⁻¹. La constante más baja corresponde a los 50 ppb de concentración inicial, mientras que, para las otras concentraciones, fueron 0.0122 min⁻¹, 0.0118 min⁻¹ y 0.0131 min⁻¹ para 750 ppb, 500 ppb y 100 ppb respectivamente.

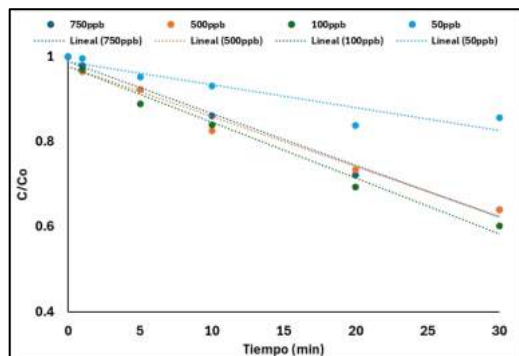


Figura 1. Degradación del ácido domoico frente a distintas dosis de radiación y diversas concentraciones iniciales 750 ppb, 500 ppb, 100 ppb y 50 ppb.

Se logró alcanzar una degradación de hasta un 40 % en muestras expuestas a 1.8 J/cm² y con una concentración inicial de 100 ppb.

Para las concentraciones de 750 ppb y 500 ppb la degradación fue del 36 % y para los 50 ppb la degradación fue solo del 14 %.

Al mismo tiempo y para todas las concentraciones estudiadas, se observó que conforme se degradaba el ácido domoico, los picos adyacentes a este, como el ácido epidomoico, que es un isómero del ácido domoico, aumentaban su concentración respecto a la inicial. Logrando incluso en algunos casos un aumento de las concentraciones totales.

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos, apuntan a una degradación parcial del ácido domoico bajo radiación UV-LED, lo que sugiere el futuro estudio de procesos fotoquímicos avanzados para obtener una total degradación del compuesto.

Agradecimientos

Proyecto MOBILED. Ref.: PCM_00015. Consejería de Universidad, Investigación e Innovación de la Junta de Andalucía y por la Unión Europea NextGenerationEU/PRTR, dentro del Plan Complementario nacional de Ciencias Marinas.

REFERENCIAS

- Bouillon, R.-C., Knierim, T. L., Kieber, R. J., Skrabal, S. A., & Wright, J. L. C. (2006). Photodegradation of the algal toxin domoic acid in natural water matrices. *Limnology and Oceanography*, 51(1), 321–330. <https://doi.org/10.4319/lo.2006.51.1.0321>
- Costa, P. R., Costa, S. T., Braga, A. C., Rodrigues, S. M., & Vale, P. (2017). Relevance and challenges in monitoring marine biotoxins in non-bivalve vectors. *Food Control*, 76, 24–33. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.12.038>
- EU-Harmonised Standard Operating Procedure for determination of domoic acid in shellfish and finfish by RP-HPLC using UV detection EUROPEAN UNION REFERENCE LABORATORY FOR MARINE BIOTOXINS..
- Quilliam, M. A., Xie, M., & Hardstaff, W. R. (1995). Rapid Extraction and Cleanup for Liquid Chromatographic Determination of Domoic Acid in Unsalted Seafood. *Journal of AOAC INTERNATIONAL*, 78(2), 543–554. <https://doi.org/10.1093/jaoac/78.2.543>

Monitoring faecal bacteria in coastal waters using satellite remote sensing: Insights from Calvià, Mallorca

M. Chowdhury (1, 2), I. Laiz (2), I. de la Calle (1)

(1) Quasar Science Resources, S.L., Camino de las Cuedas 2, 28232 Las Rozas de Madrid, Madrid, Spain. mchowdhury@quasarsr.com, masuma.chowdhury@uca.es

(2) Departamento de Física Aplicada, Instituto Universitario de Investigación Marina (INMAR), Campus de Excelencia Internacional/Global del Mar (CEI-MAR), Universidad de Cádiz, Puerto Real 11519, Cádiz, Spain.

Abstract: Faecal bacteria (FB) are microscopic organisms that live in the intestines of humans and other warm-blooded animals. Introduction of FB into aquatic ecosystem poses great public and ecosystem health risks. Management of this problem depends on identifying the correct FB, their source and fluxes, and their risk mapping. This study aims to identify two types of FB, i.e., *Escherichia coli* and *Enterococcus* using Sentinel-2 satellite data in 13 beaches in Calvià region of Mallorca, Spain. In-situ data are collected by Calvià 2000 – a municipal Company of Calvià city council. Satellite matchups with in-situ data are done using ± 5 hours of temporal-window. The images are pre-processed for feature selection and model development. Results show that the models can identify *Escherichia coli* and *Enterococcus* with R^2 values of 0.79 and 0.74, respectively. The derived information will help to monitor and control sewage discharges to maintain bathing water quality, and promote sustainable tourism.

Keywords: *Escherichia coli*, *Enterococcus*, Sentinel-2

1. INTRODUCTION

Discharge of water with high anthropogenic faecal pollution through sewer system and other means such as on-site septic systems, domestic and wild manure, or storm water can pose great risk to public health by causing water borne diseases, thus becoming a major concern for the public and regulatory authorities (EPA, 2012; Paruch et al., 2019). Over 150 years, faecal indicator bacteria (FIB) are used to monitor levels of faecal contamination in water (Holcomb & Stewart, 2020). Several regional/global water quality standards and legislations have included FIB for drinking, bathing and recreational water monitoring and management (Paruch et al., 2019). Among FIBs, *Escherichia coli* (*E. coli*) and certain *Enterococcus* species such as *E. faecalis* and *E. faecium* are widely used (Paruch et al., 2019). *E. coli* is a gram-negative, facultative anaerobic rod-shaped faecal coliform bacterium, whereas Enterococci are gram-positive, facultative anaerobic organisms from streptococcus group that often occur in pairs or short chains. In 2016, Nguyen et al. (2016) showed that FIB numbers increase in response to the rapid industrialization and urbanization. Offenbaume et al. (2020) showed that FIBs are influenced by turbidity, pH, salinity, and temperature. Islam et al. (2017) showed positive correlation between the concentration of FIB with temperature and precipitation. It was reported that the increased discharge of industrial, municipal, and domestic wastewater enriched with organic matter results in bacterial decomposition and water quality decline (Franklin et al., 2018; Md. S. Islam & Tanaka,

2004). Although satellite-based remote sensing techniques have been proven as powerful tools for water quality monitoring, its use in FIB mapping remains sparsely addressed. Vincent et al. (2005) developed an algorithm by performing multiple regression between dark-object-corrected spectral ratios of Landsat TM data (from bands 1-5 and 7, 30 m spatial resolution) to map *E. coli* bacteria. However, to our knowledge, no studies have been done to detect *E. coli* and *Enterococcus* bacteria using Sentinel-2 satellite data. Therefore, this study introduces for the first time two empirical models to identify faecal bacteria using Sentinel-2 satellite data, thus taking a step forward in current research efforts to monitor bathing water quality and ensure human health and safety.

2. DEVELOPMENT

2.1. Study sites

Calvià is a municipality located in the south-western part of the island of Mallorca in Spain. It is bordered on the north by the municipalities of Puigpunyent and Estellences, Palma de Mallorca, the island's capital to the east, Andratx to the west and to the south by the Mediterranean Sea (Fig 1). The municipality spans 145.52 square kilometres and has 34 beaches along its 54 kilometres of coastline. Because of its numerous beaches with aesthetic beauty, Calvià is a popular tourist destination in Europe. Annually, over one million tourists visit the municipality of Calvià, thus exerting pressure on the beach and water quality, for which ensuring proper bathing water monitoring has becoming a prerequisite.

2.2. Data

Calvià 2000 - a municipal company owned by Calvià Town hall, Mallorca, collected in-situ data from 2016 to 2023 to be used in this study. Although these data correspond to 34 beaches in total, only 13 beaches were considered in this study as some of the beaches were too small to be observed by the satellite data. The selected 13 beaches are: Cala Fornells, Palmira, Torà, Santa Ponça, El Toro, Magaluf, Son Maties, Palmanova, Carregador, Marineland, Ametllers, Oratori, and Illetes Militar (Fig. 1). According to the bathing water quality guideline (RD 1341/2007) and in-situ FIB measurements, water quality per beach per date was classified as excellent, good, sufficient, and insufficient water type. Therefore, matchups between the in-situ data and Sentinel-2 satellite overpass were made considering ± 5 hours of temporal-window. Images with high clouds and sun-glint effects were discarded for quality control, which resulted in 20 good quality Level-1C images from R008_T31SDD sentinel-2 tiles coinciding with 67 in-situ measurements.

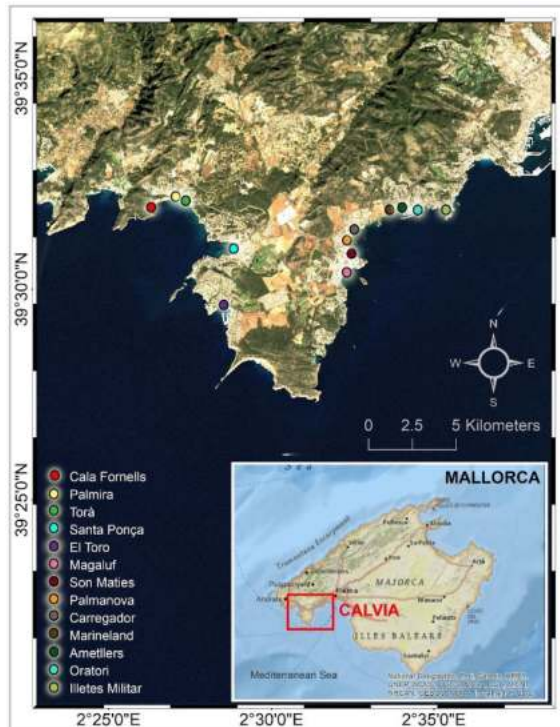


Fig. 1. Map of the study area

2.3. Data processing

ACOLITE atmospheric and sun-glint corrections were applied to the Level-1C satellite data to remove atmospheric and sun-glint interference. The outputs of these corrections were Level-2A data at the bottom of atmosphere. Therefore, land and offshore regions were masked to retain the water-leaving reflectance near the shoreline for all the beaches. Spectral analyses were performed for all water quality types, i.e., excellent, good, sufficient, and insufficient, for all the Sentinel-2 bands (VNIR-SWIR) to identify the spectral behaviour of different water types and their

corresponding FIB concentrations. Therefore, different feature variables including single band, band ratios and normalized band ratio indices were evaluated for the faecal bacteria model development.

3. RESULTS

The spectral analysis showed that the sufficient and insufficient waters containing >500 and >200 UFC/100 ml of *E. coli* and *Enterococcus* have higher scattering than the excellent and good water quality types, especially in the blue, green and near-infrared region. The regression model based on the spectral response and FIB concentration showed accuracy of 0.79 and 0.74 for *E. coli* and *Enterococcus* detection, respectively. Besides, the p-values associated with the F-statistics were $5.37e-13$ for *E. coli* and $1.17e-11$ for *Enterococcus*, suggesting that both models are statistically significant. Therefore, the models were applied to the Sentinel-2 images to map FIB. Figs. 2 and 3 represent the maps of *E. coli* and *Enterococcus* in two beaches in Calvià, namely Torà and Ametllers.

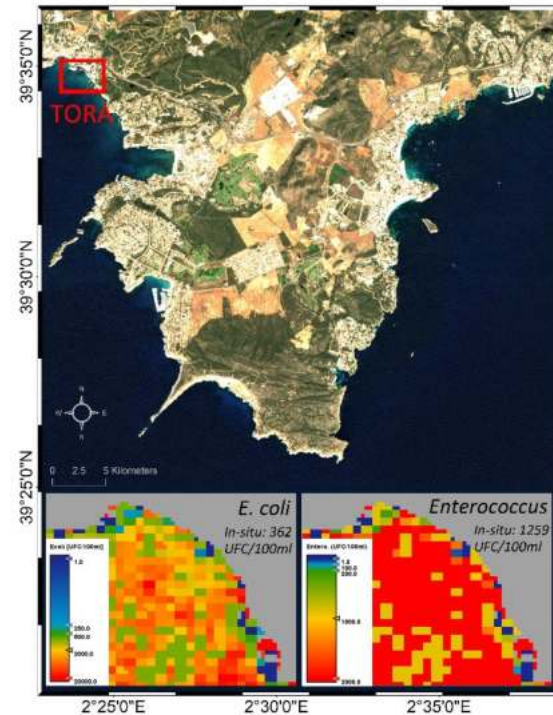


Fig. 2. *E. coli* and *Enterococcus* map in Torà beach

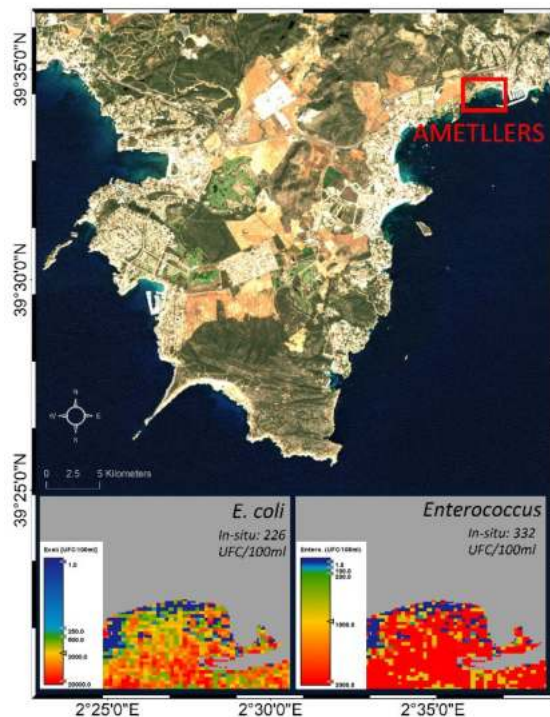


Fig. 3. *E. coli* and *Enterococcus* map in Ametllers beach

4. CONCLUSIONS

This study introduces two novel empirical models, for the first time, to detect faecal bacteria using satellite remote sensing. The derived information through this study will help identifying the hotspot to control sewage discharges for maintaining bathing water quality, and promoting sustainable tourism by ensuring safe, healthy and esthetical coastal resources.

ACKNOWLEDGEMENTS

This study is a part of the first author's PhD, supported by the Industrial Doctorate Program of the Spanish Ministry of Science and Innovation (ref.DIN2020-010979/AEI/10.13039/501100011033) and Quasar Science Resources, S.L. within the SIMBAD project framework (QSR-ESABIC-2018-001). The authors are thankful to the European Space Agency, the European Commission, and the Copernicus programme for freely distributing Sentinel-2 imagery. The authors would like to thank Calvià 2000 for providing the in-situ time series data for this study without which this research would not be possible.

REFERENCES

EPA. (2012). *5.11 Fecal Bacteria | Monitoring & Assessment | US EPA*.
<https://archive.epa.gov/water/archive/web/html/vms511.html>

Franklin, J. B., Sathish, T., Vinithkumar, N. V., Kirubakaran, R., & Madeswaran, P. (2018).

Seawater quality conditions of the south Andaman Sea (Bay of Bengal, Indian Ocean) in lustrum during 2010s decade. *Mar. Pollut. Bull.*, 136.
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30509826/>

Holcomb, D. A., & Stewart, J. R. (2020). Microbial Indicators of Fecal Pollution: Recent Progress and Challenges in Assessing Water Quality. *Current Environmental Health Reports*, 7(3), 311–324.
<https://doi.org/10.1007/s40572-020-00278-1>

Islam, M. M. M., Hofstra, N., & Islam, Md. A. (2017). The Impact of Environmental Variables on Faecal Indicator Bacteria in the Betna River Basin, Bangladesh. *Environmental Processes*, 4(2), 319–332.
<https://doi.org/10.1007/s40710-017-0239-6>

Islam, Md. S., & Tanaka, M. (2004). Impacts of pollution on coastal and marine ecosystems including coastal and marine fisheries and approach for management: A review and synthesis. *Marine Pollution Bulletin*, 48(7), 624–649.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2003.12.004>

Nguyen, H. T., Le, Q. T., Garnier, J., & Janeau, J. (2016). Seasonal variability of faecal indicator bacteria numbers and die-off rates in the Red River basin, North Viet Nam. *Scientific Reports*, 6(1), 1–12.

Offenbaume, K. L., Bertone, E., & Stewart, R. A. (2020). Monitoring Approaches for Faecal Indicator Bacteria in Water: Visioning a Remote Real-Time Sensor for *E. coli* and *Enterococci*. *Water*, 12(9), 2591.
<https://doi.org/10.3390/w12092591>

Paruch, L., Paruch, A. M., Eiken, H. G., & Sørheim, R. (2019). Faecal pollution affects abundance and diversity of aquatic microbial community in anthropo-zoogenically influenced lotic ecosystems. *Scientific Reports*, 9(1), 19469.
<https://doi.org/10.1038/s41598-019-56058-x>

Vincent, R. K., McKay, R. M., I-Rshaidat, M. M. D., Czajkowski, K., Bridgeman, T., & Savino, J. (2005). Mapping the bacterial content of surface waters with landsat tm data: Importance for monitoring global surface sources of potable water. *Proceedings ASPRS Pecora*, 16, 23–27.

Gestión y tratamiento del agua de lastre en buques: desafíos derivados de una amenaza global para la salud de los océanos

J. Moreno-Andrés ⁽¹⁾, L. Romero-Martínez ⁽¹⁾, E. Nebot ⁽¹⁾

(1) Departamento de Tecnologías del Medio Ambiente. Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales. Instituto Universitario de Investigación Marina (INMAR). **Universidad de Cádiz**.
E-mail: javier.moreno@uca.es

Resumen: La implementación del Convenio Internacional para el Control y la Gestión del Agua de Lastre, en vigor desde 2017, ha enfrentado retrasos y modificaciones. Su objetivo es prevenir la propagación de organismos y patógenos nocivos a través de estándares de descarga fijados en la Regulación D-2, obligatoria a partir de septiembre de 2024. En esta comunicación se abordarán los desafíos actuales y adaptaciones para una gestión efectiva de las aguas de lastre, con énfasis en nuevas tecnologías y estrategias de tratamiento. Tras la implementación de la conocida como “Experience-Building Phase”, la gestión del agua de lastre sigue siendo un desafío, destacando la necesidad de ajustar los sistemas de tratamiento y establecer pruebas regulares para asegurar el correcto funcionamiento y mantenimiento de los sistemas de tratamiento. Por otro lado, la experiencia en estudios específicos encaminados a inactivar distintos microorganismos en las aguas de lastre, refleja que los organismos responden de manera diferente a la radiación UV, por lo que, además de prestar especial atención a la fracción de tamaño $\geq 50 \mu\text{m}$, se deben también considerar regulaciones para los $< 10 \mu\text{m}$, cuya resistencia y potencial impacto negativo requieren de su vigilancia.

Palabras clave: Transporte marítimo, Aguas de Lastre, patógenos emergentes, microalgas nocivas, Radiación UV.

1. INTRODUCCIÓN

La implementación del Convenio Internacional para el Control y la Gestión del Agua de Lastre y los Sedimentos de los Buques (BWMC), adoptado en 2004 y en vigor desde 2017, ha enfrentado numerosos retrasos y modificaciones. Este convenio tiene un objetivo fundamental: prevenir la propagación de organismos y patógenos nocivos a través del agua de lastre y los sedimentos. Para verificar el cumplimiento de este objetivo, se utiliza el estándar de descarga del agua de lastre establecido en la Regulación D-2, donde se imponen límites de descarga asociados al tamaño de organismos ($> 50 \mu\text{m}$ y $10-50 \mu\text{m}$), así como el control de tres bacterias indicadoras (*E. coli*, *E. faecalis* y *V. cholerae*). Esta regulación D-2 tiene prevista su entrada en vigor definitiva en septiembre 2024.

En esta comunicación se abordarán los retrasos y las adaptaciones necesarias desde la entrada en vigor del convenio en el año 2017, así como las dificultades para asegurar una gestión efectiva del agua de lastre a nivel global.

2. DESARROLLO y RESULTADOS

Desde la entrada en vigor del BWMC, el número de buques que instalan sistemas de gestión de agua de lastre ha aumentado considerablemente. Aproximadamente, el 7.5% de la flota mundial de barcos de más de 100 toneladas de registro bruto estaban equipados con sistemas de tratamiento de

agua de lastre (BWTS) en 2019 (Fig. 1), subiendo al 19% en 2021 y se espera un mayor porcentaje a fecha actual. En el mercado marítimo actual, existen diversos sistemas de tratamiento de agua de lastre bajo diferentes marcas y tipos. Actualmente, los tratamientos predominantes son la radiación UV y la electro-cloración, que representan el 93.6% de las los BWMS instalados (Hess-Erga et al. 2019).

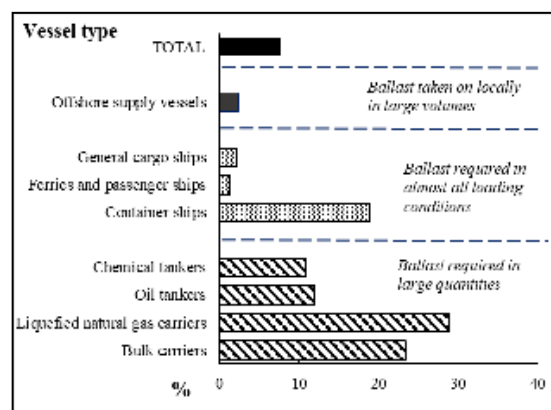


Fig. 1. Porcentaje de Buques con BWTS implementado.
Fuente: UNCTAD, 2019; Programa GloBallast.

Los armadores deben prestar atención a los criterios cualitativos del equipo, así como a los costes de instalación y operación durante la fase de selección del BWTS. Los sistemas pueden rendir de manera diferente en condiciones reales, especialmente en puertos con condiciones de agua desafiantes donde los requisitos de la OMI son superados. Cabe destacar que cuando el contenido de sólidos en suspensión (TSS) excede los límites físicos de los sistemas, los

bloqueos y fallos son inevitables (Gollasch & David, 2024).

Recientemente, la Organización Marítima Internacional (OMI) ha requerido pruebas de eficacia biológica junto con las pruebas de puesta en servicio para validar que los procesos mecánicos, físicos, químicos y biológicos de los BWTS funcionen correctamente, fase conocida como “Experience-Building Phase” (EBP). Esta EBP ha sido crucial para identificar las deficiencias en estos sistemas (Drillet et al. 2023; Outinen et al. 2024). La tasa de fallos fue inicialmente alta (30-60 %), con un promedio de fallos superior al 20 % en las primeras 100 pruebas (Drillet et al. 2023). Los fallos se debieron principalmente a problemas en la instalación, mantenimiento deficiente y calibración incorrecta de los sensores. Aproximadamente un tercio falló en el estándar D-2 y otro tercio en los límites establecidos sobre el oxidante residual. Cabe destacar que este incumplimiento del >20% bajó al 7% aproximadamente entre las primeras pruebas realizadas en octubre de 2019 a las de febrero de 2022. En lo que se refiere a parámetros biológicos de descarga, casi todos los incumplimientos ocurrieron en la fracción de tamaño $\geq 50 \mu\text{m}$, siendo el 97% de incumplimientos de la D-2 con organismos de este tamaño. Además, la mezcla de agua tratada con agua no tratada y la presencia de organismos en los tanques debido a la falta de limpieza y el rebrote de organismos tras el tratamiento fueron causas significativas de fallos. Un aspecto que ha cobrado relevancia es la gestión de organismos menores de $10 \mu\text{m}$, que actualmente no están regulados pero que, debido a su abundancia y diversidad, pueden ocasionar graves impactos en los ecosistemas marinos. Estos organismos, como bacterias y otros microorganismos, pueden mostrar una mayor resistencia a los métodos de tratamiento actuales, lo que subraya la necesidad de una vigilancia más estricta y posiblemente nuevas regulaciones.

3. CONCLUSIONES

La gestión efectiva del agua de lastre sigue siendo un desafío considerable para la industria marítima global. Los resultados de la EBP subrayan la necesidad urgente de mejorar las instalaciones y la capacitación de la tripulación, así como de ajustar los sistemas de tratamiento para garantizar su eficacia bajo condiciones operativas reales. La elección adecuada del sistema de gestión de agua de lastre es crítica para asegurar el cumplimiento de los estándares y la protección de los ecosistemas marinos. Mirando hacia el futuro, es esencial establecer un régimen de pruebas regulares para asegurar que los BWTS se operen correctamente, que los sensores se calibren rutinariamente y que se mantengan adecuadamente. Solo así se podrá garantizar que los BWTS continúen funcionando

según lo previsto y protejan los océanos de la propagación de especies invasoras. Además, se deben considerar nuevas regulaciones para los organismos menores de $10 \mu\text{m}$, cuya resistencia a los tratamientos actuales y potencial impacto negativo demandan una atención especial en la gestión del agua de lastre. La propuesta de indicadores microbiológicos en las distintas fracciones de tamaño ayudaría a estandarizar los procesos de validación de las diferentes tecnologías encaminadas al tratamiento de aguas de lastre.

Agradecimientos

Proyecto ECOTRANSEAS (Ref.: TED2021-130994B-C31) funded by MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por la Unión Europea NextGenerationEU/PRTR Proyecto MOBILED. Ref.: PCM_00015. Consejería de Universidad, Investigación e Innovación de la Junta de Andalucía y por la Unión Europea NextGenerationEU/PRTR, dentro del Plan Complementario Nacional de Ciencias Marinas.

REFERENCIAS

- Drillet, G., Gianoli, C., Gang, L., Zacharopoulou, A., Schneider, G., Stehouwer, P., Bonamin, V., Goldring, R., & Drake, L. A. (2023). Improvement in compliance of ships' ballast water discharges during commissioning tests. *Marine Pollution Bulletin*, 191, 114911.
- Gollasch, S., David, M. (2024). Testing Ballast Water Management Systems: Challenge Water Conditions During More Than 100 Test Voyages. In: David, M., Gollasch, S. (eds) *Global Maritime Transport and Ballast Water Management*. Springer.
- Hess-Erga, O.-K., Moreno-Andrés, J., Enger, Ø., & Vadstein, O. (2019). Microorganisms in ballast water: Disinfection, community dynamics, and implications for management. *Science of The Total Environment*, 657, 704–716.
- Outinen, O., Bailey, S. A., Casas-Monroy, O., Delacroix, S., Gorgula, S., Griniene, E., Kakkonen, J. E., & Srebaliene, G. (2024). Biological testing of ships' ballast water indicates challenges for the implementation of the Ballast Water Management Convention. *Frontiers in Marine Science*, 11, 1334286

Assessment of microplastic contamination in the marine environment

Palma, C.¹; Morgado, V.^{1,2}; Almeida, J.¹; Gomes, G.¹; São Pedro, M.¹, Silva, R.³

1 Instituto Hidrográfico, rua das Trinas, 49, 1249-093 Lisboa, Portugal

2 Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG), Estrada do Paço do Lumiar, 22, 1649-038 Lisboa, Portugal

3 Centro de Química Estrutural, Institute of Molecular Sciences, Departamento de Química e Bioquímica, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Campo Grande, 1749-016 Lisboa, Portugal

Resume: Microplastic pollution has emerged as a significant environmental concern, particularly in marine ecosystems, where its impacts on biodiversity and human health are still being unravelled. This study investigates the extent of microplastic contamination, including the associated uncertainty, in the marine environment of Portugal, aiming to provide a comprehensive assessment of its presence.

Sampling was conducted along the Portuguese coast and in inland waters, namely Ria de Aveiro, Ria Formosa, Mira and Mondego rivers.

Polyethylene, polypropylene, and polystyrene were the most commonly identified polymers, reflecting prevalent plastic production and usage patterns. Microplastics appeared in various forms, including fragments, fibres, and pellets, indicating multiple pathways of entry into the marine environment.

This research provides a critical baseline for future monitoring and supports efforts to protect marine ecosystems and human health from microplastic contamination.

Palabras clave: microplastics, monitoring, uncertainty.

1. INTRODUCTION

Microplastics are considered emerging contaminants in aquatic environments, entering these systems in their original form or as fragments of larger plastic items, leading to their classification as primary or secondary microplastics. These contaminants consist of particles ranging from 1 μm to 5 mm, composed of plastic or polymeric matrices (Frias & Nash, 2019). Due to their small size, microplastics are often mistaken with food and ingested by aquatic species. The monitoring of microplastic contamination includes their physical-chemical characterization (i.e., size, shape, colour, and type of polymer) after proper sample preparation and subsequent analysis using suitable analytical methods (GESAMP, 2015). Monitoring microplastic contamination across different environmental compartments (e.g., sediment, water, and biota) is essential for determining the relevance and trends of this contamination type. This information is crucial for making informed decisions on how to regulate contamination sources more effectively.

This work presents the physical-chemical characterization and distribution of microplastics in sediments from the Portuguese west and south coast (area A, B, D, and E) and four inland waters: Ria de Aveiro (RA), Ria Formosa (RF), Mira river (RMi), and Mondego river (RMO).

2. EXPERIMENTAL

The sediments were collected between 2018 and 2020, from studied locations (Fig. 1 and Fig. 2) using a Petite Ponar Grab or a Ponar Grab for inland waters or a Smith-McIntyre dredge for the Portuguese coast.

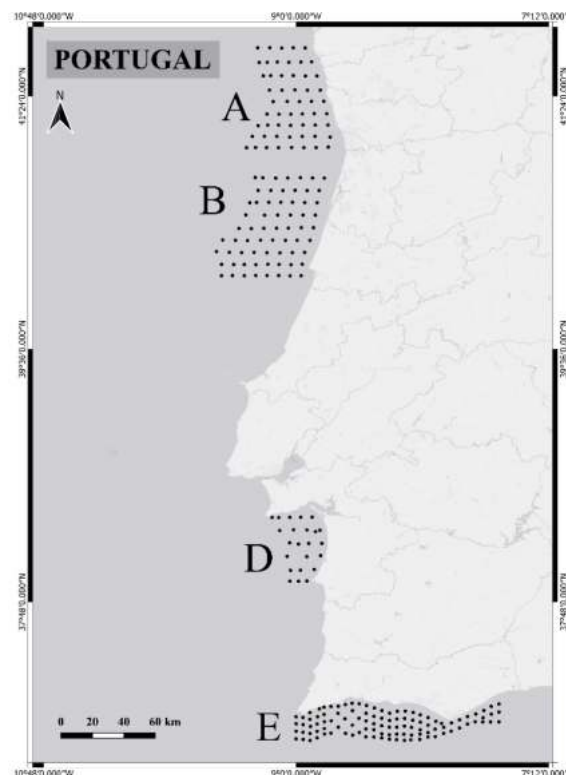


Fig. 1. Sediment sampling areas: A – Viana do Castelo to Porto; B – Aveiro to Figueira da Foz; D – Sesimbra to Sines E – Algarve south coast region.

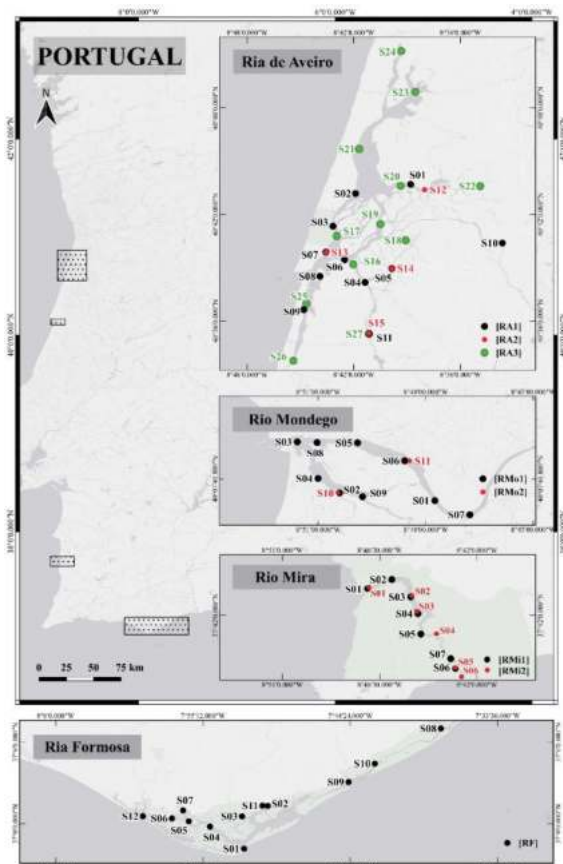


Fig. 2. Geographical positions of sediment sampling in three campaigns from Ria de Aveiro (RA1, RA2, and RA3), one campaign from Ria Formosa (RF), and two campaigns from Mira (RMi1 and RMi2) and Mondego rivers (RMo1 and RMo2).

The collected sediment was placed in a cleaned aluminium tray, homogenized and 2 kg portion of the sediment was stored in aluminium containers inside cooled boxes to be transported to the laboratory. Samples were stored under $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ until preparation.

Sediment samples were prepared according to the following procedure: sediment was sieved through a 5 mm sieve to isolate sediment matter within the size range of microplastics; the weighted sediment was digested using hydrogen peroxide (H_2O_2 , 30% or 35%, Merck); lighter microparticles were separated from the denser matter of the samples using a saturated solution of sodium chloride (NaCl , 99.5%, AppliChem Panreac); the saturated saline solution above the settled matter was filtered onto a polycarbonate membrane ($0.45\text{ }\mu\text{m}$ pore size and $\text{O} = 47\text{ mm}$, Whatman) or a glass fibre membrane (GF/C, $1.2\text{ }\mu\text{m}$ pore size and $\text{O} = 47\text{ mm}$, Roth); the filters were stored in closed Petri dishes until analysis.

The suspicious microparticles on the filters were analysed under a Leica MZ 16 F stereomicroscope using 10x to 25x amplification for the identification of their physical characteristics, namely the shape and colour, following the proposed guidelines (Frias *et al.*, 2018). The microplastics size was estimated by Spectrometer's software (Perkin Elmer). The distance

between the two furthest points of microplastic was measured.

The chemical analysis was performed by the Perkin Elmer spectrometer Spotlight 200i Microscope System (micro-ATR) or by the Perkin Elmer Spectrum Two FTIR (Fourier transform infrared spectroscopy) (ATR). Spectra were collected in reflectance, micro-ATR or ATR mode. Depending on the acquisition mode, spectra were recorded from 4000 cm^{-1} to 600 cm^{-1} or 500 cm^{-1} , using four or eight scans, and a strong Norton-Beer apodisation with 1 cm^{-1} and 4 cm^{-1} wavenumber and resolution intervals, respectively. The method for identifying the polymer type of microplastics was validated by ensuring true and false identification rates were not lower than 95% or higher than 5%, respectively (Morgado *et al.*, 2021a; Morgado *et al.*, 2021b).

3. RESULTS

The study area A (between Viana do Castelo and Porto) comprised 30 stations. A total of 68 particles suspected to be microplastics were isolated and analysed. Of the isolated particles, 11 were identified as microplastics ($\cong 16\%$). The polymers found were polyethylene (PE), polyethylene terephthalate (PET) and polymethyl methacrylate (PMMA).

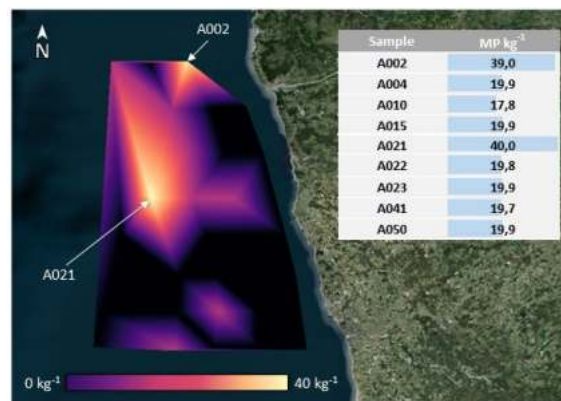


Fig. 3. Spatial distribution of microplastic contamination levels in Area A in 2018.

Fig. 3 presents the spatial distribution of microplastic contamination levels of area A in 2018, determined by the total number of microplastics, MP, per kg of dried sediment sample (MP kg^{-1}), considering the determination of the dry weight of the analytical sample. The samples collected at sampling points A021 and A010 show the highest and lowest values above zero for microplastic abundance, at 40.0 kg^{-1} and 17.8 kg^{-1} , respectively.

In Area B (between Aveiro and Figueira da Foz) a total of 244 particles suspected to be microplastics were isolated and analysed from the 33 sediment samples collected in 2019. Of the isolated particles, 16 were identified as microplastics ($\cong 7\%$). The highest calculated abundance was 81.31 kg^{-1} . The most frequently observed polymer was PP ($\cong 38\%$), followed by PE ($\cong 25\%$).

In Area D (between Sesimbra and Sines) a total of 353 particles suspected to be microplastics were isolated from 20 sediment samples collected approximately at the same geographical coordinates in 2018 and 2019 (i.e., 10 samples per year). Of the isolated particles, 84 were identified as microplastics ($\cong 24\%$).

Fig. 4 presents the spatial distribution of microplastic contamination levels of area E in 2018, as MP kg⁻¹ of dried sediment sample.

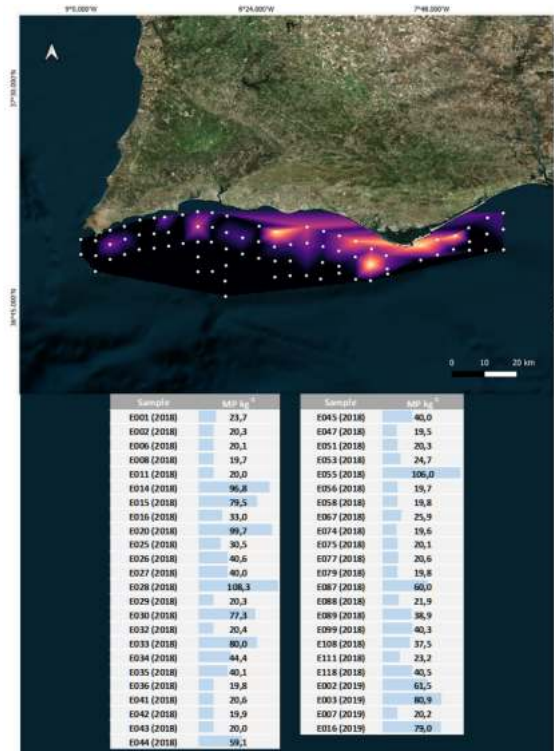


Fig. 4. Spatial distribution of microplastic contamination levels in Area E.

The coastal region of Algarve (Area E) comprises 84 stations. A total of 364 particles suspected to be microplastics were isolated and analysed from the 84 and 6 sediment samples collected in 2018 and 2019, respectively. Of the isolated particles, 86 were identified as microplastics ($\cong 24\%$).

Regarding the four Portuguese estuarine areas (Fig. 2), 1055 microparticles suspected to be microplastics were analysed in the 63 samples collected from. Around 40% of these microparticles were identified as microplastics and were divided into 18 polymer types. Table i lists the number and type of microplastics identified per environmental compartment.

The identified polymer types were distributed into 11 categories. The most frequently observed polymer was PP ($\cong 47\%$), followed by PE ($\cong 24\%$). The "Other" category includes three spectra resulting from a mixture of PE and PP.

Table.i. Number of different types of microplastics and total number of microparticles analysed in 63 samples aliquots from Ria de Aveiro (RA1; RA2; RA3), Ria Formosa (RF), Mira river (RMi), and Mondego river (RMo1; RMo2).

Polymer type	Environmental compartment							Total
	RA1	RA2	RA3	RF	RMi	RMo1	RMo2	
AC	3	-	-	2	-	4	2	11
CA	-	-	-	1	-	-	-	1
EVA	-	2	-	-	1	1	-	4
PA	-	1	-	9	35	-	-	45
PC	-	-	-	-	-	1	-	1
PDMS	-	-	-	3	2	-	-	5
PE	35	3	18	8	29	6	-	99
HDPE	4	1	3	-	-	-	1	9
LDPE	6	1	9	2	3	-	12	33
PET	4	3	1	3	1	-	2	14
PMMA	1	-	-	-	-	-	-	1
PP	18	4	4	36	31	43	13	149
PS	9	4	-	3	-	3	1	20
PTFE	-	-	-	-	-	1	-	1
PU	1	-	-	-	1	-	-	2
PVC	-	-	-	2	-	-	-	2
SBC	5	-	-	6	-	-	-	11
Other	-	-	-	-	1	14	-	15
Microplastics	86	19	35	75	104	73	31	423
Microparticles	191	43	202	181	174	213	51	1055

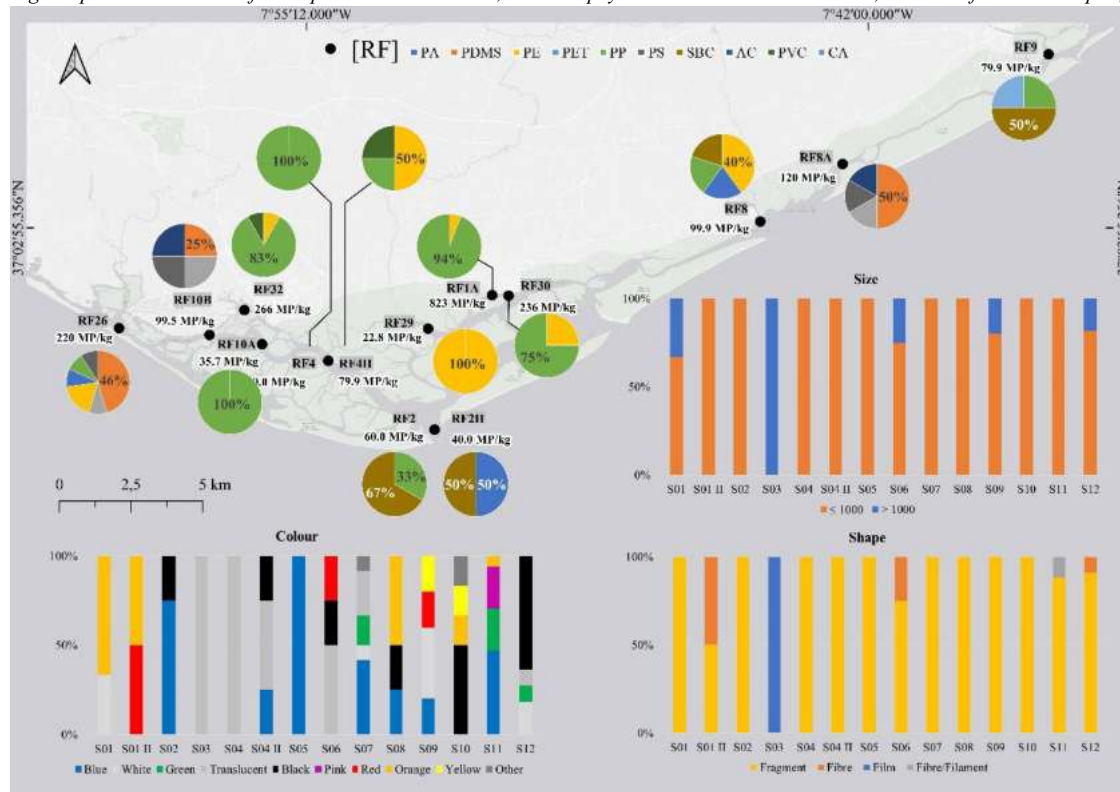
AC – Acrylate copolymer; CA – Cellulose acetate; EVA – Ethylene vinyl acetate; PA – Polyamide; PC – Polycarbonate; PDMS – Polydimethylsiloxane; PE – Polyethylene; HDPE – High density polyethylene; LDPE – Low density polyethylene; PET – Polyethylene terephthalate; PMMA – Polymethylmethacrylate; PP – Polypropylene; PS – Polystyrene; PTFE – Polytetrafluoroethylene; PU – Polyurethane; PVC – Polyvinyl chloride; SBC – Styrene butadiene copolymer.

Fig. 5 presents the observed distribution of microplastic contamination in RF, as MP kg⁻¹ of dried sediment sample. The highest contamination level in RF11 was observed close to an urban site, where the population increases significantly in the summertime.

4. CONCLUSIONS

Microplastics were found at 62 stations (42%), confirming their presence along the entire Portuguese coast. This also provides evidence of a positive correlation between the abundance of microplastics and areas of intense human activity and urbanisation, aligning with the findings and conclusions of various scientific studies (Maes *et al.*, 2017). The presence of microplastics in Ria de Aveiro, Ria Formosa, Mira and Mondego rivers is unequivocal. Only six samples from Ria de Aveiro were not contaminated with microplastics. The microplastics found were mainly fragments lower than 1000 μm identified as PP (33%) and PE (32%). The remaining polymer types were identified as below 15%. The number concentration of microplastic per kilogram of sediment varied between 20 kg⁻¹ to 1090 kg⁻¹. Even so, at least one sample from each compartment presented a number concentration greater than 278 kg⁻¹. The results of this study are helpful for future studies on identifying possible sources and ecotoxicological risks from microplastics. The study and monitoring of microplastics in the ocean are critically important for the future, providing a crucial information base to support the development of methodologies to combat this type of pollution.

Fig. 5. Spatial distribution of microplastic contamination, based on physical-chemical characteristics, estimated from one sampling campaign



in Ria Formosa (RF).

Acknowledgments

This work was supported by the Instituto Hidrográfico through the Operational Program Mar2020 through project “AQUIMAR – Caracterização geral de áreas aquícolas para estabelecimento de culturas marinhas” (MAR2020 n° MAR-02.01.01-FEAMP- 0107).

REFERENCES

Frias, J., Pagter, E., Nash, R., O'Connor, I., Carretero, O., Filgueiras, A., Viñas, L., Gago, J., Antunes, J., Bessa, F., Sobral, P., Goruppi, A., Tirelli, V., Pedrotti, M.L., Suaria, G., Aliani, S., Lopes, C., Raimundo, J., Caetano, M., Palazzo, L., Lucia, G.A., Camedda, A., Muniategui, S., Grueiro, G., Fernandez, V., Andrade, J., Dris, R., Laforsch, C., Scholz-Böttcher, B.M., Gerds, G. (2018). Standardised protocol for monitoring microplastics in sediments, Deliverable 4.2, 24. JPI-Oceans BASEMAN project.

Frias, J. & Nash, R. (2019). Microplastics: finding a consensus on the definition. *Marine Pollution Bulletin*, 138, 145-147.

GESAM (2015). Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: a global assessment. In: Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection, London, U.K.

T. Maes, M.D. Van der Meulen, L.I. Devriese, H.A. Leslie, A. Huvet, L. Frère, J. Robbens, A.D.

Vethaak, Microplastics baseline surveys at the water surface and in sediments of the North-East Atlantic, *Front. Mar. Sci.* 4 (2017) 135

Morgado, V., Palma, C., Bettencourt da Silva, R.J.N. (2021a). Microplastics identification by Infrared spectroscopy – evaluation of identification criteria and uncertainty by the Bootstrap method. *Talanta*, 224, 121814.

Morgado, V., Gomes, L., Bettencourt da Silva, R.J.N., Palma, C. (2021). Validated spreadsheet for the identification of PE, PET, PP and PS microplastics by micro-ATR-FTIR spectra with known uncertainty. *Talanta*, 234, 122624.

Morgado, V., Palma, C., Silva, R.J.N.B. (2022). Bottom-up evaluation of the uncertainty of the quantification of microplastics contamination in sediment samples. *Environmental Science & Technology*, 56, 11080-11090.

Almeida, J.M., Singdahl-Larsen, C., Buenaventura, N., Gomes, L., Morgado, V., Olsen, M., Silva, R.B., Palma, C. (2023). Assessment and comparison of microplastic contamination in Atlantic navigation routes with known uncertainty. *Environmental Science & Technology*, 57, 10062-10069.

Evaluación de riesgos para consumidores de tiburones expuestos a mercurio, selenio y cadmio en México

L. Pantoja-Echevarría¹, A. Marmolejo-Rodríguez², F. Galván-Magaña², E. Tamburin³, A. Pérez-Jiménez^a

laura.pantoja@ugr.es

¹Universidad de Granada (UGR), Avenida del Hospicio, s/n CP. 18010, Granada, España

²Instituto Politécnico Nacional (IPN), Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas (CICIMAR), Avenida Palo de Santa Rita, CP. 23096, La Paz, Baja California Sur, México

³Fundación Alium Pacific, Avenida 26, 5C-13, Cali, Colombia

Resumen: • Se determinaron las concentraciones de mercurio, selenio y cadmio y se evaluó su potencial riesgo en consumidores humanos especialmente para sectores críticos de la población (niños, mujeres embarazadas/lactantes). Los niños, como población más vulnerable, no deben consumir más de 0.5 kg de estos tiburones por semana, como medida de precaución; en adultos, mujeres embarazadas/lactantes, la ingesta puede ser mayor, pero aún con limitaciones para reducir riesgos potenciales. Como medida de precaución, considerando que frecuentemente no estamos seguros de la identidad de las especies de tiburones que consumimos y que varias comunidades pueden comer con frecuencia diferentes especies, sería apropiado que los niños no consuman más de 0.5 kg de carne de tiburón por semana. Aunque el riesgo de consecuencias tóxicas por el consumo de estas especies es bajo, debemos ser conservadores en la utilización de estos recursos debido a la dificultad en la evaluación del riesgo específico de cada especie.

Palabras clave: Contaminación, Evaluación de riesgos, Metales pesados, Salud humana, Tiburones

1. INTRODUCCIÓN

Los organismos marinos, en particular los peces, son una fuente importante de alimento para una dieta humana equilibrada, ya que son una fuente rica de proteínas, minerales esenciales y ácidos grasos poliinsaturados (Pal et al. 2018). Sin embargo, los beneficios para la salud del consumo de pescado van acompañados de preocupaciones generales sobre la contaminación química por oligoelementos como metales pesados (Landrigan et al. 2020).

Los seres humanos están expuestos principalmente a estos elementos a través del consumo (Groth, 2010) y la acumulación de sus elevadas concentraciones puede causar problemas neuronales graves y posibles riesgos cardiovasculares e inmunológicos (Karimi et al. 2014).

Debido a los altos efectos toxicológicos de los metales y las consecuentes preocupaciones internacionales sobre la salud humana, diversas organizaciones establecieron límites estándar permisibles para el consumo humano seguro (Jarosz-Krzemińska et al. 2021).

Las especies de tiburones, como *Mustelus henlei*, *M. californicus*, *Sphyrna zygaena* e *Isurus oxyrinchus*, son importantes recursos pesqueros en la costa occidental de Baja California Sur, México, y

representan importantes fuentes de alimento para el consumo humano (Ramírez-Amaro et al. 2013). Estas especies pueden acumular concentraciones de elementos potencialmente tóxicos en sus tejidos, por lo que su elevado consumo puede afectar la salud humana especialmente para sectores críticos de la población (niños pequeños, mujeres embarazadas y lactantes y adultos).

Los elementos analizados en este estudio incluyeron mercurio (Hg), selenio (Se) y cadmio (Cd) y el objetivo es evaluar su riesgo potencial para estos grupos.

2. DESARROLLO

El estudio se llevó a cabo a partir de las cuatro especies de tiburones recolectadas en las regiones costeras de Las Barrancas ubicada en la costa occidental de la Península de Baja California Sur, México. *M. californicus*: n = 15; *S. zygaena*: n = 6; *I. oxyrinchus*: n = 8; y *M. henlei*: n = 87 muestras fueron recolectadas durante febrero y abril de 2018, aproximadamente a 40 a 46 km de la costa, a profundidades de 50 a 110 m por pescadores artesanales locales. Se extrajeron aproximadamente 30 g de tejido muscular de cada individuo de la parte dorsal cerca de la cabeza. Las concentraciones de Hg, Cd y Se se determinaron mediante espectrometría de absorción atómica según lo informado por Pantoja-Echevarría et al. (2020; 2021). Se midieron

simultáneamente los blancos y los estándares de referencia certificados (DORM-4) para validar los métodos y conocer mejor la precisión y exactitud. Los porcentajes de recuperación de materiales estándar de referencia obtenidos fueron 108.7 %, 106.6 % y 105.6 % para Cd, Hg y Se; respectivamente.

Se calculó la ingesta semanal/mensual estimada (EWI/EMI, $\mu\text{g g}^{-1}$) de Hg y Cd respectivamente:

$$\text{EWI} = \text{AF} * \text{MC}_{\text{Hg}} / \text{BW} \quad (1)$$

$$\text{EMI} = \text{AF} * \text{MC}_{\text{Cd}} / \text{BW} \quad (2)$$

Los EWI/EMI se compararon con la ingesta semanal o mensual tolerable permisible (PTWI/PTMI) (JECFA, 2003; JECFA, 2011).

Para comparar estos dos parámetros se estimó la relación entre EWI/EMI y PTWI/PTMI expresada en porcentaje.

Se determinó la Ingesta Máxima Semanal/Mensual Permitida MAWI o MAMI=PTWI o PTMI / [Hg] o [Cd] respectivamente (Ordiano-Flores et al. 2011; Murillo-Cisneros et al. 2018).

El valor del beneficio para la salud del selenio (Se-HBV) se calculó utilizando la fórmula (Kaneko y Ralston, 2007):

Se determinó el Cociente de peligro (HQ) e Índice de peligro (HI)

$$\text{HQ} = \text{EDI} / \text{RfD} \quad (3)$$

Asimismo, el índice de peligro (THI) es una suma de HQ de todos los elementos metálicos. Cuando el HQ o THI es inferior a 1.0 el consumo de esta especie no supone un riesgo cancerígeno significativo. A mayor valor de HQ o THI, mayor es el riesgo para la salud. Cuando el THI es superior a 10, el riesgo carcinogénico es extremadamente alto (Ahmed et al. 2019).

Se determinó el Cociente de Riesgo Objetivo (THQ) (Chien et al. 2002):

Los valores inferiores a 1 no deberían experimentar ningún riesgo adverso para la salud no cancerígeno.

Para los carcinógenos, los riesgos se estiman como la probabilidad incremental de que un individuo desarrolle cáncer a lo largo de su vida debido a la exposición a un carcinógeno potencial (USEPA, 1989). El nivel $< 10^{-6}$ se considera aceptable, mientras que 10^{-6} y 10^{-4} se consideran un área de preocupación, y los riesgos cancerígenos $> 10^{-4}$ se consideran inaceptables (USEPA, 2005).

$$\text{CR} = \text{LCR} * \text{EDI} \quad (4)$$

3. RESULTADOS

Todos los individuos analizados presentaron concentraciones de Hg y Cd por debajo de los límites máximos permisibles para el consumo humano de $1 \mu\text{g g}^{-1}$ (pw) y $0.5 \mu\text{g g}^{-1}$ (pw). Sin embargo, el hecho de que estos elementos estén presentes en el tejido comestible implica un riesgo para la población (Ordiano-Flores et al. 2011). Los resultados mostraron que el riesgo de toxicidad por Hg y Cd es bajo, porque el EWI/EMI para Hg y Cd en cada

especie de tiburón estaban por debajo del PTWI/PTMI (Tabla i; Health Canada, 2007).

Tabla i: Ingesta semanal/mensual tolerable permisible (%PTWI/PTMI) e ingesta semanal/mensual máxima permitida (MAWI/MAMI) de Hg y Cd para *Mustelus californicus*, *Sphyrna zygaena*, *Isurus oxyrinchus* y *M. henlei* para adultos, mujeres embarazadas/lactantes y niños.

Especies		Adultos	Mujeres	
			embarazadas/lactantes	Niños
<i>M. californicus</i>	%PTWI Hg	0.021	0.073	0.41
	MAWI(Kg)	13.31	5.71	1.52
	%PTMI Cd	0.017	0.029	0.16
<i>S. zygaena</i>	MAMI (Kg)	66.65	57.13	15.23
	%PTWI Hg	0.024	0.082	0.46
<i>I. oxyrinchus</i>	MAWI (Kg)	11.85	5.08	1.35
	%PTWI Hg	0.065	0.22	1.25
<i>M. henlei</i>	MAWI (Kg)	4.39	1.88	0.5
	%PTWI Hg	0.014	0.05	0.26
	MAWI (Kg)	21.14	9.06	2.42

Asimismo, el HQ de todos los elementos estimados fue inferior a 1, lo que concuerda con los resultados obtenidos por Yun-Ju et al. (2021) HQ_{Hg}: 0.242; masculino y HQ_{Hg}: 0.236; femenino y HQ_{Cd}: 0.094; masculino y HQ_{Cd}: 0.092; femenino). Por lo tanto, independientemente de si niños, mujeres embarazadas/lactantes o adultos comen estas especies de tiburones, no habrá ningún riesgo crónico no cancerígeno para la salud. Sin embargo, el riesgo acumulativo para la salud surge cuando las personas están expuestas a elementos mixtos, como es el caso del consumo de músculo de tiburón. De hecho, los tiburones, al igual que otros organismos, exhiben una bioacumulación de metales (oides) que es un proceso integrado de cada oligoelemento. Por tanto, el efecto sobre la salud humana debe analizarse en cada elemento por separado, pero también en los elementos combinados. (Liu et al 2023).

Los resultados del THI fueron inferiores a 1 en todos los sectores de la población, lo que indica que el consumo a largo plazo de estos tiburones no causa riesgos crónicos no cancerígenos para la salud. Sin embargo, hay que considerar que el THI sólo se calculó en base a las concentraciones de los tres elementos analizados (Hg, Cd y Se). Dado que el consumo de músculo de pescado implica una mezcla de todos los elementos diferentes (Boldrocchi et al. 2019), es posible que la inclusión de otros elementos potencialmente tóxicos en el análisis pueda aumentar el THI en algunos sectores de la población, especialmente en niños y mujeres embarazadas/lactantes. El MeHg puede difundirse a través de la barrera hematoencefálica y la placenta, lo que aumenta de 5 a 7 veces el contenido de MeHg en el cerebro fetal, lo que lleva a concentraciones más altas

que las de la sangre materna e induce un mayor riesgo para la salud del feto (Cernichiari et al. 1995). Esto es crucial, porque el MeHg produce alteraciones en el desarrollo del sistema nervioso central en los niños, lo que resulta en un deterioro del aprendizaje y procesamiento de la información (Kim y Lee, 2010).

Asimismo, el selenio es un elemento destacable en este estudio ya que sus altas concentraciones en el organismo pueden provocar intoxicación, a pesar de ser esencial para la vida. Sin embargo en esta investigación las concentraciones de Se no representaron un riesgo para la salud (Azcona y Paz, 2017), debido a que el valor de beneficio de Se medido a través del índice HBVSe fue positivo para todas las especies (*M. californicus* Se-HBV = 0.35, *S. zygaena* Se-VHB = 1.61, *I. oxyrinchus* Se-VHB = 0.051 y *M. henlei* Se-HBV = 0.20). Los resultados obtenidos fueron bajos en comparación con los reportados para especies similares como el tiburón sedoso *Carcharhinus falciformis* en el Océano Índico occidental (HBVSe = 52.3; Bodin et al. 2017), lo que sugiere que el consumo de este producto marino no aporta beneficios para la salud.

Los resultados de THQ para todos los oligoelementos estuvieron por debajo del umbral, a pesar del peor de los casos de una frecuencia de exposición de 365 días al año⁻¹. Estos resultados coinciden con los obtenidos por Boldrocchi et al. (2019) para *Sphyrna lewini* y *Rhizoprionodon acutus* en el Golfo de Tadjoura (Djibouti, latitud 11° 40' N, longitud 43° 00' E) en la entrada sur del Mar Rojo.

El CR solo se calculó para *M. californicus* porque era la única especie que presentaba concentraciones de Cd detectables y que denotaban preocupaciones, principalmente en niños. Aunque el riesgo de intoxicación es bajo, recomendamos que los niños no consuman más de 1.52 kg de carne de *M. californicus*, 1.35 kg de *S. zygaena*, 0.5 kg de *I. oxyrinchus* y 2.42 kg de *M. henlei* por semana, como medida de precaución, ya que los niños representan la población más vulnerable. Para adultos, mujeres embarazadas y lactantes, la ingesta puede ser mayor, pero con un límite para reducir posibles riesgos (Tabla i). Estos hallazgos representan información valiosa para futuras investigaciones, consideraciones de salud humana y el establecimiento de estándares y límites para el consumo humano seguro a nivel mundial.

La presente investigación destacó que, dado que la identificación específica de los diferentes tiburones consumidos a menudo no está clara, su consumo debe mantenerse al mínimo como medida de precaución: en este caso, menos de 0.5 kg por semana por parte de la población infantil. Aunque estas recomendaciones puedan parecer estrictas, la USEPA (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos) ha afirmado que las restricciones tienen como objetivo proteger la salud humana debido a los

efectos tóxicos de los metales pesados. Entonces, este estudio proporciona información adicional sobre el consumo de carne de tiburón y sus posibles riesgos para sectores sensibles de la población (es decir, niños, mujeres embarazadas) y comunidades, como los pescadores artesanales, y constituye una base para futuras investigaciones en todo el mundo.

4. CONCLUSIONES

Aunque el riesgo de consecuencias tóxicas por el consumo de carne de *M. californicus*, *S. zygaena*, *I. oxyrinchus* y *M. henlei* es bajo, debemos ser conservadores en la utilización de estos recursos debido a la dificultad en la evaluación del riesgo específico de cada especie. Además, hay sectores de la población sujetos a mayor riesgo de intoxicación, como son los niños, las mujeres embarazadas/lactantes y las comunidades pesqueras, ya que incluyen un mayor consumo de pescado en su dieta (en relación con el promedio de la población general). En estos casos se deben considerar las concentraciones y el tiempo de exposición para establecer si la exposición fue aguda o crónica. Por lo tanto, aunque los organismos considerados en esta investigación mostraron bajas concentraciones de contaminantes, se recomienda consumir pequeñas cantidades de estos productos marinos, especialmente niños y mujeres embarazadas/lactantes que son la población más vulnerable. Finalmente, nuestras conclusiones resaltaron la importancia de realizar más investigaciones para evaluar los riesgos asociados al consumo de carne de tiburón para la salud humana, proporcionando evidencias importantes para futuras investigaciones en este campo.

Agradecimientos

Agradecemos a las comunidades pesqueras mexicanas del área de Las Barrancas por colaborar con nosotros para apoyar el proceso de muestreo y al Instituto Politécnico Nacional para becas (COFAA, EDI).

REFERENCIAS

- Ahmed ASS, Sultana S, Habib A, Rahman MM, Sarker MSI (2019) Bioaccumulation of heavy metals in some commercially important fishes from a tropical river estuary suggests higher potential health risk in children than adults. *PLoS One* 14, e0219336.
- Azcona R, Paz M (2017) Bioacumulación de distintas especies de selenio y sus efectos en organismos marinos. Universidad de Huelva. 269 pp.
- Bodin Ö (2017) Collaborative environmental governance: achieving collective action in social-ecological systems. *Science* 357(6352), 1114.
- Boldrocchi G, Monticelli D, Omar YM, Bettinetti R (2019) Trace elements and POPs in two commercial

- shark species from Djibouti: Implications for human exposure *STOTEN* 669, 637-648.
- Cernichiari E, Brewer R, Myers GJ, Marsh DO, Lapham LW, Cox C (1995). Monitoring methylmercury during pregnancy: Maternal hair predicts fetal brain exposure. *Neurotoxicology*, 16, 705-710.
- Chien LC, Hung TC, Choang KY, Yeh CY, Meng PJ, Shieh MJ, Han BC (2002) Daily intake of TBT, Cu, Zn, Cd and As for fishermen in Taiwan. *STOTEN* 285, 177-185.
- Groth III E (2010) Ranking the contributions of commercial fish and shellfish varieties to mercury exposure in the United States: implications for risk communication. *Environ Res*, 110(3), 226-236.
- Health Canada, Human health risk assessment of mercury in fish and health benefits of fish consumption, Bureau of Chemical Safety Food Directorate Health Products and Food Branch, Ottawa, 2007. En http://www.hc-sc.gc.ca/fnan/pubs/mercur/merc_fish_poisson-eng.php#share
- Jarosz-Krzemińska E, Mikołajczyk N, Adamiec E (2021) Content of toxic metals and As in marine and freshwater fish species available for sale in EU supermarkets and health risk associated with its consumption. *J Sci Food Agric* 101(7), 2818-2827.
- JECFA (2003) Summary and Conclusions of the 61st Meeting of the Joint FAO/WHO Expert Committee of Food Additives (JECFA). In: JECFA/61/SC. Italy, Rome.
- JECFA (2011) 73th report of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives. WHO technical report series, no. 960.
- Ju YR, Chen CF, Chen CW, Wang MH, Joung SJ, Yu CJ, Dong CD (2021) Profile and consumption risk assessment of trace elements in megamouth sharks (*Megachasma pelagios*) captured from the Pacific Ocean to the east of Taiwan. *Environ Pollut* 269, 116161.
- Kaneko JJ, Ralston NV (2007) Selenium and mercury in pelagic fish in the central north Pacific near Hawaii. *Biol Trace Elem Res* 119(3), 242-254.
- Karimi R, Fisher NS, Meliker JR (2014) Mercury-nutrient signatures in seafood and in the blood of avid seafood consumers. *STOTEN* 496, 636-643.
- Kim NS, Lee, BK (2010). Blood total mercury and fish consumption in the Korean general population in KNHANES III, 2005. *Science of the total environment*, 408(20), 4841-4847. 026
- Landrigan PJ, Stegeman JJ, Fleming LE, Allemand D, Anderson DM, Backer LC, Rampal P (2020) Human health and ocean pollution. *Annals. of global health*, 86(1).
- Liu, BY, Chen, IW, Chen, PW, Chen, TY, Hwang DF (2023). Risk assessment of methylmercury and species identification in shark meats ingested by Taiwan children. *Food Control*, 145, 109461.
- Murillo-Cisneros DA, O'Hara TM, Castellini JM, Sánchez-González A, Elorriaga-Verplancken FR, Marmolejo-Rodríguez AJ, Galván-Magaña F (2018) Mercury concentrations in three ray species from the Pacific coast of Baja California Sur, Mexico: Variations by tissue type, sex and length. *Mar Pollut Bull*, 126, 77-85.
- Ordiano-Flores A, Galván-Magaña F, Rosiles-Martínez R (2011) Bioaccumulation of mercury in muscle tissue of yellowfin tuna, *Thunnus albacares*, of the eastern Pacific Ocean *Biol Trace Elem Res* 144(1), 606-620.
- Pal J, Shukla BN, Maurya KA, Verma HO, Pandey G, Amitha A (2018) A review on role of fish in human nutrition with special emphasis to essential fatty acid. *Int J Fish Aquat Stud* 6(2): 427-430.
- Pantoja-Echevarría LM, Marmolejo-Rodríguez AJ, Galván-Magaña F, Arreola-Mendoza L, Tripp-Valdéz A, Elorriaga-Verplancken FR, Jonathan MP (2020) Bioaccumulation and trophic transfer of Cd in commercially sought brown smoothhound *Mustelus henlei* in the western coast of Baja California Sur, Mexico. *Mar Pollut Bull* 151, 110879.
- Pantoja-Echevarría LM, Marmolejo-Rodríguez AJ, Galván-Magaña F, Elorriaga-Verplancken FR, Tripp-Valdez A, Tamburin E, Arreola-Mendoza L (2021) Mercury and selenium concentrations in different tissues of brown smooth-hound shark (*Mustelus henlei*) from the western coast of Baja California Sur, Mexico. *Mar Pollut Bull* 170, 112609.
- Ramírez-Amaro SR, Cartamil D, Galvan-Magaña F, Gonzalez-Barba G, Graham JB, Carrera-Fernandez M, Rochin-Alamillo A (2013) The artisanal elasmobranch fishery of the Pacific coast of Baja California Sur, Mexico, management implications. *Sci Mar* 77(3), 473.
- USEPA (2005) Guidelines for Carcinogen Risk Assessment. Risk Assessment Forum, US Environmental Protection Agency.

Caracterización acústica de plataformas petrolíferas offshore en alta mar durante la producción

N. Pérez-Gimeno (1), J.L. Cueto-Ancela (1), E. Nava-Baro (2)

(1) Departamento Ciencias y Técnicas de la Navegación y Construcciones Navales, Escuela de Ingenierías Marinas, Náutica y Radioelectrónica, Instituto Universitario de Investigación Marina (INMAR), Laboratorio de Ingeniería Acústica, Universidad de Cádiz, Puerto Real 11519, Cádiz, España. E.mail: neus.perez@uca.es

(2) Departamento de Ingeniería de Comunicaciones, Universidad de Málaga, Málaga 29016, España.

Resumen: Existe escasa información sobre el ruido generado por plataformas petrolíferas fijas offshore durante la explotación. En colaboración con Repsol Investigaciones Petrolíferas S.A (RIPSA), se realizó una campaña de mediciones acústicas en aguas Mediterráneas, desplegando tres registradores con hidrófono a 500 metros de una plataforma fija de gas y petróleo. Se analizaron los niveles sonoros en banda ancha promedio 24 horas, tercio de octava y densidad espectral de potencia y se describió la huella acústica submarina de la actividad.

Los resultados mostraron una correlación entre los niveles sonoros y la producción de los pozos, destacando los pozos 2 y 3 por su mayor productividad e influencia en los niveles sonoros registrados, a pesar de estar a varios kilómetros de la plataforma. El pozo 1, situado a 500 metros de los puntos de medición y con una producción diaria elevada, también mostró dependencia significativa de los niveles sonoros diarios. Se catalogaron los eventos sonoros dominantes y se ofreció una visión global de la distribución temporal de los niveles de ruido subacuático.

Palabras clave: huella acústica, monitorización acústica pasiva, producción offshore, ruido submarino.

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, la prevalencia de plataformas petrolíferas en alta mar ha aumentado significativamente dentro de la industria del petróleo y el gas (Kostianoy y Carpenter, 2018). La plataforma offshore objeto de estudio es una estructura fija (ver Fig. 1), cuyo sonido producido está influido por múltiples factores (Gales, 1982). La bibliografía disponible sobre la caracterización de las emisiones sonoras de estas plataformas es limitada (Genesis,

2011; Kent et al., 2013; Rossi-Santos, 2015). Tanto el sonido producido por las plataformas de perforación fijas (Jiménez- Arranz et. al., 2020) como sus potenciales efectos adversos sobre el medio marino son aún poco conocidos (Tyack y Janik, 2013; Rossi-Santos, 2015), lo que hace necesario un análisis más exhaustivo centrado en el impacto acústico submarino de este tipo de actividades (Spence et al., 2023).

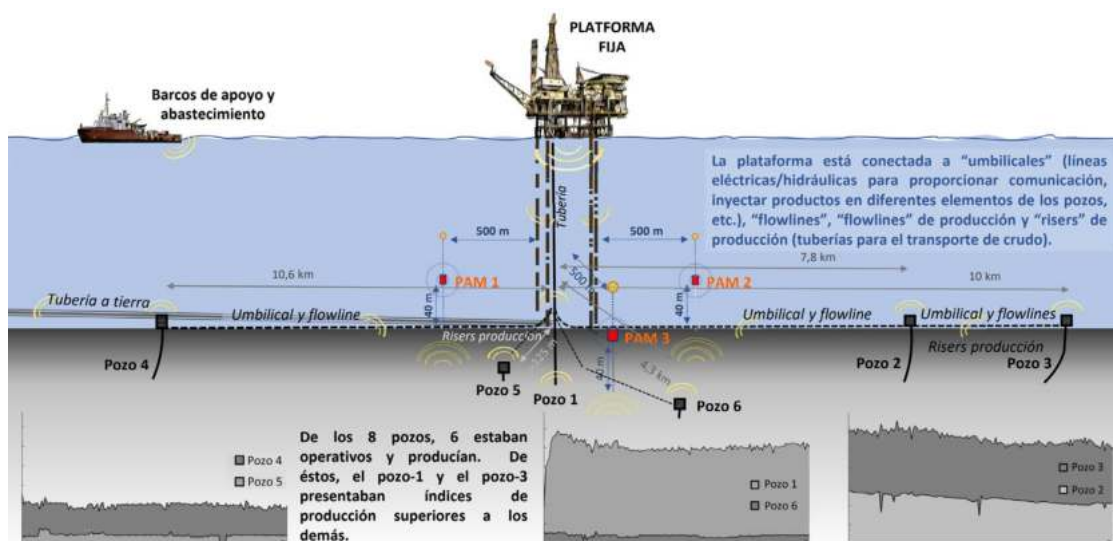


Fig. 1. Esquema de los puntos de medición y de la ubicación de los elementos de la plataforma de producción, mostrando la evolución temporal del periodo de estudio de la producción de 6 pozos.

Por todo ello, los principales objetivos de este estudio son procesar esta información para:

- Examinar las tendencias temporales tanto de los niveles sonoros de banda ancha (SPL_{24h}) como de tercios de octava en función de la producción de los pozos (24h) y el consumo diario de los barcos de apoyo y abastecimiento.
- Describir la huella de ruido submarino de una plataforma petrolífera fija en alta mar durante su explotación en el Mar Mediterráneo.

2. METODOLOGÍA.

En el 2017 se fundearon, en sucesivas campañas y durante cinco meses (del 01/10/16 al 24/02/17), tres equipos Monitorización Acústica Pasiva (PAM) a 500 metros de una plataforma de producción de hidrocarburos situada a 50 km de la costa en aguas del Mediterráneo. Los PAM se programaron para registrar el sonido en ciclos periódicos de manera que se grabara un 14% del tiempo. La frecuencia de muestreo fue de 96 kHz y resolución de 16 bits (ancho de banda 2 Hz - 48 kHz). Se registraron más de 420 horas de grabaciones en formato .wac (.wav comprimido).

Paralelamente se recogieron datos no acústicos como la producción diaria de 10 pozos, movimiento de barcos de apoyo, datos meteorológicos de la zona (velocidad y dirección viento, altura significativa y máxima del oleaje, periodos), etc.

Procesamiento y tratamiento de las mediciones acústicas

Los niveles sonoros de banda ancha (SPL, dB re 1 μ Pa RMS) se calcularon promediando intervalos de 3 minutos y de 24 horas (SPL_{24h} , dB re 1 μ Pa). Se estimaron los promedios en tercios octava (dB re 1 μ Pa/Hz) utilizando un banco de filtros de tercera octava implementado en *MatLAB* según la norma ANSI S1.6- 1984 (Christophe Couvreur, Faculte Polytechnique de Mons, Bélgica). Y la densidad del espectro de potencia (PSD) se calculó mediante la interfaz CHORUS (Australia et al., 2014), utilizando la ventana temporal de cada fondeo.

En cuanto a la producción, del total de 10 pozos, 4 pozos estaban inactivos y se excluyeron del análisis. Además, se consideró que el consumo de 24 horas de los buques de apoyo y suministro representan su actividad.

Se examinaron las correlaciones entre los niveles sonoros recibidos y distintos parámetros de producción. Por tanto, se investigaron tendencias temporales tanto de SPL_{24h} como de cada banda de tercio de octava en función de la producción diaria de los pozos con la prueba de Kruskal-Wallis. Para evaluar la asociación entre variables se utilizó la correlación de rangos de Spearman.

Por tanto, se investigó la relación entre las actividades de producción de los pozos/movimiento de los buques de suministro versus SPL_{24h} y tercios de octava.

Las variables incluidas en el análisis de correlación de banda ancha fueron: PAM 1 SPL_{24h} , PAM 2 SPL_{24h} , PAM 3 SPL_{24h} , y Pozos #1, #2, #3, #4, #5 y #6.

3. RESULTADOS

Los SPL_{24h} de los tres puntos PAM (ver Tab. i y Fig. 2) se situaron entre 111 y 114 dB re 1 μ Pa.

Los PSD reflejan el escenario acústico de la actividad de una plataforma durante su fase de explotación en tres puntos de medida (ver Fig. 3 y Fig. 4). Se observa cómo están dominados por sonidos antropogénicos en baja frecuencia (explosiones en el rango de banda < 100 Hz) y frecuencias medias (de 100 Hz- 2000 Hz). Además, se observa un patrón diario en las frecuencias altas (en torno a 20 kHz) vinculado a los periodos día/noche.

Los resultados de la prueba de Kruskal-Wallis indicaron que los pozos de mayor producción presentaban relaciones con los SPL_{24h} (valores p se consideraron significativos a $p < 0,05$), detectándose la correlación más fuerte (valores $p < 0,01$) en los pozos #2 y #3 (situados en la tubería o línea del Este).

Las tendencias temporales de los niveles de sonido en tercios de octava mostraron que el ruido en las frecuencias medias, especialmente entre 500 Hz y 1 kHz, así como en las frecuencias más altas, entre 3,15 kHz y 20 kHz, se correlacionó con la producción de los pozos. En particular, estas frecuencias presentaron una correlación significativa con la producción de los pozos #1 y #3, y en menor medida con los pozos #2 y #4.

Además, a diferencia de los SPL_{24h} , los resultados de los tercios de octava indicaron una relación con los datos de consumo de 24 horas de los buques de suministro y apoyo. Las frecuencias más significativamente correlacionadas se encontraron en el rango de 500 Hz a 8000 Hz.

Tab. i Descripción estadística de los parámetros analizados..

	N	Media	Desviación	Min	Max
Pto. 1 SPL _{24h}	133	111,540	3,500	104,983	127,273
Pto. 2 SPL _{24h}	123	112,632	3,684	104,844	119,731
Pto. 3 SPL _{24h}	139	113,795	2,452	109,104	121,794
Producción Pozo 1	146	337,694	26,585	246,560	448,830
Producción Pozo 2	146	604,705	38,553	287,658	736,793
Producción Pozo 3	146	657,423	44,886	360,040	749,482
Producción Pozo 4	146	297,152	14,422	233,009	360,705
Producción Pozo 5	146	141,094	18,801	0,000	176,720
Producción Pozo 6	146	140,121	7,698	118,370	167,525
Consumo barco apoyo (24h)	146	1421,589	702,437	200	3989
Altura ola (24h)	146	1,219	0,861	0,188	5,092
Veloc. Viento (24h)	146	5,255	2,999	0,638	14,188

Nota: N es el número de muestras analizadas y se marcan en negrita los valores máximos de producción.

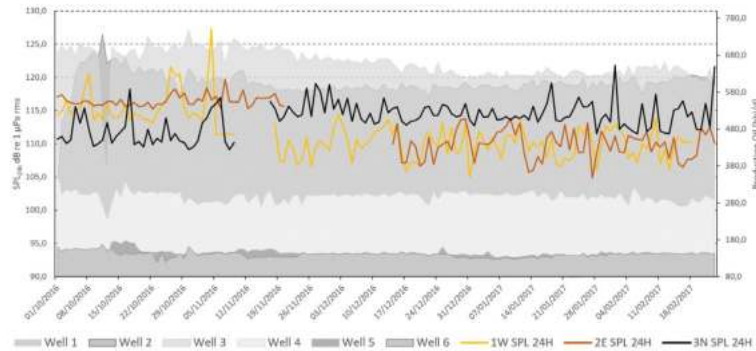


Fig. 2. SPL_{24h} (01/10/2016 al 24/02/2017) de los 3 puntos PAM. Los tonos grises corresponden a la producción de 6 pozos.

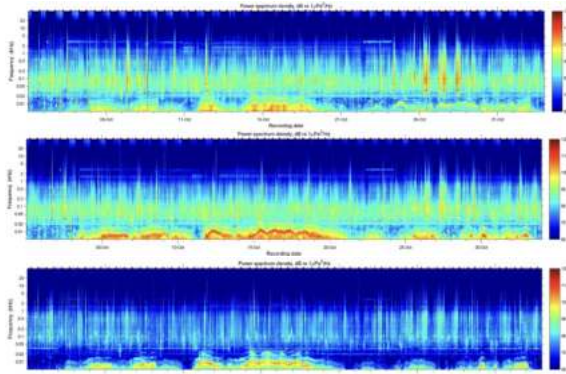


Fig. 3. PSD campaña #1 (octubre - noviembre 2016). Imagen superior PAM 1; imagen central, PAM 2; imagen inferior, PAM 3.

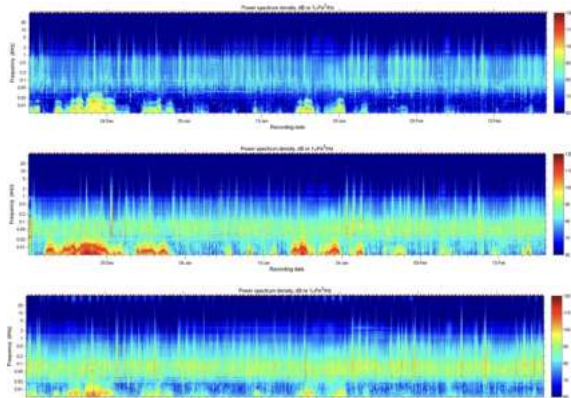


Fig. 4. PSD campaña #1 (noviembre 2016 - febrero 2017). Imagen superior PAM 1; imagen central, PAM 2; imagen inferior, PAM 3.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Valores similares a los obtenidos (ver Tab. i y Fig. 2) han sido documentados en otros estudios relacionados con el sonido submarino generado por actividades petrolíferas en alta mar (Kent et al. 2013). Sin embargo, el nivel medio estimado de banda ancha parece ser relativamente inferior en comparación con otras plataformas de petróleo y gas que no son fijas (Jiménez- Arranz et. al., 2020).

Se observó una correlación entre los SPL_{24h}, y la productividad de los pozos, especialmente aquellos con mayor producción diaria. La correlación más fuerte (observada en los tres puntos de medida) fue con los pozos #2 y #3, lo que sugiere que estos pozos

y/o las tuberías que los conectan a la plataforma se encuentran entre las principales fuentes de ruido. Los pozos #2 y #3 están situados en el mismo oleoducto de producción en el sector oriental y, aunque estaban alejados de la plataforma y de los puntos de medición (7,8 km y 10 km, respectivamente), su actividad contribuía significativamente a los niveles sonoros diarios en la zona de estudio. El Pozo #1, que también mostró una dependencia significativa de los SPL_{24h}, en PAM2 y PAM3, estaba situado justo debajo de la plataforma.

Por otro lado, los PSD (ver Fig. 3 y Fig. 4) describieron patrones día/noche en alta frecuencia (hasta 20 kHz). Estos niveles de ruido eran generalmente bajos y no estaban claramente

vinculados al ruido de la plataforma, siendo atribuibles a actividad biológica.

Una de las principales aplicaciones de estos resultados radica en la modelización acústica de una plataforma fija offshore durante su fase de explotación, la cual puede durar varias décadas. En este contexto, además de la propia plataforma como fuente de ruido, se debe considerar también a los pozos con mayor producción como focos sonoros relevantes. Además, los niveles sonoros varían temporalmente, por lo que es esencial tener en cuenta diferentes tipos de funcionamiento o eventos sonoros en el modelo.

En conclusión:

Contribución a la contaminación acústica marina: La actividad de explotación de plataformas fijas petrolíferas contribuye a la contaminación acústica marina al generar sonido en una amplia gama de frecuencias, abarcando desde 10 Hz hasta 48 kHz (todo el rango de medida).

Correlación entre producción y niveles sonoros: Aunque se ha establecido una correlación significativa entre los SPL_{24h} y la producción de los pozos, esta relación no siempre se manifiesta de manera uniforme. El actual análisis demuestra una conexión clara entre el ruido y la actividad de producción, pero identificar de manera precisa la fuente específica de estos sonidos (como los provenientes de tuberías, líneas umbilicales o la propia plataforma) sigue siendo un desafío.

Aplicaciones prácticas: Los hallazgos son fundamentales para la modelización acústica submarina de plataformas fijas offshore, debiéndose considerar no solo la plataforma como fuente de ruido, sino también los pozos de mayor producción. Además, se debería incluir varios tipos de funcionamiento o eventos sonoros para representar con precisión las variaciones temporales en los niveles sonoros.

Agradecimientos

Agradecemos a Repsol Investigaciones Petrolíferas S.A. (RIPSA) por su colaboración y apoyo en este estudio.

REFERENCIAS

Gales, R. S. (1982). Effects of noise of offshore oil and gas operations on marine mammals: An introductory assessment. San Diego, CA.

Gavrilov, A. N., & Parsons, M. J. G. (2014). A Matlab tool for the characterisation of recorded underwater sound (CHORUS). *Acoustics Australia*, 42(3), 190-196. <http://www.wildlifeacoustics.com/products/song-scope-overview>.

Genesis Oil and Gas Consultants Ltd. (2011). Review and assessment of underwater sound produced from oil and gas sound activities and potential reporting requirements under the Marine Strategy Framework Directive. Informe para *Department of Energy and Climate Change*. <http://www.wildlifeacoustics.com/products/song-scope-overview>.

Jiménez-Arranz, G., Banda, N., Cook, S., & Wyatt, R. (2020). Review on existing data on underwater sounds produced by the oil and gas industry. Seiche Ltd., *Joint Industry Programme (JIP) - E&P Sound and Marine Life*.

Kent, C. S., McCauley, R. D., Duncan, A., Erbe, C., Gavrilov, A., Lucke, K., & Parnum, I. (2016). Underwater sound and vibration from offshore petroleum activities and their potential effects on marine fauna: An Australian perspective (*Project CMST 1218, Report 2015-13*). Centre for Marine Science and Technology, Curtin University. Para APPEA.

Kostianoy, A. G., & Carpenter, A. (2018). Oil and gas exploration and production in the Mediterranean Sea. En *The Handbook of Environmental Chemistry* (pp. 53-77). Springer. https://doi.org/10.1007/698_2018_373.

Rossi-Santos, M. R. (2015). Oil industry and noise pollution in the humpback whale (*Megaptera novaeangliae*) soundscape ecology of the Southwestern Atlantic breeding ground. *Journal of Coastal Research*, 31(1), 184-195. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-13-00195.1>.

Spence, J., Fischer, R., Bahtiaran, M., Boroditsky, L., Jones, N., & Dempsey, R. (2007). Review of existing and future potential treatments for reducing underwater sound from oil and gas industry activities. Noise Control Engineering, Incorporated. <https://trid.trb.org/View/883689>. Accessed: Jul. 11, 2023.

Tyack, P., & Janik, V. (2013). Effects of noise on acoustic signal production in marine mammals. En H. Brumm (Ed.), *Animal communication and noise* (pp. 251-271). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-41494-7_9.

Aporte contaminante al Golfo de Cádiz por procesos de drenaje ácido de minas (AMD)

C. Ruiz Cánovas (1), M.D Basallote (2), R. Pérez-López (1), F. Macías (1), M. Olías (1), J.M Nieto (1)

(1) Departamento de Ciencias de la Tierra & Centro de Investigación en Recursos Naturales, Salud y Medioambiente (RENSMA), Universidad de Huelva, Avda. Tres de Marzo s/n, 21071, Huelva. carlos.ruiz@dgeo.uhu.es

(2) Departamento de Ecología y Gestión Costera. Instituto de Ciencias Marinas de Andalucía (ICMAN-CSIC), E-11510, Puerto Real.

Resumen: El Estuario de la Ría de Huelva está fuertemente afectado por contaminación metálica asociado al drenaje ácido de minas (AMD) causado por minería histórica en la Faja Pirítica Ibérica (FPI). Estos metales mayoritariamente precipitan durante los procesos de mezcla estuarina y son retenidos en los sedimentos, sin embargo, una fracción de los elementos más móviles atraviesa el estuario, llegando al Golfo de Cádiz e incluso al Estrecho de Gibraltar. Este estudio revisa los resultados obtenidos por los diferentes muestreos realizados en este sistema fluvio-marino para analizar la tendencia seguida por el contenido de metales en el Golfo de Cádiz. Los metales y metaloides transportados por los ríos Tinto y Odiel son transferidos mayoritariamente al sedimento (especialmente Fe y Al), sin embargo, otros metales y metaloides (e.g., Cd, Co, Ni, As o Zn) son afectados en menor medida por estos procesos y atraviesan el estuario hacia el Golfo de Cádiz.

Palabras clave: carga contaminante; drenaje ácido de minas, Golfo de Cádiz, mezcla estuarina, precipitación mineral.

1. INTRODUCCIÓN

En la década de los 80 se observaron elevadas concentraciones de metales en las aguas del Golfo de Cádiz durante una expedición oceanográfica organizada por el Woods Hole Oceanographic Institution de Massachusetts (Sherrell and Boyle, 1988). Debido a las bajas concentraciones transportadas por los principales ríos ibéricos que desembocan en esta zona, como el río Guadalquivir, se descartó el aporte fluvial de metales como causante de estas elevadas concentraciones y se asoció a procesos de *upwelling*, esto es, el ascenso de agua procedente de zonas profundas del océano y atrapamiento de los metales en el golfo de Cádiz (van Geen et al., 1991). Sin embargo, Elbaz-Poulichet y Leblanc (1996) identificaron la fuente metálica en dos pequeños cursos fluviales realmente secundarios en relación al río Guadalquivir como los ríos Tinto y Odiel, que transportan elevadas cargas de acidez, sulfatos, metales y metaloides al estuario de la Ría de Huelva.

Los ríos Tinto y Odiel están intensamente afectados por procesos de drenaje ácido de minas (AMD), como consecuencia de la intensa actividad minera llevada a cabo en la Faja Pirítica Ibérica (FPI) especialmente en los últimos 150 años. Como consecuencia, se estima que alrededor de 7900 t/año de Fe, 5800 t/año de Al, 3500 t/año de Zn, 1700 t/año de Cu y 1600 t/año de Mn son transportados por ambos ríos hacia el estuario de la Ría de Huelva (Nieto et al., 2013). La Ría de

Huelva es un medio de transición entre las descargas fluviales ácidas de los ríos Tinto y Odiel y las condiciones marinas. Aparte de la existencia de una cuña de agua salina y una disminución progresiva de la salinidad tierra adentro que se observa en los estuarios, en la Ría de Huelva se produce la neutralización ácida de las aguas afectadas por AMD. Esta neutralización ácida desencadena una serie de procesos geoquímicos que controla la movilidad de los metales y su transferencia al Golfo de Cádiz, con un rango de valores de pH comprendidos entre 2.5–3.5 en la parte fluvial del estuario a valores cercanos a 8 en muy corto espacio. Este estudio revisa los resultados obtenidos en diferentes muestreos realizados en este sistema fluvio-marino para analizar su impacto en el Golfo de Cádiz

2. DESARROLLO

El comportamiento de los metales durante su tránsito en el estuario se ha estudiado mediante la recogida de muestras en barco a lo largo de la Ría de Huelva (Fig. 1). En el año 2018 se llevaron a cabo dos muestreos en diferentes condiciones hidrológicas: durante un evento de intensas precipitaciones (marzo, 201 mm), donde los ríos llevaban un caudal más elevado, y otro muestreo con un menor aporte fluvial (mayo, 51 mm). Además, se tomaron muestras en aguas costeras en dirección Este-Oeste del estuario, tomando como puntos de muestreos aquellos publicados en literatura. Para limitar procesos de contaminación por el barco durante el muestreo, las muestras se tomaron a 10 m de profundidad con una botella Van Dorn,

excepto para zonas de aguas someras donde la profundidad del muestreo fue de 5 m. Los parámetros físico-químicos (pH, conductividad eléctrica, potencial redox (ORP) y temperatura) se midieron in situ mediante un medidor multiparamétrico Crison MM40+, que fue previamente calibrado en tres puntos para CE y pH (147 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 1413 $\mu\text{S}/\text{cm}$, y 12.88 mS/cm , y 4.01, 7.00, y 9.21, respectivamente), mientras que ORP fue controlada usando 2 puntos con soluciones certificadas (220 y 470 mV). A bordo, se dividió la muestra en dos alícuotas: una filtrada a 0.45 μm para el estudio de los contaminantes disueltos y la otra sin filtrar para el estudio de los contaminantes totales después de una digestión ácida.



Fig. 1. Ubicación de los puntos de muestreo dentro del estuario de la Ría de Huelva durante los muestreos de marzo y mayo de 2018. O: Odiel, TR: Tinto, C: canal común. La zona amarilla indica dominio fluvial y la azul marina.

La concentración de elementos mayoritarios fue determinada mediante espectroscopía de emisión atómica por plasma acoplado inductivamente (ICP-AES; Jobin Yvon Ultima 2) en los Servicios I+D de la Universidad de Huelva, mientras que los metales traza fueron analizados mediante espectroscopía de masas por plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) con un Thermo Scientific iCAP TQ ICP-MS en la Plateforme AETE-ISO (HydroSciences/OSU OREME, Universidad de Montpellier) sin dilución previa.

3. RESULTADOS

Las figuras 2 y 3 muestran la evolución del pH y la concentración disuelta y total de Fe y As en los estuarios de los ríos Tinto y Odiel. Se observa un incremento progresivo del pH, desde valores entre

2.7-4.0 en la parte fluvial de ambos ríos a valores de 8.0 en la parte marina del estuario común. En la zona de mezcla (marca naranja; Fig. 2), el aumento de pH va acompañado de una disminución drástica en la concentración de hierro disuelto en el agua por procesos de precipitación mineral, fundamentalmente por la precipitación de schwertmannita ($\text{Fe}_8\text{O}_8(\text{OH})_6\text{SO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$). Este mineral posee una elevada capacidad de retención de contaminantes en medios afectados por AMD debido a procesos de sorción y coprecipitación (Acero et al., 2006). El arsénico, un elemento traza, que destaca por su toxicidad, es inicialmente retenido debido a la precipitación de Fe, mientras que a valores de pH próximos a la neutralidad (a partir de la línea discontinua roja vertical; Figs. 2 y 3) las concentraciones de arsénico aumentan probablemente a procesos de desorción causados por un cambio en la carga superficial de los minerales de Fe. Estos resultados se observan en diferentes condiciones estacionales, por ejemplo, antes y después del periodo estival y, especialmente, en los eventos de avenidas.

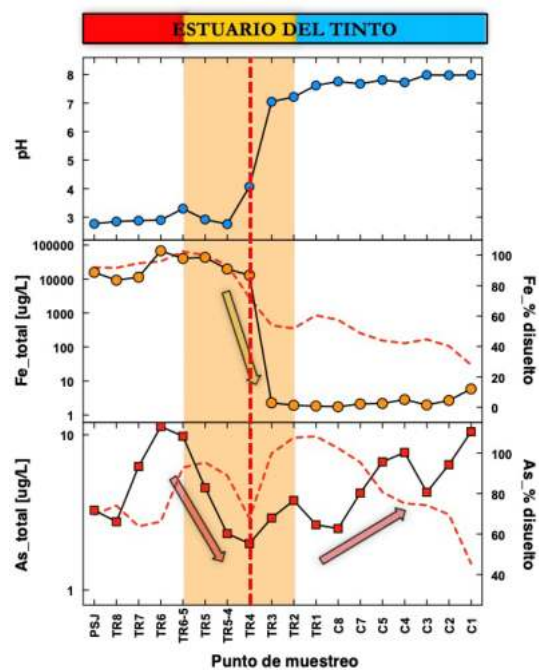


Fig. 2. Evolución del pH y de las concentraciones totales (líneas discontinuas; en escala logarítmica) y porcentaje disuelto de Fe y As (líneas con símbolos) a lo largo del estuario del río Tinto. Color rojo indica dominio fluvial, amarillo azul dominio marino y amarillo mezcla.

Otros metales de origen minero tales como Al, Cu, Zn, Cd, o Co, se encuentran en solución como cationes con carga positiva y, por tanto, sufren un proceso de repulsión electrostática con la superficie de schwertmannita, también cargada positivamente, por lo que la precipitación de este mineral no suele controlar la movilidad de esos metales. De estos metales, algunos mayoritarios como Al y, en menor medida, Cu tienen un comportamiento no conservativo en el estuario, como sucede con el

hierro. Sin embargo, otros metales de origen minero como Zn, Cd, Co o Ni tienen un comportamiento conservativo en el estuario, y la disminución de las concentraciones de estos elementos se debería exclusivamente a un efecto de dilución por agua de mar.

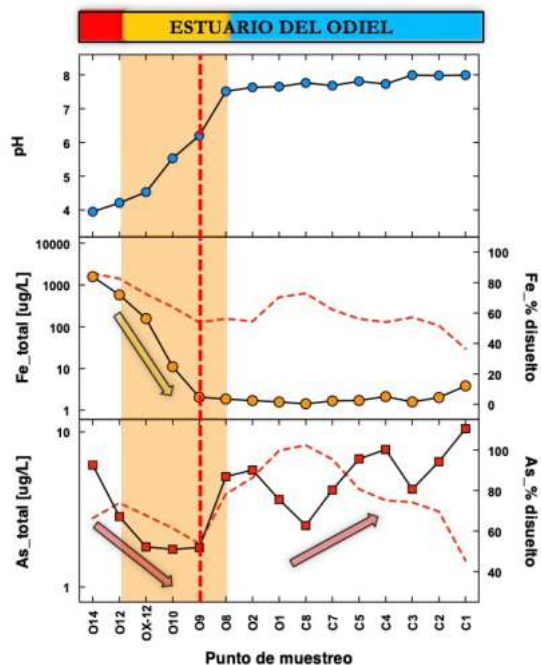


Fig. 3. Evolución del pH y de las concentraciones totales (líneas discontinuas; en escala logarítmica) y porcentaje disuelto de Fe y As (líneas con símbolos) a lo largo del estuario del río Odiel. Color rojo indica dominio fluvial, amarillo azul dominio marino y amarillo mezcla.

No se produciría por tanto la precipitación de estos metales durante la mezcla estuarina ya que la mayor parte de la concentración total de estos elementos se encuentra en la fracción disuelta a lo largo de todo el estuario y alcanzarían junto con parte del As, desorbido desde los minerales de Fe, el golfo de Cádiz y entrarían a formar parte de la dinámica de contaminantes controladas por las corrientes oceánicas.

Esto se puede corroborar a partir de modelos de mezcla, tomando como miembros extremos el agua de mar y las aguas de los ríos Tinto y Odiel que participan en los procesos de mezcla estuarina. La figura 4 muestra una comparación entre los valores medidos experimentalmente para Fe y Zn y aquellos esperados a partir de ratios de mezcla calculados a partir de elementos conservativos como Na o Cl. Como puede apreciarse la concentración estimada de Fe en el estuario del Odiel a partir de las ratios de mezcla es muy superior a la medida experimentalmente, lo que sugiere una fuerte precipitación de este elemento durante la mezcla. Esto se aprecia también, aunque en menor medida para otros elementos (no mostrados en Fig. 4) como Al y Cu. Por el contrario, para otro grupo de elementos (e.g., Zn, Cd, Mn, Co, o Ni) las muestras

se alinean sobre la línea teórica de mezcla (Zn en Fig. 4), lo que apoyaría hipótesis de que la concentración de estos elementos en el estuario estaría controlada fundamentalmente por procesos de dilución y atravesarían por tanto el estuario llegando al Golfo de Cádiz. Esto también ocurriría para el caso del As (no mostrado en la Fig. 4), cuyas muestras se situarían en el campo de precipitación de la Figura 4 debido a la intensa sorción sobre la schwertmannita, moviéndose posteriormente al campo de la disolución/desorción conforme los procesos de desorción desde este mineral se hacen más intensos.

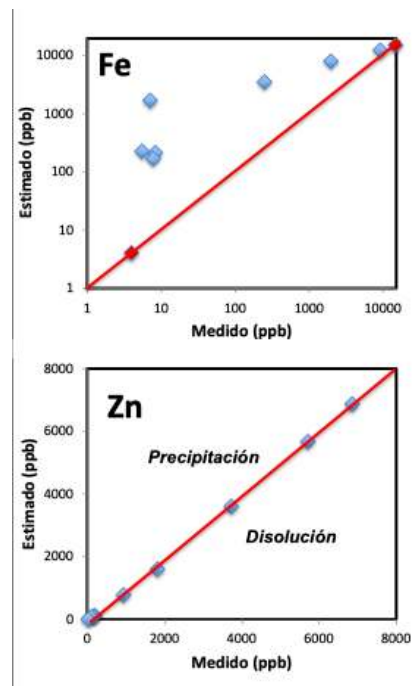


Fig. 4. Comparación de la concentración disuelta de Fe y Zn medida experimentalmente en el estuario del Odiel y aquella teórica a partir de las ratios de mezcla. La línea horizontal roja indicaría la línea teórica de mezcla, de tal modo que aquellas muestras situadas por encima de la línea sugerirían la precipitación y aquellas por debajo disolución y/o desorción.

El diferente comportamiento de estos elementos en su tránsito por el estuario controla por tanto su flujo neto hacia el Golfo de Cádiz, provocando un enriquecimiento en sus aguas. La figura 5 muestra una comparación temporal de las concentraciones de metales en aguas costeras a partir de información recogida en el marco del proyecto TOROS (Elbaz-Poulichet et al., 2001) en 1996 y este estudio. Las corrientes dominantes en esta zona se producen normalmente en la dirección O-E, por lo que mayores concentraciones serían esperables al este de la Ría de Huelva, como se observa en la Figura 5. De forma general, se observa como la concentración en aguas costeras de Cu, Ni y Zn en 1996 era menor a la encontrada actualmente.

Por otra parte, también se observan en 1996 valores superiores de Mn en aquellos puntos situados al oeste de la Ría de Huelva. Esto podría deberse a la

contribución de otros ríos de mayor magnitud situados al oeste, como el río Guadiana. De igual modo, también se observan valores superiores de Cd en 1996 al este de la Ría de Huelva respecto a los registrados actualmente. Este enriquecimiento en 1996 podría tener su origen en la actividad industrial. Una de las fuentes de Cd identificadas en la Ría de Huelva es el Cd liberado a causa de la generación de fosfoyesos, con una cantidad depositada en el estuario del Tinto de alrededor de 100 Mt. A diferencia de 1996, cuando incluso se liberaba directamente a las aguas estuarinas, actualmente no se genera fosfoyesos, por tanto la liberación de Cd a las aguas estuarinas y costeras asociada a la actividad industrial se ha reducido.

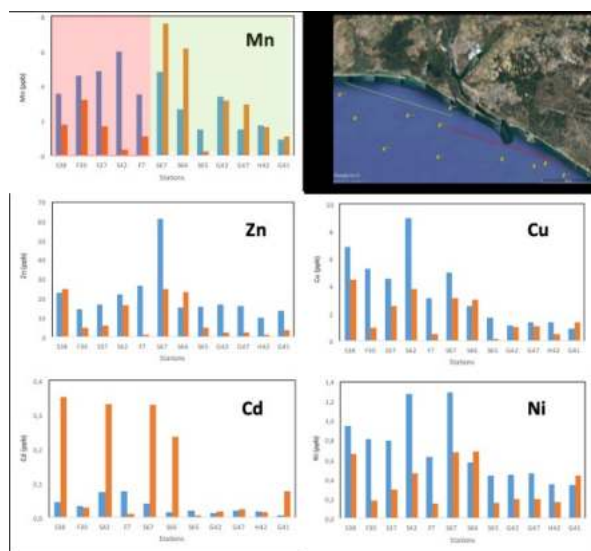


Fig. 5. Comparación de la concentración disuelta de Mn, Zn, Cu, Cd y Ni medida en las aguas costeras del sistema estuarino Tinto-Odiel en este estudio (azul) con aquella medida en 1996 (naranja) dentro del proyecto TOROS (Elbaz-Poulitchet et al., 2001). La zonación verde indica las muestras tomadas en el sector oeste y el rojo el sector este de la desembocadura.

4. CONCLUSIONES

Los metales y metaloides transportados por los ríos Tinto y Odiel son transferidos mayoritariamente al sedimento (especialmente Fe y Al), sin embargo, otros metales y metaloides (e.g., Cd, Co, Ni, o Zn) son afectados en menor medida por estos procesos y atraviesan el estuario hacia el Golfo de Cádiz. Es especialmente llamativo el comportamiento del As, que es inicialmente transferido al material particulado en el estuario, sin embargo, debido a intensos procesos de desorción es liberado de nuevo a la columna de agua, atravesando el estuario y llegando al Golfo de Cádiz, donde se produce un

enriquecimiento en las aguas costeras, fundamentalmente en dirección este-oeste.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad (MCIN/AEI/10.13039/501100011033.) a través del proyecto TRAMPA (MINECO; PID2020-119196RB-C21) y por el Plan Andaluz de Investigación, Desarrollo e Innovación (PAIDI 2020) a través del proyecto EMC21_00363. CR Cánovas y MD Basallote agradecen las Ayudas RYC2019-027949-I y RYC2022-035326-I, respectivamente, financiadas por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por El FSE+.

REFERENCIAS

- Acero P., Ayora C., Torrente C. y Nieto J.M. (2006). The behavior of trace elements during schwertmannite precipitation and subsequent transformation into goethite and jarosite. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 70: 4130-4139.
- Elbaz-Poulitchet, F., y Leblanc, M., (1996). Transfert de métaux d'une province minière à l'océan par des fleuves acides (Rio Tinto, Espagne). *COMPTES RENDUS DE L'ACADEMIE DES SCIENCES, SERIE II. SCIENCES DE LA TERRE ET DES PLANETES* 322, 1047-1052.
- Elbaz-Poulitchet, F., Braungardt, C., Achterberg, E., Morley, N., Cossa, D., Beckers, J., Nomérange, P., Cruzado, A., y Leblanc, M., (2001). Metal biogeochemistry in the Tinto-Odiel rivers (Southern Spain) and in the Gulf of Cadiz: a synthesis of the results of TOROS project. *Continental Shelf Research* 21(18): 1961-1973.
- Nieto, J.M., Sarmiento, A.M., Cánovas, C.R., Olias, M., y Ayora, C. (2013). Acid mine drainage in the Iberian Pyrite Belt: 1. Hydrochemical characteristics and pollutant load of the Tinto and Odiel rivers. *Environmental Science and Pollution Research*, 20(11): 7509-7519.
- Sherrell, R.M., y Boyle, E.A. (1988). Zinc, chromium, vanadium and iron in the Mediterranean Sea. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 35(8): 1319-1334.
- van Geen, A., Boyle, E.A. y Moore, W.S. (1991). Trace metal enrichments in the waters of the Gulf of Cadiz. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 55: 2173-2191.

Development and harmonization of procedures for the characterization of microplastics in environmental matrices

M. São Pedro (1), V. Morgado (1,2), J. Almeida (1), G. Brás Gomes (1), R. Silva (3), C. Palma (1)

- (1) Instituto Hidrográfico, rua das Trinas, 49, 1249-093 Lisboa matildeisabelsp@gmail.com
- (2) Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG), Estrada do Paço do Lumiar, 22, 1649-038 Lisboa
- (3) Centro de Química Estrutural, Institute of Molecular Sciences, Departamento de Química e Bioquímica, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Campo Grande, 1749-016 Lisboa, Portugal

Abstract: The Plastic Trace project aims to develop harmonized methods for detecting, characterizing, and quantifying small microplastics (SMP) and nanoplastics (NP) in environmental matrices such as suspended particulate matter (SPM), drinking water, and food, leading to the establishment of metrological traceability of measurements through rigorous validation studies. The Hydrographic Institute (IH) is involved in two work packages, one is the evaluation of polymers present in environmental samples (tablets) and their respective physical-chemical characterizations, done with the reflectance mode from Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). The second, is based on the development and optimization of the method for the traceable characterization of SMP. For that, the IH conducted multiple tests on SPM samples, varying multiple parameters, to achieve better physical-chemical characterizations and quantitative analyses. To this date, it has not yet been possible to develop a protocol that would allow the analysis of filters by FTIR, as a layer of sediment is visible on the surface of the filter, making analysis by Attenuated total reflectance (ATR), reflectance and transmittance impossible. IH and *Centro de Química Estrutural* (CQE) will also contribute with their expertise on the evaluation of microplastics identification and quantification uncertainty.

Keywords: FTIR, Plastic Trace, SPM, microplastics, harmonization

1. INTRODUCTION

The accumulation of particles originating from plastics in various environments, including oceans, rivers, soils, and even the air, is known as plastic pollution. This is primarily caused by excessive consumerism, where plastics are initially mass-produced for packaging, consumer products, and industrial materials, which are subsequently improperly discarded, dispersing mainly, though not exclusively, in the marine environment. The emission of small plastic particles into the air and water during industrial processes, as well as from the abrasion of vehicle tires, are also significant contributors to this form of pollution (Xu *et al*, 2020).

Microplastics (MP), small plastic particles ranging from 1 to 5000 micrometers, are categorized into two main types: (i) primary microplastics, which are directly manufactured in small dimensions for specific purposes. These are used in personal care products, such as facial exfoliates, or in plastic production; and (ii) secondary microplastics, which result from the physical and chemical degradation of larger plastics. These larger fragments, such as bottles or bags, break down into small particles due to exposure to sunlight, the mechanical action of waves and currents in the oceans, as well as chemical processes (Laskar & Kumar, 2019).

These particles can be ingested by aquatic and terrestrial organisms, entering the food chain and potentially causing harm to ecosystems and human health (Thushari & Senevirathna, 2020). Therefore, mitigating and preventing microplastic pollution is essential to protect both the environment and public health. Despite the limited information available on this matter, as it is a relatively recent, several studies have concluded that microplastics exhibit significant toxicity in food matrices and the environment. However, MPs and nanoplastics (NP; particles smaller than 0.1 μm) in natural systems have been neglected, primarily due to the significant methodological challenges associated with their micro and nano properties.

In this context, the PlasticTrace project – Tracing Micro and NanoPlastics in Food and Environment, aims to address the urgent need to develop and harmonize methods for the chemical and physical characterization, as well as the quantification, of small micro- and nanoplastics present in drinking water, food, and natural environments. In order to make quantifications objectively interpretable, it must be assessed measured value uncertainty expressing the combined effect of all random and systematic effects affecting the determination.

2. DEVELOPMENT

The objectives PlasticTrace project are in line with the requirements of the EU's Circular Economy Action Plan (CEAP). This study also aims to develop an efficient measurement infrastructure to support the European Chemicals Agency's (ECHA) proposed restriction on intentionally added microplastics in consumer products, and to set specific limits for types of waste after harmonizing methodologies, as required by the Marine Strategy Framework Directive (MSFD). Additionally, it aims to support the new Drinking Water Directive (DWD), which addresses microplastics.

In this context, analytical procedures will be developed, optimized, compared, and harmonized, leading to the establishment of metrological traceability of measurements. Furthermore, innovative and environmentally relevant reference materials for small MP and NP will be created within the project.

The target recipients of the procedures to be developed include public organizations and non-governmental organizations involved in environmental and food monitoring, regulatory bodies responsible for controlling environmental pollution and ensuring food safety, as well as industries directly or indirectly involved in the emission and/or disposal of microplastics into the environment or the human food chain.

PlasticTrace project is structured into six work packages, with various collaborators assigned to each. The first work package (WP1) focuses on developing reference materials traceable to the International System of Units (SI) for small MP and NP, including simulating degraded samples in the studied matrices. It will also study potential anomalous particle shapes and their respective distributions. WP2 and WP3 will develop sample preparation methods for measuring small MP and NP in multiple matrices, which will subsequently be harmonized to demonstrate their efficiency, precision, and trueness (Fig. 1).



Fig. 1 Example of a sample preparation strategy for the extraction of microplastics from the seawater matrix (WP2).

These two work packages are also responsible for the chemical and physical characterization of polymers and particles, respectively, including mass fraction determination. The validity of the analytical methods and reference materials will be tested through interlaboratory trials in WP4. Finally, WP5 and WP6 will focus more on the management and coordination inherent to the developed processes (Giovannozzi, 2024).

To achieve the project's objectives, the Hydrographic Institute (IH) received ten polyethylene terephthalate (PET) tablets and a sample of Suspended Particulate Matter (SPM), which was treated as a sediment sample for later analysis. In preparing the tablets, the Standard Operation Procedure (SOP) was followed. This procedure was developed for samples where MP are dispersed in a solid or liquid matrix. Since, this project focuses on MP ranging from 10 μm to 100 μm , it requires the use of a silicone filter with a pore size of 5 μm and a proper filtration system. Earlier in the protocol, an alumina (aluminum oxide) filter with a 10 μm pore is also used as an intermediate step. These specifications are necessary because the particles present in the tablets have variable dimensions (Miclea *et al.*, 2022).

Regarding the SPM tests, as the protocol is not yet defined, some steps in the sample preparation were adjusted based on the amount of organic matter present on the filter, prior to qualitative analysis by Fourier Transform Infrared spectroscopy (FTIR). The sample preparation starts with resuspending the sediment in ultrapure water, followed by filtration with a glass system onto an alumina filter, and digestion using hydrogen peroxide. This is followed by density separation using sodium chloride, and finally another filtration using a silicone filter through the proper filtration system (test 1).

To address the excess organic matter on the filter surface, various sample masses ranging from 3 mg to 28 mg of SPM were tested. Poor digestion of the organic matter could also be a contributing factor. Consequently, different concentrations of hydrogen peroxide were tested (test 2 – test 5).

The analytical technique used at IH is micro-FTIR. Through infrared radiation that contacts the particles, the molecule absorbs light in that region of the electromagnetic spectrum, converting it into molecular vibration, which is characteristic of the chemical bonds present in a molecule. Using the micro-Attenuated Total Reflectance mode (micro-ATR), where a crystal descends and contacts the particle, the infrared radiation or part of it is absorbed by the particle, and consequently, a spectrum is generated, providing the particle's fingerprint. On the other hand, Attenuated Total Reflectance mode (ATR) is the most advantageous of all modes, not only because it allows the analysis of liquid and solid matrices but also because it is independent of the particle's thickness. As it involves internal reflections, whether the particle is flatter or more voluminous, the spectrum will be the same in both cases. Transmittance is another mode of spectrum acquisition, where a fraction of energy passes through a particle and is not absorbed, thus measuring its ability to transmit radiation. Finally, there is reflectance mode, which, contrary to transmittance, measures the amount of infrared radiation reflected relative to the incident radiation (MCGOWAN, 1963).

Finally IH and CQE have developed tools that enable the assessment of uncertainty in the identification and

quantification of microplastics in sediments, which will be applied in this Project (Morgado, et al, 2021).

3. RESULTS

The first analyzes were done with the tablets and the process started with manual marking of the particles (Fig. 2). This process becomes challenging not only because the number in the hundreds and possibly thousands of particles, but also due to their small dimensions, which make detection difficult even with a camera designed for micrometer-level dimensions. The manual marking of particles could be another contributing factor to the low number of detected MP, as adjusting the aperture to match their diameter is critical when marking smaller particles. This adjustment impacts the resolution of the spectra obtained: reducing this area decreases the device's energy, thereby reducing the spectrum's baseline and resulting in noisy spectra and low spectral band resolution.

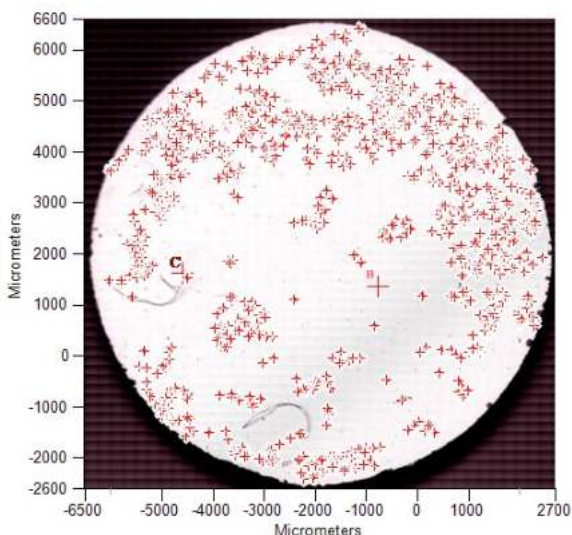


Fig. 2 Example of a marked filter for analysis.

Table 1 presents the first results of the seven of ten tablets already analyzed.

Table 1 Distribution of microplastics per polymer type in each tablet.

Sample	PA	PDMS	PE	PET	PP	PS	Total MP	Total microparticles
ID553	9	-	5	109	1	-	124	274
ID866	5	-	17	207	6	-	235	337
ID639	10	-	13	107	1	1	132	208
ID112	1	-	11	126	3	3	144	330
ID549	5	1	8	48	4	1	67	174
ID035	1	-	4	116	3	2	126	312
ID927	10	2	1	147	24	-	184	417

PA – Polyamide, PDMS – Polydimethylsiloxane; PE – Polyethylene; PET – Polyethylene terephthalate; PP – Polypropylene; PS – Polystyrene.

These results are lower when compared to the other groups in the same working package. The type of equipment used for the detection and identification of MP might be the reason for the aforementioned disparity. It is noteworthy that partners with the highest number of detected MP use automated equipment, where the filter is placed in the apparatus, the area to be analyzed is selected, and the equipment scans, detects, and marks the particles, finishing with the chemical analysis of the particles.

Regarding the results of SPM, test 1 show 10 microplastics with size variation between 79.46 µm to 654.99 µm; 9 fragments and 1 fiber; 6 polypropylene, 2 polyethylene, 1 nylon and 1 nitrile rubber. Figure 3 show the microplastics found.

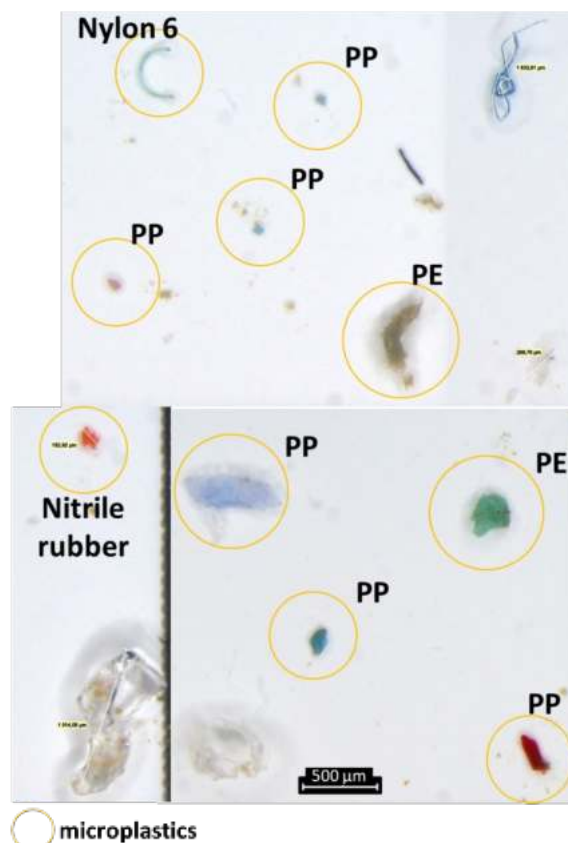


Fig. 3 Microplastics found in SPM' test 1.

Results of SPM' tests 2 – 5, show sediment accumulation on the silicone filter hindering chemical characterization by ATR, transmittance, and reflectance modes (Fig. 4). In ATR mode, the excessive quantity of particles prevents the crystal from contacting only one fragment, making it impossible to isolate spectra, as different molecules might be observed in the spectrum (Fig. 5). For reflectance and transmittance modes, the thick layer deposited on the filter prevents the radiation from contacting the silicone substrate.



Fig. 4 Example of silicon membrane with a layer of SPM.

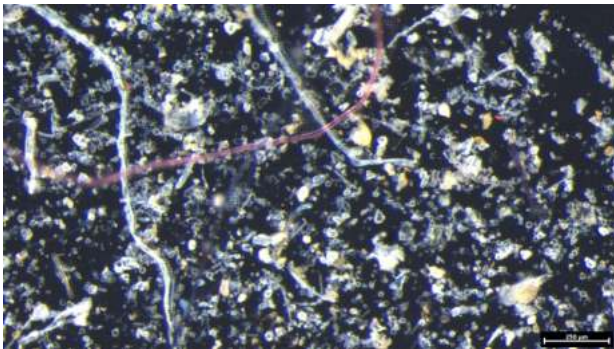


Fig. 5 Example of silicon membrane with too many particles.

Finally, testing the use of a larger filter or one with a larger pore size are also hypotheses to be explored. Using a larger filter could potentially disperse the excess material more effectively, allowing for analysis either by particle contact (ATR) or by reflectance or transmittance modes, as the light beam could traverse the sample more effectively. Similarly, a filter with larger pores would facilitate filtration, enabling a greater number of particles to pass through and thereby reducing sediment accumulated on its surface.

4. CONCLUSION

In conclusion, IH will continue to conduct various analysis contributing to the WP2, to develop and harmonize the procedure for the characterization of small microplastics in environmental samples. After it is planned to implement the tools developed by IH and CQE@FCUL to evaluate the uncertainty of the identification and quantification of microplastic in the analyzed samples. IH and CQE@FCUL have developed a novel tool for setting objective criteria for identifying microplastics by micro-FTIR subsequently assessed for the adequacy of rates of false identifications. These two organizations also developed pioneer work on the bottom-up evaluation of the uncertainty of the determination of microplastic contaminations that is most valuable for the fulfillment of the aims of the international project.

Acknowledgments



Plastic Trace project has received funding from the European PartnerShip on Metrology, co-financed from the European Union's Horizon Europe Research and Innovation Programme and by the Participating States.

REFERENCES

- Xu, S., Ma, J., Ji, R., Pan, K., & Miao, A. J. (2020). Microplastics in aquatic environments: Occurrence, accumulation, and biological effects. *The Science of the total environment*, 703, 134699.
- Laskar, N., & Kumar, U. (2019). Plastics and microplastics: A threat to environment. *Environmental Technology & Innovation*, 14, 100352.
- Thushari, G. G. N., & Senevirathna, J. D. M. (2020). Plastic pollution in the marine environment. *Heliyon*, 6, 8.
- Giovannozzi, A. (2024). Metrological traceability of measurement data from nano- to small microplastics for a greener environment and food safety. *Opus4.Kobv.de*.
- Miclea, P.; Richter, S.; Hagendorf, C. (2022). Nanoporous membrane filter cascade for size-selective analysis of nano- and microplastic particles. *Applied Research*.
- Mcgowan, R. J. (1963) Attenuated Total Reflectance vs. Transmission Infrared Spectrometry in the Quantitative Evaluation of Paint Vehicles. *Analytical Chemistry*, 35, 11, 1664–1665.
- Morgado, V.; Gomes, L.; Bettencourt da Silva, R.; Palma, C. (2021) Validated spreadsheet for the identification of PE, PET, PP and PS microplastics by micro-ATR-FTIR spectra with known uncertainty. *Talanta*, 234, 122624.

Lipophilic marine toxins in sediments from Arrábida marine protected area, Portugal (NE Atlantic)

Soliño (1,2,3), A. C. Braga (2,4), J. Lobo-Arteaga (2,5) & P. Reis Costa (2,3,4)

(1) Centro Oceanográfico de Vigo (IEO, CSIC), Subida a Radio Faro, 50, 36390 Vigo, Spain (lucia.solino@ieo.csic.es)

(2) IPMA, I.P. — Portuguese Institute for Sea and Atmosphere, Av. Dr. Alfredo Magalhães Ramalho, 6, 1495-165 Lisboa, Portugal

(3) CCMAR — Centre of Marine Sciences, Campus of Gambelas, University of Algarve, 8005-139 Faro, Portugal

(4) MARE — Marine and Environmental Sciences Centre / ARNET - Aquatic Research Network Associate Laboratory, NOVA School of Science and Technology, NOVA University Lisbon, Portugal

(5) S2AQUA — Collaborative Laboratory, Association for a Sustainable and Smart Aquaculture, Av. Parque Natural da Ria Formosa s/n, 8700-194 Olhão, Portugal

Resumen: Marine toxins produced by harmful algal blooms (HAB) are traditionally determined in bivalve molluscs due to their risk to human consumption. However, during the development of HABs, algae cells or contaminated pellets may sink to the bottom, and accumulate in sediments. In this study, lipophilic marine toxins were determined in sediments from different depths in the marine protected area of Arrábida (Portugal). Sediments were characterized in terms of granulometry, water content, and organic matter content and the toxins determined by liquid chromatography with tandem mass spectrometry. Okadaic acid (OA), dinophysistoxin-2 (DTX2), and azaspiracid-2 (AZA2), reaching concentrations of up to 3.36, 1.33, and 0.13 ng/g, respectively, were found. A trend in the occurrence of DTX2 and AZA2 with sediment water and organic matter content was observed, as well as with AZA2 and depth. This study highlights the need to further investigate sediment deposition of toxins and their availability for bottom-dwelling organisms.

Palabras clave: Harmful algal blooms, marine biotoxins, Diarrhetic Shellfish Poisoning, soft bottom benthic habitats, seafloor

1. INTRODUCTION

Marine toxins produced by harmful algal blooms (HAB) are well characterized in shellfish due to their threats to seafood safety. Shellfish and particularly bivalve molluscs can accumulate high levels of marine toxins during the seasonal HAB occurrence posing them as toxin vectors to humans. To minimize the risk of acute intoxications, most European coastal countries conduct a monitoring program and shellfish harvesting is closed whenever safety limits are exceeded (Cruz et al., 2022). The most common hazardous algal toxins in Europe, including Portugal, are those causing diarrhetic shellfish poisoning

(DSP), paralytic shellfish poisoning (PSP), and amnesic shellfish poisoning (ASP) (Braga et al., 2023). While the mechanisms behind the HAB development and seafood contamination have been extensively studied, little is known concerning the fate of the pool of toxins generated during HABs other than accumulation in shellfish. Over the course of an HAB event and their senescence toxins may be released into dissolved fraction, due to cell lysis or excretion, and be adsorbed by suspended particles that sink to the bottom. The toxins remaining within the algal cell, if not ingested by biota, may reach the bottom via cell deposition (Sekula-Wood et al., 2011). Faecal pellets of plankton grazers, such as copepods, also represent a major pathway of toxins to the bottom (Kuuppo et al., 2006). Finally, several benthic microalgae species are known to produce marine toxins (e.g. Durán-Riveroll et al., 2019) increasing the load of natural contaminants available to bottom-dwelling communities (Costa et al., 2005; Mafra Jr et al., 2015). Among the wide variety of marine toxins, those with hydrophobic chemical properties are expected to remain longer in the environment and to easily adsorb to particles. The lipophilic toxins that include the okadaic acid group, also known as diarrhetic shellfish poisoning (DSP) toxins, are among the most common toxins globally. The growing concerns of their presence in surface sediments have been particularly investigated in China, namely in the Yellow Sea, Bohai Sea, East China Sea and South China Sea (Chen et al., 2017, 2018; Liu et al., 2019, 2021; Wang et al., 2015). These studies highlighted marine sediments as relevant reservoir for DSP toxins and other lipophilic toxins, such as pectenotoxins, azaspiracids, yessotoxins and cyclic imines. Cyclic imines are another class of lipid soluble toxins appearing in sediments in China and New Zealand. More specifically, gymnodimine was determined in sediments from Daya Bay, South China Sea, and

Pinnatoxin-F, -E and -D have been determined in Rangaunu Harbour sediments, New Zealand (Liu et al., 2019; MacKenzie et al., 2011). The present study

aims to assess, for the first time, lipophilic marine toxins in sediments at the NE Atlantic region.

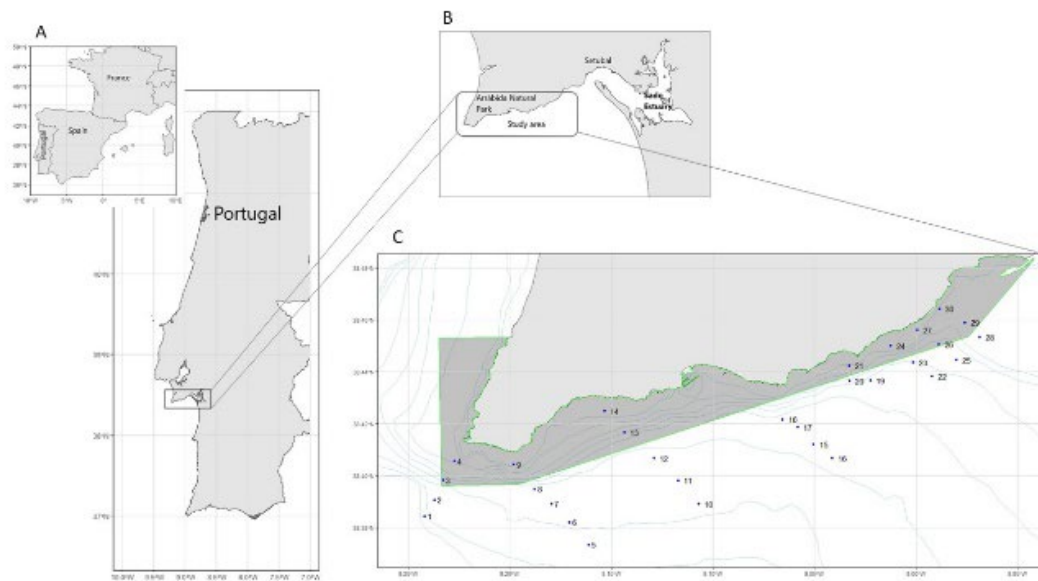


Fig. 1. A, B. Location of the study area. C. sampling stations where sediment samples were collected. The shaded area within the green line represents the boundaries of the Arrábida marine protected area. Bathymetric lines are displayed every 20 m depth. Data for the marine protected area and bathymetry were obtained from MarineRegions.org and NOAA National Centers for Environmental Information, respectively.

2. DEVELOPMENT

Surface sediments were collected in the Marine Park Professor Luiz Saldanha and adjacent areas, at the mouth of the Sado estuary (southwest coast of mainland Portugal) which affects this region in terms of phytoplankton community structure (Santos et al., 2022) (Fig. 1). Sediment samples devoted to toxin analyses were freeze dried and stored at -20°C prior to toxin extraction. Toxins were extracted using ultrasonic-assisted extraction as by (Wang et al., 2015), with modifications. Briefly, 10 g of sediment were extracted with MeOH by vortexing for 1 min, ultrasonication for 10 min and centrifugation at 2000 g for 10 min. The pellet was re-extracted and supernatants combined. The volume was adjusted to 20 mL with MeOH, and 5 ml of the methanolic extract was diluted in 10 ml deionised water to obtain a 30% (v/v methanol/water) solution for Solid-phase extraction (SPE) with SPE Strata-X cartridges (3 ml, 60 mg). After activation and equilibration of the cartridges the extract was loaded, washed with 3 mL of methanol/water (20:80, v/v) and eluted with 1 mL of methanol containing 0.3% (v/v) ammonium hydroxide. Lipophilic toxins were determined by LC-MS/MS analysis using an Agilent 1290 Infinity chromatograph coupled to an Agilent 6470 triple quadrupole mass spectrometer. The chromatographic separation was conducted with a Zorbax SB-C8. RRHT column (2.1×50 mm, $1.8 \mu\text{m}$), protected with a guard column (2.1×5 mm, $1.8 \mu\text{m}$). The mobile phase A was water with 2 mM ammonium formate and 50 mM formic acid, and the mobile phase B was

95% acetonitrile with 2 mM ammonium formate and 50 mM formic acid. An elution gradient at a flow rate of 0.4 mL/min was used as follows: 0–3 min, gradient from 88 to 50% eluent A; 3–6.5 min gradient 50 to 10% eluent A; 6.5–8.9 min 10% eluent A; 8.9–10 min, gradient 10 to 88% eluent A. The detection of the toxins was carried out in multiple reaction monitoring (MRM) acquisition mode. Two MRM transitions were monitored one for quantification and the other for confirmation (Table S2, 3). A five point calibration curve with a correlation > 0.990 was set up for quantification using certified OA, DTX1, DTX2, YTX and hYTX reference standards purchased from CIFGA (Lugo, Spain), and AZA1-3, Gym, SPX1 and Pntx-G purchased from NRC Canada. Statistics and data visualization were performed with R (R core team, 2021).

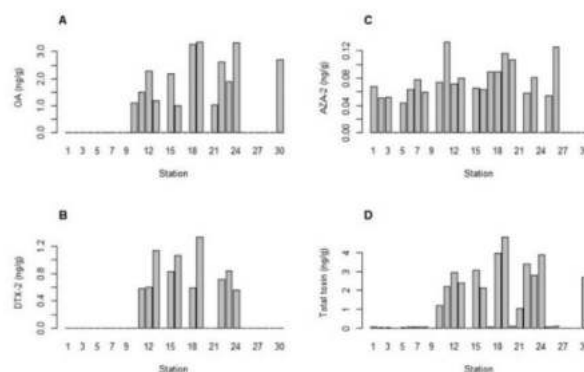


Fig. 2. Toxin concentration in the different stations sampled.

3. RESULTS

Okadaic acid (OA), dinophysistoxin-2 (DTX2) and azaspiracid-2 (AZA2) were detected in the analysed sediments (Fig. 2). No other toxins, namely yessotoxins and cyclic imines were found. Toxins in sediments with detectable levels averaged 2.11 ± 0.90 ng/g for OA, 0.82 ± 0.27 for DTX-2 and 0.08 ± 0.02 ng/g for AZA-2. OA was detected in 13 out of the 30 stations (43%), while DTX-2 was found in 33% of the sampled stations. Both toxins were present mainly in stations 10 to 24. Contrarily, most of sampled stations (70%) contained AZA-2 although at low concentrations. Lipophilic toxins, other than OA, DTX-2 and AZA-2, such as DTX-1, PTX-2, homo-YTX and GYM were not detected in the present work. Differences in microalgae occurrence may be behind the differences in toxin distribution in sediments from Portugal. The coast of Arrábida is an important harvesting area, where clams, mussels, cockles, sea urchins and limpets are collected for trade or self-consumption. Marine biotoxins are routinely monitored in Portugal, according to European Regulations, which set the thresholds for lipophilic toxins in bivalves at $160 \mu\text{g}/\text{kg}$ for both OA and AZA toxins groups (Regulation (EC) No 853/2004) (European Union, 2004). No correlations were found between toxin concentration and seafloor composition (percentage of mud, sand or gravel), neither between DTX-2 and the percentage of organic matter ($r=0.64$) or DTX-2 and the percentage of water ($r=0.56$) (Fig. 4). The same trend was observed for AZA-2 concentration and organic matter ($r=0.69$) and depth ($r=0.64$). In the case of the percentage of water and AZA-2 the correlation was more evident ($r=0.87$) (Fig. 2).

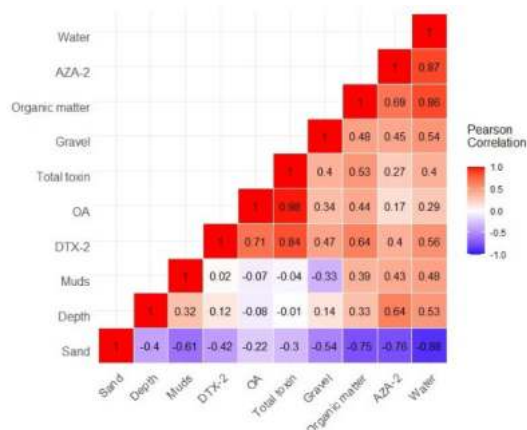


Fig. 3. Correlation matrix showing Pearson correlation between the different variables considered.

Similar research performed in China did not observe differences between toxin contents and sediment grain average (Liu et al., 2019, 2021). However, in most of the stations sampled in this study a high percentage of sands was recorded, not allowing for reliable comparisons. In contrast, DTX-2 and AZA-2 concentration may

be somehow related to organic matter content, probably due to its higher affinity for this fraction (Li et al., 2022). The percentage of organic matter in samples from this study averaged 3.2 ± 2.3 , being in the range of those observed in certain Chinese regions where lipophilic toxins have been also detected (Liu et al., 2019, 2021). Previous studies suggested that some lipophilic toxins may be more stable in detrital organic matter, which agrees with the positive correlation observed (Kuuppo et al., 2006; Li et al., 2022). High correlation between particulate organic matter and DTX-2 and AZA-2 was observed in the study by Li and collaborators (Li et al., 2022). Also, the spatial distribution of lipophilic toxins in sediments from Sishili and Rongcheng Bays (China) showed a trend of high concentrations in areas with land-based inputs likely linked to an elevated organic matter in the bay (Sheng et al., 2023).

4. CONCLUSIONS

In this study, sediments from the Portuguese coast of Arrábida marine protected area were analysed for the first time, showing quantifiable levels of OA, DTX-2 and AZA-2. The levels found in this study exceed the concentrations reported in other seas and suggest that contamination of marine organisms with marine biotoxins through sediment ingestion is plausible in this region. Arrábida is a low disturbed area where most bottom-impacting fishing activities are forbidden, which could impede the resuspension of toxins in the water column and favour its presence in the bottom layer. On the other hand, considering the proximity of intensive bivalve harvesting zones, a better assessment of marine toxin occurrence in different sea compartments, including sediments, calls for attention. Despite the limited number of samples and periods evaluated, this study fills a gap of knowledge on toxin distribution besides microalgae and filter-feeding organisms and opens a new field on toxin fate and accumulation along sedimentary systems.

Acknowledgments

This study was supported by the Portuguese Government under the Marine Biodiversity Information System – MarBIS, and by the Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT, Portugal), through the strategic projects UIDB/04292/2020 and UIDP/04292/2020 granted to MARE - Marine and Environmental Sciences Centre, the project LA/P/0069/2020 granted to the Associate Laboratory ARNET - Aquatic Research Network, and the projects UIDB/04326/2020, UIDP/04326/2020,

LA/P/0101/2020 granted to CCMAR - Centre of Marine Sciences.

REFERENCES

- Braga, A. C., Rodrigues, S. M., Lourenço, H. M., Costa, P. R., & Pedro, S. (2023). Bivalve shellfish safety in Portugal: variability of faecal levels, metal contaminants and marine biotoxins during the last decade (2011–2020). *Toxins*, 15(2), 91.
- Chen, J., Han, T., Li, X., He, X., Wang, Y., Chen, F., Song, X., Zhou, D., & Wang, X. (2018). Occurrence and distribution of marine natural organic pollutants: Lipophilic marine algal toxins in the Yellow Sea and the Bohai Sea, China. *Science of the Total Environment*, 612, 931–939.
- Chen, J., Li, X., Wang, S., Chen, F., Cao, W., Sun, C., Zheng, L., & Wang, X. (2017). Screening of lipophilic marine toxins in marine aquaculture environment using liquid chromatography–mass spectrometry. *Chemosphere*, 168, 32–40.
- Costa, P. R., Rosa, R., Pereira, J., & Sampayo, M. A. M. (2005). Detection of domoic acid, the amnesic shellfish toxin, in the digestive gland of *Eledone cirrhosa* and *E. moschata* (Cephalopoda, Octopoda) from the Portuguese coast. *Aquatic Living Resources*, 18(4), 395–400.
- Cruz, R. C., Costa, P. R., Krippahl, L., & Lopes, M. B. (2022). Forecasting biotoxin contamination in mussels across production areas of the Portuguese coast with Artificial Neural Networks. *Knowledge-Based Systems*, 257.
- Durán-Riveroll, L. M., Cembella, A. D., & Okolodkov, Y. B. (2019). A review on the biodiversity and biogeography of toxigenic benthic marine dinoflagellates of the coasts of Latin America. *Frontiers in Marine Science*, 6. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00148>.
- European Union. (2004). *Regulation (EC) No 853/2004 of the European Parliament and of the Council of 29 April 2004 laying down specific hygiene rules for food of animal origin*.
- Flanders Marine Institute. (2024, April). *MarineRegions.org*. Available online at www.marineregions.org. Accessed April 2024.
- Kuuppo, P., Uronen, P., Petermann, A., Tamminen, T., & Granéli, E. (2006). Pectenotoxin-2 and dinophysistoxin-1 in suspended and sedimenting organic matter in the Baltic Sea. *Limnology and Oceanography*, 51(5), 2300–2307. <https://doi.org/10.4319/lo.2006.51.5.2300>.
- Li, J., Ruan, Y., Wu, R., Cui, Y., Shen, J., Mak, Y. L., Wang, Q., Zhang, K., Yan, M., Wu, J., & Lam, P. K. S. (2022). Occurrence, spatial distribution, and partitioning behavior of marine lipophilic phycotoxins in the Pearl River Estuary, South China. *Environmental Pollution*, 310. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119875>.
- Liu, Y., Chen, Z., Wang, J., Guo, W., Zhang, C., Du, S., Zhang, P., Yu, R., & Zhang, L. (2021). Distribution characteristics of lipophilic marine phycotoxins in the sediment: A case study in Jiaozhou Bay, China. *Marine Pollution Bulletin*, 162, 111908.
- Liu, Y., Zhang, P., Du, S., Lin, Z., Zhou, Y., Chen, L., Yu, R., & Zhang, L. (2019). Sediment as a potential pool for lipophilic marine phycotoxins with the case study of Daya Bay of China. *Marine Drugs*, 17(11). <https://doi.org/10.3390/md17110623>.
- MacKenzie, L. A., Selwood, A. I., McNabb, P., & Rhodes, L. (2011). Benthic dinoflagellate toxins in two warm-temperate estuaries: Rangaunu and Parengarenga Harbours, Northland, New Zealand. *Harmful Algae*, 10(6), 559–566. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.hal.2011.02.007>.
- Mafra Jr, L. L., Lopes, D., Bonilauri, V. C., Uchida, H., & Suzuki, T. (2015). Persistent contamination of octopuses and mussels with lipophilic shellfish toxins during spring Dinophysis blooms in a subtropical estuary. *Marine Drugs*, 13(6), 3920–3935.
- NOAA National Centers for Environmental Information. (2004). *Multibeam Bathymetry Database (MBBDB)*. <https://doi.org/doi:10.7289/V56T0JNC>. Accessed April 2024.
- R Core Team. (2021). *R: A language and environment for statistical computing*. *R Foundation for Statistical Computing*.
- Santos, M., Amorim, A., Brotas, V., Cruz, J. P. C., Palma, C., Borges, C., Favareto, L. R., Veloso, V., Dâmaso-Rodrigues, M. L., Chainho, P., Félix, P. M., & Brito, A. C. (2022). Spatio-temporal dynamics of phytoplankton community in a well-mixed temperate estuary (Sado Estuary, Portugal). *Scientific Reports*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-20792-6>.
- Sekula-Wood, E., Benitez-Nelson, C., Morton, S., Anderson, C., Burrell, C., & Thunell, R. (2011). Pseudo-nitzschia and domoic acid fluxes in Santa Barbara Basin (CA) from 1993 to 2008. *Harmful Algae*, 10(6), 567–575.
- Sheng, C., He, X., Shen, N., Han, T., Chen, J., Liu, C., & Li, X. (2023). Occurrence and phase distribution of lipophilic marine algal toxins in the bottom boundary layer and sediment-porewater system of two mariculture sites. *Chemosphere*, 341. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140109>.
- Wang, Y., Chen, J., Li, Z., Wang, S., Shi, Q., Cao, W., Zheng, X., Sun, C., Wang, X., & Zheng, L. (2015). Determination of typical lipophilic marine toxins in marine sediments from three coastal bays of China using liquid chromatography–tandem mass spectrometry after accelerated solvent extraction. *Marine Pollution Bulletin*, 101(2), 954–960.

TECNOLOGÍA
DEL MAR



Integración de energía eólica offshore y acuicultura: viabilidad técnica y económica en España

A. Alcayde (1); M.I. Sáez (2)

(1) Departamento de Ingeniería, CEIMAR. Universidad de Almería, 04120 Almería, España. aalcayde@ual.es

(2) Departamento de Biología y Geología, CEIMAR. Universidad de Almería, 04120 Almería, España.

Resumen: El trabajo analiza la viabilidad de una planta híbrida que combina la energía eólica marina y la acuicultura, específicamente con la especie *Seriola dumerili*. Se ha optado por una estructura semisumergible para los aerogeneradores, ubicados frente a las costas de Granada y Almería, donde la velocidad media del viento es de aproximadamente 8 m/s. La integración de la acuicultura con la energía eólica offshore requiere estructuras flotantes que permitan instalar jaulas de producción debajo de los aerogeneradores. Este estudio incluye un análisis del estado del arte, propuestas de estructuras y un estudio económico detallado, mostrando la rentabilidad y los beneficios potenciales de esta combinación.

Palabras clave: acuicultura, energía eólica, sostenibilidad, integración marina, desarrollo tecnológico.

1. INTRODUCCIÓN

La integración de la energía eólica marina y la acuicultura representa una oportunidad significativa para abordar dos de los principales desafíos globales: la transición hacia fuentes de energía renovables y la necesidad de una producción sostenible de alimentos. Este enfoque promueve la sostenibilidad ambiental, mejorando el impacto social de la instalación, junto al potencia de generar beneficios económicos y sociales.

La energía eólica marina se ha convertido en una de las fuentes de energía renovable de mayor crecimiento en la última década. Según el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (2021), España ha proyectado alcanzar una producción eléctrica de 161 GW para 2030, de los cuales 50 GW serán de origen eólico, con una significativa contribución de la eólica marina. Esta expansión se debe a las ventajas inherentes de la energía eólica marina, incluyendo la constancia y la mayor velocidad del viento en alta mar, que permite una generación más eficiente y estable en comparación con la energía eólica terrestre (Red Eléctrica Española, 2023).

Paralelamente, la acuicultura ha emergido como una solución crucial para el abastecimiento de productos acuáticos y la seguridad alimentaria global. En las últimas décadas la acuicultura, especialmente en el contexto del Mediterráneo, ha experimentado un crecimiento sustancial debido a la demanda creciente de productos del mar y la necesidad de reducir la presión sobre las pesquerías naturales. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2023), más de un tercio de los caladeros mundiales se encuentran en un estado de sobreexplotación. En este sentido, la acuicultura no solo ayuda a satisfacer la demanda de

pescado, sino que también juega un papel vital en la conservación de las especies marinas y la biodiversidad.

El objetivo principal de este estudio es evaluar la viabilidad técnica y económica de la integración de parques eólicos marinos con instalaciones de acuicultura. Esta hibridación busca optimizar el uso del espacio marino y aprovechar las sinergias entre ambos sectores para lograr una producción sostenible de energía y alimentos. Los subobjetivos específicos incluyen:

1. Análisis del potencial y la viabilidad técnica de la energía eólica marina y la acuicultura: Esto incluye un estudio detallado de las estructuras flotantes y fijas, y cómo estas pueden soportar tanto aerogeneradores como jaulas acuícolas.
2. Evaluación económica: Se analizarán los costos de implementación, operación y mantenimiento, así como los posibles ingresos generados por la producción combinada de energía y pescado.
3. Impacto ambiental y social: Se investigarán los beneficios y desafíos ambientales, incluyendo la reducción del impacto visual y la contaminación acústica, y los efectos sobre las comunidades costeras en términos de empleo y desarrollo económico.

La hibridación de la energía eólica y la acuicultura no es un concepto completamente nuevo, pero su implementación a gran escala aún enfrenta varios desafíos. Este estudio se centra en la viabilidad específica de esta integración en el contexto español, donde tanto la energía eólica como la acuicultura tienen un papel destacado en la economía nacional. España es líder en la producción acuícola en la Unión Europea, con un 25.3% de la producción total (APROMAR, 2023), y ha demostrado un

compromiso firme hacia la expansión de las energías renovables.

El presente trabajo busca contribuir a la literatura existente proporcionando un análisis integral que combine aspectos técnicos, económicos, ambientales y sociales. La integración de estos sectores puede ofrecer una solución efectiva para maximizar el uso del espacio marino y promover la sostenibilidad. Además, la reducción de costos operativos y de mantenimiento, junto con la producción de energía limpia, puede mejorar la rentabilidad de las instalaciones acuícolas y reducir su dependencia de fuentes de energía externas.

La energía eólica marina aprovecha la energía cinética del viento para generar electricidad, un proceso que ha sido optimizado mediante el desarrollo de aerogeneradores avanzados y estructuras flotantes robustas. Por otro lado, la acuicultura implica el cultivo controlado de organismos acuáticos, una práctica que requiere condiciones ambientales específicas y un manejo eficiente de los recursos (Teletchea & Fontaine, 2014).

La combinación de estos dos sectores se basa en la premisa de que ambos pueden coexistir y beneficiarse mutuamente. Los aerogeneradores pueden proporcionar energía a las instalaciones acuícolas, reduciendo la necesidad de fuentes de energía externas y mejorando la sostenibilidad de las operaciones. Además, la ubicación de jaulas acuícolas en estructuras flotantes de aerogeneradores puede minimizar el impacto ambiental y optimizar el uso del espacio marino, una consideración crucial en áreas con alta densidad de actividad marítima (Fakriadis et al., 2020).

Este estudio tiene como objetivo proporcionar una evaluación exhaustiva de la viabilidad de esta integración en el contexto español, contribuyendo al desarrollo de políticas y prácticas que promuevan la sostenibilidad y el uso eficiente de los recursos marinos

2. RESULTADOS

El desarrollo de la integración de la energía eólica marina con la acuicultura abarca varios aspectos cruciales, que incluyen la situación actual de ambos sectores, los retos y oportunidades técnicos, económicos y ambientales, y las soluciones innovadoras para una implementación efectiva. Este apartado se divide en secciones clave para abordar cada uno de estos aspectos de manera detallada.

La energía eólica marina se ha convertido en una fuente de energía renovable fundamental en muchos países, gracias a su capacidad para generar grandes cantidades de electricidad de manera limpia y sostenible. En España, la energía eólica marina está en fase de expansión, con proyectos significativos planificados para los próximos años. Según el Plan

Nacional Integrado de Energía y Clima (2021), se espera que la energía eólica marina contribuya de manera sustancial a la producción de energía renovable en España para 2030, con una capacidad proyectada de 50 GW.

Por otro lado, la acuicultura ha demostrado ser una industria esencial para la producción de alimentos a nivel mundial. La acuicultura en España, particularmente en el Mediterráneo, se centra en especies como la dorada (*Sparus aurata*) y la lubina (*Dicentrarchus labrax*). Sin embargo, la sobreexplotación de caladeros y la necesidad de diversificar la producción han llevado a un interés creciente en especies como la *Seriola dumerili*, que ofrece ventajas significativas en términos de crecimiento rápido y valor nutricional, así como una gran aceptación por el consumidor (APROMAR, 2023).

La viabilidad técnica de la integración de la energía eólica marina y la acuicultura se basa en el diseño y la implementación de estructuras flotantes que puedan soportar tanto aerogeneradores como jaulas acuícolas. Estas estructuras deben ser robustas y capaces de resistir las condiciones ambientales adversas del entorno marino. Los aerogeneradores flotantes han avanzado considerablemente en los últimos años, permitiendo su instalación en aguas más profundas y con vientos más constantes, lo que aumenta la eficiencia de generación de energía.

Las jaulas acuícolas, por otro lado, deben estar diseñadas para proteger a los peces de las corrientes fuertes y de los depredadores, al tiempo que permiten una circulación adecuada del agua para mantener la calidad del hábitat. La hibridación de estas tecnologías requiere una ingeniería precisa y una comprensión profunda de las dinámicas del entorno marino (Fakriadis et al., 2020).

La viabilidad económica es otro aspecto crítico para el éxito de esta integración. La inversión inicial en estructuras flotantes y aerogeneradores puede ser elevada, pero los costos operativos y de mantenimiento pueden reducirse significativamente mediante la coubicación de las instalaciones. Esto se debe a la utilización compartida de recursos y la reducción de los costos de transporte y logística.

La integración de la energía eólica marina y la acuicultura también tiene implicaciones ambientales y sociales significativas. Desde una perspectiva ambiental, esta hibridación puede reducir el impacto visual y la contaminación acústica en comparación con las instalaciones terrestres. Además, la coubicación de aerogeneradores y jaulas acuícolas puede minimizar la huella ecológica y mejorar la eficiencia en el uso del espacio marino. Desde una perspectiva social, la integración puede generar nuevas oportunidades de empleo y desarrollo económico en las comunidades costeras. La creación de empleos en la construcción, operación y

mantenimiento de las instalaciones híbridas puede revitalizar las economías locales y proporcionar ingresos estables a las comunidades afectadas por la disminución de las pesquerías tradicionales.

En este estudio, se han estimado diversos costos asociados, debido a la imposibilidad de obtener datos precisos empresariales sobre los costos de operación y mantenimiento tanto de las plantas eólicas como de las instalaciones acuícolas. Esta aproximación es fundamental para realizar un análisis económico preliminar de la viabilidad del proyecto, considerando las limitaciones de acceso a información detallada y específica de costos empresariales.

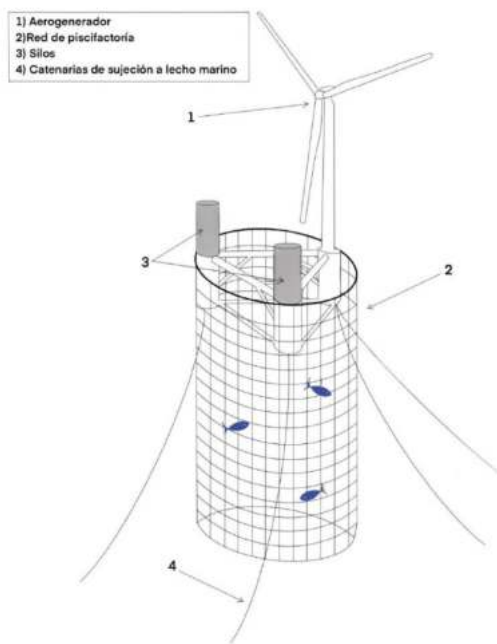


Fig 1. Estructura semisumergible propuesta para acuicultura basada en la estructura para aerogenerador descentrado. (Ferreño González et al., 2011).

Se ha analizado el diseño de estructuras flotantes modulares, las cuales pueden adaptarse a diversas condiciones ambientales y satisfacer las necesidades específicas de las especies acuícolas, permitiendo así una mayor flexibilidad en la instalación y mantenimiento, así como facilitando la expansión y escalabilidad del proyecto, analizando el espacio útil disponible para la instalación acuícola. Se ve clara la necesidad en el uso de tecnologías avanzadas de monitoreo y automatización, muy importantes para gestionar de manera eficiente las operaciones acuícolas y energéticas. Esto incluye el uso de sensores para controlar la calidad del agua, el estado de condición de los peces, así como para automatizar al máximo las tareas de alimentación y mantenimiento de las jaulas, aprovechando la gran capacidad de almacenamiento disponible en las estructuras, lo que reduce la huella de carbono asociada a los desplazamientos en barco. Además, se analizan estrategias de mitigación de impactos ambientales, como la implementación de sistemas de

protección contra depredadores y la gestión de residuos acuícolas, garantizando así la sostenibilidad a largo plazo del proyecto.

3. CONCLUSIONES

La hibridación de la producción acuícola con la generación eléctrica a partir de energía eólica marina ofrece una nueva solución más sostenible que optimiza el uso de los recursos naturales. A lo largo del trabajo, se han identificado múltiples ventajas de esta integración, tales como el uso eficiente del espacio marino, la reducción de costos operativos, la diversificación de ingresos y el fomento de la sostenibilidad ambiental. No obstante, también se han señalado desafíos significativos, especialmente en términos de ingeniería y gestión ambiental

La flexibilidad en la instalación y el mantenimiento de las estructuras flotantes facilita la expansión y escalabilidad del proyecto de hibridación, maximizando el uso del espacio disponible para la instalación acuícola. La elección de una plataforma semisumergible con aerogenerador descentrado se ha identificado como la opción más conveniente debido a sus ventajas estructurales, de acceso y económicas.

La combinación de turbinas eólicas y jaulas de engorde de especies acuicultivadas maximiza la utilización del espacio marino. Al instalar jaulas en áreas designadas para aerogeneradores, se evita la competencia por terrenos y se reduce significativamente el impacto ambiental. Esta estrategia optimiza el uso del espacio disponible y minimiza la huella ecológica, beneficiando tanto a la producción energética como a la acuícola.

La hibridación permite compartir gastos de infraestructura, mantenimiento y operación, resultando en una reducción significativa de los costos operativos. La utilización de una misma plataforma para ambas actividades no solo disminuye los costos logísticos, sino que también optimiza los recursos disponibles, mejorando la eficiencia económica del proyecto.

La adición de una nueva fuente de ingresos a través de la energía eólica marina reduce los riesgos económicos asociados a la acuicultura. Esta diversificación fortalece la estabilidad financiera de las operaciones, proporcionando una fuente de ingresos complementaria que puede compensar las fluctuaciones del mercado en uno de los sectores, garantizando así una mayor resiliencia económica.

REFERENCIAS

Artículos en revistas:

Brink, H., e Allen, J. (1978). On the Effect of Bottom Friction on Barotropic Motion Over the Continental Shelf. *Journal of Physical Oceanography*, 8, 919-922.

- APROMAR. (2023). Informe de la acuicultura en España 2023.
- FAO. (2023). Estado mundial de la pesca y la acuicultura 2023.
- Fakriadis, I., et al. (2020). Control de la reproducción en cautiverio de *Seriola dumerili*.
- Plan Nacional Integrado de Energía y Clima. (2021). Estrategias para el desarrollo de la energía eólica marina en España.
- Red Eléctrica Española. (2023). Potencia total instalada en España según generación.
- Teletchea, F., & Fontaine, P. (2014). Diversificación de especies en acuicultura.

Modelos de Fiabilidade em Estações Maregráficas

D. Carinhas (1,2), P. Infante (2), P. Santos (1), A. Martinho (3)

- (1) Instituto Hidrográfico. Rua das Trinas 49, 1249-093 Lisboa, Portugal. dora.carinhas@hidrografico.pt
- (2) CIMA/IIFA e DMAT/ECT, Universidade de Évora, Évora, Portugal.
- (3) CINAV, Escola Naval, Instituto Universitário Militar, Portugal.

Resumen: A clássica questão da qualidade dos dados maregráficos tornou-se mais importante na última década, pois surgiram novas tecnologias, as redes maregráficas foram modernizadas, factos que obrigam a olhar com atenção o desempenho dos marégrafos. A distribuição de Weibull é flexível em termos de modelação de fiabilidade dos vários componentes de uma estação maregráfica, mesmo quando dispomos de um número reduzido de dados. Nos sistemas reparáveis, como é o caso das estações maregráficas, consideram-se modelos de falhas misturados e a distribuição de Weibull conduz a um ajustamento com parâmetro de forma igual a 1. Nestas situações, o modelo sugerido é o de Crow-AMSA. Neste estudo, os dados de falha foram recolhidos nas estações maregráficas de Leixões, Setúbal-Troia e Sines, durante, aproximadamente, 15 anos. O software R foi utilizado para o cálculo das estimativas de parâmetros e recorreu-se ao teste de Kolmogorov-Smirnov para rejeitar ou aceitar a hipótese do modelo de distribuição.

Palabras clave: estação maregráfica, fiabilidade, modelos de sobrevivência, previsão

1. INTRODUÇÃO

O Instituto Hidrográfico (IH) gere a maior rede de observações maregráficas nacional, operando e mantendo 23 estações maregráficas em cooperação com entidades públicas ou privadas.

O conhecimento da maré tem especial interesse em zonas costeiras, nomeadamente para a hidrografia e geodesia, segurança da navegação (em canais, estuários e portos), execução de projetos de engenharia costeira (como a construção de pontes, docas e quebra-mares), estudos de processos biológicos e geológicos, estudos de alterações climáticas e ainda para atividades recreativas e pesca (Pugh, 1987).

As questões relacionadas com a qualidade das medições maregráficas tornaram-se mais importantes com a modernização dos equipamentos e as recentes preocupações com o aumento do nível médio do mar. Assim, nas últimas décadas, muita atenção tem sido dada ao desempenho de marégrafos, especialmente no contexto do programa Global Sea Level Observing System GLOSS (IOC, 1997).

As estações maregráficas podem, basicamente, ser divididas em dois tipos: estações maregráficas principais ou de referência e estações maregráficas secundárias. O primeiro

tipo tem um carácter permanente, isto é, tratam-se de estações maregráficas instaladas em locais estratégicos da região costeira, cujo intuito é uma medição contínua dos níveis de água, principalmente da maré, nesse local. Estão associadas estruturas para abrigo dos componentes da estação em alvenaria ou betão – as denominadas “casas” ou “abrigos” do marégrafo (Fig. 1).

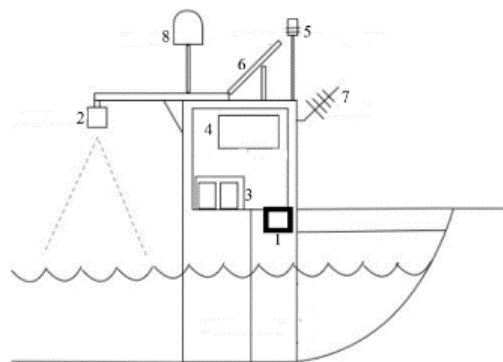


Fig. 1. Esquema de uma estação maregráfica (1- marégrafo radar principal; 2 - marégrafo radar secundário; 3 - baterias; 4 - data loggers; 5 - estação meteorológica; 6 - painéis solares; 7 - antena de comunicações; 8 - antena GPS).

No segundo tipo, o carácter da estação é temporário, ou seja, são estações instaladas com um objetivo específico, geralmente associado a um trabalho limitado no tempo ou para simples

comparação da maré relativamente a um porto principal. As estações maregráficas são sistemas constituídos por diferentes componentes.

A norma NP EN 13306, de 2007, define fiabilidade como a “aptidão de um bem para cumprir uma função requerida sob determinadas condições, durante um dado intervalo de tempo”.

O termo fiabilidade também se aplica como uma medida de desempenho da fiabilidade, podendo definir-se como uma probabilidade. O termo elemento refere-se a qualquer peça, componente, dispositivo, subsistema, unidade funcional, equipamento ou sistema que possa ser considerado individualmente. Os elementos poderão ser ou não reparáveis. A função requerida, de acordo com a mesma norma, é a função ou combinação de funções que se considera necessária para que o elemento preste um dado serviço ou atinja determinado objetivo funcional. O tempo deverá ser bem caracterizado, distinguindo-se entre tempo real de funcionamento e tempo de calendário.

Um aspeto importante relacionado com a manutenção é o que se entende por falha e por avaria. A falha define-se como o fim da capacidade do elemento para executar a função requerida. Após a falha o elemento encontra-se avariado. Assim a norma EN 13306:2007 considera a falha como a ocorrência e a avaria como um estado; deste estado são excluídas a indisponibilidade durante a manutenção preventiva, ou outras ações programadas.

De acordo com a mesma norma, define-se bem reparável aquele que, após a falha e sob condições determinadas, seja repostado num estado no qual possa voltar a desenvolver a função que lhe é requerida. A ideia de bem reparável contempla também a ação pela qual a função é repostada por afinação, calibração ou ajuste, ou seja, sem substituição de qualquer componente.

É com o objetivo de definir políticas de manutenção para os elementos que se aplicam modelos de fiabilidade.

2. METODOLOGIA

À medida que as técnicas de organização e gestão da manutenção vão evoluindo vai havendo um conjunto cada vez maior de dados históricos das estações maregráficas. Estes dados são analisados com vista à construção de bases de dados de fiabilidade que nos indicam as avarias sofridas por estação, as suas causas, periodicidades, etc.

A necessidade da existência de bases de dados de fiabilidade obtidos a partir da monitorização das estações maregráficas advém da necessidade de comparar com os valores teóricos as situações práticas, a fim de se poder realizar previsões cada vez mais seguras sobre os estados das diferentes estações maregráficas, desde a instalação ao termo da sua vida útil e, até sobre a própria vida útil.

Os modelos considerados seguem os seguintes pressupostos: qualquer transição de um estado de disponibilidade para um estado de indisponibilidade é considerada como uma falha e o subsequente estado é considerado como sendo de avaria; toda a transição de estado de avaria para o estado de disponibilidade é considerada como reparação; as intervenções preventivas sistemáticas são integradas nos modelos como dados censurados.

A distribuição de Weibull provou ser muito flexível em termos de modelação de fiabilidade dos mais variados componentes mesmo usando um número reduzido de dados.

Esta distribuição poderá ser caracterizada por dois ou três parâmetros (Pereira e Sena, 2012; Dias, 2015):

- a) parâmetro de forma, identificado por β , o qual condiciona a forma gráfica da densidade de probabilidade de falha, podendo assumir diversos valores ($0 < \beta < 1$, a função de risco é monótona decrescente e poderão ser consideradas falhas resultantes de má montagem, materiais, controlo de qualidade, má aplicação da manutenção e falha de componentes eletrónicos; $\beta = 1$, são típicos os modos de falha característicos de uma função de risco constante e são consideradas as falhas aleatórias, nomeadamente, induzidas por fenómenos naturais e erros de análise de dados gerados pela mistura de modos de falha; $1 < \beta < 4$, a função de risco é monótona crescente e podemos considerar as falhas por fadiga, falhas de componentes sujeitos a desgaste e fenómenos de erosão e corrosão);
- b) parâmetro de escala ou vida característica, identificado por θ ou η , cuja variação faz aumentar ou diminuir a distribuição ao longo do eixo horizontal (x) e o grau de assimetria e achatamento da distribuição; representa o valor de x em que o componente apresenta 63,2% de probabilidade de falha;
- c) parâmetro de localização ou vida mínima garantida, identificado por γ , representa o tempo com probabilidade certa de não haver falhas.

A função distribuição de Weibull é definida como (O'Connor, 1991):

$$f(x) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{x}{\eta}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{\eta}\right)^\beta\right].$$

A função de fiabilidade $R(x)$ dá-nos a probabilidade de sobrevivência do componente em função do tempo, sendo descrito por:

$$R(x) = \int_x^\infty f(x')dx' = \exp\left[-\left(\frac{x}{\eta}\right)^\beta\right].$$

Sendo $F(x)$ complementar de $R(x)$, teremos:

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{\eta}\right)^\beta\right].$$

A função de risco $h(x)$ representa a taxa instantânea de falha aplicando-se na caracterização das falhas. A função de risco, da distribuição de Weibull, é dada pela expressão:

$$h(x) = \frac{f(x)}{R(x)} = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{x}{\eta}\right)^{\beta-1}.$$

Os sistemas complexos reparáveis, como as estações maregráficas, são reparados em vez de substituídos, quando avariam. As distribuições, e em particular a de Weibull, não podem ser usadas no tratamento desses problemas uma vez que estamos perante o tratamento de avarias com causas variadas que não podem ser tratadas como distribuições. É vulgar que o tratamento de dados com modos de falha misturados, no papel de probabilidade de Weibull, conduza a um ajustamento com $\beta = 1$.

O modelo sugerido por Larry Crow, nos anos 70, Crow-AMSAA é uma generalização do processo de Poisson baseado na distribuição exponencial.

Supõe-se que o sistema é colocado em funcionamento em $t = 0$ e funciona durante um período de tempo T , o número de avarias $N(T)$ a que o sistema está sujeito durante um período de tempo é aleatório e os tempos entre falhas sucessivas $0 < X_1 < X_2 < \dots < X_{N(T)}$ são também aleatórios (Fig. 2). Se, durante o funcionamento do sistema, os tempos entre avarias sucessivas $X_i - X_{i-1}$ ($i = 1, 2, \dots, X_0 = 0$) são variáveis aleatórias independentes e são distribuídas exponencialmente com taxa de ocorrência de falhas λ , então $\{N(t), t > 0\}$ é um processo de Poisson com taxa de ocorrência de avarias constante, λ .

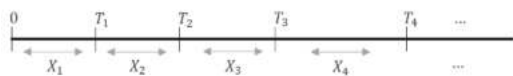


Fig. 2. Tempos das ocorrências/falhas e tempos entre ocorrências/falhas.

Assim, o modelo Crow-AMSAA surge quando os tempos entre avarias não seguem a mesma distribuição e a taxa de ocorrência de falhas é dada por (Crow, 1974.):

$$\rho(t) = \lambda \beta t^{\beta-1}, t, \lambda, \beta > 0$$

em que: β é o parâmetro de forma, λ é o parâmetro de escala e t é o tempo de funcionamento do sistema em unidades adequadas.

A taxa de ocorrência de avarias aumenta (diminui) com t quando $\beta > 1$ ($\beta < 1$) e, deste modo, o modelo Crow-AMSAA pode descrever a redução ou o aumento da fiabilidade do sistema. Quando $\beta = 1$, o modelo Crow-AMSAA reduz-se ao processo de Poisson.

Considerando um sistema de idade t , podemos estar interessados na probabilidade de o sistema cumprir a sua função requerida num período Δt sem avariar:

$$R(t) = e^{-[\lambda(t+\Delta t)^\beta - \lambda t^\beta]}.$$

É importante caracterizar a fiabilidade do sistema, determinando o MTBF (*mean time between failures*) instantâneo:

$$MTBF_i = 1/\rho(t) = \frac{1}{\lambda \beta t^{\beta-1}}.$$

O método da máxima verosimilhança permite estimar os parâmetros de escala e de forma da taxa de ocorrência de falhas e, conseqüentemente, todas as funções de fiabilidade descritas.

3. RESULTADOS

Neste estudo, os dados de falha foram recolhidos nas estações maregráficas de Leixões, Setúbal-Troia e Sines, durante, aproximadamente, 15 anos (Fig. 3).

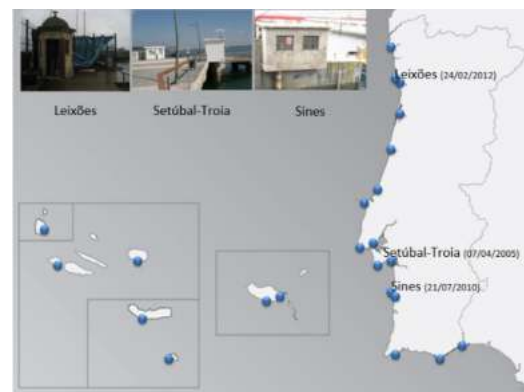


Fig. 3. Localização das estações maregráficas do estudo, entre parênteses temos a data, a partir da qual iniciámos a contagem das falhas.

A Tabela I apresenta as principais estatísticas descritivas referentes aos tempos entre falhas:

	<i>Leixões</i>	<i>Setúbal-Troia</i>	<i>Sines</i>
Média	2545,52	3090,79	1874,91
Mediana	1407,00	2172,00	425,00
Desvio-padrão	2812,22	2752,38	3131,38
Curtose	0,90	2,51	6,84
Assimetria	1,32	1,45	2,51
Mínimo	5	114	3
Máximo	9744	12456	15663
Soma	63638	105087	142493
Contagem	25	34	76

Tabela I – Principais estatísticas descritivas

Valores de assimetria positivos, sugerem distribuições positivas, este facto é corroborado pelos gráficos *box-plot* da Fig. 4:

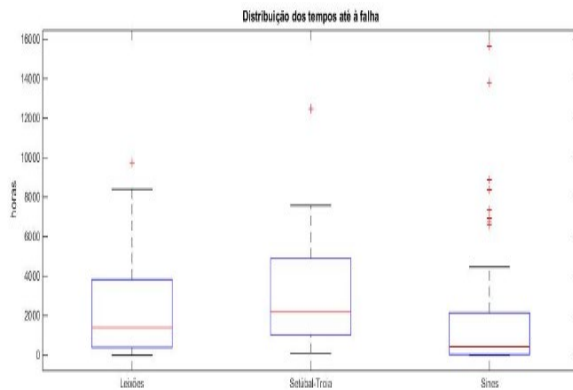


Fig. 4. Distribuições dos tempos até à falha para cada uma das estações maregráficas.

Os modelos de Weibull e Crow-AMSAA foram aplicados aos dados das três estações maregráficas e os resultados obtidos são apresentados na Tabela II:

LEIXÕES	SETÚBAL_TROIA	SINES
<u>Modelo Weibull</u> tempos até à falha		
2 549horas ≈ 3,5 meses	4 446 horas ≈ 6 meses	1 070horas ≈ 1,5 meses
<u>Modelo Crow-AMSAA</u> tempos até à falha		
2 412horas ≈ 3 meses	3 194 horas ≈ 4,5 meses	1 301horas ≈ 2 meses

Tabela II – Tempos até à falha calculados pelo modelo Weibull e pelo modelo Crow-AMSAA

Os tempos até à falha são similares, no entanto devemos considerar os resultados do modelo Crow-AMSAA uma vez que estamos perante o tratamento de avarias com causas variadas que não podem ser tratadas como tendo a mesma distribuição.

4. CONCLUSÕES

O principal objetivo deste trabalho é o de melhorar as políticas de manutenção para as estações maregráficas da responsabilidade do IH. Neste trabalho foram apresentados os resultados da aplicação de modelos de fiabilidade aos dados de falhas nas estações maregráficas de Leixões, Setúbal-Troia e Sines. Os modelos escolhidos, são modelos paramétricos, no entanto com pressupostos distintos. O modelo de Weibull é amplamente utilizado em estudos de fiabilidade de equipamentos, no entanto as estações maregráficas apresentam falhas de diferentes origens. Nestas situações, sugere-se a aplicação do modelo Crow-AMSAA.

REFERENCIAS

- Crow, L.H., Reliability Analysis for Complex, Repairable Systems in Reliability and Biometry, SIAM, ed. by Proschan and R. J. Serfling, Philadelphia, Pennsylvania, pp. 379- 410, 1974.)
- Dias, I. (2015). Aplicação de Técnicas de Fiabilidade e Gestão de Manutenção numa Linha de Tratamento de Frigoríficos em Fim de Vida: Caso de Estudo Recielectric. [Dissertação de Mestrado, FCT-UNL].
- Ferreira, L. (1998). Uma introdução à manutenção. Porto: Publindústria.
- IOC. (1997). Global Sea Level Observing System (GLOSS) - Implementation plan. Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, Technical Series No. 50, 91 pp & annexes.
- O'Connor, P. (1991). Practical reliability engineering. New York: John Wiley & Sons Inc.
- Norma Portuguesa NP EN 13306:2007 – Terminologia da Manutenção.
- Pereira, F., Sena, F. (2012) Fiabilidade e sua aplicação à manutenção. Porto: Publindústria.
- Pugh, D. T. (1987). Tides, Surges and Mean Sea Level. Wiley.

Experiencia piloto de aprovechamiento de corrientes mareales en la costa de Huelva (TidUtil)

Autores: A. de la Cruz (1), J. Morales (1), M. Sedrati (2), J. Hernández (1), J. Clavijo (1) y M. Reyes (1)

(1) Universidad de Huelva, España.

(2) Université Bretagne, Francia.

Resumen: La integración de tecnologías de energía renovable con la selección innovadora de sitios es esencial para abordar los desafíos energéticos globales. En este contexto, la propuesta de instalar una turbina de marea en la desembocadura del río Tinto en Huelva ofrece un potencial significativo para futuros estudios e instalaciones similares. Colocar el dispositivo debajo del puente donde se unen los ríos Tinto y Odiel permitirá ensayar distintos métodos de control y contar con un sistema innovador de monitorización y control remoto, convirtiéndose en un referente de la Industria 4.0. La construcción de una planta en la costa de Huelva fortalecerá las infraestructuras de I+D en Andalucía

Palabras clave: Corrientes mareales, Energía renovable marina, Microturbinas.

1. INTRODUCCIÓN

En este proyecto se aborda la necesidad de encontrar nuevos recursos energéticos para satisfacer la creciente demanda mundial de energía de manera eficiente y sostenible. Las fuentes de energía actuales, como los combustibles fósiles, son limitadas y generan problemas significativos, incluyendo emisiones de dióxido de carbono que afectan el clima y la salud pública, particularmente en áreas industriales como Huelva.

La energía mareal, en particular, ofrece una oportunidad significativa en la provincia de Huelva. Desde el siglo XVIII, se han utilizado construcciones como el Molino del Pintado en Ayamonte para aprovechar esta energía, utilizando la diferencia de altura entre la bajamar y la pleamar para moler trigo. La historia y geografía de Huelva, con sus amplios humedales, han facilitado el uso de la energía mareal a lo largo de su costa.

Los ciclos de mareas en nuestra provincia son de doce horas, estos permitirían un suministro estable y predecible de energía a lo largo del día. Por supuesto, el proyecto no estará exento de retos como el adverso ambiente alcalino al que se enfrentan los materiales sumergidos debajo del agua o a las bajas velocidades de flujo que se presentan en periodos de mareas muertas.

La energía oceánica tiene un potencial significativo, aunque difícil de cuantificar. Los estudios más optimistas sugieren que se podrían generar hasta 32 TW de electricidad al año (Wahyudie et al. 2017)¹. Estudios más conservadores estiman un potencial total de 337 GW y 885 TWh al año (De Andres et al. 2017)².

Las turbinas mareales extraen energía cinética de las corrientes generadas por las mareas, similar a las

turbinas eólicas, pero con diferencias clave. Los flujos de las corrientes mareales están confinados entre el lecho marino y la superficie del mar, y pueden concentrarse en un canal, a diferencia de la energía eólica. Las turbinas mareales, con la misma capacidad de potencia nominal que los aerogeneradores, pueden producir cuatro veces más energía por año/m² (Hussain, Arif, y Aslam 2017)³. Aunque las turbinas mareales operan con velocidades de flujo más bajas, el agua tiene una densidad de 1025 kg/m³ comparada con 1.25 kg/m³ del aire, compensando así los efectos y produciendo la misma potencia (Bahaj et al. 2007)⁴.

Este efecto se puede apreciar en la ecuación que modela la potencia producida por una turbina.

$$P(t) = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot A \cdot v(t)^2$$

- P(t) es la potencia hidráulica por unidad de superficie, medida en [W].
- C_p es el coeficiente de potencia, que varía dependiendo de la microturbina considerada.
- A es el área barrida del rotor de la microturbina o el área frontal de la microturbina, medida en [m²].
- v(t) es la velocidad del flujo, medida en [m/s].

El proyecto consistirá en la instalación de una turbina mareal debajo del puente que cruza la desembocadura del río Tinto, dirección Mazagón. Conectando la instalación a red y a un sistema de baterías, el comportamiento de la instalación será monitorizado y servirá de ejemplo para otras instalaciones del mismo tipo que se quieran implantar.

En este artículo se presentan los trabajos realizados para establecer la ubicación de la turbina y los primeros análisis de la distribución del flujo en el emplazamiento elegido.

2. DESARROLLO

Descripción del emplazamiento.

Tras una prospección en las posibles ubicaciones (Desembocadura del Río Tinto y en la Zona 9 del puerto de Huelva) para la turbina en torno a la desembocadura de los ríos Tinto y Odiel en la ría de Huelva, se determina que el lugar con mayor potencial energético para la instalación de la turbina es la desembocadura del río Tinto, en lo que se conoce como Punta del Sebo. La turbina irá instalada debajo del puente del Tinto, el cual une la autovía H-30 con la carretera nacional N-442, en el arco número 14 contando desde la Punta del Sebo ($37^{\circ}12'35''N$ $6^{\circ}56'08''W$), *figura 1*. La colocación de la turbina debajo del puente supone una ventaja, ya que no será necesario instalar grandes extensiones de cable submarino, además de poder usar el puente como estructura para colocar el generador fuera del agua abaratando más los costes de instalación.



Fig. 1. Localización de la instalación.

Modelo 3D.

Para la creación del modelo en tres dimensiones se partieron de unas batimetrías antiguas aportadas por el Puerto de Huelva. Estos datos batimétricos venían en formato CAD, con el sistema de coordenadas ED 50, *figura 2*. Las batimetrías vienen modeladas por polilíneas con elevación.

El primer objetivo consiste en crear un modelo TIN (Triangulated Irregular Network) de la zona. Para crear el modelo geométrico se usará el programa ArcGIS Pro, en el cual se combinarán los datos de batimetría y los datos cartográficos de IGN, no antes sin haber preprocesado los datos de batimetría y los datos cartográficos.

Una vez procesados los datos de la *figura 2* y completados los datos al lado este del puente con datos de la web Navionics, se tienen las batimetrías listas para ser exportadas en ArcGIS.

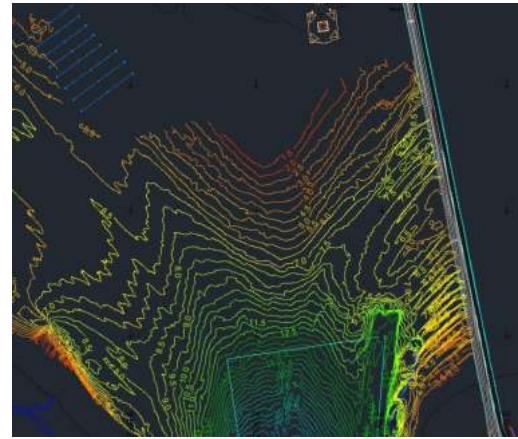


Fig. 2. Batimetrías en formato CAD sin procesar.

En ArcGIS se creará a partir de estas isolíneas de profundidad, un archivo en formato TIN, que posteriormente será transformado a Raster.

Una vez tenemos las batimetrías en formato Raster, estas se unen al modelo digital de la zona que se obtuvo del IGN (PNOA-2020- AND-682-4122-ORT-CLA-CIR.LAZ) para después obtener el modelo digital completo de la zona que se muestra en la *figura 3*.

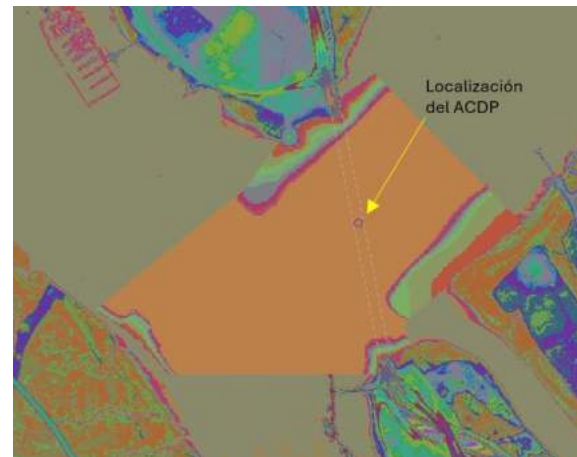


Fig. 3. Modelo 3D final, que incluye la unión con la capa del IGN.

Análisis del flujo.

Los datos de flujo se obtuvieron mediante una campaña de medidas con un dispositivo ADCP (Teledyne RD Instruments, modelo WorkHorse Centinela), que se inició el día 27 de febrero de 2024 y terminó el 13 de marzo del mismo año. El dispositivo de medida en cuestión se instaló en el mismo lugar en el que se tiene planeado situar la turbina.

Los datos que se han obtenido de la campaña de medida incluyen datos a distintas profundidades, la primera medida se encuentra a 1.05 metros del fondo y después tenemos 33 más separadas 0.5 metros entre cada una. Por lo que estamos registrando valores de

dirección y magnitud de la corriente a distintas distancias del fondo.

Los datos obtenidos del ADCP también tuvieron que ser procesados ya que había datos de medida de flujo para alturas que se encontraban por encima de la superficie.

3. RESULTADOS

Las velocidades horizontales a lo largo de la capa de agua han mostrado una tendencia en la que sus magnitudes aumentaban a medida que nos acercamos a la superficie y nos alejamos del fondo, *figura 4*.

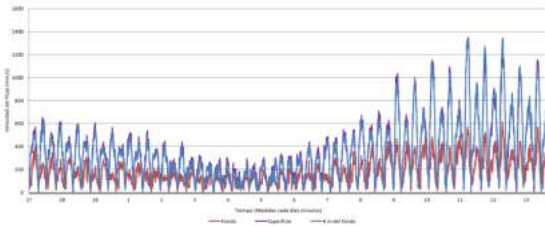


Fig. 4. Magnitud de las velocidades horizontales a distintas profundidades.

Se aprecia que las mayores velocidades se dan cercanas a la superficie, pero las de mayor calidad en

cuanto a dirección y a dispersión del flujo se encuentra a 5.55 m del fondo, *figura 5*.

De forma proporcional a las velocidades obtenemos resultados de las potencias, por lo que es obvio que los mejores lugares para instalar la turbina son aquellos en los que las velocidades son mayores. Y por lo tanto mayores serán las energías también.

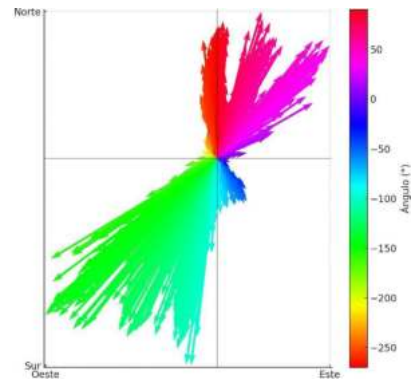


Fig. 5. Dirección de flujo a 5,55 metros del fondo.

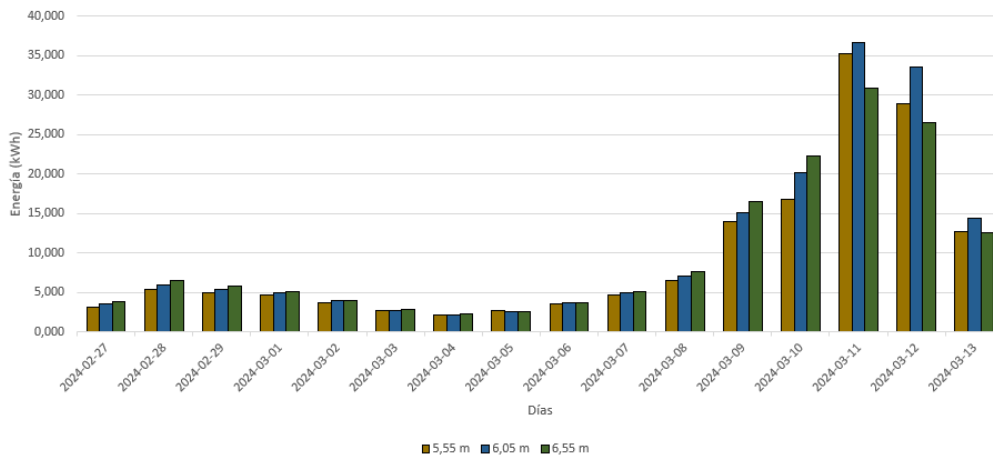


Fig. 6. Energía diaria producida en las profundidades más cercanas a la superficie.

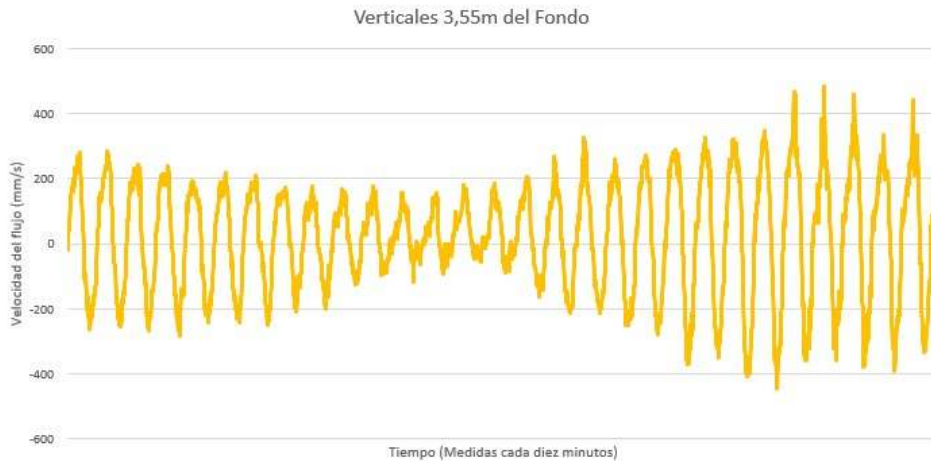


Fig. 7. Corrientes verticales a 3.55 metros del fondo.

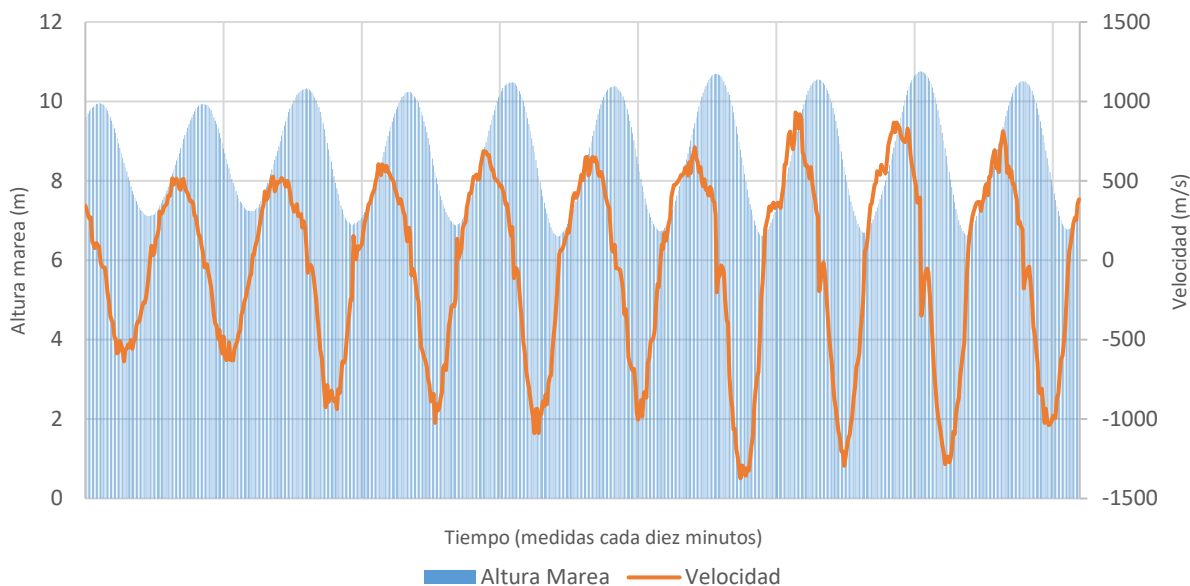


Fig. 8. Altura de Marea y Velocidad (5,55 m del fondo) frente al Tiempo (8 al 13 de marzo de 2024)

En la *figura 6* se han representado las tres profundidades con mayores energías diarias acumuladas.

En cuanto a las corrientes verticales, se observó que éstas eran de muy baja intensidad además de ser prácticamente constantes con la profundidad, un ejemplo de sus magnitudes se encuentra en la *figura 7*.

Resultó que para las mareas vaciantes se dan flujos de mayor intensidad que para las mareas de régimen llenante. Este comportamiento se ilustra en la *figura 8*.

4. CONCLUSIONES

Con los resultados mencionados anteriormente se han llegado a las siguientes conclusiones:

En primer lugar, se ha cumplido con el desarrollo de un modelo geométrico en formato raster que servirá para simulaciones hídricas del proyecto, además de haber sido de utilidad para la obtención de perfiles de la cuenca del río que más tarde han sido utilizados para graficar la sección útil para la instalación de la turbina.

En cuanto al análisis de las corrientes se ha concluido que la profundidad óptima para la instalación de la turbina es a 5.55 m del lecho marino, obteniéndose ahí los valores óptimos de velocidad, dirección y energía. Además, se tiene margen de agua por encima de la turbina para que no se quede nunca al descubierto por las mareas equinocciales y que los barcos no puedan dañarla. Esa profundidad también asegura que la turbina esté protegida de los sedimentos del fondo.

Agradecimientos

Proyecto del Plan Complementario de Ciencias Marinas. Código de expediente PCM_00024, cofinanciado por la Junta de Andalucía y por la Unión Europea a través de los fondos NextGenerationEU del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia.

REFERENCIAS

- (1) Wahyudie, A., M.A. Jama, T.B. Susilo, O. Saeed, C.S.A. Nandar, y K. Harib. 2017. «Simple Bottom-up Hierarchical Control Strategy for Heaving Wave Energy Converters». *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 87: 211-21. doi:10.1016/j.ijepes.2016.10.010.
- (2) De Andres, Adrian, Andy MacGillivray, Owain Roberts, Raul Guanache, y Henry Jeffrey. 2017. «Beyond LCOE: A Study of Ocean Energy Technology Development and Deployment Attractiveness». *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 19: 1-16. doi:10.1016/j.seta.2016.11.001.
- (3) Hussain, Akhtar, Syed Muhammad Arif, y Muhammad Aslam. 2017. «Emerging Renewable and Sustainable Energy Technologies: State of the Art». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 71: 12-28. doi:10.1016/j.rser.2016.12.033.
- (4) Bahaj, A.S., A.F. Molland, J.R. Chaplin, y W.M.J. Batten. 2007. «Power and Thrust Measurements of Marine Current Turbines under Various Hydrodynamic Flow Conditions in a Cavitation Tunnel and a Towing Tank». *Renewable Energy* 32(3): 407-26. doi:10.1016/j.renene.2006.01.012.

Aplicación de procesos foto-dirigidos para la eliminación de microalgas nocivas en aguas marinas

Autores: A. de la Jara-Fariñas (1), M. Ibáñez-López (1) y J. Moreno-Andrés (1)

(1) Dpto. Tecnologías del Medio Ambiente, Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales. Instituto Universitario de Investigación Marina (INMAR). Universidad de Cádiz. ana.delajarafarinas@alum.uca.es.

Resumen: Las aguas de lastre constituyen un severo problema debido al transporte de especies nocivas. Según el Convenio Internacional para el control y la gestión del agua de lastre y los sedimentos de los buques de 2004, será obligatorio, a partir de diciembre de 2024, implementar un tratamiento eficaz para eliminar estas especies. Tradicionalmente se utiliza radiación UV con lámparas de mercurio como opción mayoritaria, pero su limitada comercialización a futuro, en líneas con el Convenio de Minamata, han dado lugar a la búsqueda de alternativas. Por ello, se propone la evaluación de fuentes emergentes de radiación UV-C, como los Diodos Emisores de Luz (LEDs) para inactivar el fitoplancton nocivo transportado en las aguas de lastre. Esta tecnología se combinará con H₂O₂ y hierro, aprovechando el presente en los tanques de lastre.

Palabras clave: aguas de lastre, *Heterosigma akashiwo*, procesos de oxidación avanzada, UV-LED.

1. INTRODUCCIÓN

Las aguas de lastre representan un problema significativo debido a su papel en el transporte e introducción de especies nocivas en hábitats oceánicos. Este problema está intensificado por la globalización, ya que la construcción de rutas marítimas y canales interoceánicos supone la eliminación de las barreras naturales, permitiendo la dispersión de organismos de unas cuencas a otras y creando corredores de invasión. Todo esto, unido al cambio climático, supone una reducción de la resistencia de especies tropicales y de la resiliencia de los ecosistemas acuáticos (Nentwing, 2008).

Estas aguas transportan alrededor de 850 especies marinas y microorganismos diariamente, incluyendo especies invasoras y nocivas (Mouchtoglou et al., 2024). Por ello, la Organización Marítima Internacional (OMI) estableció el Convenio Internacional para el Control y la Gestión del Agua de Lastre y Sedimentos de los Buques de 2004, vigente desde 2017, con el objetivo de evitar la transferencia de especies nocivas y patógenos (OMI, 2004). En dicho convenio se establecen dos directrices, la D-1 en la que se determina que la toma y descarga de las aguas deben realizarse en alta mar y la D-2, que establece los requisitos de concentración de organismos vivos y patógenos que están permitidos en el agua de lastre que va a ser descargada. En esta última se establece que los buques solo pueden descargar aguas que posean menos de 10 organismos viables por metro cúbico cuando su tamaño sea igual o superior a 50 micras y menos de 10 organismos viables por mililitro cuando su tamaño esté comprendido entre 10 y 50 micras. Por otro lado, también considera límites de descarga en cuanto a bacterias indicadoras (OMI, 2004).

Para cumplir con el Convenio, se han implementado mayoritariamente dos técnicas: la aplicación de radiación ultravioleta y la electrocloración. Además,

existen otras alternativas viables como la aplicación de ultrasonidos, desoxigenación o la ozonización (Hess-Erga et al., 2019). No obstante, estas últimas son técnicas minoritarias y su uso no está extendido.

El motivo principal por el que la radiación ultravioleta constituye un tratamiento mayoritario se debe a que este método permite un ahorro energético, de espacio y de costes significativo (Lakshmi et al., 2021). Por ello y, debido a que la electrocloración es una técnica que presenta mayor eficacia en caudales elevados y a que, tras su aplicación deben degradarse mediante otras técnicas los compuestos reactivos generados, se ha seleccionado la radiación UV como tecnología de aplicación para este estudio.

La manera tradicional de aplicación de radiación ultravioleta consiste en la utilización de lámparas de baja y media presión de mercurio. No obstante, debido a la implementación del Convenio de Minamata, cuyo objetivo es reducir de manera paulatina la producción de mercurio y de productos que lo contengan, es necesario buscar alternativas eficaces a esta tecnología. Para ello, en el presente estudio se propone la utilización de UV-LEDs, con mayor vida útil y con un menor consumo de energía en comparación con las lámparas tradicionales (Chen et al., 2017).

En este estudio se evalúa la efectividad de los UV-LEDs en la eliminación de microalgas nocivas. Para ello, se hace uso de esta técnica tomando como indicador la microalga planctónica *Heterosigma akashiwo*, detectada en tanques de lastre, y capaz de causar mareas rojas y episodios de elevada mortandad en peces (Mehdizadeh, 2023; Kim et al., 2015) y cuyo tamaño está comprendido entre las 10 y 50 micras. Además, se combinará esta tecnología con peróxido de hidrógeno y con el hierro presente en el tanque de las aguas de lastre para la evaluación de una posible sinergia entre ambos tratamientos y la determinación

de la técnica más eficaz en la eliminación de estos microorganismos.

2. DESARROLLO

La especie seleccionada fue *Heterosigma akashiwo*, utilizándose una cepa perteneciente a la colección de cultivos del País Vasco BMCC 76 Aislada 1-6-2002 en Portugalete. Para la realización del estudio se cultivó esta especie y se determinó su curva de crecimiento en condiciones óptimas de luz y nutrientes. Para ello, se inoculó una parte de la solución madre en una solución de 500 mL de agua de mar filtrada con medio de cultivo F/2 y vitaminas y se mantuvo la muestra a 24°C.

Para la construcción de la curva de crecimiento se realizaron medidas de fluorescencia cada dos días con un fluorímetro. Además, se midió la eficiencia o actividad fotosintética, parámetro que indica el rendimiento cuántico del fotosistema II y que es comúnmente utilizado para determinar los efectos de los nutrientes sobre las algas (Qi et al., 2013).

Las medidas de fluorescencia se asociaron a la concentración celular medida mediante cámara Neubauer al microscopio. Para ello, se construyó la recta de calibrado entre la fluorescencia y la concentración celular (Fig. 1).

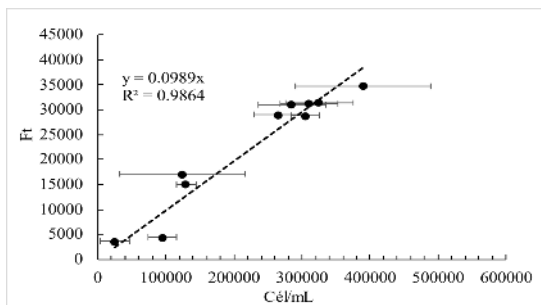


Fig. 1. Recta de calibrado que muestra la relación existente entre la fluorescencia y la concentración celular para la especie *Heterosigma akashiwo*.

Para la realización del tratamiento UV se utilizó un reactor LED (PHOTOLAB LED 275-0.1/300-0.3-1 Cb, APRIA Systems S.L) con diodo emisor de luz a 275 nm, que posee intensidad regulable de forma independiente, obteniéndose una irradiancia estable a 0.077 mW/cm² desde su encendido. Así, se vertieron 40 mililitros del cultivo en placas Petri y se introdujeron en el reactor LED durante 1.46, 2.21 y 4.43 minutos. Cada tiempo se corresponde con una dosis de 75, 100 y 200 mJ/cm² respectivamente. Posteriormente, se realizó un seguimiento del crecimiento celular destinado a la construcción de las curvas de crecimiento de los cultivos irradiados con las distintas dosis.

Por otro lado, se expusieron los cultivos a un agente oxidante y a hierro. El agente oxidante seleccionado fue el peróxido de hidrógeno ya que es capaz de interactuar con el hierro presente en los tanques de

agua de lastre a través de un proceso Fenton y potencial de producir radicales hidroxilo, que son altamente oxidantes. La concentración de hierro seleccionada fue 1 mg/L puesto que es la concentración máxima presente en los tanques (Dobaradaran et al., 2018). Por otro lado, se seleccionaron dosis de 1, 2.5, 5 y 7 mg/L de peróxido con el objetivo de determinar la más efectiva. Para ello, se adicionaron estas dosis a los cultivos y se determinó el efecto que tenían sobre su crecimiento celular.

Para evaluar el rendimiento de la reacción se monitorizó la evolución de ambos compuestos mediante técnicas espectrofotométricas (Spuhler et al., 2010). Para ello se realizaron rectas de calibrado que relacionaban la concentración de H₂O₂ (Fig. 2) y Fe²⁺ (Fig. 3) con la absorbancia medida en el espectrofotómetro mediante la realización de diluciones. Estas rectas permitieron conocer la concentración de hierro y peróxido presente en el cultivo hasta su agotamiento.

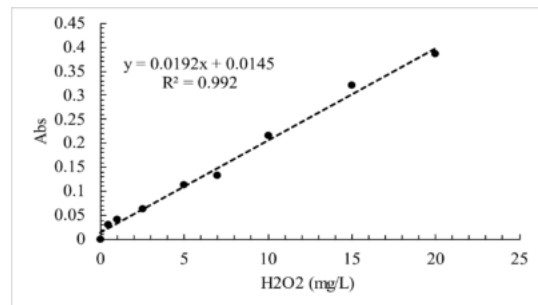


Fig. 2. Recta de calibrado que relaciona la concentración de peróxido de hidrógeno presente en el medio con la absorbancia medida mediante espectrofotómetro.

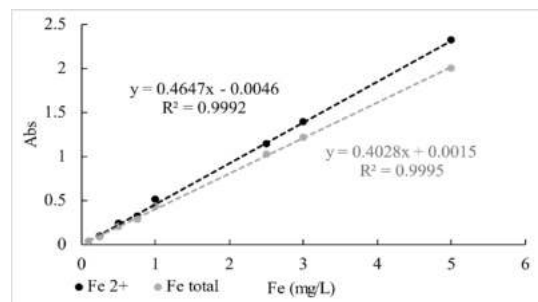


Fig. 3. Recta de calibrado que relaciona la concentración de hierro total y Fe²⁺ presente en el medio con la absorbancia medida mediante espectrofotómetro.

Por último, se integró la dosis seleccionada del tratamiento UV con la de peróxido de forma simultánea y secuencial. El tratamiento simultáneo consiste en aplicar ambas técnicas a la vez, mientras que en el secuencial se añade inicialmente uno de los tratamientos y a continuación el otro. Este procedimiento se replicó adicionando además hierro a los cultivos. De esta manera, se pudo determinar la existencia de efectos sinérgicos entre ambos tratamientos.

3. RESULTADOS

La curva de crecimiento de ambas réplicas de *Heterosigma akashiwo* (Fig. 4) muestran un ciclo de crecimiento celular de aproximadamente un mes. En estas condiciones no se aprecia fase de latencia celular, produciéndose un crecimiento desde el primer día. Asimismo, la fase estacionaria del cultivo o capacidad de carga se alcanza el día 25.

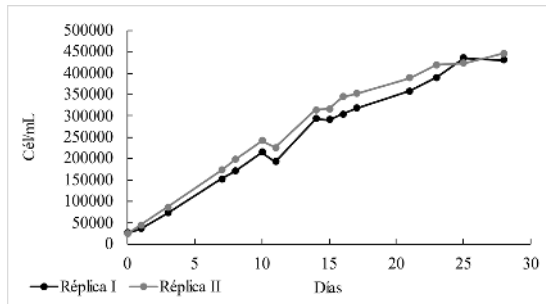


Fig. 4. Curva de crecimiento celular de la especie *Heterosigma akashiwo*.

En una primera aproximación, se evaluó la aplicación de hierro y peróxido de hidrógeno a los cultivos y el posible efecto de estos reactivos por sí solos. Se puede determinar que, pese a no existir un efecto de inhibición del crecimiento celular significativo, sí que se ve afectada la actividad fotosintética. Además, se determinó que la dosis óptima de peróxido de hidrógeno es de 6.5 mg/L.

Por el contrario, la aplicación de luz ultravioleta muestra un claro efecto de inhibición del crecimiento celular (Fig. 5) en todas las dosis, siendo la dosis de 200 mJ/cm² la que presenta un efecto mayor e impide la recuperación del cultivo celular (Fig. 6).

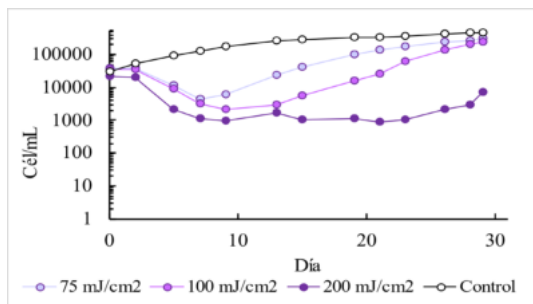


Fig. 5. Curvas de crecimiento celular del cultivo control y de los cultivos con las distintas dosis de luz ultravioleta.

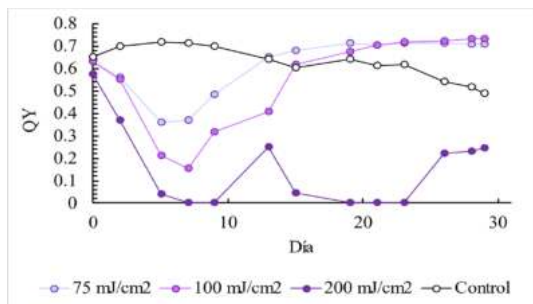


Fig. 6. Evolución de la actividad fotosintética del cultivo control y de los cultivos a los que se les aplicó distintas dosis de luz UV.

El cultivo irradiado con una dosis de 100 mJ/cm² se comporta de manera similar al irradiado con 75 mJ/cm². Por ello, se selecciona la dosis de 75 mJ/cm², ya que el tiempo de exposición es menor y supone un ahorro energético con respecto a las más elevadas. Además, la dosis más baja permite la recuperación progresiva del cultivo y de su actividad fotosintética, lo que la hace idónea para su combinación con el tratamiento químico.

Seguidamente, se evalúa la sinergia existente entre ambos tratamientos. Las curvas de crecimiento de los distintos tratamientos (Fig. 7) muestran la existencia de una interacción entre la radiación ultravioleta y el peróxido adicionado. En este caso, se puede observar que la técnica con una mayor eficacia consiste en aplicar en primer lugar luz ultravioleta y adicionar posteriormente el reactivo. La adición conjunta del peróxido y la radiación ultravioleta posee un comportamiento similar del crecimiento y de la actividad fotosintética (Fig. 8) a la aplicación secuencial, pero permite una recuperación más temprana del cultivo.

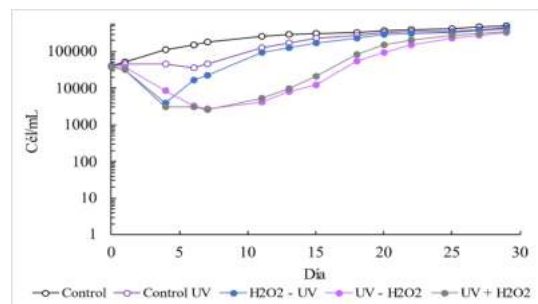


Fig. 7. Curva de crecimiento celular del cultivo control, el cultivo control con aplicación de luz ultravioleta y los cultivos a los que se le adicionó en primer lugar peróxido y luego luz ultravioleta (azul), luz ultravioleta y luego peróxido (malva) y ambas técnicas a la vez (gris).

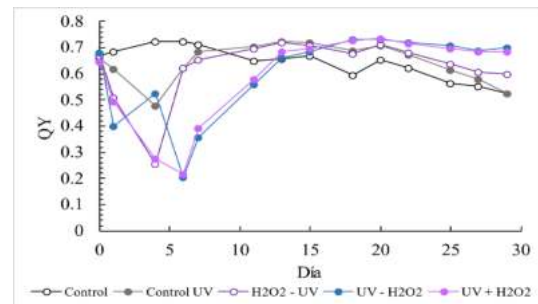


Fig. 8. Evolución de la actividad fotosintética del cultivo control, el cultivo control con aplicación de luz ultravioleta y los cultivos a los que se le adicionó en primer lugar peróxido y luego luz ultravioleta (azul), luz ultravioleta y luego peróxido (malva) y ambas técnicas a la vez (gris).

Finalmente, la curva de crecimiento celular del experimento en el que se han combinado la luz ultravioleta con el peróxido y el hierro se encuentra aún en desarrollo y demostrará si existe una relación entre ambos métodos. Esta curva se construye con el objetivo de optimizar el método.

4. CONCLUSIONES

La problemática asociada a las aguas de lastre posee una escala internacional debido a la globalización y al elevado número de rutas marítimas. Aunque el Convenio Internacional para el Control y la Gestión del Agua de Lastre y Sedimentos de Buques de 2004 establece dos directivas globales, no especifica la tecnología o las técnicas óptimas para su implementación. Este vacío tecnológico, se ve aumentado por la intención del Convenio de Minamata de prohibir la comercialización de productos con mercurio, por lo que se requiere del desarrollo de nuevas técnicas que cumplan con las directivas de la OMI.

La innovadora tecnología UV-LED representa un avance significativo, y posee potencial de aplicación para la inactivación de microalgas nocivas en las aguas de lastre. Los resultados muestran una inhibición del crecimiento a partir de 75 mJ/cm², inhibiendo casi por completo el crecimiento de *H. akashiwo* a 200 mJ/cm² durante 30 días. Además, esta aumenta su eficacia en combinación con Procesos de Oxidación Avanzada.

El efecto de la radiación UV-LED en la microalga *H. akashiwo* puede verse incrementado en presencia de H₂O₂ (6,5 mg/L) y Fe²⁺ (1 mg/L). Se determina que la manera más efectiva de aplicar el tratamiento consiste en aplicar luz ultravioleta en primer lugar y, seguidamente, adicionar H₂O₂. Por ello, se puede afirmar que el tratamiento alcanza su óptimo con la combinación secuencial de la luz ultravioleta con un tratamiento químico.

Agradecimientos

Proyecto MOBILED. Ref.: PCM_00015. Consejería de Universidad, Investigación e Innovación de la Junta de Andalucía y por la Unión Europea NextGenerationEU/ PRTR, dentro del Plan Complementario nacional de Ciencias Marinas el material proporcionado y su contribución a este estudio.

Asimismo, agradecer al Máster en Gestión Integral del Agua de la Universidad de Cádiz, a su coordinador, Enrique Nebot, y al grupo de trabajo del Departamento de Tecnologías del Medio Ambiente del Instituto Universitario de Investigaciones Marinas (INMAR) la oportunidad de desarrollar con ellos mi trabajo de Fin de Máster y la beca de investigación otorgada.

REFERENCIAS

(OMI). (2004). Implantación del Convenio sobre la gestión del agua de lastre. Implantación del Convenio sobre la gestión del agua de lastre. <https://www.imo.org/es/MediaCentre/HotTopics/Pages/Implementing-the-BWM-Convention.aspx>.

Chen, J., Loeb, S., & Kim, J.-H. (2017). LED revolution: Fundamentals and prospects for UV disinfection applications. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 3(2), 188-202. <https://doi.org/10.1039/C6EW00241B>

Dobaradaran, S., Soleimani, F., Nabipour, I., Saeedi, R., & Mohammadi, M. J. (2018). Heavy metal levels of ballast waters in commercial ships entering Bushehr port along the Persian Gulf. *Marine Pollution Bulletin*, 126, 74-76. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.10.094>.

Hess-Erga, O.-K., Moreno-Andrés, J., Enger, Ø., & Vadstein, O. (2019). Microorganisms in ballast water: Disinfection, community dynamics, and implications for management. *Science of The Total Environment*, 657, 704-716. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.004>.

Kim, J.-H., Park, B. S., Wang, P., Kim, J. H., Youn, S. H., & Han, M.-S. (2015). Cyst morphology and germination in *Heterosigma akashiwo* (Raphidophyceae). *Phycologia*, 54(5), 435-439. <https://doi.org/10.2216/15-26.1>.

Lakshmi, E., Priya, M., & Achari, V. S. (2021). An overview on the treatment of ballast water in ships. *Ocean & Coastal Management*, 199, 105296. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2020.105296>.

Mehdizadeh, M. (2023). *Heterosigma akashiwo*, un flagelado que mata peces. *Microbiol. Res*, 14(1), 132-147.

Mouchtoglou, K., Zacharia, P., & Nikolaou, G. (2024). A Fuzzy Ballast Water Risk Assessment Model in Maritime Transport. *Sustainability*, 16(8), Article 8. <https://doi.org/10.3390/su16083166>.

Nentwing, W. (2008). *Biological invasions* (Vol. 193). Springer.

Qi, H., Wang, J., & Wang, Z. (2013). A comparative study of maximal quantum yield of photosystem II to determine nitrogen and phosphorus limitation on two marine algae. *Journal of Sea Research*, 80, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2013.02.007>.

Spuhler, D., Andrés Rengifo-Herrera, J., & Pulgarin, C. (2010). El efecto del Fe²⁺, Fe³⁺, H₂O₂ y el reactivo foto-Fenton a pH casi neutro sobre la desinfección solar (SODIS) a bajas temperaturas del agua que contiene *Escherichia coli* K12. *Applied Catalysis B: Environmental*, 96(1), 126-141. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2010.02.010>.

Eliminación de Microcontaminantes de Aguas Residuales Urbanas Mediante Fotocatálisis Heterogénea para Proteger Ecosistemas Marinos

M. Figueredo ⁽¹⁾, I. Levchuk ⁽²⁾, A. Lähde ⁽²⁾, M.A. Manzano ⁽¹⁾

- (1) Departamento de Tecnologías del Medio Ambiente, INMAR- Instituto de Investigaciones Marinas Marine, Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales, Universidad de Cádiz, Polígono Río San Pedro s/n, Puerto Real, 11510 Cádiz, Spain. manuel.figueredo@uca.es
- (2) Fine Particle and Aerosol Technology Laboratory, Department of Environmental and Biological Sciences, University of Eastern Finland, P.O. Box 1627, FI-70211 Kuopio, Finland

Resumen: Este trabajo presenta la aplicación de la fotocatálisis heterogénea (FH) para eliminar microcontaminantes de aguas residuales urbanas utilizando TiO₂ sintetizado mediante "spray flame pyrolysis" (FSP) como fotocatalizador. Se han realizado experimentos a escala de laboratorio, empleando un fotorreactor UVA-LED y para la eliminación de cafeína y el ácido oxálico. El FSP mostró una velocidad comparable al fotocatalizador P25 de Evonik para eliminar la cafeína del agua. Mediante experimentos en presencia de tertbutanol, se determinó la capacidad del FSP para desarrollar las diferentes vías de reacción que ocurren en la fotocatálisis. Para simular unas condiciones más próximas a las de un agua real, se realizaron experimentos en presencia de HCO₃⁻/CO₃⁼ a pH 8, donde a pesar de que la velocidad de reacción disminuye, el FSP mostró una constante de reacción del doble que el P25. Los próximos pasos incluyen pruebas en matrices reales de agua y ensayos de toxicidad para asegurar la viabilidad del tratamiento en aplicaciones prácticas.

Palabras clave: Microcontaminantes, aguas residuales, oxidación, fotocatálisis

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Actualmente, el avance de la química analítica en la detección de contaminantes de preocupación emergente y prioritarios ha revelado un problema global (Neamțu, M. y col., 2014). Los hábitos de vida y medios de producción actuales, en cuanto a consumo de fármacos, productos de higiene personal, pesticidas etc., han identificado a los efluentes de aguas residuales urbanas e industriales como una de las vías principales de entrada de estos compuestos al medio ambiente, donde pueden presentar efectos tóxicos incluso a muy baja concentración (Rodríguez, E.M. y col., 2013). Debido a que estos compuestos orgánicos, suelen ser poco o nada biodegradables, no son eliminados en las estaciones de tratamiento de aguas residuales convencionales. En un contexto de cambio climático, la protección de los recursos hídricos disponibles se plantea como una de las prioridades dentro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la agenda 2030, en concreto, dentro del objetivo 6.3: "De aquí a 2030, mejorar la calidad del agua reduciendo la contaminación, eliminando el vertimiento y minimizando la emisión de productos químicos y materiales peligrosos, reduciendo a la mitad el porcentaje de aguas residuales sin tratar y aumentando considerablemente el reciclado y la reutilización sin riesgos a nivel mundial".

Una de las alternativas para eliminar estos compuestos de las aguas residuales, es el uso de Procesos de Oxidación Avanzada (POAs), que se basan en la producción de radicales hidroxilo (HO[•])

de elevado poder oxidante (E=2,8 V), capaces de reaccionar con la mayoría de compuestos orgánicos. Entre los POA, la Fotocatálisis Heterogénea (FH) empleando TiO₂ P25 de Evonik[®] como fotocatalizador, siendo un tratamiento capaz de mineralizar estos compuestos (Mena, E. y col., 2018)

El principio de la FH se muestra en la figura 1, y se basa en que cuando un semiconductor recibe radiación lo suficientemente energética, un electrón (e⁻) de su capa de valencia se excita y pasa a la capa de conducción, dejando un hueco en la primera (h⁺). Esta fotoexcitación del semiconductor lleva a una serie de reacciones químicas que producen oxidantes capaces de eliminar los contaminantes orgánicos del agua.

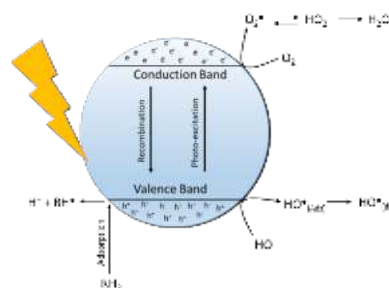


Figura 1: Esquema del funcionamiento de la fotocatálisis heterogénea.

El desarrollo de nuevas técnicas de síntesis de materiales para llevar a cabo la FH es una rama de investigación en auge y con una elevada producción científica en los últimos años. En los últimos años, el desarrollo de la técnica de "Spray Flame Pyrolysis

(FSP)” se ha extendido debido a que puede producir una gran cantidad de nanopartículas con alta pureza y elevada superficie específica comparada con otros métodos. Es además una técnica rápida, realizada en un solo paso y de bajo coste. La FSP se basa en la formación de óxidos de metales a partir de precursores disueltos en soluciones altamente volátiles, que son pulverizadas en forma de aerosol en una llama. La combustión hace que se generen las nanopartículas, que son retenidas en un filtro (Kafil, M. y col., 2019).

La caracterización de la actividad fotocatalítica de un nuevo material es compleja debido a que durante la FH ocurren distintas vías de reacción (ver figura 1). Sin embargo, resulta clave a la hora de determinar el potencial del material para eliminar contaminantes en distintos tipos de agua. Una estrategia típica, consiste en evaluar la capacidad de los fotocatalizadores para eliminar un determinado compuesto, pero estos experimentos están más encaminados a ver la reactividad del compuesto empleado en función de la vía principal de degradación (ya sea por reacción con HO^\bullet , adsorción, fotólisis, etc.) (Figueredo, M. y col., 2021). Sin embargo, esta metodología también podría ser válida para comparar distintos materiales, tan solo eligiendo los compuestos prueba adecuados. Esto podría ser una interesante estrategia para evaluar la capacidad de un material para desarrollar las distintas vías de reacción de la FH.

Teniendo esto en cuenta, en el presente estudio para evaluar la capacidad del fotocatalizador para producir los HO^\bullet , se empleó cafeína como compuesto prueba, ya que es un compuesto que no sufre fotólisis, y no se adsorbe sobre la superficie del catalizador y es ampliamente detectado en aguas residuales y naturales. Por otro lado, para evaluar la capacidad del fotocatalizador de eliminar compuestos mediante la reacción con los h^+ , se empleó ácido oxálico, por ser un compuesto que no fotoliza, se adsorbe fácilmente sobre la superficie del TiO_2 , no genera subproductos al oxidarse y presenta una reactividad relativamente baja con los HO^\bullet . Para confirmar o descartar las reacciones de ambos compuestos con los HO^\bullet , se empleó tertbutanol (tButOH).

Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es evaluar la actividad fotocatalítica de un fotocatalizador basado en TiO_2 y sintetizado mediante la técnica FSP sintetizado por el grupo de investigación FINE, de la University of Eastern Finland (UEF), y comparar su efectividad para la degradación de los compuestos prueba seleccionados, tomando como referencia el fotocatalizador TiO_2 P25 comercial.

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

La figura 2 muestra un esquema del sistema experimental empleado para la realización de los experimentos, este consistía en una placa de LEDs UVA que emitían a una longitud de onda de 365 nm.

A 8 cm de distancia de las lámparas (irradiancia de 9 mW cm^{-2}), se disponían dos vasos de vidrio con agitación magnética que contenían 150 mL de agua problema.

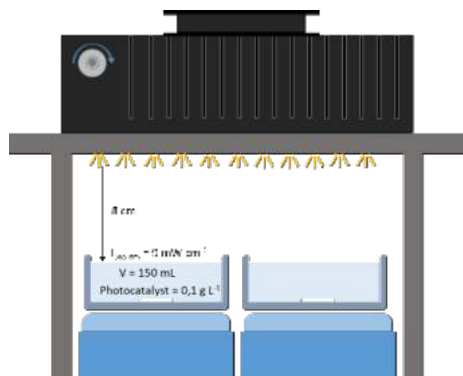


Figura 2: Esquema del sistema experimental empleado.

Como agua problema se empleó agua ultrapura ($18,2 \mu\Omega \text{ cm}^{-1}$) o agua tamponada a pH 8 con disoluciones de $\text{CO}_3^{2-}/\text{HCO}_3^-$. Los compuestos prueba se añadían a partir de stock concentrados hasta alcanzar las concentraciones experimentales deseadas que eran de $0,1 \text{ mg L}^{-1}$ cuando se empleaba cafeína, 35 mg L^{-1} cuando se empleaba oxálico. En algunos experimentos se añadió tertbutanol en concentración suficiente para asegurar que la reactividad (R) de este con los HO^\bullet , fuera entre 100-1000 veces mayor que con el compuesto objetivo ($C = \text{cafeína}$ o ácido oxálico), calculándose dicha concentración mediante la ecuación 1.

$$R = \frac{k_{\text{HO}^\bullet\text{-tButOH}} \times [\text{tButOH}]}{k_{\text{HO}^\bullet\text{-C}} \times [C]} \quad \text{Ecuación 1.}$$

Donde $k_{\text{HO}^\bullet\text{-tButOH}}$ y $k_{\text{HO}^\bullet\text{-C}}$ son las constantes de reacción entre el tButOH y el compuesto C (cafeína o ácido oxálico) con los radicales hidroxilo, respectivamente.

En los experimentos donde se empleaban fotocatalizadores (TiO_2 P25 y TiO_2 FSP), estos se pesaban y añadían al agua a concentraciones de $0,1 \text{ g L}^{-1}$. Antes de empezar cada experimento, para asegurar una correcta dispersión del fotocatalizador, se ponía la suspensión del fotocatalizador y el agua problema durante 10 min en un baño de ultrasonidos. Después, se dejaban otros 20 minutos de tiempo de contacto entre el agua y el fotocatalizador, para alcanzar el equilibrio de adsorción. Una vez comenzado el tiempo de experimentación, se conectaban las lámparas del fotorreactor y se tomaban muestras a distintos tiempos para su análisis.

En cuanto a los métodos experimentales, la cafeína se midió mediante un LCMS-8040 de Shimadzu dotado de una columna Zorbax Eclipse Plus C18 $3 \times 5 \text{ mm}$ $1,8 \mu\text{m}$. Se empleó un método isocrático con una proporción de 90% de agua acidificada con ácido fórmico y un 10 % acetonitrilo a un flujo de $0,4 \text{ mL min}^{-1}$ y un volumen de inyección de muestra de $10 \mu\text{L}$. La detección de ácido oxálico se realizó mediante

un cromatógrafo iónico Dionex ICS-2100 de Thermo Scientific empleando como fase estacionaria una columna Dionex Ion PAC AS18 de 2×250mm. Las fases móviles fueron agua ultrapura y una disolución 2M de KOH a un flujo de 0,25 mL min⁻¹.

Para el análisis y la comparación de los resultados experimentales entre los distintos procesos implicados en la FH (fotólisis, adsorción, fotocatalisis) y los materiales estudiados (FSP y P25), se ha atendido a la constante de reacción de pseudoprimer orden, k_{obs} (ver ecuación 2), obtenida mediante la pendiente de la curva entre el logaritmo de la concentración normalizada del compuesto prueba, respecto al tiempo.

$$\ln\left(\frac{C}{C_0}\right) = k_{obs} \times t \quad \text{Ecuación 2.}$$

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La figura 3A muestra los resultados experimentales obtenidos para la degradación de cafeína en los experimentos de adsorción, fotólisis y FH con los materiales FSP y P25. Se muestra también el efecto en la degradación de cafeína al añadir tertbutanol al agua como secuestrante de los HO[•], así como al realizar los experimentos en agua tamponada a pH 8 con CO₃⁼/HCO₃⁻. Además, se muestran los valores de la k_{OBS} obtenidos para cada uno de los experimentos (figura 3B).

Se observa claramente como la adsorción y la fotólisis no producen degradación ninguna de la cafeína. Sin embargo, la combinación de ambos procesos lleva a una desaparición la cafeína en menos de 5 min. Esto pone de manifiesto el efecto sinérgico que existente entre la fotólisis y el fotocatalizador, y la capacidad de la FH para eliminar compuestos orgánicos presentes en el agua. Estos experimentos también muestran como en condiciones óptimas de experimentación, esto es, cuando solo existe cafeína para reaccionar, el TiO₂ P25 es el fotocatalizador mas efectivo.

La adición de tertbutanol al agua problema a una concentración 0,1 M al agua, provocó una bajada drástica en la degradación de cafeína, donde se eliminó menos del 60 % de la cafeína inicial al final de los 30 minutos de experimento. Este resultado, confirma la capacidad de ambos fotocatalizadores de producir HO[•], y que estos son la principal especie implicada en la degradación de cafeína

En cuanto al efecto de realizar los experimentos en agua tamponada a pH 8 con CO₃⁼/HCO₃⁻, lo que representa unas condiciones mas próximas a las que se podrían encontrar en un agua real, se observa una disminución de la velocidad de reacción, pero la eliminación de cafeína fue mayor del 90%, con ambos materiales, en 30 minutos de experimento con ambos materiales.

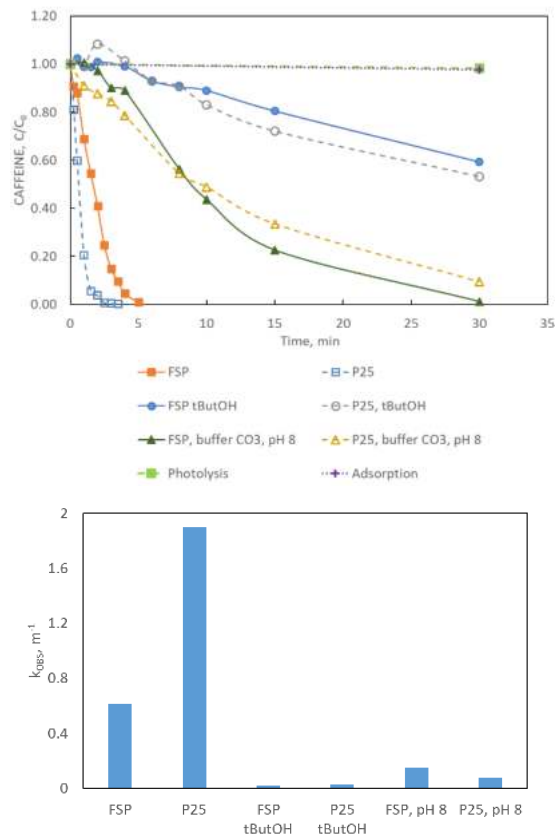


Figura 3: Concentración de cafeína en disolución respecto al tiempo en experimentos de adsorción, fotólisis y fotocatalisis heterogénea, empleando los fotocatalizadores FSP y P25 (A) y k_{obs} para los experimentos obtenida mediante la ecuación 1 (B). Condiciones experimentales: $V_t=150$ mL, Concentración fotocatalizador = 0,1 g L⁻¹, $I_{365nm} = 9$ mW cm⁻², $CAF_0 = 0,1$ mg /L⁻¹, tButOH = 7 mM

La figura 4.A muestra los resultados de eliminación de ácido oxálico en los procesos ensayados (fotólisis, adsorción y FH) así como bajo distintas condiciones experimentales de pH y presencia de scavengers. En la figura 4.B se muestran las k_{OBS} obtenidas para cada uno de los experimentos.

Al igual que en los experimentos llevados a cabo con cafeína, se observa como la fotólisis y la adsorción no llevan a la eliminación alguna de ácido oxálico tras 60 min de experimentación. Sin embargo, en combinación de ambos el ácido oxálico es eliminado en 30 min tanto con P25 y en 60 con FSP.

En este caso, el efecto de la presencia de tertbutanol en el experimento de eliminación de ácido oxálico con FSP, no condujo a una significativa reducción de la velocidad de reacción. Esto implica que el compuesto está siendo eliminado principalmente por los h^+ en la superficie del fotocatalizador, y confirma la capacidad del fotocatalizador para desarrollar esta vía de eliminación de contaminantes.

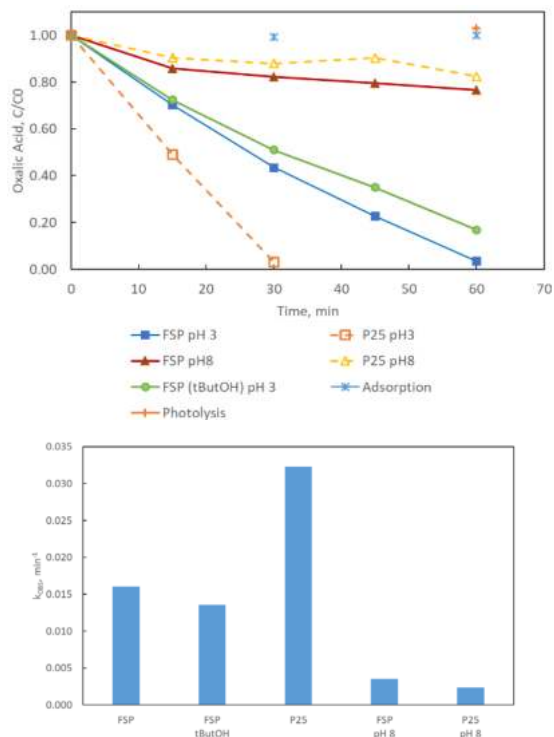


Figura 4: Concentración de ácido oxálico en disolución respecto al tiempo en experimentos de adsorción, fotólisis y fotocátalisis heterogénea, empleando los fotocatalizadores FSP y P25. Condiciones experimentales: $V_t=150$ mL, Concentración fotocatalizador = $0,1$ g L^{-1} , I_{365nm} : 9 mW cm^{-2} , Cafeína inicial = $0,1$ mg L^{-1} , tButOH = 0.1 M

Por último, la tabla 1 muestra las k_{OBS} para los experimentos de eliminación de cafeína y ácido oxálico en agua tamponada a pH 8 con CO_3^{2-}/HCO_3^- . Se observa como para ambos casos, la actividad fotocatalítica del fotocatalizador FSP sintetizado es del doble de la obtenida con P25.

Tabla 1: k_{OBS} (min^{-1}) para los experimentos de degradación de compuestos orgánicos, en condiciones alcalinas.

	Cafeína	Ácido oxálico
FSP	0,148	0,004
P25	0,079	0,002

4. CONCLUSIONES

El presente estudio demuestra las buenas capacidades de fotocatalizador TiO_2 sintetizado mediante la técnica de "spray flame pyrolysis" para su uso en aplicaciones ambientales para la eliminación de microcontaminantes presentes en aguas residuales, evitando así los efectos que puedan provocar en el medio marino. Los experimentos realizados muestran como la actividad fotocatalítica es comparable a la del fotocatalizador mas ampliamente estudiado en la bibliografía, el TiO_2 P25 de Evonik.

Los próximos estudios pasan por evaluar la capacidad del fotocatalizador para eliminar contaminantes en aguas residuales urbanas y en aguas marinas, así como realizar ensayos de toxicidad del agua tratada.

Agradecimientos

Manuel Figueredo agradece al Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades por su contrato Juan de la Cierva (referencia FJC2021-047753-I) y por la financiación para Estancias de movilidad en el extranjero José Castillejo para jóvenes doctores 2019 (referencia CAS22/00400).

REFERENCIAS

- Manuel Figueredo, Eva M. Rodríguez, Javier Rivas, Fernando J. Beltrán, "Photocatalytic ozonation in water treatment: Is there really a synergy between systems?", *Water Research*, Volume 206, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117727>
- Kafil, M., Nasab, S.B., Moazed, H., Jokiniemi, J., Lähde, A. & Bhatnagar, A. 2019, "Efficient removal of azo dyes from water with chitosan/carbon nanofloas a novel nanocomposite synthesized by pyrolysis technique", *Desalination and Water Treatment*, vol. 142, pp. 308-320
- E. Mena, A. Rey, F.J. Beltrán, "TiO₂ photocatalytic oxidation of a mixture of emerging contaminants: A kinetic study independent of radiation absorption based on the direct-indirect model," *Chemical Engineering Journal*. 339 (2018) 369–380. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.01.122>
- G. Márquez, E.M. Rodríguez, F.J. Beltrán, P.M. Álvarez, "Solar photocatalytic ozonation of a mixture of pharmaceutical compounds in water," *Chemosphere*. 113 (2014) 71–78. doi:10.1016/j.chemosphere.2014.03.093
- M. Neamtu, D. Grandjean, A. Sienkiewicz, S. Le Faucheur, V. Slaveykova, J.J.V. Colmenares, C. Pulgarín, L.F. De Alencastro, "Degradation of eight relevant micropollutants in different water matrices by neutral photo-Fenton process under UV254 and simulated solar light irradiation - A comparative study," *Applied Catalysis B: Environmental*. 158–159 (2014) 30–37. doi:10.1016/j.apcatb.2014.04.001
- E.M. Rodríguez, G. Márquez, E.A. León, P.M. Álvarez, A.M. Amat, F.J. Beltrán, "Mechanism considerations for photocatalytic oxidation, ozonation and photocatalytic ozonation of some pharmaceutical compounds in water," *Journal of Environmental Management* 127 (2013) 114–124. doi:10.1016/j.jenvman.2013.04.024

Desinfección solar y cultivo de microalgas: Tratamientos integrados para la mejora ambiental de efluentes de acuicultura marina

Autores: D. Herrera-Amaya (1), C. Garrido-Pérez, M. Figueredo-Fernández e M. Manzano-Quñones

(1) Instituto Universitario de Investigación Marina (INMAR), Universidad de Cádiz, Puerto Real, Cádiz. dianam.2herrera7@gmail.com

Resumen: Los efluentes de la acuicultura marina representan un riesgo para los ecosistemas costeros debido a la carga microbiológica, materia orgánica y nutrientes que contienen. Su tratamiento requiere enfoques tecnológicos que reduzcan contaminantes y reutilicen agua y materiales. El objetivo de este estudio fue evaluar métodos de desinfección del efluente: desinfección solar (SODIS), peróxido de hidrógeno (H₂O₂), y una combinación de ambos (SODIS+H₂O₂). Luego, se añadió un inóculo de *Tetraselmis chuii*, registrando el crecimiento de microalgas en las aguas tratadas. Se utilizó la especie *Vibrio* como indicador contaminante. El tratamiento más eficiente en desinfección fue SODIS+H₂O₂, inactivando bacterias por debajo del límite de detección. El crecimiento de microalgas se midió mediante densidad óptica (O.D), siendo SODIS el que logró mayor biomasa (O.D 680nm = 0,2768). El rendimiento cuántico fue de 0,7, indicando buen estado de las microalgas. La concentración bacteriana se redujo entre un 90-99% y se eliminaron más del 90% de los nutrientes en cada caso.

Palabras clave: Desinfección, efluente de acuicultura, cultivo de microalgas.

1. INTRODUCCIÓN

España es una potencia acuícola dentro de la Unión Europea, sobre todo respecto a especies tradicionales. Su rápida extensión y desarrollo, debido al crecimiento poblacional y a la disminución de capturas salvajes, han provocado diversas cuestiones sobre los posibles impactos de dicha actividad (Estrada et al., 2023). Para poder lograr un desarrollo sostenible de la acuicultura deben conocerse los impactos ambientales que esta actividad puede provocar, con el fin de minimizarlos. El impacto ambiental de la actividad acuícola depende en gran medida de la especie, el método de cultivo, la densidad del stock, el tipo de alimentación y las condiciones hidrográficas (Rabassó, 2006).

Las actividades acuícolas generan efluentes cargados de nutrientes, productos químicos y compuestos orgánicos, que, si no reciben un tratamiento adecuado antes de ser vertidos, pueden tener un impacto negativo significativo en las especies acuáticas y los ecosistemas circundantes como la eutrofización, especialmente, en zonas de ambientes sensibles. Además, en caso de reutilización del agua, se pueden producir efectos tóxicos en los cultivos por la presencia de otros organismos nocivos.

Una de las estrategias de gran potencial para los procesos acuícolas para mejorar el rendimiento del cultivo, el control de enfermedades y el ahorro de agua y energía son los Sistemas de Recirculación Acuícola (RAS). Es un método avanzado de cría intensiva piscícola que tiene como objetivo maximizar el uso del agua mediante su reciclaje, eliminando los desechos de los peces, reciclando los nutrientes y volviendo a utilizar el agua de manera eficiente.

Aunque el RAS posee una serie de ventajas, tiene un elevado coste operacional asociado a los costes de los equipos (bombas, reguladores de temperatura, filtros y sensores para el monitoreo avanzado) y a la energía consumida, la cual es entre un 24 y 40% mayor que en los sistemas de flujo continuo (Badiola et al., 2018), además de la amenaza de enfermedades infecciosas en los organismos cultivados debido a la presencia de *Vibrio* spp, que forman parte de los sistemas digestivos de animales marinos (Villar-Navarro et al., 2019), siendo *Vibrio harveyi*, *V. anguillarum*, *V. parahaemolyticus* y *V. vulnificus* cepas asociadas a mortalidad de los cultivos (Espinoza Plascencia & Bermúdez Almada, 2012).

La desinfección solar o SODIS (Solar Disinfection) es un tratamiento de agua que utiliza la energía solar para inactivar las bacterias presentes y mejorar la calidad microbiológica del agua. La inactivación de microorganismos por irradiación se debe a la absorción ultravioleta (UV), causando reacciones fotoquímicas de los componentes fundamentales de las células. El mecanismo fundamental de desinfección por UV es la dimerización de la timina. Si una de dos timinas adyacentes absorbe un fotón UV, se forma el dímero de timina, rompiéndose la estructura del ADN e inhibiendo la capacidad de reproducción del microorganismo (Guimarães et al., 2001). A pesar de ser uno de los tratamientos de agua menos utilizados, se trata de una solución eficiente y económica del tratamiento de agua potable (Figueredo-Fernández et al., 2017).

Este mecanismo mejora significativamente con la presencia de peróxido de hidrógeno para la inactivación total de vibrios (Villar-Navarro et al., 2019). Se trata de un oxidante cuya capacidad de desinfección consiste en la liberación de radicales

libre de hidroxilo (OH^-), que, al encontrarse con la membrana de los organismos contaminantes, activan un proceso de oxidación produciendo una ruptura en la cadena doble o modificaciones químicas en las bases nitrogenadas del ADN (Labas et al., 2008), determinando así la destrucción bacteriana y evitando su posible regeneración.

El objetivo del estudio se alinea con las tareas planteadas en el proyecto RECOVER, que estudia la regeneración de estos efluentes mediante desinfección y el reciclaje de los nutrientes utilizando tecnología de microalgas. Consiste en el crecimiento de estos organismos a la vez que absorben nutrientes del efluente, de manera que la biomasa de las microalgas se puede cosechar y utilizar como pienso de acuicultura de valor añadido y mejorar la inmunidad de animales acuáticos (Han et al., 2019) a la vez que se disminuyen los costes de producción, reduce el flujo de nutrientes al medio, mejora la huella de carbono y reduce la huella hídrica (proyecto SUNRAS).

2. DESARROLLO

2.1 Desinfección

Se llevaron a cabo tres tratamientos de desinfección: desinfección con peróxido de hidrógeno (H_2O_2 , 1 mg L^{-1}); radiación solar (SODIS); y la combinación de ambos (SODIS+ H_2O_2 , 1 mg L^{-1}). Además, una muestra de agua inicial del efluente se almacenó como experimento de control en oscuridad (CO). El procedimiento consistió en llenar cuatro vasos transparentes de un litro con agua proveniente del efluente de una planta de cultivos de la Bahía de Cádiz, sometiéndose a los diferentes mecanismos de desinfección mencionados (además del control oscuridad) durante cuatro horas para garantizar la desinfección en los tres primeros casos, a la vez que se le aplicó una agitación magnética moderada a cada uno (Fig. 1). Se tomaron muestras a los 60, 90, 180 y 240 minutos para evaluar la eliminación de bacterias con el tiempo, y se realizó un análisis de nutrientes previo a la inoculación de microalgas.

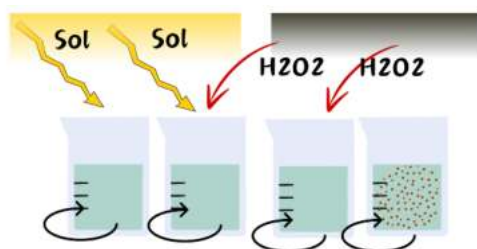


Figura 1. Esquema ilustrativo de los mecanismos de desinfección aplicados y el control oscuridad.

2.2 Análisis microbiológico

Se utilizaron bacterias del género *Vibrio* como indicadoras de la contaminación, midiendo su

concentración mediante filtración por membrana ($0,45 \mu\text{m}$ poro) y siembra en agar TCBS (Agar Tiosulfato Citrato Bilis Sacarosa), medio selectivo para el aislamiento de vibrios. Una vez filtradas las muestras se incubaron en una cámara microbiológica durante 24 horas a 30°C para su posterior recuento. Este análisis se realizó antes y tras el tratamiento de desinfección.

2.3 Análisis de nutrientes

Para determinar los nutrientes del agua, se realizó el análisis de nitrógeno (NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^-) y de fósforo (PO_4^{3-}) mediante kits de determinación fotométrica (Sigma-Aldrich) (espectrofotómetro genesys 10S UV-VIS Thermo scientific) con los procedimientos análogos a EPA 350.1, APHA 4500- NH_3 F; EPA 354.1, APHA 4500- NO_2^- B; EPA 365.2, APHA 4500-P E. Este análisis se realizó antes de inocular las aguas con microalgas y una vez acabado el tratamiento biológico.

2.4 Análisis de peróxido de hidrógeno

La concentración de peróxido de hidrógeno se determinó mediante métodos espectrofotométricos de peróxido de hidrógeno en soluciones acuosas (Masschelein et al., 1977) basado la oxidación de Co (II) a Co (III) en presencia de peróxido de hidrógeno y su posterior determinación fotométrica a 260 nm.

2.5 Cultivo de microalgas

Para el estudio del efecto de la desinfección en el crecimiento de microalgas, se seleccionó como especie de referencia, la microalga *Tetraselmis chuii*. Se inoculó un volumen de 40 ml de las aguas tratadas con 5 mL de microalgas en matraces de 100 ml, por triplicado, para conseguir absorbancia inicial de 0,1 y así registrar la curva de crecimiento a lo largo del tiempo. Además de las aguas obtenidas en los tratamientos de desinfección, se realizó un cultivo de control en agua marina autoclavada y fertilizada con medio F2 (Sigma-Aldrich). El cultivo se realizó en una cámara incubadora con agitación orbital con un fotoperíodo de 12:12h (Fig. 2). El cultivo de microalgas se mantuvo durante un total de 28 días desde su inoculación hasta alcanzar una fase estacionaria. Cada día se realizaba las mediciones de la biomasa tomando los parámetros de densidad óptica (DO) a 680 nm. Además, se determinó el rendimiento cuántico (Qy) por medio de un fluorímetro Aquapen Photo System Instruments).

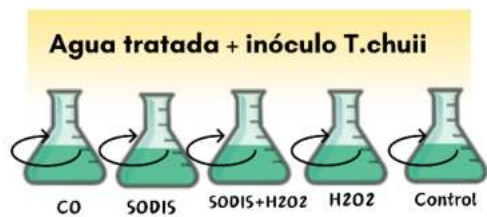


Figura 2. Esquema ilustrativo de los matracos con cada una de las aguas tratadas e inoculadas.

2 RESULTADOS

La figura 3 muestra los resultados de variación de la concentración de bacterias respecto al tiempo para los experimentos de CO, SODIS, H₂O₂ y SODIS+H₂O₂. No se observó inactivación en el CO, manteniéndose la concentración de bacterias sin cambios significativos durante las 4 horas de experimentación. Los experimentos realizados con SODIS y H₂O₂ mostraron una reducción notable en la concentración bacteriana, eliminando las bacterias en un 99,89% y 99,99%. Además, al combinar ambos tratamientos, SODIS y H₂O₂, se observó una inactivación rápida de las bacterias, logrando reducir sus concentraciones a niveles inferiores al límite de detección (Fig. 3). Esto sugiere que existe un efecto sinérgico entre ambos tratamientos, potenciando su eficacia en la eliminación de bacterias.

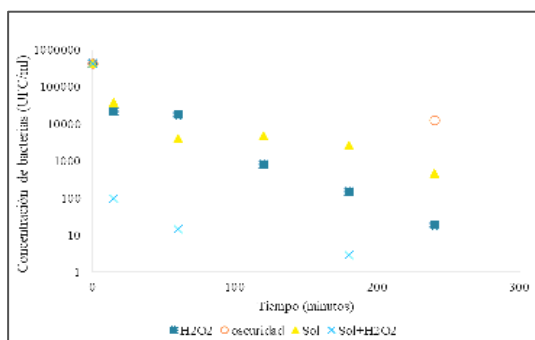


Figura 3. Variación de la concentración de bacterias con el tiempo para cada experimento.

El tratamiento más eficaz para la eliminación de vibrios es la desinfección mediante la combinación de SODIS y H₂O₂. A las tres horas desde el inicio del tratamiento, ya se alcanzaron concentraciones de vibrios por debajo del límite de detección. Tras 6 días después de los tratamientos de desinfección, se volvieron a realizar análisis de bacterias, los resultados mostraron que no hubo reaparición de vibrios en ninguno de los efluentes.

En cuanto al consumo de peróxido, fue del 98% 24 horas después de haber inoculado las aguas tratadas (H₂O₂ final = 0,015 ppm).

La figura 4 muestra los resultados de densidad óptica obtenidos durante el cultivo de microalgas realizados con el agua obtenida en los distintos tratamientos de desinfección. Por otra parte, la figura 5 muestra la

concentración de Nt obtenida antes y después de los cultivos de microalgas en cada experimento.

Se observan las distintas fases de crecimiento para cada experimento, alcanzando un estado estacionario (DO máx. 680 nm = 0.3) tras 23 días de cultivo, registrando una fase de muerte en el experimento realizado con agua del control oscuridad. En todos los ensayos, el Qy fue en torno 0.7, indicando un buen estado de las microalgas.

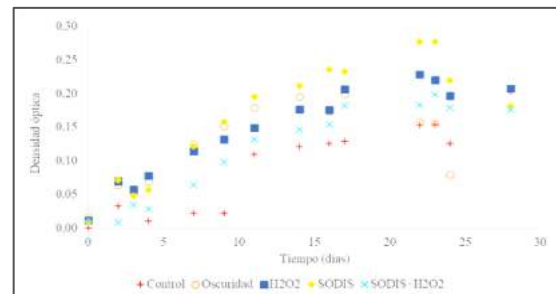


Figura 4. Crecimiento de la biomasa algal en los cultivos con agua proveniente de los diferentes tratamientos de desinfección.

En cuanto al crecimiento de la biomasa algal, la mayor densidad de cultivo se alcanzó en el agua desinfectada mediante SODIS. Además, fue donde se alcanzó una mayor eliminación de nutrientes, logrando eliminar aproximadamente el 96,3% del nitrógeno presente en el agua (Fig. 5).

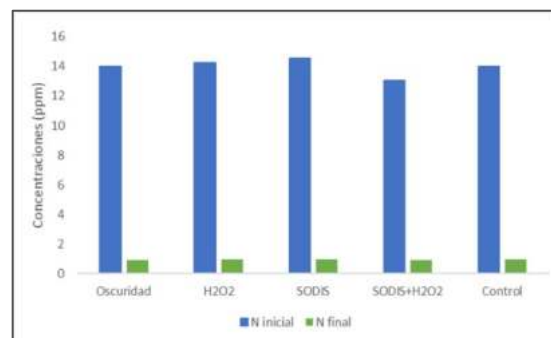


Figura 5. Concentración de nitrógeno total en el agua antes y después del cultivo de microalgas

Al comparar estos datos de los experimentos con el control en oscuridad, podemos afirmar que la aplicación de un pretratamiento de desinfección microbiológica favorece al crecimiento de las microalgas. Los resultados del crecimiento algal están asociados a escala de laboratorio para conseguir las condiciones óptimas de crecimiento.

3 CONCLUSIONES

En el presente proyecto se estudia la eficacia de los tratamientos de desinfección para el posterior cultivo de *Tetraselmis chuii* a escala de laboratorio. Las conclusiones más importantes de este proyecto son las siguientes:

- La combinación de desinfección solar con el cultivo de microalgas representa una opción prometedora para evitar la contaminación de los efluentes de la industria acuícola.

- El tratamiento mediante el cultivo de microalgas genera una biomasa algal aprovechable de alta calidad, la cual puede utilizarse para producir alimento para los peces.
- Realizar un cultivo de microalgas en un agua pretratada con desinfección solar optimizará la obtención de biomasa.

Se pretende realizar el mismo procedimiento, con la diferencia de hacer crecer la biomasa en condiciones más naturales, como aplicación de luz solar natural y otro tipo de agitación o aireación que sustituya la agitación orbital, así como la posibilidad de la aplicación de ambos (agitación mecánica y aireación).

Estos métodos de desinfección junto con el suministro de microalgas contribuye a la obtención de una biomasa algal que promueva un desarrollo sostenible de la acuicultura, minimizando sus impactos ambientales y reciclando tanto agua como nutrientes.

Agradecimientos

Proyecto RECOVER: Recovery and valorisation of waste nutrients from intensive marine aquaculture using microalgae biotechnology (Regional Govern of Andalusia, Spain).

REFERENCIAS

- Badiola, M., Basurko, O. C., Piedrahita, R., Hundley, P., & Mendiola, D. (2018). Energy use in Recirculating Aquaculture Systems (RAS): A review. *Aquacultural Engineering*, 81, 57–70. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2018.03.003>
- Espinosa Plascencia, A., & Bermúdez Almada, M. del C. (2012). La acuicultura y su impacto al medio ambiente. *Estudios Sociales. Revista de Alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional*, 2, 221–232. [Redalyc. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=41724972010](https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=41724972010)
- Estrada, M. D. L. L., Flores, P., Caltzontzin Rabell, V., & Zarazua, G. (2023). Tecnologías para optimizar el agua en la acuicultura.
- Figueredo-Fernández, M., Gutiérrez-Alfaro, S., Acevedo-Merino, A., & Manzano, M. A. (2017). Estimating lethal dose of solar radiation for enterococcus inactivation through radiation reaching the water layer. Application to Solar Water Disinfection (SODIS). *Solar Energy*, 158, 303–310. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.09.006>
- Guimarães, J. R., Ibáñez, J., Litter, M. I., & Pizarro, R. (2001). Desinfección de agua. Eliminación de Contaminantes Por Fotocatálisis Heterogénea, 1, 375–388.

Han, P., Lu, Q., Fan, L., & Zhou, W. (2019). A Review on the Use of Microalgae for Sustainable Aquaculture. *Applied Sciences*, 9(11). <https://doi.org/10.3390/app9112377>

Masschelein, W., Denis, M., Ledent, R., 1977. Spectrophotometric determination of residual hydrogen peroxide. *Water Sewage Works* 124, 69–72.

Labas, M. D., Zalazar, C. S., Brandi, R. J., & Cassano, A. E. (2008). Reaction kinetics of bacteria disinfection employing hydrogen peroxide. *Biochemical Engineering Journal*, 38(1), 78–87. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2007.06.008>

Rabassó, M. (2006). Los impactos ambientales de la acuicultura, causas y efectos. *Vector plus: Miscelánea Científico - Cultural*, ISSN 1134-5306, No. 28, 2006, Pags. 89-98.

Villar-Navarro, E., Levchuk, I., Rueda-Márquez, J. J., & Manzano, M. (2019). Combination of solar disinfection (SODIS) with H₂O₂ for enhanced disinfection of marine aquaculture effluents. *Solar Energy*, 177, 144–154. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.11.018>

Sistemas de monitorización de playas: creación de una base de datos multimodal de la costa de Cádiz

J. Montes (1), L. del Río (1), T. Plomaritis (2), M. Puig (3), M. Aranda (4), L. Talavera (5), T. Oo Mon (2), C. Montes (1), P. Zarandona (1) y J. Benavente (1)

(1) Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales, Instituto Universitario de Investigación Marina (INMAR), Universidad de Cádiz, 11510 Puerto Real, Cádiz, España. juan.montes@uca.es

(2) Departamento de Física Aplicada, Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales, Instituto Universitario de Investigación Marina (INMAR), Universidad de Cádiz, 11510 Puerto Real, Cádiz, España.

(3) TECNALIA, Basque Research and Technology Alliance (BRTA), Astondo Bidea, Edificio 700, 48160 Derio, Bizkaia, España.

(4) TRAGSATEC, Madrid, España.

(5) Departamento de biología, Geología, Física y Química Inorgánica, ESCET, Universidad Rey Juan Carlos, Tulipán St., 28933 Móstoles, Madrid, España.

Resumen: Las playas arenosas, uno de los ambientes costeros de mayor relevancia socioeconómica y ambiental para el ser humano, presentan una tendencia global erosiva. A principios de la década de los 2000, el grupo de Geomorfología Litoral de la Universidad de Cádiz implementó un programa de monitorización de diversas playas ubicadas en los entornos de las bahías de Cádiz y Algeciras, continuado hasta la actualidad. Para la obtención de la extensa base de datos existente actualmente se han empleado diferentes metodologías: levantamiento de perfiles de playa con RTK-DGPS, campañas topográficas con UAV, seguimiento de la línea de costa con sistemas de vídeo-monitorización, estaciones CoastSnap y batimetrías. Adicionalmente, se han incorporado datos de bases de datos públicas. Esta amplia base de datos ha permitido evaluar las variaciones de la línea de costa, así como los cambios volumétricos y de pendientes en las playas monitorizadas a lo largo de las últimas décadas.

Palabras clave: ciencia ciudadana, monitorización costera, playas, sistema de vídeo-monitorización, UAV.

1. INTRODUCCIÓN

Las playas arenosas, uno de los ambientes costeros de mayor relevancia socioeconómica y ambiental para el ser humano, presentan una tendencia global erosiva. Entre las principales causas destacan la urbanización del litoral, la construcción de defensas costeras y la disminución del aporte sedimentario procedente de los ríos (Syvitski et al., 2022), factores que han aumentado la vulnerabilidad de estas zonas en las últimas décadas. Las inundaciones costeras también son objeto de preocupación, ya que tienen la capacidad de generar grandes daños económicos y sobre la población (Harley, 2017). Estimar los impactos que estos procesos pueden ocasionar se ha convertido en algo necesario en los últimos años. Además, en el contexto actual de cambio climático, la subida del nivel del mar representa una amenaza para las zonas costeras, ya que además de acelerar las tasas de retroceso costero (Vousdoukas et al., 2020), puede sumergir permanentemente algunas zonas, favorecer la intrusión salina en aguas superficiales y subterráneas y afectar a los ecosistemas costeros (van de Wal et al., 2023).

Por ello, la monitorización de las playas arenosas, que sufren cambios constantes y en las que se dan

procesos a distintas escalas espacio-temporales, es un aspecto clave para entender su evolución. Esta monitorización se ha llevado a cabo normalmente con técnicas costosas y que requerían grandes esfuerzos de campo, por lo que es difícil encontrar bases de datos con una buena cobertura espacial y temporal, y estas se limitan a zonas muy específicas (Vitousek et al., 2023).

El presente trabajo tiene como objetivo presentar la base de datos generada por el grupo de Geomorfología Litoral de la Universidad de Cádiz sobre la evolución de diferentes playas ubicadas en los entornos de las bahías de Cádiz y Algeciras. El programa de monitorización se implementó a principios de la década de los 2000, y ha continuado hasta la actualidad a través de la financiación de múltiples proyectos europeos, nacionales y regionales, y del esfuerzo de un gran número de investigadores. La monitorización de las playas se ha realizado mediante diferentes metodologías, como levantamiento de perfiles de playa con RTK-DGPS, campañas topográficas con UAV (drones), uso de sistemas de vídeo-monitorización costera y programas de ciencia ciudadana como CoastSnap para el seguimiento de la línea de costa, análisis de granulometrías y campañas batimétricas. Asimismo, se han incorporado datos de bases de datos públicas,

como series temporales de oleaje o marea, ortofotografías aéreas, y vuelos LiDAR puntuales de áreas específicas. De forma complementaria, se han aplicado algoritmos de extracción automática de la línea de costa a partir de imágenes de satélite para monitorizar algunos tramos costeros en los últimos años.

Esta amplia base de datos ha permitido evaluar las variaciones de la línea de costa, así como los cambios volumétricos y de pendientes en las playas monitorizadas a lo largo de las últimas décadas. Además, los datos han sido empleados para realizar simulaciones numéricas de eventos extremos, con el objetivo de analizar procesos de erosión e inundación y los impactos asociados en la costa de la provincia de Cádiz.

2. ZONA DE ESTUDIO

La costa de la provincia de Cádiz, situada al sur de la Península Ibérica, tiene una extensión aproximada de 230 km repartidos entre el Océano Atlántico y el Mar Mediterráneo (Fig. 1). Las dos fachadas, atlántica y mediterránea, separadas por el Estrecho de Gibraltar, tienen diferentes orientaciones, distintas características geomorfológicas e hidrodinámicas y diferente exposición a eventos de alta energía (Del Río et al., 2018). Destaca la presencia de dos grandes

bahías, la Bahía de Cádiz en la parte atlántica y la Bahía de Algeciras en la parte mediterránea. La plataforma continental tiene entre 30 y 40 km de anchura en la fachada atlántica, disminuyendo en anchura desde el Cabo de Trafalgar hasta ser prácticamente inexistente en el Estrecho de Gibraltar y la fachada mediterránea.

En cuanto a las condiciones hidrodinámicas, el rango mareal varía considerablemente a lo largo de la provincia de Cádiz. La zona norte de la fachada atlántica es mesomareal, hasta el Cabo de Trafalgar donde se produce una disminución brusca del rango mareal, siendo micromareal la Bahía de Algeciras y la fachada mediterránea. El oleaje en la parte atlántica está condicionado por los vientos del oeste (poniente), con alturas medias inferiores a 1 m en condiciones de buen tiempo y superiores a 3 m durante eventos de alta energía (Del Río et al., 2012; Rangel-Buitrago y Anfuso, 2011). En la parte mediterránea, el oleaje está relacionado con los vientos del este (levante), con alturas medias inferiores a 0,75 m y que pueden superar los 5 m durante los temporales (Montes, 2021).

La corriente de deriva litoral tiene principalmente dirección sureste en la parte atlántica, mientras que en la parte mediterránea tiene dirección suroeste.



Fig. 1. Distribución de las playas monitorizadas, indicadas con los puntos naranjas.

3. METODOLOGÍA

Para la monitorización de las playas que componen la base de datos del grupo de Geomorfología Litoral se han empleado diferentes metodologías, adaptadas a las necesidades de monitorización y características de las playas, de las que se describen a continuación las más destacadas.

La evolución a medio plazo se ha analizado mediante un estudio de fotografías aéreas y ortofotos de los últimos 70 años en toda la costa de la provincia (Del

Río, 2007; Montes, 2021). Las variaciones costeras se han cuantificado mediante la herramienta DSAS (Digital Shoreline Analysis System) (Thieler et al., 2009) usando como indicadores tanto la marca de agua como el pie de duna.

Diferentes playas han sido monitorizadas de forma específica mediante un RTK-DGPS a través de la realización de perfiles perpendiculares a la costa y espaciados de forma homogénea (Gracia et al., 2005). Las campañas se han realizado, por lo general, con periodicidad quincenal o mensual y en condiciones de

bajamar viva. Los perfiles cubren desde el límite superior de la playa hasta aproximadamente el 0 hidrográfico.

La playa de La Victoria, en Cádiz, ha sido monitorizada también a través de un sistema de video-monitorización costera (Montes et al., 2023). Este sistema, situado en la azotea de un edificio a 49 m de altura y compuesto por tres cámaras de video-vigilancia, obtiene imágenes horarias desde septiembre de 2013 y cubre unos 750 m de playa longitudinalmente. A partir de este sistema se obtiene la línea de costa de forma automática.

Las playas Santa María del Mar y Faro de Trafalgar han sido seguidas a través del sistema CoastSnap (González-Villanueva et al., 2023), basado en ciencia ciudadana e implementado en diferentes países repartidos por todo el mundo. CoastSnap permite a cualquier persona enviar fotos de la playa desde una estación fija, que posteriormente son procesadas y en las que se obtiene la línea de costa.

En otras playas de la provincia, como en Camposoto (San Fernando), se ha complementado el seguimiento RTK-DGPS con vuelos fotogramétricos UAV para analizar los cambios producidos por los temporales (Talavera et al., 2018).

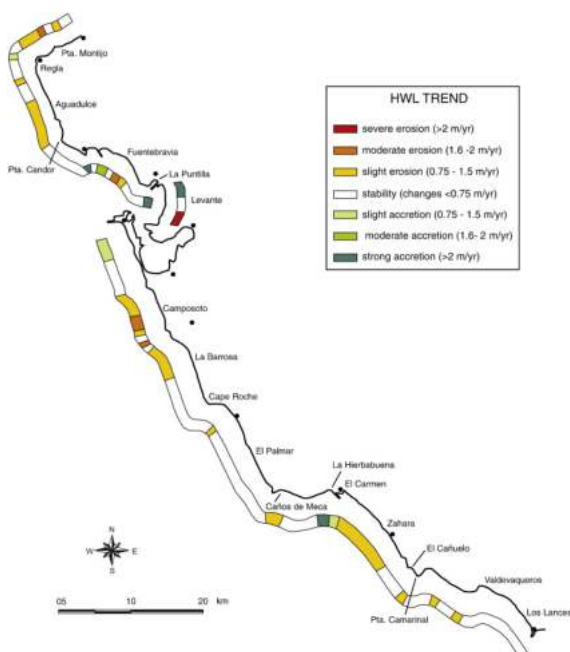


Fig. 2. Evolución de las playas de la fachada atlántica de la provincia de Cádiz obtenida a partir del análisis de fotografías aéreas y ortofotos (Del Río et al., 2013).

Por último, recientemente se está comenzando a implementar un seguimiento de algunas playas basado en imágenes de satélite. Para ello se utilizan algoritmos capaces de extraer de forma automática la línea de costa (Cabezas-Rabadán et al., 2024).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El seguimiento de las diferentes playas a lo largo de la costa de Cádiz ha permitido mejorar el conocimiento sobre la evolución de estos sistemas y los procesos que se dan en ellas. Los resultados de la monitorización muestran cómo los cambios en la costa de la provincia presentan una gran variabilidad espacial y temporal (Fig. 2). Además, ha permitido identificar la relación entre las tasas de retroceso costero y la ocurrencia de tormentas, principalmente en las zonas más expuestas, así como la relación con factores antrópicos (Puig et al., 2016).

A su vez, los datos han permitido determinar cómo las tormentas están influenciadas por patrones de circulación atmosférica a gran escala, como la NAO o la EA. Además, se ha observado como el efecto conjunto con la marea meteorológica puede aumentar la vulnerabilidad de las zonas costeras a los procesos de erosión e inundación (Plomaritis et al., 2015).

A corto plazo, la monitorización ha permitido relacionar procesos y analizar cambios espacio-temporales en tramos costeros estudiados (Montes et al., 2023). También ha permitido analizar el impacto generado por grandes temporales, como el caso de Emma en Camposoto, en el que se observaron grandes cambios debidos a procesos de *overwash*, erosión y generación de escarpes en las dunas (Fig. 3) (Talavera et al., 2020).

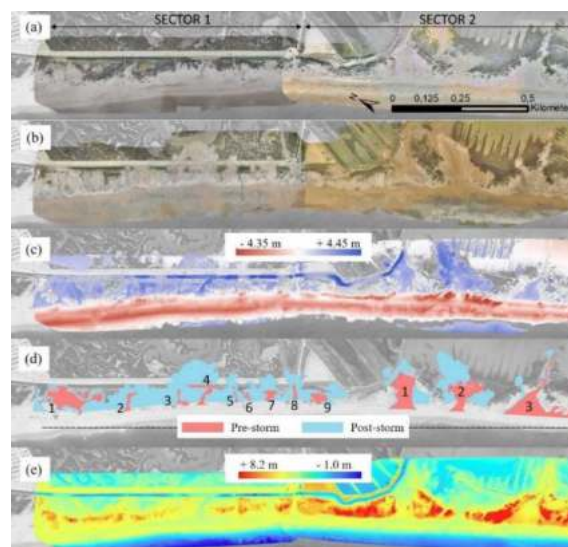


Fig. 3. Efectos de la tormenta Emma (feb-mar 2018) en la playa de Camposoto a partir de datos obtenidos mediante UAVs (Talavera et al., 2020).

5. CONCLUSIONES

La creación y mantenimiento de la presente base de datos ha permitido conocer tanto el estado de salud como la evolución de las playas de la provincia de Cádiz ante distintas amenazas, entre las que destacan las relacionadas con el cambio climático y la subida del nivel del mar asociada. Esto ha permitido la colaboración del grupo de Geomorfología Litoral con diversos organismos, como ayuntamientos,

Consejerías de la Junta de Andalucía o la Diputación de Cádiz, en proyectos destinados a la gestión de espacios costeros y en la realización de planes de adaptación ante el reto del cambio climático.

Agradecimientos

Este trabajo es una contribución al grupo RNM-328 del Plan Andaluz de Investigación (PAI) y a diferentes proyectos regionales, nacionales y europeos.

REFERENCIAS

- Cabezas-Rabadán, C., Almonacid-Caballer, J., Benavente, J., Castelle, B., Río, L. Del, Montes, J., Palomar-Vázquez, J., y Pardo-Pascual, J. E. (2024). Assessing Satellite-Derived Shoreline Detection on a Mesotidal Dissipative Beach. *Remote Sensing 2024, Vol. 16, Page 617, 16(4)*, 617. <https://doi.org/10.3390/RS16040617>
- Del Río, L. (2007). *Riesgos de erosión costera en el litoral atlántico gaditano* [PhD thesis]. PhD Thesis, University of Cadiz.
- Del Río, L., Benavente, J., Gracia, F. J., Anfuso, G., Aranda, M., Montes, J., Puig, M., Talavera, L., y Plomaritis, T. A. (2018). Beaches of Cadiz. In J. A. Morales (Ed.), *The Spanish Coastal Systems: Dynamic Processes, Sediments and Management* (pp. 311–334). Springer. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-319-93169-2_14
- Del Río, L., Gracia, F. J., y Benavente, J. (2013). Shoreline change patterns in sandy coasts. A case study in SW Spain. *Geomorphology, 196*, 252–266. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.07.027>
- Del Río, L., Plomaritis, T. A., Benavente, J., Valladares, M., y Ribera, P. (2012). Establishing storm thresholds for the Spanish Gulf of Cádiz coast. *Geomorphology, 143–144*, 13–23. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.04.048>
- González-Villanueva, R., Soriano-González, J., Alejo, I., Criado-Sudau, F., Plomaritis, T., Fernández-Mora, À., Benavente, J., Río, L. Del, Ángel Nombela, M., y Sánchez-García, E. (2023). SCShores: a comprehensive shoreline dataset of Spanish sandy beaches from a citizen-science monitoring programme. *Earth Syst. Sci. Data, 15*, 4613–4629. <https://doi.org/10.5194/essd-15-4613-2023>
- Gracia, F. J., Anfuso, G., Benavente, J., Del Río, L., Domínguez, L., y Martínez, J. A. (2005). Monitoring coastal erosion at different temporal scales on sandy beaches: Application to the Spanish Gulf of Cadiz coast. *Journal of Coastal Research, SI 49*, 22–27.
- Harley, M. D. (2017). Coastal Storm Definition. In P. Ciavola y G. Coco (Eds.), *Coastal Storms: Processes and Impacts* (Issue April 2017, pp. 1–21). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781118937099.ch1>
- Montes, J. (2021). *Vulnerabilidad costera ante los procesos de erosión e inundación en el marco del cambio climático en la Bahía de Cádiz y Bahía de Algeciras*. Universidad de Cádiz.
- Montes, J., del Río, L., Plomaritis, T. A., Benavente, J., Puig, M., y Simarro, G. (2023). Video-Monitoring Tools for Assessing Beach Morphodynamics in Tidal Beaches. *Remote Sensing 2023, Vol. 15, Page 2650, 15(10)*, 2650. <https://doi.org/10.3390/RS15102650>
- Plomaritis, T. A., Benavente, J., Laiz, I., y Del Río, L. (2015). Variability in storm climate along the Gulf of Cadiz : the role of large scale atmospheric forcing and implications to coastal hazards. *Climate Dynamics, 45*, 2499–2514. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2486-4>
- Puig, M., Del Río, L., Plomaritis, T. A., y Benavente, J. (2016). Contribution of storms to shoreline changes in mesotidal dissipative beaches: Case study in the Gulf of Cádiz (SW Spain). *Natural Hazards and Earth System Sciences, 16(12)*, 2543–2557. <https://doi.org/10.5194/nhess-16-2543-2016>
- Rangel-Buitrago, N., y Anfuso, G. (2011). Coastal storm characterization and morphological impacts on sandy coasts. *Earth Surface Processes and Landforms, 36(15)*, 1997–2010. <https://doi.org/10.1002/esp.2221>
- van de Wal, R., Melet, A., Bellafiore, B., Voudoukas, M., Camus, P., Ferrarin, C., Essink, G.O., Haigh, I.D., Lionello, P., Luijendijk, A., Toimil, A., y Staneva, J. (2023). Sea Level Rise in Europe: impacts and consequences. *State of the Planet*. <https://doi.org/10.5194/sp-2023-38>
- Syvitski, J., Ángel, J. R., Saito, Y., Overeem, I., Vörösmarty, C. J., Wang, H., y Olago, D. (2022). Earth's sediment cycle during the Anthropocene. *Nature Reviews Earth & Environment 2022 3:3*, 3(3), 179–196. <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00253-w>
- Talavera, L., Del Río, L., y Benavente, J. (2020). UAS-based High-resolution Record of the Response of a SeminatURAL Sandy Spit to a Severe Storm. *Journal of Coastal Research, 95(sp1)*, 679–683. <https://doi.org/10.2112/SI95-132.1>
- Talavera, L., Del Río, L., Benavente, J., Barbero, L., y López-Ramírez, J. A. (2018). UAS as tools for rapid detection of storm-induced morphodynamic changes at Camposoto beach, SW Spain. *International Journal of Remote Sensing, 39(15–16)*, 5550–5567. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1471549>
- Thieler, E. R., Himmelstoss, E. A., Zichichi, J. L., y Ergul, A. (2009). Digital Shoreline Analysis System (DSAS) Version 4.0 – An ArcGIS Extension for Calculating Shoreline Change. In *U.S. Geological Survey Open-File Report, 2008– 1278*.
- Vitousek, S., Buscombe, D., Vos, K., Barnard, P. L., Ritchie, A. C., y Warrick, J. A. (2023). The future of coastal monitoring through satellite remote sensing. *Cambridge Prisms: Coastal Futures, 1*, e10. <https://doi.org/10.1017/CFT.2022.4>
- Voudoukas, M. I., Ranasinghe, R., Mentaschi, L., Plomaritis, T. A., Athanasiou, P., Luijendijk, A., y Feyen, L. (2020). Sandy coastlines under threat of erosion. *Nature Climate Change, 10(3)*, 260–263. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0697-0>

Eficacia del tratamiento UV-C mediante LEDs como tecnología para la gestión de las aguas de lastre: efecto de diferentes configuraciones de intensidad, tiempos de exposición y longitud de onda en la inactivación de organismos fitoplanctónicos

P. Payán-Montes, J. Moreno-Andrés, E. Nebot y L. Romero-Martínez

Universidad de Cádiz (UCA). Instituto Universitario de Investigación Marina (INMAR) Departamento de Tecnologías del Medio Ambiente. Puerto Real (Cádiz). e-mail: paula.payanmontes@uca.es

Resumen: El tratamiento con luz ultravioleta en el rango C (UV-C) es empleado con frecuencia como sistema de tratamiento de aguas de lastre. En los últimos años ha habido un importante desarrollo de los diodos emisores de luz (LEDs) con emisión en este rango. El objetivo de este estudio es determinar la eficacia en la inactivación de la microalga *Tetraselmis suecica* de un tratamiento UV-LED aplicado mediante diferentes combinaciones de intensidades UV y tiempos de exposición, a diferentes longitudes de onda. Los resultados muestran una mayor inactivación del tratamiento a 265 nm y a intensidades UV más elevadas. Sin embargo, *T. suecica* muestra una elevada resistencia al tratamiento UV y dosis de 200 mJ cm⁻² no fueron suficientes para inactivar el 99% de los organismos, requiriéndose dosis mayores para una inactivación efectiva.

Palabras clave: aguas de lastre, inactivación ultravioleta, intensidad UV, LED, microalgas.

1. INTRODUCCIÓN

Las aguas de lastre son empleadas para mejorar la estabilidad y maniobrabilidad de los buques. Estas aguas son frecuentemente descargadas en áreas geográficas alejadas de su origen. Dado que las aguas de lastre contienen organismos de la zona de origen, su descarga supone un problema de dispersión de especies fuera de su rango natural. Las especies descargadas pueden proliferar y convertirse en especies invasoras en las áreas receptoras, lo cual supone un importante problema medioambiental, con impactos sobre los ecosistemas y la economía.

Para mitigar futuros impactos debido a la dispersión de especies en las aguas de lastre, la Organización Marítima Internacional (IMO) adoptó en 2004 el Convenio Internacional sobre Aguas de Lastre (BWC). El BWC establece una serie de estándares en cuanto a la concentración de organismos viables que pueden ser descargados durante el deslastre. En particular, los organismos entre 10 y 50 µm, principalmente fitoplancton, están limitados a menos de 10 individuos viables por mL. Según el BWC, los buques deberán estar equipados a partir de octubre de 2024 con un sistema de tratamiento de aguas de lastre (BWTs) que cumpla con los estándares establecidos.

Las tecnologías empleadas con mayor frecuencia en los BWTs son la electrocloración y la irradiación con luz UV. Dado que la electrocloración puede suponer un problema de toxicidad al descargar una cierta cantidad de cloro al medio marino, así como la generación de diversos subproductos de la desinfección (DBPs), la irradiación con luz UV parece una alternativa más sostenible para cumplir con los objetivos del BWC.

Las fuentes tradicionales de luz UV han sido las lámparas de vapor de mercurio. Sin embargo, en los años recientes ha tenido lugar un importante desarrollo de los diodos emisores de luz (LEDs) en el rango germicida UV-C. Estos dispositivos presentan una serie de ventajas como la ausencia de mercurio en su composición, ausencia de tiempo de calentamiento, mayor durabilidad y la disponibilidad de un abanico más amplio de longitudes de onda de emisión. Sin embargo, la tecnología UV-LED está limitada a su uso experimental en laboratorio y se necesita mejorar la eficiencia de los LEDs y una cuantificación detallada de su eficacia en la inactivación de organismos para su aplicación a gran escala.

Para determinar la eficacia del tratamiento UV se necesita conocer con precisión la dosis UV aplicada y la respuesta de los organismos. La dosis UV se define como el producto de la intensidad media (I_m) por el tiempo de exposición (USEPA, 2006). La I_m depende de la potencia de la lámpara UV, las características morfométricas del reactor y la transmitancia del agua a tratar. Los dispositivos a escala de laboratorio como los reactores de rayo colimado (CBRs), con un funcionamiento por lotes, permiten un cálculo preciso de la I_m y del tiempo de exposición (Bolton et al., 2015). Sin embargo, los BWTs basados en la irradiación UV son reactores de flujo continuo (FTRs), los cuales presentan una mayor complejidad en el cálculo de estos parámetros. Además, los CBRs se caracterizan por aplicar una I_m baja, al contrario que los FTRs. Por ello, para conseguir una misma dosis UV, los tiempos de exposición requeridos son más largos en el caso de

los CBRs. Normalmente se emplea la dosis UV como parámetro que define la desinfección, asumiendo una completa reciprocidad intensidad - tiempo. No obstante, las interacciones entre la luz UV y los componentes celulares son complejas, y la irradiación a diferentes longitudes de onda no afecta a todas las estructuras por igual (Beck et al., 2017). Por ello, una misma dosis UV puede tener diferentes efectos al ser aplicada a través de una I_m baja y un tiempo de exposición alto o viceversa (Pousty et al., 2021). Esta falta de reciprocidad intensidad - tiempo puede limitar la fiabilidad de los estudios con reactores a pequeña escala como aproximación a la eficacia de reactores a escala real.

El objetivo de este estudio es evaluar eficacia del tratamiento UV sobre la microalga *Tetraselmis suecica*, empleando diferentes combinaciones de intensidad y tiempo de exposición para aplicar las dosis UV, y utilizando diferentes longitudes de onda.

2. DESARROLLO

El organismo objetivo fue la clorofícea *T. suecica*; debido a su resistencia relativamente alta a la irradiación con luz UV, esta especie se emplea ampliamente como organismo indicador de la eficacia de tratamiento de aguas de lastre (Sun and Blatchley III, 2017).

Previamente a la irradiación, se prepararon 2 L de cultivo de *T. suecica* a baja concentración, empleando agua marina artificial enriquecida con 1 mL por L de medio f/2 (Guillard and Ryther, 1962). El cultivo se incubó en una cámara de cultivos a 20°C y luz continua durante 4 días, con el objetivo de que los organismos estén en fase de crecimiento exponencial el día de la irradiación con luz UV.

La irradiación UV se aplicó mediante dos CBRs (APRIA Systems, S.L.; España) con emisión a 265 y 275 nm. Previamente al tratamiento se realizó una caracterización de la I_m en ambos reactores en función de la distancia entre el dispositivo LED y la muestra a tratar. La I_m se determinó en base al protocolo de Bolton (2015), en función de la irradiancia medida con un radiómetro UV-B-C HD 2102.1 (Delta OHM, Italia) en el centro de la superficie de la muestra, la morfometría del reactor y la transmitancia del agua a tratar, determinada en el momento del tratamiento. Los valores de I_m determinados fueron 0.728 ± 0.012 mW cm⁻² para una distancia de 10 cm, 0.406 ± 0.017 mW cm⁻² a 15 cm, y 0.224 ± 0.004 mW cm⁻² a 20 cm. En función de la I_m en cada caso, se calcularon los tiempos de exposición necesarios para la aplicación de dosis UV de 50, 100, 150 y 200 mJ cm⁻².

Se tomaron alícuotas de 60 mL del cultivo de *T. suecica* en fase de crecimiento exponencial en placas Petri de 5.3 cm de diámetro y 3 cm de altura. Las diferentes muestras se trataron durante los tiempos de exposición necesarios para aplicar las dosis correspondientes. El procedimiento se repitió tres

veces en cada uno de los dos reactores. Se obtuvieron, por tanto, una serie de muestras sometidas a diferentes dosis UV aplicadas mediante la combinación de diferentes intensidades y tiempos de exposición, a longitudes de onda de 265 y 275 nm, así como los respectivos controles sin irradiar.

Las muestras se trasvasaron a matraces Erlenmeyer de 50 mL e incubadas durante 14 días en las mismas condiciones descritas en el pretratamiento. A lo largo de la incubación, se tomaron medidas periódicas de fluorescencia con un fluorímetro AQUAPEN (Photon Systems Instruments; República Checa), como aproximación a la concentración celular.

Las curvas de crecimiento se obtuvieron a partir de los datos de fluorescencia respecto al tiempo de incubación. Estas curvas fueron modelizadas de acuerdo al modelo logístico de Verhulst (Peleg et al., 2007; Verhulst, 1838), para determinar la concentración de organismos viables al inicio de la incubación (N_{v0}), tras la aplicación del tratamiento UV. La supervivencia (S) al tratamiento se determinó como el cociente entre la N_{v0} de cada una de las muestras irradiadas respecto al control sin tratar.

Las curvas de inactivación se determinaron a partir de los valores de Log (S) respecto a la dosis UV aplicada en cada caso. Las curvas de inactivación fueron sometidas a un ANCOVA, empleando Log (S) como variable dependiente, la dosis UV como covariable, y el experimento, la longitud de onda y la I_m como factores, con el objetivo de determinar si existen diferencias significativas entre ellos. Asimismo, las curvas de inactivación fueron modelizadas de acuerdo a una regresión lineal para determinar la dosis necesaria para inactivar el 90% de los organismos, en cada caso.

3. RESULTADOS

Las curvas de crecimiento representadas en escala logarítmica (Fig. 1) en las muestras sin tratar presentaron un crecimiento exponencial desde el inicio de la incubación, volviéndose asintótico a medida que crecía la concentración celular. Por su parte, las muestras irradiadas presentaron curvas de crecimiento prácticamente paralelas al control, tras una fase de estancamiento de duración dependiente de la dosis UV aplicada.

Las características del crecimiento permiten el ajuste de un modelo logístico de Verhulst a los datos experimentales. La aplicación de este modelo para determinar la inactivación causada por el tratamiento UV ya ha sido explicada y utilizada en anteriores estudios (Romero-Martínez et al., 2020, 2016). Se asume que la irradiación con luz UV divide la población total de organismos en una fracción viable (capaz de reproducirse) y una fracción no viable (pierden su capacidad de reproducción). La fracción viable presenta un crecimiento según el modelo

logístico desde el inicio de la incubación, tal como se observa en los controles no irradiados. Sin embargo, en las muestras irradiadas, la presencia de organismos no viables, aunque con capacidad fotosintética, enmascara el crecimiento de la fracción viable durante los primeros días de incubación. El crecimiento de la fracción viable se hace visible cuando alcanzan una concentración superior a la fracción no viable, lo cual puede ser visualizado como un crecimiento logístico en las curvas de crecimiento. Para cada experimento, la tasa de crecimiento se determinó mediante la modelización del control, obteniéndose valores de 0.612, 0.729 y 0.495 d⁻¹ respectivamente; dado que las curvas para un mismo experimento eran prácticamente paralelas, se pudo asumir que la tasa de crecimiento era similar. De este modo, empleando la tasa de crecimiento calculada en el control, se obtuvieron los valores de concentración de organismos viables al inicio de la incubación (N_{v0}) en cada una de las muestras tratadas, permitiendo el cálculo de la supervivencia tras el tratamiento (S).

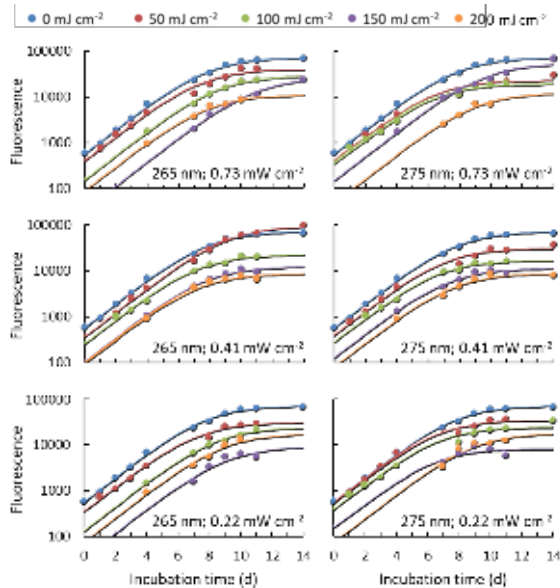


Fig. 1. Curvas de crecimiento obtenidas en uno de los experimentos, tras la aplicación de diferentes dosis UV al cultivo de *Tetraselmis suecica* empleando diferentes combinaciones de intensidad y tiempo de exposición y varias longitudes de onda. Se representa la sección de cada curva que presenta un crecimiento de acuerdo al modelo logístico de Verlhust, tras una primera sección sin crecimiento en función de la dosis UV aplicada. Las líneas representan el modelo logístico ajustado a los datos experimentales.

El ANCOVA aplicado a los datos de $\text{Log}(S)$ calculados indicó la ausencia de diferencias significativas entre experimentos ($p = 0.236$) (Fig. 2-a), pero sí determinó diferencias significativas entre las longitudes de onda ($p < 0.001$) y entre las intensidades de tratamiento ($p = 0.003$). De forma general, la eficacia del tratamiento a 265 nm fue superior en relación al tratamiento a 275 nm (Fig. 2-b). Asimismo, la eficacia fue superior cuando se aplicó una intensidad más alta y tiempos de exposición más bajos para alcanzar la misma dosis UV (Fig. 2-c).

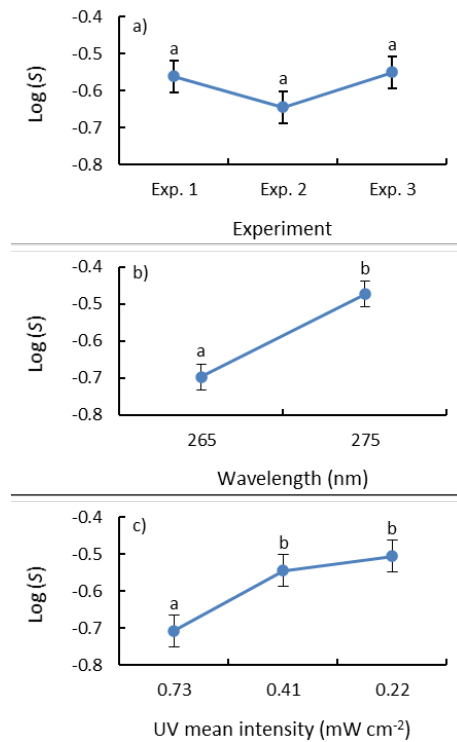


Fig. 2. Resultados del ANCOVA para determinar si existen diferencias significativas entre experimentos, longitudes de onda e intensidad UV de tratamiento. Las letras a y b sobre los puntos indican los grupos homogéneos determinados en cada caso.

Las curvas de inactivación se obtuvieron al representar los valores de $\text{Log}(S)$ respecto a la dosis UV aplicada (Fig. 3). Las curvas pudieron modelizarse mediante una regresión lineal. Dado que los valores de origen no fueron significativos en ningún caso, la regresión lineal se aplicó determinando únicamente la pendiente como parámetro.

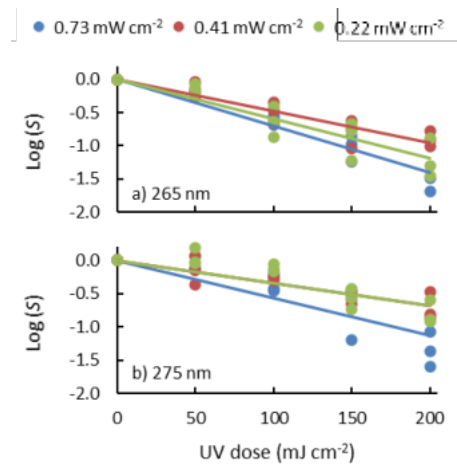


Fig. 3. Curvas de inactivación obtenidas para las diferentes longitudes de onda y las diferentes combinaciones de intensidad y tiempos de exposición.

A partir de las pendientes obtenidas en la regresión lineal de las curvas de inactivación, se calcularon los valores de D_1 , como las dosis UV necesarias para reducir la concentración de organismos viables en un orden de magnitud, es decir, para inactivar el 90% de

los organismos (Fig. 4). En todos los casos, los valores de D_1 fueron mayores cuando se aplicó el tratamiento a 275 nm, indicando una menor eficacia a esta longitud de onda.

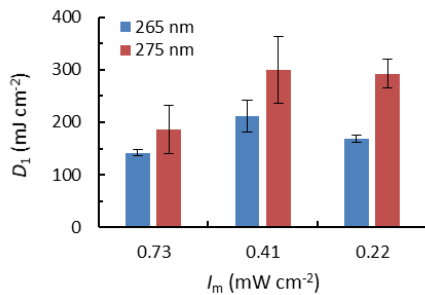


Fig. 4. Dosis necesarias para alcanzar una inactivación del 90% de los organismos para varias configuraciones de intensidad UV y longitud de onda.

Las directrices para el procedimiento de aprobación de los BWTs especifican una concentración mínima de 10^3 organismos por mL en el agua a tratar, y recomendada de 10^4 organismos por mL (IMO, 2018). Por ello, se necesitaría una reducción de, al menos, dos órdenes de magnitud (un 99% de los organismos) para cumplir los requisitos del BWC. Por ello, se necesita la aplicación de dosis UV superiores a 200 mJ cm^{-2} , preferiblemente mediante el aumento de la intensidad UV de los reactores.

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos muestran que una misma dosis UV puede tener un efecto diferente según se aplique mediante una intensidad alta y un tiempo de exposición bajo o viceversa, siendo más favorable al tratamiento la aplicación de una intensidad alta y a una longitud de onda más baja. Aun así, la eliminación efectiva de organismos fitoplanctónicos como *T. suecica*, caracterizada por una elevada resistencia a la luz UV, requiere dosis superiores a las empleadas en este estudio.

Agradecimientos

Proyecto LASTRELED (Ref. PR2023-015) financiado por el “Plan Propio de Investigación de la Universidad de Cádiz”. Proyecto ECOTRANSEAS (Ref.: TED2021-130994B-C31) financiado por el MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y European Union NextGenerationEU/PRTR. El autor L. Romero-Martínez está contratado en el marco del Programa Qualifica 2021 (Ref: QUAL21_019_UCA) financiado por el “Plan Andaluz de Investigación, Desarrollo e Innovación (PAIDI 2020)”.

REFERENCIAS

Beck, S.E., Ryu, H., Boczek, L.A., Cashdollar, J.L., Jeanis, K.M., Rosenblum, J.S., Lawal, O.R. and

Linden, K.G., 2017. Evaluating UV-C LED disinfection performance and investigating potential dual-wavelength synergy. *Water Research*, [online] 109, pp.207–216.

Bolton, J.R., Beck, S.E. and Linden, K.G., 2015. Protocol for the determination of fluence (UV dose) using a low-pressure or low-pressure high-output UV lamp in benchscale collimated beam ultraviolet experiments. *IUVA News*, 17(1), pp.11–16.

Guillard, R.R.L. and Ryther, J.H., 1962. Studies of marine planktonic diatoms: I. *Cyclotella nana* Hustedt, and *Detonula confervacea* (Cleve) Gran. *Canadian Journal of microbiology*, 8(2), pp.229–239.

IMO, 2018. RESOLUTION MEPC.300(72). Code for Approval of Ballast Water Management Systems (BWMS Code).

Peleg, M., Corradini, M.G. and Normand, M.D., 2007. The logistic (Verhulst) model for sigmoid microbial growth curves revisited. *Food Research International*, 40(7), pp.808–818.

Pousty, D., Hofmann, R., Gerchman, Y. and Mamane, H., 2021. Wavelength-dependent time-dose reciprocity and stress mechanism for UV-LED disinfection of *Escherichia coli*. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, [online] 217, p.112129.

Romero-Martínez, L., Moreno-Andrés, J., Acevedo-Merino, A. and Nebot, E., 2016. Evaluation of ultraviolet disinfection of microalgae by growth modeling: application to ballast water treatment. *Journal of Applied Phycology*, [online] 28(5), pp.2831–2842.

Romero-Martínez, L., Rivas-Zaballos, I., Moreno-Andrés, J., Moreno-Garrido, I., Acevedo-Merino, A. and Nebot, E., 2020. Effect of the length of dark storage following ultraviolet irradiation of *Tetraselmis suecica* and its implications for ballast water management. *Science of The Total Environment*, [online] 711, p.134611.

Sun, Z. and Blatchley III, E.R., 2017. *Tetraselmis* as a challenge organism for validation of ballast water UV systems. *Water Research*, [online] 121, pp.311–319.

USEPA, 2006. Ultraviolet disinfection guidance manual for the final long term 2 enhanced surface water treatment rule. Technical Report. US Environmental Protection Agency, Office of Water (4601).

Verhulst, P.F., 1838. Notice sur la loi que la population suit dans son accroissement. *Correspondance Mathematique et Physique Publiee* par A. Quetelet, 10, pp.113–121.

Vehículos autónomos del Instituto Hidrográfico de la Marina

Capitán de Corbeta Luis Manuel Rusillo Díaz-Obregón, Capitán de Corbeta Marcos Larrad Revuelto

Instituto Hidrográfico de la Marina, Cádiz; lrusdia@fn.mde.es, mlarrev@fn.mde.es

Resumen: Con este artículo se pretende informar del estado actual de la flotilla de equipos no tripulados de los que dispone actualmente el Instituto Hidrográfico de la Marina (IHM), así como el futuro a corto plazo, así como, su integración en el flujo de producción.

Palabras clave: USV, RPAS, SENSORES

1. INTRODUCCIÓN

El Instituto Hidrográfico de la Marina (IHM) ha apostado por tecnologías no tripuladas, tanto aéreas (RPAS) como de superficie (USV), para la obtención de datos que posteriormente puedan ser integrados tanto en las cartas náuticas como en otros productos demandados.

- Equipo totalmente eléctrico (autonomía: 12 horas con 4 baterías).
- Peso de 100 kg totalmente equipado.
- Velocidad hasta 6 nudos.
- Calado muy reducido (50 cm).
- Dimensiones: 2 x 1,08 x 1,065 metros.
- Enlace con el USV: Wifi, radio (2 Km) y 4G.

2. DESARROLLO

De momento se ha apostado por nuevas tecnologías que dispongan de Sistemas Globales de Navegación por Satélite (siglas en inglés, GNSS) por su fiabilidad en el posicionamiento y posibilidad de trabajar en modo RTK¹.



Imagen 1. USV clase VERIL.

2.1. ESTADO ACTUAL Y FUTURO UxV.

Actualmente el IHM dispone y tiende a:

EQUIPO	HOY	24	25	26	27	28	29	30
USV	3 (*)	1	1	1	1	1	-	1
RPAS	3	1	0	1	0	1	0	1
AUV	0	1	-	1	-	1	-	1
ROV	0	-	1	-	1	-	1	-

Tabla I. Relación equipos actuales e intenciones del IHM de adquisición UxV.

(*) Dos modelos Otter Pro (OP) y un Mariner (M) de la empresa noruega Maritime Robotics

b) MARINER (clase SONDA):

- Sondador EM2040.
- Sistema de posicionamiento SEAPATH 380 MRU5+ OEM.
- Perfilador de la velocidad del sonido.

2.2. VEHÍCULOS DE SUPERFICIE NO TRIPULADOS.

a) OTTER PRO (clase VERIL):

- Sondador EM2040.
- Sistema de posicionamiento SEAPATH 130 MRU5+ OEM.
- Perfilador de la velocidad del sonido.



Imagen 2. USV clase SONDA.

Otras características de la clase VERIL:

¹ RTK, Real Time Kinematic

El USV SONDA-01 además dispone de otros sensores:

- Posicionador acústico.
- RADAR.
- LIDAR.
- Estación meteorológica.



Imagen 3. Sensores USV clase SONDA.

2.2 ESCENARIOS ACTUACIÓN.

Debido a las características de los USV de la clase VERIL, su ámbito de actuación se centra en zonas portuarias. Anualmente se planifican 3/4 campañas expedicionarias donde el equipo se desplaza mediante una furgoneta con 4/5 personas. Este tipo de campañas supone:

- Mayor eficiencia económica con respecto a otras campañas tradicionales.
- Mayor accesibilidad a zonas respecto a otras plataformas (botes hidrográficos/Lanchas Hidrográficas).

En cuanto a la clase SONDA, estos se centran en zonas costeras abiertas al mar. Su despliegue puede realizarse de diferentes formas, por tierra o bien por mar a bordo del BH Malaspina donde recientemente se ha realizado una reforma integral de la toldilla, instalando un pescante para la maniobra de puesta a flote y recogida del USV por parte de la Jefatura de Mantenimiento del Arsenal de Cádiz.

En este sentido, hay que decir que ya se han llevado a cabo dos campañas hidrográficas con el SONDA-01, una en aguas próximas a la Base Naval de Rota y otra totalmente integrado en el BH Malaspina en el estrecho de Gibraltar y mar de Alborán.

Los resultados obtenidos con las dos clases de USV han sido plenamente satisfactorios, de hecho, se han publicado cartas náuticas con datos de estos equipos.



Imagen 4. Trabajos USV clase SONDA en la isla de Alboran.

2.3.LÍMITES OPERACIONALES.

A continuación, se indican los límites de operaciones de los USV:

OLA - Hs (m)	0-0,1	0,1-0,2	0,2-0,3
VIENTO (Kts)			
0-5			
05-10			
10-15			
15-20			

	Sin restricciones
	Marginal
	No-Go

Imagen 5. Límites operaciones USV clase VERIL (IPH 802)

Ola - Hs (m)	0 - 0,5	0,5 - 1	1 - 1,5
Viento (kts)			
0 - 6 (flojito)			
6 - 10 (flojo)			
10 - 18 (bonancible)			
Hasta 22 (fresquito)			

	Sin restricciones
	Dependiendo de calidad de los datos
	No - Go

Imagen 6. Límites operaciones USV clase SONDA (IPH 803).

De las dos imágenes anteriores se puede comprobar que el USV clase SONDA soporta condiciones de mar y viento superiores a las de la clase VERIL.

Tras las campañas efectuadas por el USV SONDA se ha podido comprobar que el equipo puede llegar a trabajar hasta con 0,8 metros de altura de la ola. El problema radica en la maniobra de puesta a flote e izado, límite máximo: 15 nudos de viento y 0,7 metros de ola.

2.4. VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS (RPAS).

Cambiando de medio, el IHM dispone de tres sistemas aéreos operados remotamente (siglas en inglés, RPAS²) MATRICE 300 RTK de la empresa *DJI Enterprise*. Dispone de los siguientes sensores:

- Cámara fotogramétrica digital P1.
- LIDAR topográfico L1.
- Cámara multispectral Micasense MX- RED-EDGE.



Imagen 7. RPAS MATRICE 300 RTK y sensores.

Los trabajos realizados con estos equipos están enfocados a la obtención y actualización de la línea de costa que aparece en las cartas náuticas. La precisión de los datos obtenidos es más que suficiente para fines cartográficos (Rusillo, 2022). El primer trabajo operativo se realizó de manera conjunta con el CEGET y CECAF en la isla de La Palma (islas canarias). Tras la erupción del volcán Cumbre Vieja, la línea de costa se vio modificada por las coladas de lava del volcán.

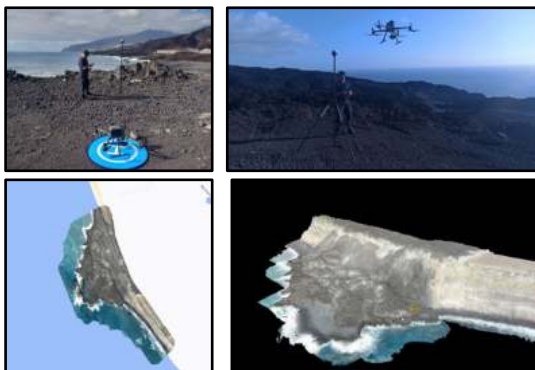


Imagen 8. Línea de costa isla de La Palma.

Recientemente se ha adquirido un nuevo sensor para los RPAS, un sondador monohaz remolcado TOPDRONE *AQUAMAPPER*. El fin de este sensor, actualmente en pleno proceso de conocimiento y optimización, es el de obtener datos batimétricos en zonas muy próximas a costa (veril de 5 metros hacia costa) o bien obtener datos con el fin de proporcionar apoyo REA³ a una fuerza naval.



Imagen 9. Sondador monohaz remolcado.

2.5. PROCEDIMIENTOS

El IHM ha elaborado los procedimientos operativos para el manejo de todos sus vehículos no tripulados en las conocidas como Instrucciones Permanentes de Hidrografía. En estos documentos se explican los pasos a seguir por las diferentes comisiones hidrográficas a la hora de trabajar con estos vehículos. Hay que decir que son documentos “vivos”, es decir, se encuentran en permanente revisión y actualización tras las experiencias adquiridas en sus despliegues.



² Remotely Piloted Aircraft System.

³ REA, Rapid Environmental Assessment.

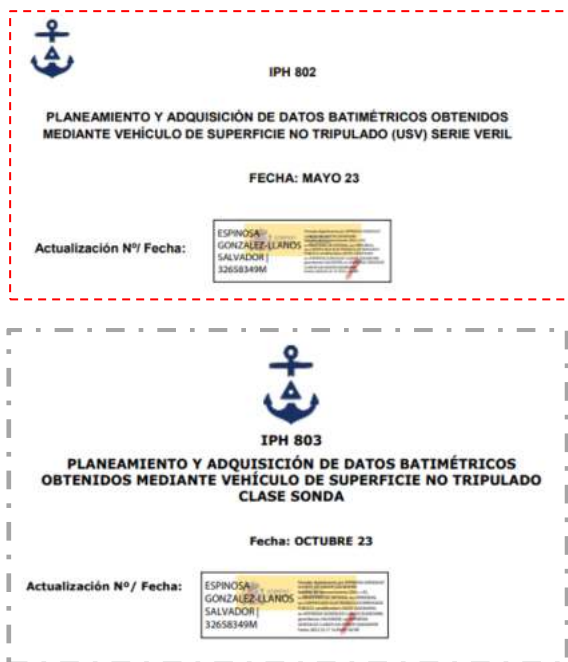


Imagen 10. IPH vehículos no remolcados.

Una vez aquí y, «casi» controlados los equipos con GNSS, el IHM va a apostar por los vehículos submarinos, tanto autónomos (AUV) como de operación remota (ROV). Comenzaremos poco a poco como con los USV, adquiriendo conocimientos y experiencia con el fin de integrar los datos obtenidos en la cadena de producción.

2.6. LEGISLACIÓN

A diferencia de los vehículos aéreos, cuyo uso se encuentra totalmente legislado, la legislación de los vehículos de superficie está en pleno proceso de creación, tanto a nivel nacional como internacional. La Administración del Estado está trabajando actualmente en la creación y desarrollo de la legislación necesaria para este tipo de vehículos en cuanto a uso y formación que deberán disponer los operadores. De manera paralela la Armada también está desarrollando la documentación necesaria dentro de su ámbito, Directiva de implantación de UxV y el Concepto de empleo.

El IHM participa en ambos foros, aportando su experiencia en el uso de los vehículos no tripulados.

3. RESULTADOS.

Los datos obtenidos con los vehículos no tripulados adquiridos por el Instituto Hidrográfico de la Marina durante los últimos años se encuentran totalmente integrados en su flujo de producción, contribuyendo

a la actualización de la cartografía náutica básica de la que el IHM es competente.

4. CONCLUSIONES

A la vista de los resultados obtenidos por los diferentes vehículos no tripulados, el IHM va a seguir apostando por este tipo de plataformas, actualizando las que tiene y adquiriendo nuevos vehículos submarinos, que serán desplegados desde los buques de los que actualmente dispone el IHM (Malaspina, Tofiño y Lanchas Hidrográficas Transportables) así como en los futuros buques hidrográficos costeros (2027-2028).

5. REFERENCIAS

- Rusillo, 2022. TFM Procedimientos de planeamiento, procesado e incorporación de datos obtenidos mediante equipos USV y RPAS a la cadena de producción del Instituto Hidrográfico de la Marina (<http://hdl.handle.net/10366/150683>).
- Sánchez y Rusillo, 2023. Primeros pasos en el uso de vehículos no tripulados para la producción cartográfica. Revista General de Marina septiembre 2023.

Desafíos y Soluciones para el Cultivo Sostenible de Microalgas Marinas en Áreas Litorales Sensibles de Andalucía: Proyecto Green-Marshes

E. Villar-Navarro (1), I. Moreno-Garrido (2), J. Ruiz (1), J.A. Perales (1), M.D. Macías-Sánchez (3) y C. Garrido-Pérez (1)

(1) Departamento de Tecnologías del Medio Ambiente, Facultad de Ciencias Marinas y Ambientales, Instituto Universitario de Investigación Marina (INMAR), Universidad de Cádiz, Campus Universitario de Puerto Real, 11510 Cádiz, España. elena.villar@uca.es

(2) Departamento en Ecología y Gestión Costera, Instituto de Ciencias Marinas de Andalucía (CSIC), Campus Río S. Pedro, 11510, Puerto Real, Cádiz, España

(3) Departamento de Ingeniería Química y Tecnología de Alimentos, Facultad de Ciencias, Instituto Universitario de Investigación Marina (INMAR), Universidad de Cádiz, Campus Universitario de Puerto Real, 11510 Cádiz, España

Resumen: el estudio tiene como objetivo optimizar el cultivo de microalgas en salinas, evaluando diversas especies nativas y de interés comercial para su producción y uso. Se desarrolla en varias fases: análisis de la calidad del agua de estero, bioprospección para generar monocultivos adaptados al clima del Parque Natural Bahía de Cádiz (PNBC), caracterización en laboratorio del crecimiento de estas especies con ajustes de nutrientes y luz PAR, y escalado intermedio en la Universidad de Cádiz (UCA) y superior en la Salina Preciosa y Roqueta para evaluar la resiliencia del cultivo y la circularidad del uso de nutrientes y agua.

Palabras clave: Ficotecnología, Economía Circular, Esteros, Microalgas.

1. INTRODUCCIÓN

El proyecto se centra en el cultivo de microalgas en salinas y su evaluación para producción y uso, destacando la importancia de estos organismos debido a su alta eficiencia fotosintética y capacidad para generar biomasa rica en aceites, proteínas, polisacáridos y otros compuestos de valor. Las microalgas pueden cultivarse en terrenos no agrícolas, lo que evita la competencia con la producción de alimentos. Su producción es prometedora para biocombustibles y bioproductos, pero la viabilidad económica depende de diversos factores y requiere un enfoque de biorrefinería que maximice el aprovechamiento de la biomasa generada, produciendo una amplia gama de productos desde químicos hasta biofertilizantes. Este enfoque es atractivo para industrias agroalimentarias, farmacéuticas y cosméticas por sus beneficios económicos, sociales y ambientales. Andalucía, con su alta irradiación solar y extensas zonas litorales, especialmente salinas y esterios en desuso, pero con un flujo continuo y renovación de agua de mar, ofrece un gran potencial para el cultivo de microalgas. Estas áreas, adecuadas para la producción no alimentaria debido a su estructura de caños y estanques, pueden revitalizarse económicamente. En Cádiz, las salinas y esterios del PNBC, catalogadas como Zonas Especiales de Conservación y Humedales de Importancia Internacional, son ideales para este

cultivo, permitiendo evaluar la resiliencia y sostenibilidad del proceso a escala semi-industrial. La producción de microalgas se puede realizar en sistemas de cultivos abiertos o fotobiorreactores cerrados. Los sistemas abiertos son económicos y fáciles de operar (Hernández-Pérez y Labbé, 2014) pero tienen menos control sobre las condiciones de cultivo y son propensos a la contaminación (Contreras-Flores et al., 2003). Los sistemas cerrados, aunque más costosos, permiten un mayor control y densidad de cultivo, adecuados para productos de alto valor (Martínez, 2008). El proyecto Green-Marshes tiene el objetivo de iniciar el cultivo de microalgas en la salina Preciosa y Roqueta, situada en el saco interno de la Bahía de Cádiz. El proyecto se ha orientado para incluir el reciclaje de nutrientes de los esterios, donde la actividad piscícola aporta nutrientes que pueden utilizarse para el cultivo de microalgas, complementados con fertilizantes solubles. Este enfoque reduce costes y mejora la viabilidad económica y la protección ambiental del ecosistema. Además, la reutilización del agua de cultivo, garantizando su calidad para otros usos como el cultivo de ostras, refuerza la sostenibilidad del conjunto de actividades económicas de la salina, reduciendo su huella ambiental. La biomasa de microalgas, rica en aceites y compuestos de alto valor (Shick y Dunlap, 2002), tiene aplicaciones en la agroalimentación (Guedes et al., 2015), cosmética y como aditivos en piensos para peces, sustituyendo la harina y aceite de pescado y mejorando los valores

nutricionales y biológicos del pienso (Vázquez-Romero et al., 2024). La extracción de estos compuestos con tecnologías verdes como la extracción con fluidos supercríticos (Cejudo Bastante et al., 2022), ofrece una alternativa prometedora y respetuosa con el medio ambiente, mejorando la eficiencia y reduciendo residuos. La investigación en esta área continúa, mostrando el potencial de las microalgas como fuente sostenible y versátil de biomasa para diversas aplicaciones industriales, apoyando la economía circular y la sostenibilidad ambiental.

2. DESARROLLO

La metodología para el estudio del cultivo de microalgas en la salina Preciosa y Roqueta se desarrolla en varias etapas claramente definidas. La primera etapa consiste en la bioprospección de las microalgas residentes en la salina. Esta fase se realiza durante un año tomando muestras de agua en diferentes puntos y en diferentes épocas del año, estaciones fría y cálida. Las muestras se tamizaron para eliminar sólidos de gran tamaño y se cultivan en condiciones controladas con medio f/2 suplementado con silicatos y vitaminas. Esto permitió evitar limitaciones nutricionales y favorecer el crecimiento de diversas especies presentes.

La segunda etapa implica el aislamiento e identificación de especies microalgales. Una vez obtenidos los bloom de fitoplancton, se utilizan equipos de citometría de flujo y microscopía para visualizar y analizar las muestras. Con los resultados obtenidos se realiza la identificación taxonómica de las diferentes muestras. Posteriormente, en la tercera etapa, se estudia el crecimiento y la productividad de las especies seleccionadas en condiciones de laboratorio, ajustando nutrientes y evaluando el crecimiento bajo diferentes intensidades de luz.

Finalmente, se realiza un escalado del cultivo a nivel intermedio y superior. En el nivel intermedio, los cultivos se trasladan a las instalaciones de la UCA donde se mantienen en condiciones ambientales de luz y temperatura. En el escalado superior, los cultivos se trasladan a la salina Preciosa y Roqueta, donde se evalúa la resiliencia del cultivo y la circularidad del uso de nutrientes y agua.

3. RESULTADOS

3.1 Análisis de calidad del agua

Se ha realizado un muestreo estacional para estudiar la viabilidad del agua de esteros para cultivar microalgas. Esta información es relevante para decidir si es necesario el suplemento de nutrientes como nitrógeno o fósforo, o si se requiere un pretratamiento físico-químico en la instalación. Los parámetros analizados fueron sólidos en suspensión, nitrógeno y fósforo total, especies inorgánicas del

nitrógeno, pH, oxígeno disuelto, salinidad y análisis microbiológico (*Vibrio* spp.).

Los resultados preliminares indican que las concentraciones de nutrientes en el estero fueron < 2 mg/L de nitrógeno total y < 0.1 mg/L de fósforo. De igual manera, en todos los muestreos estacionales la concentración de sólidos se mantuvo entre 50–100 mg/L, siendo mayoritariamente partículas inorgánicas ($>75\%$). El pH se mantuvo en 8.1 ± 0.1 , la salinidad por encima de 38 g/L y el oxígeno disuelto (%) en 112 ± 8 . Todo ello indica que la calidad química del agua de estero es óptima y similar al agua natural procedente del Océano Atlántico. La alta salinidad y concentración de sólidos en suspensión se debe a la propia naturaleza de los esteros, donde la evaporación del agua incrementa la salinidad.

En cuanto al análisis microbiológico, los resultados variaron significativamente durante las estaciones entre 40–700 UFC/mL (UFC: unidades formadoras de colonias). Esto, de igual manera, se debe a la propia actividad de los esteros y a la variación en la presencia de los organismos. En periodos de mayor actividad y presencia de organismos acuáticos, la concentración aumentó.

3.2 Aislamiento de especies

Para el aislamiento de especies se seleccionaron dos puntos de muestreos de diferente salinidad y dentro de los esteros: un punto de mayor salinidad y cercano a la zona de salina (59 g/L) y otro punto del estero más cercano a la zona de renovación del agua (43 g/L). Además, se tomó muestra tanto en la columna de agua como en el sedimento.

En los muestreos de primavera, en general, se observaron microalgas de los géneros *Chaetoceros*, *Tetraselmis*, *Euglena*, *Nitzschia*, *Cylindrotheca* y *Pelurosigma*, así como diatomeas pennadas pelágicas pertenecientes al género *Tabellaria*. Destaca también la presencia de *Oxyrrhis marina*, un dinoflagelado heterotrófico depredador de otras algas. También se observaron células de cianobacterias filamentosas del género *Arthrospira*.

La población de microalgas en la estación de otoño varió con respecto al muestreo de primavera, encontrándose una mayor concentración de diatomeas y mayor presencia de cocolitoforidos, dinoflagelados y microalgas del género *Tetraselmis*.

Aunque faltan por realizar muestreos y analizar muestras de población, se observó una diversidad de moderada a alta de especies fitoplanctónicas. Su aislamiento y producción a escala de laboratorio nos indicará el potencial de estas especies autóctonas para ser cultivadas en el entorno natural de la Bahía de

Cádiz utilizando agua de esteros para producir biomasa de alto valor.

3.3 Cultivo de microalgas

La experimentación con microalgas a escala piloto se realiza bajo invernadero en las instalaciones situadas en la salina Preciosa y Roqueta. Estas instalaciones constan de dos reactores abiertos tipo raceway de 200 y 2000 litros de capacidad, un sistema de bombeo del agua del estero con pretratamiento y sistema de cosechado. Además, se cuenta con un laboratorio para el seguimiento del crecimiento de la biomasa y calidad del agua.

Para la primera experiencia se utilizó la especie *Arthrospira platensis*, cianobacteria altamente estudiada y conocida coloquialmente como *Spirulina*. Se seleccionó esta cianobacteria ya que el género ha sido identificado en bioprospecciones previas y por su robustez el el cultivo. De hecho, gracias a esta característica, se pudo completar todas las fases de producción (desde obtención del inóculo hasta el cosechado) y analizar las dificultades técnicas del cultivo en salinas y ajustarlas para el cultivo del resto de especies. Una vez finalizada esta primera experiencia, se realizó un protocolo de cultivo para estas instalaciones bajo invernadero y se generó un informe de mejoras de la instalación.

El cultivo en discontinuo de *A. platensis* tuvo una duración de 35 días hasta que se alcanzó el estado estacionario (Fig. 1), momento en el que se cosechó la biomasa, se modelizó el crecimiento del cultivo y se analizó la calidad del agua.

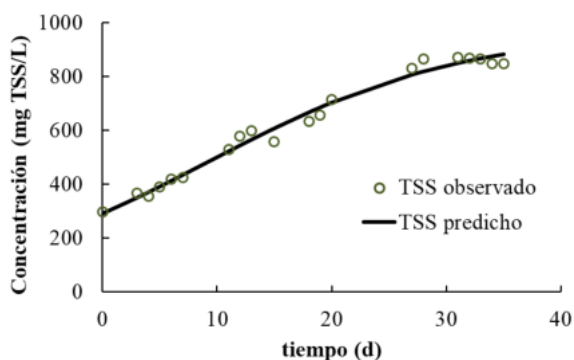


Fig. 1. Evolución de la concentración de sólidos en suspensión (TSS) correspondiente a la biomasa de *A. Platensis*, especie cultivada en un reactor tipo raceway (2000 L). Los puntos se refieren a los valores medidos y la línea a los valores predichos.

Se obtuvo una concentración máxima en torno a 1 g/L y a una producción de 30 mg por litro de reactor y día. Aunque la tasa de duplicación celular (0.004 h^{-1}) es baja a comparación de otras microalgas marinas (Villar-Navarro et al., 2021), se espera optimizar este resultado en los próximos experimentos. En el caso de los análisis de nutrientes, se ha observado un

consumo reducido (<15%) de nitrógeno y fósforo aportado en el medio de cultivo. Dado que se utilizó el medio de cultivo standard para *Spirulina*, la optimización se basará en el estudio de la recirculación del medio para el aprovechamiento total de los nutrientes y en la optimización del medio para la reducción del coste de producción.

4. CONCLUSIONES

Es viable utilizar el agua de estero como matriz de cultivo de microalgas marinas y cianobacterias, aunque es necesaria la suplementación de nutrientes y la instalación de un pretratamiento para la mejora de la calidad física y microbiológica del agua. La diversidad fitoplanctónica del agua de esteros es alta y con potencial para encontrar especies altamente resistentes y con interés biotecnológico para ser cultivada en el PNBC.

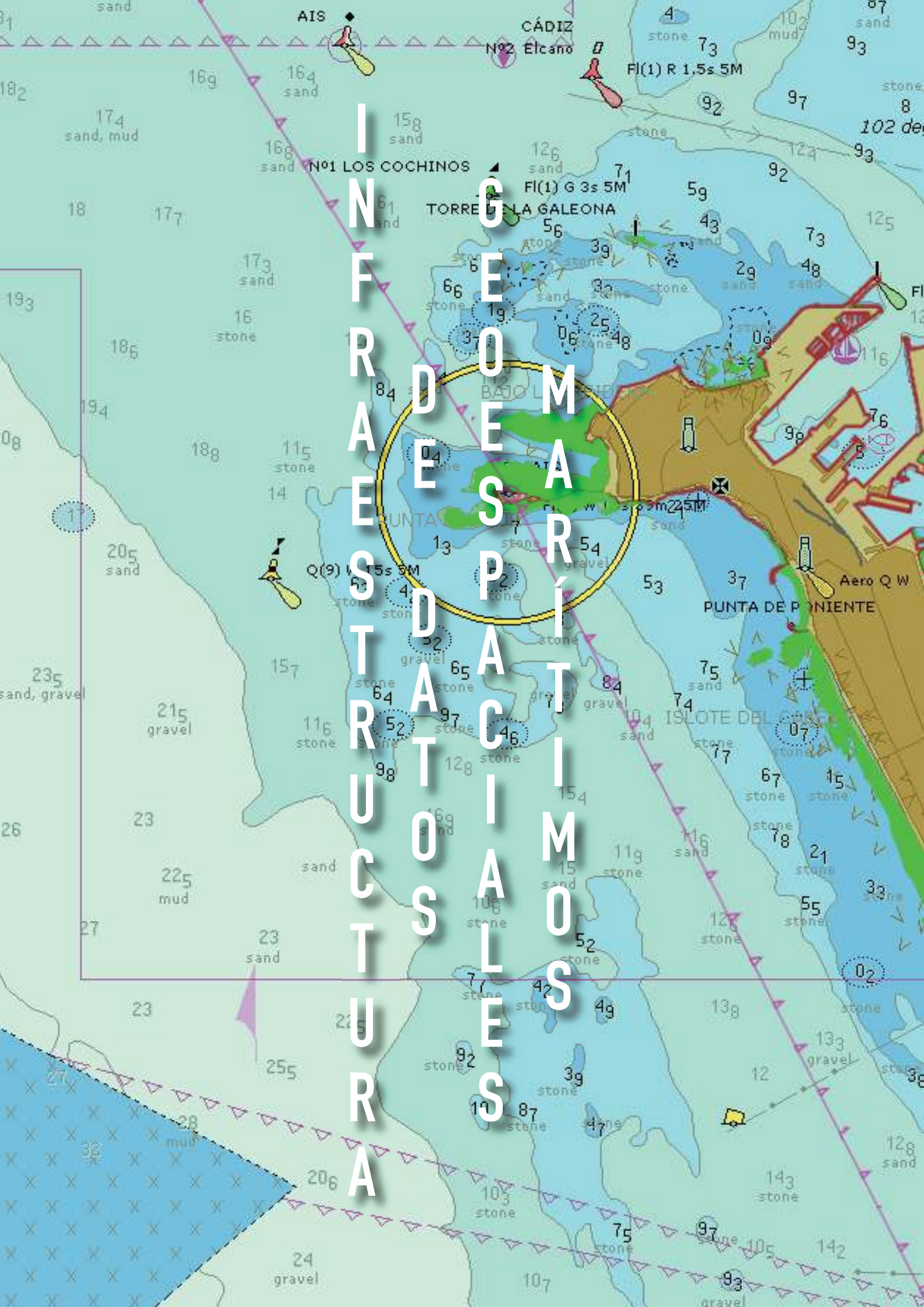
Agradecimientos

Este estudio está financiado por el Proyecto Green-Marshes (Ref. PCM_00041), cofinanciado por la Consejería de Universidad, Investigación e Innovación de la Junta de Andalucía y por la Unión Europea a través de los fondos Next Generation EU del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia; y al proyecto AlgaeMar&Bay (Ref. CEIMAR.44) financiado por la Fundación CEI-MAR (2021-085 / PV / FUND-CEIMAR-TRANSF-INNOV-2021 / PT).

REFERENCIAS

- Cejudo Bastante, C., Tizón, S. R., Cardoso, L. C., Macías-Sánchez, M. D., Serrano, C. M., y de la Ossa, E. J. M. (2022). Fractionation of Marine Microalgae Extract using Supercritical CO₂ with Progressive Addition of Co-Solvent for the Recovering of High-Valuable Compounds. *Chemical Engineering Transactions*, 93, 259–264.
- Contreras-Flores C., Peña-Castro J., Flores-Cotera L. y Cañizares-Villanueva R. (2003). Avances en el diseño conceptual de fotobiorreactores para el cultivo de microalgas. *Interciencia* 28(8): 450-456.
- Guedes A.C., Sousa-Pinto I. y Malcata F.X. (2015). Application of microalgae protein to aquafeed. En: S.K. Kim (eds.). *Handbook of Marine Microalgae: Biotechnology Advances*. Elsevier, Amsterdam, 93 - 125.
- Hernández-Pérez A y Labbé J.I. (2014). Microalgas, cultivo y beneficios. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*. 49 (2): 157-173.
- Martínez L. (2008). Eliminación de CO₂ con microalgas autóctonas. Tesis Doctoral, Instituto de Recursos Naturales, Universidad de León, León, 226 pp

- Shick J.M. y Dunlap W.C. (2002). Mycosporine-like amino acids and related gadusols: Biosynthesis, accumulation and UV-protective functions in aquatic organisms. *Annual Review of Physiology*, 64, 223–262.
- Vázquez-Romero, B., Villar-Navarro, E., Perales, J. A., Garrido-Pérez, C., y Ruiz, J. (2024). Techno-economic analysis of using microalgae to treat streams from fish RAS farming and replace fish meal: A case study. *Journal of Water Process Engineering*, 59, 104904.
- Villar-Navarro, E., Garrido-Pérez, C., y Perales, J. A. (2021). The potential of different marine microalgae species to recycle nutrients from recirculating aquaculture systems (RAS) fish farms and produce feed additives. *Algal Research*, 58, 102389.



INFRAESTRUCTURAS DE MARRÍMOS

Edificação do *National Oceanographic Data Centre* de Portugal

T. Dias (1), I. Fortes (1), T. Silveira (2) e E. Dias (2)

- (1) Instituto Hidrográfico, Portugal (geraldes.dias@hidrografico.pt).
(2) Instituto Português do Mar e da Atmosfera, I.P., Portugal.

Resumen: Os *National Oceanographic Data Centres* (NODC) são nodos de uma rede global coordenada pelo programa *International Oceanographic Data and Information Exchange* (IODE) da *Intergovernmental Oceanographic Commission* (IOC) da *United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization* (UNESCO). A edificação do NODC de Portugal (NODC-PT) é uma ação conjunta do Instituto Hidrográfico (IH) e do Instituto Português do Mar e da Atmosfera, I.P. (IPMA), reconhecida como ação da Década dos Oceanos, no âmbito do Desafio 8 - Criar uma representação digital do oceano. Este artigo resume os trabalhos de edificação do NODC-PT, nomeadamente a arquitetura da infraestrutura e a sua interligação com as entidades produtoras de dados, procurando estabelecer um ponto único de acesso aos dados oceanográficos nacionais e centralizar a sua gestão.

Palabras clave: catálogo de metadados, dados marinhos, economia azul, IODE.

1. INTRODUÇÃO

A informação geoespacial (dados que incluem uma componente geográfica, permitindo a geolocalização de fenómenos) é essencial na análise de padrões e tendências. No contexto do estudo e compreensão do oceano, esta análise é determinante para a utilização segura e sustentável do mar, permitindo uma gestão e um planeamento adequados do meio marinho.

As iniciativas da União Europeia (UE), através dos seus instrumentos legais para estabelecer objetivos comuns para os Estados Membros, estabeleceram: (1) a Diretiva-Quadro da Estratégia Marinha (DQEM), que visa atingir e manter um bom estado ambiental nas águas marinhas europeias, promovendo o desenvolvimento de estratégias e programas (monitorização e medidas) para atingir esse bom estado ambiental (UE, 2008) e, (2) a Diretiva do Ordenamento do Espaço Marítimo (OEM), que consiste numa abordagem de gestão adaptativa que implica o planeamento da utilização do espaço marítimo de forma coordenada e sustentável (UE, 2014). Estas iniciativas da UE estão alinhadas com a Agenda 2030 das Nações Unidas, nomeadamente com o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 14 - Proteger a Vida Marinha.

Nesta abordagem integrada é reconhecida que a observação do oceano é um dos pilares fundamentais para o conhecimento do meio marinho, sendo inegável a interligação entre os dados geoespaciais e as séries temporais de variáveis oceânicas, nas suas diversas aplicações: científicas, ambientais, económicas e de gestão, constatando-se serem um recurso valioso que apoia uma variedade de atividades humanas e iniciativas de preservação dos oceanos e gestão sustentável dos recursos.

Neste âmbito, destacam-se o Instituto Hidrográfico (IH) e o Instituto Português do Mar e da Atmosfera, I.P. (IPMA) como as entidades de referência no acervo de dados do meio marinho, bem como do conhecimento que daí advém, através das séries longas de que dispõem. Assim, considerando as suas responsabilidades nacionais, o IH e o IPMA, prestam um conjunto de serviços, onde se inclui a disponibilização de dados oceanográficos, com o objetivo de potenciar a investigação, desenvolvimento e a economia azul, garantindo os mecanismos de curadoria de dados oceanográficos, de acordo com as boas práticas nacionais e internacionais (Leadbetter *et al*, 2020).

Neste contexto, os *National Oceanographic Data Centres* (NODC) são nodos de uma rede global coordenada pelo programa *International Oceanographic Data and Information Exchange* (IODE) da *Intergovernmental Oceanographic Commission* (IOC) da *United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization* (UNESCO) (IOC 2022, 2023). A edificação do NODC de Portugal (NODC-PT) é uma ação conjunta do Instituto Hidrográfico (IH) e do Instituto Português do Mar e da Atmosfera, I.P. (IPMA), reconhecida como ação da Década dos Oceanos, no âmbito do Desafio 8 - Criar uma representação digital do oceano (ONU, 2024).

Com o objetivo de criar uma sinergia conjunta, em alinhamento com os objetivos dos NODC, o IH e o IPMA, estabeleceram em 2022 um Protocolo de Cooperação para edificar e manter o NODC-PT, garantindo as articulações necessárias ao respetivo funcionamento e evolução.

2. METODOLOGIA

O NODC-PT assenta nas infraestruturas de dados espaciais (IDE) do IH, a plataforma Hidrográfico+, e do IPMA, a plataforma SOMOSATLÂNTICO.

A IDE do IH designa-se Hidrográfico+ e foi projetada de forma a estar alinhada com as diretivas europeias: INSPIRE (UE, 2007), *Open Data Directive* (UE, 2019) e Diretiva Quadro de Estratégia Marinha (UE, 2008). Ao nível nacional, implementa os princípios do Regulamento Nacional de Interoperabilidade Digital (RNID) para dados geoespaciais e as regras do Sistema Nacional de Informação Geográfica (SNIG). A infraestrutura foi desenvolvida para ser o único ponto de acesso a todos os dados técnico-científicos do IH, maioritariamente de natureza geoespacial, fornecendo um conjunto de serviços e funcionalidades aos utilizadores internos e externos. Esta infraestrutura compreende, entre outras componentes, um catálogo de metadados. Este catálogo agrega e indexa as fichas de metainformação dos Conjuntos de Dados Geográficos (CDG) e Serviços de Dados Geográficos (SDG) produzidos pelo IH. O seu conteúdo pode ser replicado em infraestruturas de nível superior (e.g., NODC-PT, Sistema Nacional de Informação Geográfica (SNIG), mediante processos de colheita específicos.

A plataforma SOMOSATLÂNTICO é uma infraestrutura digital com a capacidade de ingestão, agregação, geoprocessamento e disponibilização de dados do meio marinho, e inclui as seguintes componentes: (1) repositório, (2) catálogo de metadados e (3) interface web com visualizadores geográficos (Fig. 1).

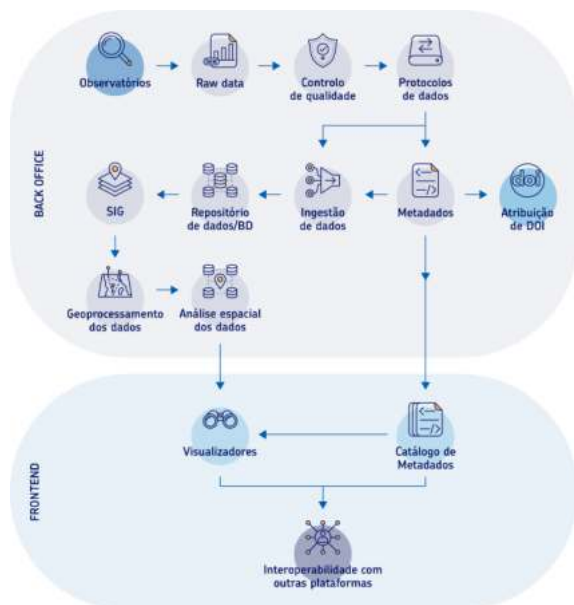


Fig. 1. Fluxo de processamento dos dados na plataforma SOMOSATLÂNTICO.

Tem como objetivo potenciar a investigação, monitorização e partilha de dados do IPMA, assegurando a sua integridade e continuidade,

segundo o princípio “medir uma vez, usar várias vezes”, otimizando assim a aquisição de dados do meio marinho (Silveira *et al.*, 2024a, 2024b).

Para a criação do NODC-PT foi idealizado um modelo federado de responsabilidades distribuídas por várias entidades, tendo como ponto de partida as IDE marinhos do IH e do IPMA. Nesse sentido, a plataforma digital integra-se numa perspetiva de *Service Oriented Architecture* (SOA) com as restantes infraestruturas, de forma que a informação possa fluir entre as diversas infraestruturas com base em serviços *web* - *Open Geospatial Consortium* (OGC) e *Representational State Transfer* (REST). O acesso aos dados é materializado através de um catálogo de metadados, baseado em *GeoNetwork*, interoperável com IDE de nível superior, nomeadamente, a nível nacional, o SNIG, e a nível europeu, a *Infrastructure for Spatial Information in Europe* (INSPIRE).

Há uma forte aposta na interoperabilidade de dados geográficos e informação espacial do meio marinho, antecipando-se que outras plataformas poderão ter acesso a informação a partir do catálogo de metadados, assente numa política de dados comum e seguindo os princípios *FAIR: Findable, Accessible, Interoperable and Reusable* (Go FAIR, 2024).

A agregação e indexação de dados e metadados no NODC-PT baseia-se em três tipologias distintas de fontes de conjuntos de dados geográficos (CDG):

- Tipo 1 – Fornecedores com infraestrutura de armazenamento e com catálogo de metadados;
- Tipo 2 – Fornecedores com infraestrutura de armazenamento e sem catálogo de metadados;
- Tipo 3 – Fornecedores sem infraestrutura de armazenamento e sem catálogo de metadados.

O processamento dos dados é distinto, em função do tipo de fornecedor (Fig. 2):

- Tipo 1 – Os metadados são colhidos, preferencialmente de forma automática (e.g., através da palavra-chave “NODC-PT”, a partir do catálogo do fornecedor e replicados no catálogo do NODC-PT. Os dados mantêm-se na infraestrutura do fornecedor;
- Tipo 2 – Os metadados são criados pelo fornecedor, através do modelo disponibilizado pelo NODC-PT, e publicados neste catálogo. Os dados mantêm-se na infraestrutura do fornecedor;
- Tipo 3 – Os metadados são criados pelo fornecedor, através do modelo disponibilizado pelo NODC-PT, e publicados neste catálogo. Os dados são carregados no NODC-PT, compactados num ficheiro único.

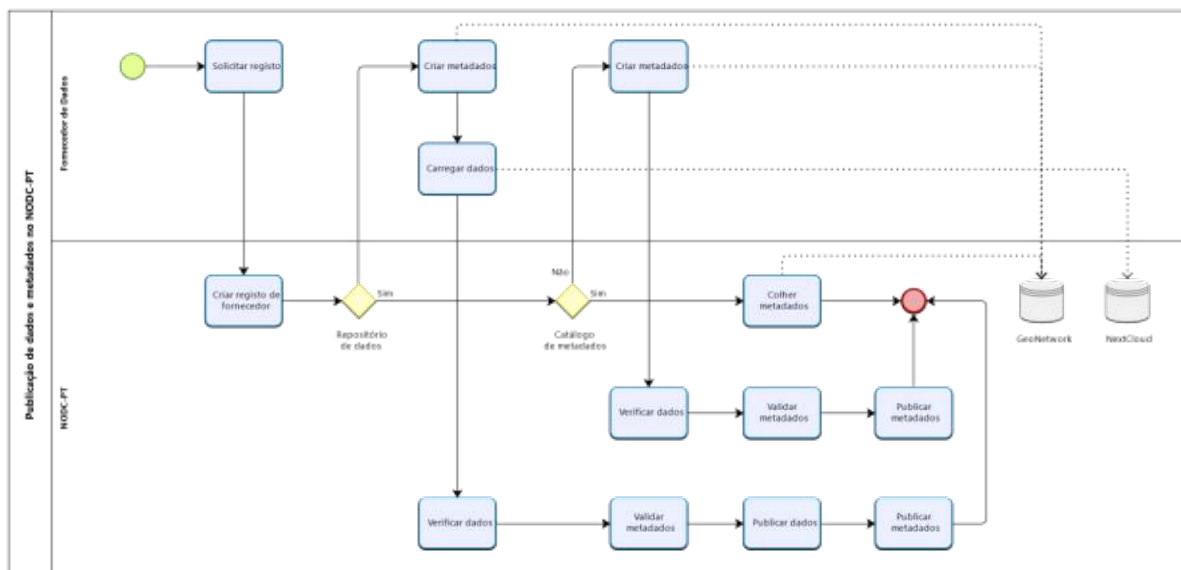


Fig. 2 – Publicação de dados e metadados no NODC-PT.

A integração de dados e metadados no NODC-PT processa-se em dois níveis:

- Nível I, numa primeira fase de implementação, os dados são armazenados em ficheiros únicos compactados e os metadados incluem todos os atributos obrigatórios;
- Nível II, numa fase posterior, os dados são disponibilizados em formatos padronizados (e.g., *Web Feature Service* (WFS), *OGC Interface de Programação de Aplicativo* (API) *Features*, *Network Common Data Form* (NetCDF), *Ocean Data View* (ODV)) e os metadados incluem todos os atributos aplicáveis.

3. RESULTADOS

O NODC-PT possui um portal de divulgação, acessível no endereço <https://nadc-portugal.pt/>, que descreve o conceito e objetivos do NODC-PT, bem como a tipologia de dados que se pretende disponibilizar e algumas das normas e boas práticas a adotar. São identificados os parceiros aderentes e são providenciados links para referências e recursos de apoio à gestão de dados marinhos.

O NODC-PT disponibilizará dados marinhos multidisciplinares, nos domínios da batimetria, biologia, química marinha, geologia marinha, ecossistemas marinhos, atividades humanas, oceanografia física, meteorologia marinha e poluição marinha.

O acesso aos dados é materializado através de um catálogo de metadados, disponível em <https://data.nadc-portugal.pt/>, que permite a pesquisa temática e espacial dos dados, disponibiliza os links para acesso e descarregamento, através de serviços web OGC ou OGC API, incluindo um visualizador.

Numa fase inicial, o NODC-PT contará com os dados do IH e do IPMA, prevendo-se uma contribuição crescente das restantes instituições nacionais que observam e produzem dados sobre o oceano.

4. CONCLUSÃO

A edificação do NODC-PT, enquanto ponto único de acesso aos dados oceanográficos nacionais, procura corrigir a lacuna existente na gestão centralizada desses dados. Seguindo as normas e boas práticas internacionais relativas à partilha de dados geoespaciais, o NODC-PT promove a integração de sistemas de observação e de disseminação de dados marinhos, promovendo a ciência, desenvolvimento e literacia dos oceanos e impulsionando a economia azul, contribuindo para a utilização sustentável e segura do mar.

REFERENCIAS

- Go FAIR (2024). FAIR Principles. <https://www.go-fair.org/fair-principles/>.
- Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO (2022). Guide for Establishing an IODE National Oceanographic Data Centre, IODE Associate Data Unit or IODE Associate Information Unit. IOC Manuals and Guides, 5, 3rd revised edition. Paris, UNESCO, 26 pp.
- Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO (2023). IODE Quality Management Framework for National Oceanographic Data Centres and Associate Data Units. IOC Manuals and Guides, 67, 2nd revised edition. Paris, UNESCO, 36 pp.
- Leadbetter, A., Carr, R., Flynn, S. et al (2020). Implementation of a Data Management Quality

- Management Framework at the Marine Institute, Ireland. *Earth Sci Inform* 13, 509–521. <https://doi.org/10.1007/s12145-019-00432-w>.
- Organização das Nações Unidas (ONU) (2024). 10 Challenges – Ocean Decade Challenges for collective impact. <https://oceandecade.org/challenges/>.
- Silveira, T., Dias, E., Barata, P., Almeida, P., Santos, C., Deus, R., (2024a). WE ARE ATLANTIC Digital Platform: A New Era in Providing Oceanographic Data in Portugal. Encontro de Oceanografia 2024 – 3-4 May 2024, Peniche.
- Silveira, T., Carapuço, M., Dias, E., Santos, C., (2024b). IPMA's Marine Data Portal. In Proceedings of International Conference on Marine Data and Information Systems. IMDIS 2024 – 27-29 May 2024, Bergen.
- União Europeia (UE) (2007). Directiva 2007/2/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 14 de Março de 2007, que estabelece uma infraestrutura de informação geográfica na Comunidade Europeia (Inspire).
- União Europeia (UE) (2008). Directiva 2008/56/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 17 de Junho de 2008, que estabelece um quadro de acção comunitária no domínio da política para o meio marinho (Directiva-Quadro Estratégia Marinha).
- União Europeia (UE) (2014). Directiva 2014/89/UE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 23 de julho de 2014, que estabelece um quadro para o ordenamento do espaço marítimo.
- União Europeia (UE) (2019). Directiva (UE) 2019/1024 do Parlamento Europeu e do Conselho de 20 de junho de 2019, relativa aos dados abertos e à reutilização de informações do setor público.

Gemelo Digital Oceanográfico: Visualización Dinámica del Océano mediante mallas H3

M. Fernández-Gavilanes¹(1), C. Pérez-Collazo (1), J.A. González-Prieto (1) y P. Sendín-Raña (1)

(1) Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar, Plaza de España s/n, 36920, Marín, España
¹(correo electrónico: mfgavilanes@tud.uvigo.es).

Resumen: En la actual Revolución Industrial, impulsada por la Inteligencia Artificial y el Big Data, surgen innovaciones que transforman nuestra sociedad. Una de ellas es el Gemelo Digital Oceanográfico, una réplica virtual del entorno marino alimentado por un sistema Big Data. Este sistema recopila, almacena y visualiza dinámicamente información de diversas fuentes mediante herramientas avanzadas de gestión de grandes volúmenes de datos. Para modelar el entorno marino, se emplea mallas H3, una técnica avanzada en la gestión de datos geoespaciales. Teniendo en cuenta que este proceso automatizado de creación del gemelo digital requiere de un suministro continuo de datos de la zona de estudio, el caso de uso propuesto se ha limitado a la zona de las Rías Baixas. Estas tecnologías de la era 4.0 permiten a la Armada y otras instituciones mantenerse a la vanguardia tecnológica, facilitando decisiones informadas y precisas en el ámbito marítimo y generando respuestas efectivas a los problemas que puedan surgir en sus obligaciones.

Palabras clave: SIG, gemelo digital, oceanografía, meteorología.

1. INTRODUCCIÓN

Operar en el entorno marítimo, tanto de forma profesional, militar o de ocio, depende en gran medida de la disponibilidad precisa y confiable de información sobre el estado del entorno en donde se desea realizar la tarea. Esta información es esencial para garantizar la seguridad, optimizar el rendimiento y planificar de manera efectiva las rutas a seguir en el mar, debido a lo cual diversas organizaciones, incluidas agencias reguladoras estatales, monitorean de forma regular el entorno marítimo. La captura masiva de estos datos, juntamente con tecnologías como el IOT, el Big Data o la Inteligencia Artificial (IA), están llamadas a revolucionar la economía azul, permitiendo su uso en diversas tareas, incluyendo la identificación de zonas de pesca, la previsión de cambios climáticos bruscos o mejorar la eficiencia en la respuesta a emergencias como tormentas o accidentes marítimos.

La necesidad de disponer de toda esa información ha propiciado la creación de lo que se conoce como gemelo digital, una réplica virtual de objetos o procesos reales que, aplicado al ámbito marítimo, da lugar a lo que se conoce como *Gemelo Digital Oceanográfico* (GDO). Un GDO debe replicar el entorno marino utilizando tecnologías emergentes de la Industria 4.0, proporcionando una herramienta útil para la navegación y la protección marítima (Griffiths y Po-Leen Ooi 2018).

Teniendo esto en cuenta, hoy en día la cantidad de datos disponibles sobre el entorno marítimo está aumentando rápidamente a través de: boyas in situ (Legler et al. 2015), redes de sensores de bajo coste (Ruiz, Estronell, y Erena 2017) y modelos de predicción (Hewitt y Lowe 2018).

Ahora bien, a pesar de las diferencias existentes en estos datos –ej. en las escalas espaciales y temporales o en las ubicaciones geográficas, un aspecto común entre la mayoría de los usuarios es que todos necesitan representar o relacionar temporal y espacialmente las condiciones del entorno marítimo mediante sistemas geoespaciales avanzados. Estos sistemas permiten proporcionar beneficios para una navegación eficiente en un entorno cada vez más restrictivo y cambiante –ej., por los efectos del cambio climático. Por tanto, los datos deben recopilarse de varias fuentes –se refiere a todo aquello que aporta información y conocimiento–, o servicios de información, como en el caso del *Copernicus* (European Commission 2024) o *MeteoSIX* (MeteoGalicia 2009; Regueiro et al. 2012); armonizarse e integrarse en un entorno espacial.

Por tanto, el GDO debiera disponer de esta información integrada y estandarizada, ya que permitiría la visualización y simulación de condiciones oceánicas complejas, a la vez que es crucial para la toma de decisiones. Sin embargo, el desafío también radica en integrar estos datos de manera que sean accesibles y utilizables en una plataforma unificada, de forma que se pueda visualizar toda esta información en un único entorno.

La estructura seleccionada para gestionar la información de estos entornos geoespaciales juega un papel fundamental, ya que, aunque la mayoría de los modelos proporcionados por las diversas fuentes, servicios o portales emplean mallas cuadradas, la realidad es que las mallas hexagonales emergen como una alternativa viable con importantes mejoras respecto a la configuración de mallas cuadradas, especialmente cuando se trata de aplicaciones centradas en la navegación.

2. MALLAS HEXAGONALES

Entrando más en detalle, las mallas hexagonales son un tipo de disposición en la que los elementos están organizados en un patrón similar a los paneles de un panal de abeja, y ofrecen varias ventajas sobre las cuadradas. Estas son (Birch et al A. 2007):

- Una celda hexagonal tiene una relación perímetro/diámetro menor que una unidad cuadrada, lo que significa que se parece más a un círculo y tiene menos sesgo por los efectos de los bordes. Este atributo es particularmente importante en el ámbito marítimo ya que permite utilizar una muestra de puntos para caracterizar un área mayor como conjunto.
- Las celdas hexagonales son mejores en términos de conectividad y análisis de trayectorias. Todos los centroides de los seis hexágonos vecinos son todos ellos equidistantes. En contraste, las celdas cuadradas tienen ocho vecinos con distancias variables, lo que puede introducir complejidades adicionales al planificar rutas o analizar patrones de movimiento.

Es importante destacar que la mayoría de las fuentes actuales utilizan mallas cuadradas, lo que presenta un desafío al integrarlas con las hexagonales, ya que sus centroides no coinciden. Esta discrepancia dificulta la comparación y combinación de datos.

Una solución eficaz a este problema es el uso de un Sistema de Cuadrícula Global Discreta (DGGS). Los DGGS son una estructura de datos jerárquica que cubre la superficie terrestre con celdas con forma y tamaño uniformes. Estas unidades referencian ubicaciones espacialmente, evitando los problemas de transformación relacionados con las representaciones planares de coordenadas. En este sentido, existen varias implementaciones de DGGS que usan hexágonos de áreas iguales como sus unidades. H3 es uno de los ejemplos más comunes (Brodsky 2018), aunque existen otros tipos de implementaciones (Barnes et al. 2018).

Concretamente, este trabajo se centra en la utilización de la librería de Python H3, v.3.7.7 (Uber 2023), la cual permite pasar de un escalado de resolución más gruesa a un escalado de resolución más fino (y viceversa). H3 divide un hexágono en siete hexágonos de escalado más “fino” que cubre casi completamente el hexágono original (Fig. 1).

3. METODOLOGÍA

3.1 Selección de fuentes y almacenamiento

En la actualidad existen numerosas fuentes susceptibles de ser consultadas para la descarga de información relevante para ser usada por un GDO. Concretamente, en el caso de datos METOCEAN se ha utilizado el servidor THREDDS MeteoSIX de MeteoGalicia (Regueiro et al. 2012), que permite la obtención de datos a muy alta resolución para la

geografía gallega. A este respecto, los tres modelos predictivos de más relevancia son:



Fig. 1. Subdivisión mediante H3 de áreas en hexágonos cada vez más pequeños (Brodsky 2018).

- **Modelo Weather Research and Forecast (WRF):** es uno de los modelos meteorológicos de mesoescala más potentes. Dispone de un elevado conjunto de variables meteorológicas de diagnóstico (ej., presión atmosférica, componente y dirección de viento a 2 m) con una resolución espacial de 1.3 km y una resolución temporal horaria.
- **Modelo oceanográfico regional WW3:** es un modelo oceanográfico regional que permite una predicción meteorológica fuera de las rías gallegas. Cuenta con diferentes variables de diagnóstico tales como altura, periodo y dirección del oleaje.
- **Modelo oceanográfico local SWAN:** es un modelo que permite disponer de información similar a la de WW3, dentro de las rías.

•	Variable	Ancho/área	Escala H3	Área promedio H3
MeteoGalicia - FORECAST	WRF (módulo o dirección del viento, temperatura, humedad, etc.)	1,3 km / 1,69km ²	7	~5,18km ²
		4 km / 16km ²	6	~36,27km ²
		12 km / 144 km ²	7	~5,18km ²
			5	~253,9km ²
			6	~36,27km ²
			9	~0,11 km ²
	SWAN (dirección, altura del oleaje, etc.)	0,3km / 0,09 km ²	10	~0,01km ²
	WW3 (dirección, altura del oleaje, etc.)	4,63km / ~21,44km ²	6	~36,27km ²
			7	~5,18km ²
	ROMS (profundidad, salinidad, etc.)	2 km / 4 km ²	7	~5,18km ²
		8	~0,74km ²	
MOHID (profundidad, salinidad, marea etc.)	0,1km / 0,01km ²	9	~0,11 km ²	
		10	~0,01km ²	
IHM	Batimetría	30m / 0,09 km ²	9	~0,11 km ²
			10	~0,01km ²

Tabla i: Fuentes de datos seleccionadas, considerando variables, e indicando atributos de área tanto de la fuente original como de las resoluciones H3 que más se ajustan.

Por otro lado, se ha integrado una batimetría de alta resolución de la zona considerada, la cual ha sido aportada por el Instituto Hidrográfico de la Marina (IHM). En la Tab. i, se observan las fuentes

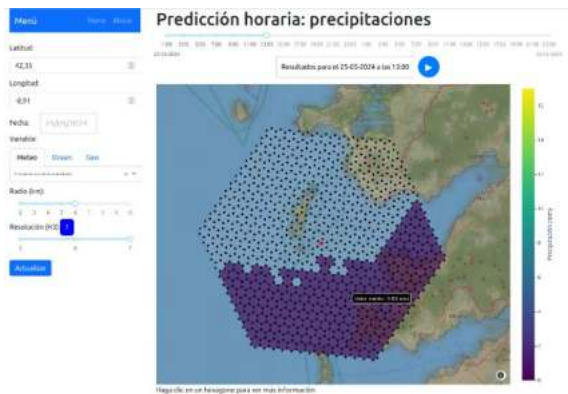


Fig. 2. Predicción de precipitaciones, tomado del modelo WRF de 1Km de MeteoGalicia para la Rias Baixas del día 25/05/2024 para radio de 6km y resolución 7 de H3.



Fig. 3. Predicción del módulo del viento, tomado del modelo WRF de 1Km de MeteoGalicia para la Rias Baixas del día 25/05/2024 para radio de 5km y resolución 8 de H3.

consideradas, junto con los modelos y algunas variables. A este respecto, las tres últimas columnas reflejan, de una parte, el ancho de la malla utilizada en origen junto con el área que abarca, la escala H3 y el área H3 de rango superior e inferior que más se ajusta al área del modelo original.

Una vez identificadas las fuentes, se procede a definir el módulo encargado de la descarga y almacenamiento. Esta tarea ha de ejecutarse de forma periódica. De esta forma se asegura disponer de los datos más actualizados de las predicciones futuras (para el caso de modelos meteorológicos y oceanográficos). Concretamente, para el caso de datos METOCEAN, el acceso y descarga a través del servidor se realiza de forma programada cada 12 horas, mientras que, en el caso de datos geoespaciales (batimetría), la descarga se realiza manualmente porque su período de actualización es de varios años.

En este sentido, y de forma resumida, H3 utiliza un índice jerárquico de 64 bits, donde cada identificador es específico para una unidad espacial y resolución específica (Brodsky 2018). Este sistema permite identificar el hexágono padre de resolución más gruesa a partir del hexágono hijo de resolución más fina simplemente truncando el índice. Además, H3 tiene métodos basados en índices que se utilizan para interconectar unidades entre sí, gracias a la identificación de celdas de borde vecinas.

En este sentido, los datos han de convertirse a unidades hexagonales gracias a la librería de Python H3, que permite transformar pares de latitud y longitud en un índice H3 e identificar la celda que la contiene. Por tanto, cada uno de los datos de puntos de las cuadrículas muestreadas en los modelos originales seleccionados se convierten a su índice H3. Cabe señalar de nuevo que la agregación de datos en bruto procedentes de las fuentes se aplicó únicamente al caso de las Rias Baixas.

3.3 Interpolación de datos

Para realizar la interpolación en celdas que carecen de valor es necesario utilizar un enfoque de ponderación.

En este sentido, a fecha de realización de este trabajo se plantea como limitación la no utilización de escalas H3 de grano más fino a las indicadas en la Tab. i para cada variable. De no ser así, sería necesario aplicar una interpolación más elaborada de la que se propone. El aumento en la escala implica reducir el tamaño de la celda H3, lo que podría provocar la existencia de agrupaciones de celdas que no contuviesen datos suficientes y afectaría a la precisión y la fiabilidad de los resultados. Por lo tanto, se plantea mantener la escala dentro de los límites establecidos para garantizar que los datos originales sean representados de manera precisa y consistente sin necesidad de interpolaciones complejas adicionales.

En este contexto, y considerando que la escala de grano más fino es la establecida *a priori*, la interpolación empleada sigue un enfoque simple de promedio de valores de celdas vecinas que sí contengan valor. Existe una excepción a la regla en el caso de la batimetría. El enfoque en este caso consiste en tomar el valor mínimo de profundidad de los valores de las celdas vecinas.

3.4 El entorno de visualización

Para finalizar, el entorno de visualización se ha implementado mediante el framework *Flask* para desarrollos de aplicaciones web en Python. La interfaz está estructurada en una secuencia de pasos fácilmente manejables por parte de un usuario, tal y como se ve reflejado en el menú lateral izquierdo de las Figs. 2, 3 y 4. Estos son:

- 1) Definir las coordenadas del punto objetivo a partir del cual se desea obtener información.
- 2) Seleccionar la fecha concreta en la que se desea obtener la información.
- 3) Seleccionar alguna de las variables meteorológicas, oceanográficas o geográficas que se proporcionan.
- 4) Seleccionar el radio de acción en km con centro el punto objetivo de los datos que se desean visualizar.
- 5) Seleccionar la escala H3 para mostrar el grano de fineza de las celdas a visualizar.

Una vez indicados todos los parámetros, el resultado será el mapa en el que punto objetivo aparecerá en el centro del mismo junto con las celdas de resolución elegida en el radio y variable seleccionado.

Así, por ejemplo, en la Fig. 2 se representa la predicción de precipitaciones, donde los valores nulos se muestran con celdas de color transparente, mientras que las demás tienen asignado el color según la barra de colores del lateral derecho. Lo mismo ocurre en el caso de la batimetría (Fig. 4), donde las celdas que representan tierra se muestran de color transparente. En cualquier caso, el usuario puede comprobar los valores por cada celda posicionándose encima. En caso de seleccionar una variable relacionada con el viento, además de mostrar los valores en cada una de las celdas, también se mostrará la dirección que sigue el viento (Fig. 3).

Cabe indicar que en caso de seleccionar una variable de tipo FORECAST (predicción), la herramienta permite visualizar a modo vídeo la previsión realizada de días posteriores, como se observa en la parte superior del mapa de la Fig. 2 y 3. Finalmente, para el caso de la batimetría.

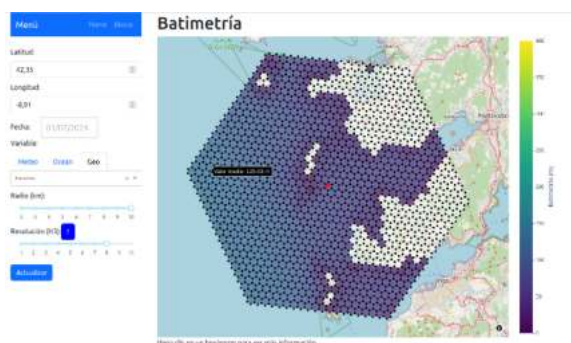


Fig. 4. Batimetría del IHM para la Rías Baixas con radio 10km y resolución 8 de H3.

4. CONCLUSIONES

El sistema desarrollado se enmarca dentro de la ejecución del proyecto vivo POSEIDON del CUD-ENM y ha demostrado ser una herramienta potencialmente muy útil. Su integración en una arquitectura más ambiciosa, con datos procedentes de sensores instalados en plataformas navales, podría maximizar su utilidad. Sin embargo, para aprovechar plenamente el sistema, se necesitan plantear mecanismos de interpolación más eficientes y la inclusión de mayor número de fuentes de datos, sin importar su tipo de mallado, para alcanzar su máximo potencial operativo.

Agradecimientos

Este trabajo se llevó a cabo con el apoyo financiero del proyecto de investigación del Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar (CUD-ENM) con referencia (PICUD-2023-01) con título “Plataforma de desarrollo, ensayo y validación de un gemelo digital oceanográfico (POSEIDON)”, así como también de las ayudas para

financiar estancias cortas en centros de investigación del CUD-ENM, con referencia (PAM_EC_2023-01 y PAM_EC_2023-02). Los autores agradecen IHM por facilitar el acceso a los datos batimétricos de las Rías Baixas.

REFERENCIAS

- Barnes, R., K. Sahr, G. Evenden, A. Johnson, y F. Warmerdam. 2018. «dgggridR: Discrete Global Grids for R». Recuperado 30 de junio de 2024 (<https://zenodo.org/records/1322866>).
- Birch, Colin P. D., Sander P. Oom, y Beecham Jonathan A. 2007. «Rectangular and hexagonal grids used for observation, experiment and simulation in ecology». *Ecological Modelling* 206(3):347-59. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2007.03.041>.
- Brodsky, Isaac. 2018. «Uber’s hexagonal hierarchical spatial index». Recuperado 30 de junio de 2024 (<https://www.uber.com/en-ES/blog/h3>).
- European Commission. 2024. «Copernicus Marine Service». Recuperado 3 de julio de 2024 (<https://marine.copernicus.eu/>).
- Griffiths, Francis, y Melanie Po-Leen Ooi. 2018. «The fourth industrial revolution - Industry 4.0 and IoT [Trends in Future I&M]». *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine* 21(6):29-43. <https://doi.org/10.1109/MIM.2018.8573590>.
- Hewitt, Chris D., y Jason A. Lowe. 2018. «Toward a European Climate Prediction System». *Bulletin of the American Meteorological Society* 99(10):1997-2001. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0022.1>.
- Legler, D. M., H. J. Freeland, R. Lumpkin, G. Ball, M. J. McPhaden, S. North, R. Crowley, G. J. Goni, U. Send, y M. A. Merrifield. 2015. «The current status of the real-time in situ Global Ocean Observing System for operational oceanography». *Journal of Operational Oceanography* 8(sup2):189-200. <https://doi.org/10.1080/1755876X.2015.1049883>.
- MeteoGalicia. 2009. «MeteoSIX». Recuperado 12 de junio de 2024 (https://www.meteogalicia.gal/web/modelos-numericos/meteosix?request_locale=gl).
- Regueiro, M. A., J. R. R. Viqueira, C. Cortizas, P. Díaz, X. Méndez, J. Touriño, J. Parapar, y F. Landeira. 2012. «MeteoSIX: Difusión de datos meteorológicos y oceanográficos en MeteoGalicia». Pp. 79-86 en *Terceras Jornadas Ibéricas de las Infraestructuras de Datos Espaciales (JIIDE 2012)*, 2012/10/17-2012/10/17. Madrid.
- Ruiz, Luis Ángel, Javier Estronell, y Manuel Erena. 2017. *Teledetección. Nuevas plataformas y sensores aplicados a la gestión del agua, la agricultura y el medio ambiente*. Editorial Universitat Politècnica de Valencia.
- Uber. 2023. «H3-py version 3.7.7». Recuperado (<https://github.com/uber/h3-py>).

Modernización del Geoportal de Infraestructuras de Datos Espaciales del Instituto Hidrográfico de la Marina (IdeIHM).

Autores: A. Fernández-Ros (1)

(1) Instituto Hidrográfico de la Marina – España. aferr22@fn.mde.es.

Resumen: el objetivo de la presente ponencia es dar a conocer los avances producidos en cuanto a la modernización del Portal de Infraestructuras de Datos Espaciales del Instituto Hidrográfico de la Marina (IdeIHM) desde su puesta en funcionamiento definitiva en el año 2018. Desde el año 2021 se han llevado a cabo actualizaciones tanto en el diseño del Geoportal como en el visualizador de productos de información náutica basado en herramientas de software libre. Se han incorporado servicios como el Web Coverage Service de la Superficie de Referencia Vertical Hidrográfica, un nuevo servicio de visualización de Cartografía Náutica Electrónica y una Interfaz de Programación de Aplicaciones (API) para acceso a las predicciones de mareas publicadas en el Anuario de Mareas. Por otro lado, y paralelamente, se ha implementado una aplicación para dispositivos móviles, disponible para Android e IOS, con acceso a algunos de los servicios de visualización publicados por el IHM, así como a información de Mareas, distancia entre puertos, información de Señales Marítimas, Catálogo de Cartas Náuticas de Papel y acceso al Grupo de Avisos a los Navegantes. Con estas actuaciones, el IHM pretende continuar con su afán de poner a disposición de la sociedad información náutica digital, cumpliendo así con las distintas normativas europeas y nacionales sobre difusión, uso y reutilización de información del sector público.

Palabras clave: SDI, OGC, Open Source, Servicios Web.

1. INTRODUCCIÓN

El Instituto Hidrográfico de la Marina (IHM), organismo de la Armada de interés público, nacional e internacional, tiene como misión velar por la seguridad en la navegación, mediante la obtención y difusión de información sobre el mar y el litoral, y contribuir al progreso de la ciencia náutica. Además, se le encomienda, como competencia delegada de la Administración del Estado, la formación y conservación de la cartografía náutica básica de España (Ley 7/1986 de Ordenación de la Cartografía y Real Decreto 1545/2007 que desarrolla la ley anterior y regula el Sistema Cartográfico Nacional).

La Ley 14/2010, de 5 de julio, sobre las Infraestructuras y Servicios de Información Geográfica en España (LISIGE), y la Ley 37/2007, de 16 de noviembre, sobre Reutilización de la Información del Sector Público, establecen que las

administraciones públicas deben tomar las medidas oportunas para hacer que la información geográfica (IG) sea más accesible al público, en general mediante la interoperabilidad entre los conjuntos de datos espaciales.

En este sentido, y teniendo en cuenta la demanda, por parte de la sociedad, de información náutica que sirviese como base para obtener productos derivados no necesariamente dirigidos a la navegación, el IHM inició, a mediados de 2013, su andadura en la creación de un nodo experimental IDE denominado «Geoportal de la Infraestructura de datos espaciales del Instituto Hidrográfico de la Marina», con el acrónimo IdeIHM. Este nodo tuvo y tiene como objetivo la publicación de información náutica derivada de los productos oficiales producidos por el IHM. Está abierta al público de forma continua desde julio de 2018.

Desde el año 2021 se han llevado a cabo actuaciones con el fin de modernizar tanto el aspecto visual como la forma de acceso a la información basadas fundamentalmente en herramientas de software libre. En esta ponencia hacemos un breve repaso a estas actuaciones.

2. ASPECTO E IDENTIDAD VISUAL

Uno de los aspectos a destacar en la modernización llevada a cabo ha sido un cambio en la identidad visual del Geoportal así como en el logo de la IdeIHM (Fig. 1.). Para el desarrollo del Geoportal se ha utilizado el Sistema de Gestión de Contenidos (CMS) Wordpress (versión 6.5.5), desarrollado en PHP (versión 7.4.13) y con el uso del sistema de gestión de base de datos MySQL (versión 8.0.26). En la Fig.2., se muestra la página principal de acceso al Geoportal.



Fig. 1. Logo IdeIHM



Fig. 2. Página principal del Geoportal de la IdeIHM.

El menú principal consta de los siguientes ocho accesos:

- Presentación, breve descripción de proyecto de la IdeIHM incluyendo un vídeo sobre el Instituto Hidrográfico de la Marina.
- Inspire-Ide, reseña sobre las directivas e iniciativas en las que se basa la creación del Geoportal, Directiva 2007/2/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 14 de marzo de 2007 por la que se establece una infraestructura de información espacial en la Comunidad Europea (INSPIRE), Iniciativa de la Infraestructura de datos Espaciales de España (IDEE) y el Maritime Spatial Data Infrastructure Group (MSDI) de la Organización Hidrográfica Internacional.
- Servicios Web, descripción de los tipos de servicios y listado de los servicios principales ofrecidos por la IdeIHM.
- Visualizador, aplicación web de acceso a los servicios de visualización y que incluye sencillas herramientas de consulta, edición e impresión.
- Licencias, breve descripción de las limitaciones de uso de la información ofrecida por el Geoportal.
- Legislación, listado de las principales leyes en las que se basa tanto el Geoportal como en la información geográfica que se pone a disposición del usuario.
- Metadatos, acceso a un catálogo de metadatos de información geográfica producida por el IHM.
- Contactar, descripción de las distintas formas de contactar con el IHM.

En los siguientes apartados se describirán los nuevos servicios, herramientas, aplicaciones y tecnologías utilizadas en el desarrollo del proyecto de modernización de la IdeIHM.

3. VISUALIZADOR Y PLUGINS

El nuevo visualizador (Fig. 3) está basado en la herramienta API CNIG (2024), desarrollada a partir de la librería javascript Openlayer 6 y que permite integrar de una forma muy sencilla un visualizador de mapas interactivo en cualquier página web y configurarlo consumiendo ficheros Web Map Context, servicios de visualización y descarga de



Fig. 3. Visualizador de la IdeIHM.

información geográfica, ficheros KML, etc. Además, provee la capacidad de añadir una gran cantidad de herramientas y controles.

Para el visualizador, además de incluir plugins de la API CNIG, se han desarrollado otros personalizados entre los que podemos destacar fundamentalmente dos: el plugin de impresión (Fig. 4), utilizando la herramienta de impresión MapFish Print 3 (2024), que permite generar un mapa (incluyendo todas las capas predefinidas en el visor) tanto en los sistemas de referencia Web Mercator (EPSG:3857) como en una modificación del sistema de proyección World Mercator (EPSG:3395) adaptado al paralelo

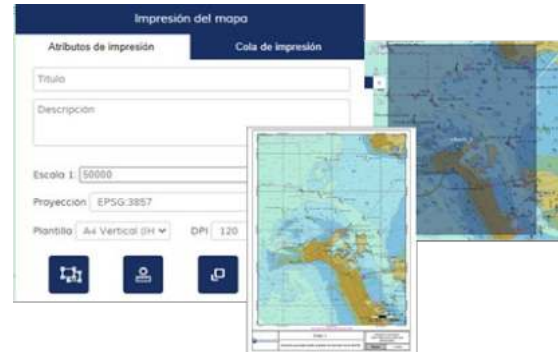


Fig. 4. Aspecto del plugin de impresión e imagen generada por el mismo.

automecoico de la zona de impresión; y el plugin para buscar y acceder a señales marítimas (Fig. 5) que permite el acceso a la información de las luces publicadas en el Libro de Faros y su búsqueda por palabra clave (zona geográfica o número nacional) y/o número de carta, permitiendo acotar la búsqueda al marco de visualización.

4. SERVICIOS

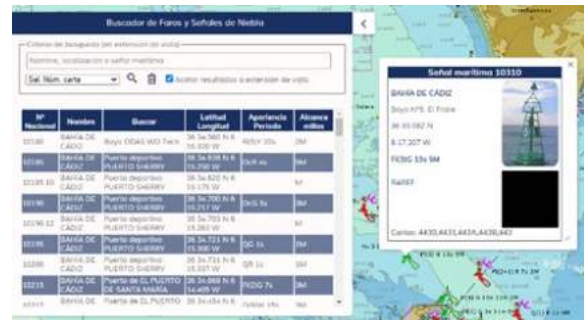


Fig. 5. Aspecto del plugin del buscador de Faros y Señales de niebla y popup de información de una luz.

Desde la IdeIHM se comparten tres tipos de servicios: Servicios de Visualización de Mapas (Web Map Service, WMS), Servicio de Descarga de Entidades Vectoriales (Web Feature Service, WFS) y servicios de Descarga de Datos Raster (Web Coverage Service, WCS). También se publica un Servicio de Catálogo (Catalogue Service Web, CSW). Respecto a las tecnologías utilizadas para la creación de servicios se han utilizado para WMS y WFS los softwares open source MapServer For Windows (2024), ms4w version 4.0.5, y Deegree (2024), versión 3.5.7, montado sobre el contenedor de servlet Apache Tomcat versión 9. Respecto a los servicios WCS se

ha utilizado Mapserver For Windows. Respecto al Servicio CSW se ha utilizado el software open source GeoNetwork (2024) versión 3.10.10.

En el menú de servicios se encuentra un listado con la descripción y las urls de acceso a los servicios WMS, WFS, WCS y CSW producidos por el IHM y de libre disposición para el público en general.

Cabe destacar la implementación de un nuevo servicio WMS para la visualización de información geográfica procedente de la Cartografía Náutica Electrónica (ENC), cuyo aspecto se puede ver en la Fig. 3. Este servicio se ha desarrollado utilizando WMS ChartServer (2024) de © SevenCs, y como característica principal es que permite hacer peticiones de información (GetFeatureInfo) a los objetos que se muestran, y su visualización es configurable para ser muy parecida a la que utilizan las consolas ECDIS (Electronic Chart Display and Information System) que consumen ENC. Este servicio tiene también la posibilidad de ser consumido a través del estándar WMTS (Web Map Tile Service) que sirve la información mediante la definición de una teselación estándar resultando más rápido y eficiente que el servicio WMS.



Fig. 6. WMS Superficie de Referencia Vertical Hidrográfica (SRVH).

Otro de los nuevos servicios que se han implementado es la visualización y descarga raster de la Superficie de Referencia Vertical Hidrográfica (SRVH), WMS y WCS, que se puede ver en la Fig. 6. La SRVH es un modelo que representa, en cada punto del terreno, la separación entre el elipsoide (u otra superficie de referencia como el geode) y el cero hidrográfico, tanto en costa como hacia la mar.

Como servicio complementario se ha implementado una Application Programming Interface (API) desarrollada en python y que permite el acceso a los datos del «Anuario de Mareas» publicado por el Instituto Hidrográfico de la Marina (IHM). El objetivo de esta API, ver Fig. 7., es ofrecer a los usuarios la posibilidad de incrustar los datos de la predicción de Mareas del IHM en sus páginas web, documentos o trabajos a partir de la solicitud a un servicio de peticiones automatizado. Permite, no solo

extraer los datos diarios y mensuales del anuario para una estación en formatos xml, texto o json, sino que también permite obtener el gráfico de predicción de la onda de marea interpolada por días o meses.

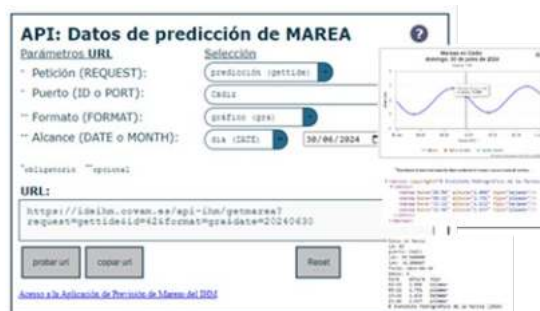


Fig. 7. API de Mareas.

5. APP MOVIL

Con el fin de divulgar la información náutica producida por el IHM, se ha desarrollado una aplicación para dispositivos móviles disponible para los sistemas Android e IOS denominada «IHM Información Náutica», ver Fig. 8.

Esta aplicación permite el acceso al servicio WMTS



Fig. 8. Capturas de pantalla de la aplicación para móviles «IHM Información Náutica»

de Cartografía ENC, la predicción de mareas procedentes de datos del Anuario de Mareas, señales marítimas publicadas en Libro de Faros, Grupo de Aviso a los Navengantes (GAN), Catálogo de Cartas Náuticas de Papel y Distancias entre puertos españoles. Tiene la posibilidad, a través del GPS del dispositivo, de navegación en tiempo real y

determinar las cartas náuticas de papel necesarias para cubrir una determinada ruta.

6. CONCLUSIONES

La puesta a disposición pública del Geoportal de la IdeIHM ha cosegido el objetivo de hacer más accesible la Información Geográfica Náutica producida por el IHM. Las actuaciones llevadas a cabo y descritas en esta ponencia, en cuanto a la modernización del Geoportal así como el desarrollo de la aplicación para dispositivos móviles, demuestran el compromiso del IHM por divulgar de forma fácil y atractiva sus productos cumpliendo así con las distintas normativas europeas y nacionales sobre difusión, uso y reutilización de información del sector público.

Agradecimientos

Estas actuaciones no hubieran podido realizarse sin la colaboración de distintas unidades del Ministerio de Defensa, como la Unidad de Coordinación Cartográfica, por dotar de recursos para la adquisición de las licencias necesarias para la adquisición del software WMS ChartServer (2024) de © SevenCs, el personal de CIGACART, por su apoyo en el mantenimiento de la infraestructura física, y el personal de los distintos departamentos del IHM por sus comentarios, pruebas e ideas para el desarrollo de los distintos aplicativos. Y por último, agradecer al personal de Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG) responsable del desarrollo de la API-CNIG, por su disposición a la hora de aconsejar en el desarrollo del nuevo visualizador.

REFERENCIAS

API-CNIG (2024). Página web de acceso a la API-CNIG. [consulta: 1 de julio de 2024]. Disponible en: <https://plataforma.idee.es/cnig-api>.

Deegree (2024). Página de acceso al proyecto Deegree. [consulta: 1 de julio de 2024]. Disponible en: <https://www.deegree.org/>

GeoNetwork (2024) Página de acceso al proyecto GeoNetwork. [consulta: 1 de julio de 2024]. Disponible en: <https://geonetwork-opensource.org/>

IdeIHM (2024). Página de acceso al Geoportal de Infraestructura de Datos Espaciales del IHM. [consulta: 1 de julio de 2024]. Disponible en: <http://ideihm.covam.es>.

MapFishPrint 3 (2024) Página de acceso a la documentación de la herramienta de

impresión MapFish Print 3. [consulta: 1 de julio de 2024]. Disponible en: <https://mapfish.github.io/mapfish-print-doc/>

MapServer For Windows (2024). Página del acceso al proyecto MapServer para Windows. [consulta: 1 de julio de 2024]. Disponible en: <https://ms4w.com/>

WMS ChartServer (2024) Página de acceso a la descripción del software WMS CharServer. [consulta: 1 de julio de 2024]. Disponible en <https://www.sevencs.com/chartserver/wms-chartserver/>

Strategic Infrastructure for Improved Animal Tracking in European Seas (STRAITS). Gibraltar Strait Curtain

J. Jiménez-Rincón (1)*, A. Aldarias (1), C. González-Cabrera, (1), I. Villar-Menéndez (1), R. Muñoz-Lechuga (1), R. Sánchez-Leal (1).

(1) Instituto Español de Oceanografía (IEO-CSIC), Cádiz, España. *juan.jimenezrincon@ieo.csic.es

Resumen: Understanding animal movement across oceans is vital for marine conservation. The Strait of Gibraltar, a crucial migratory corridor, links the Mediterranean Sea to the Atlantic Ocean. Many important marine species pass through the Strait of Gibraltar. Under The Strategic Infrastructure for Improved Animal Tracking in European Seas (STRAITS) project, an infrastructure has been designed and deployed across the Strait of Gibraltar for animal tracking and environmental monitoring. The marine animal tracking technology utilises acoustic telemetry. When tagged animals move near acoustic receivers, the receiver is able to detect them. The infrastructure, designed considering oceanographic characteristics and maritime traffic, consists of 24 moorings from Algeciras to Ceuta, forming an acoustic curtain to track all tagged animals crossing the strait. Implementation began in November 2023, equipping each mooring with Thelma Biotel acoustic receivers. This infrastructure aims to be permanent and continuously enhanced to collect more environmental in the Strait of Gibraltar.

Palabras clave: Animal tracking, Acoustic telemetry, Environmental monitoring.

1. INTRODUCCIÓN

Dado el rápido cambio que están sufriendo los océanos, se están asignando esfuerzos sustanciales para monitorear sus propiedades clave, es decir, las Variables Oceánicas Esenciales (EOVs; Miloslavich et al., 2018). Durante décadas, se han desarrollado redes avanzadas de sistemas de observación oceanográfica que agregan datos físicos, químicos y climáticos relacionados con las EOVs utilizando diversos tipos de tecnologías. Sin embargo, hay una notable carencia de monitoreo unificado del movimiento de los animales bajo el marco de las EOVs, lo que produce una clara brecha en el progreso para alcanzar objetivos ambiciosos como el Objetivo de Desarrollo Sostenible 14 de las Naciones Unidas, Recursos Marinos (Naciones Unidas, 2018).

Comprender dónde, cuándo y por qué los animales se desplazan a través de los océanos es esencial para la conservación marina. Esta comprensión no solo ayuda a proteger especies vulnerables, sino que también aporta información clave para la sostenibilidad de los recursos marinos de los que dependen directa o indirectamente la sociedad.

Para abordar la necesidad de un seguimiento detallado y efectivo de estos movimientos migratorios, se ha desarrollado el proyecto *Strategic Infrastructure for Improved Animal Tracking in European Seas* (STRAITS, mas información en: <https://www.europeantrackingnetwork.org/straits>).

En el desarrollo de este proyecto colaboran diferentes instituciones internacionales como la Univesidad Técnica de Dinamarca (DTU), y naciones como el Instituto de Investigación y Formación Agraria y

Pesquera (IFAPA), y el Instituto Español de Oceanografía (IEO).

Este proyecto se centra en la implementación de infraestructuras avanzadas de seguimiento de animales marinos y monitoreo ambiental. Estas infraestructuras están situadas en los principales estrechos que conectan los mares europeos, permitiendo observar las migraciones de diversas especies marinas entre ellos. Estos estrechos incluyen los estrechos daneses, el Canal del Norte, los estrechos turcos y el Estrecho de Gibraltar.

El Estrecho de Gibraltar es uno de los corredores migratorios más importante, siendo el único punto de conexión entre el Mar Mediterráneo y el Océano Atlántico. Muchas especies marinas de alto valor económico y ecológico entran y salen del Mar Mediterráneo y para ello pasan por este estrecho (Rooker et al., 2014; Medina et al., 2022). Por ello, el monitoreo de los movimientos de animales en este área es esencial para generar conocimiento del porque de estas migraciones.

La tecnología central del proyecto es la telemetría acústica, una técnica que permite rastrear los movimientos de los animales mediante el uso de transmisores y receptores acústicos (Matley et al., 2022).

La telemetría acústica está basada en el marcado de animales marinos con transmisores que emiten señales acústicas que son escuchadas por un receptor geolocalizado. Cuando el animal marcado se mueve cerca de un receptor acústico, el receptor detecta la señal del transmisor y registra la presencia del animal. Esta tecnología ha demostrado ser una herramienta poderosa para el estudio de los patrones de movimiento de las especies marinas.

El objetivo a largo plazo del proyecto STRAITS es que esta infraestructura sea permanente y continuamente mejorada. Con el tiempo, se espera que la recopilación continua de datos permita una mejor comprensión de los patrones migratorios y los factores ambientales que los afectan. Además, estos datos pueden informar políticas de conservación y gestión, asegurando que las especies marinas que dependen del Estrecho de Gibraltar para sus migraciones reciban la protección adecuada.

2. DESARROLLO

Para el diseño de la cortina acústica se llevó a cabo un estudio previo donde se barajaron diferentes alternativas de localización. En este estudio, se recopilaban observaciones oceanográficas detalladas y se consideraron cuidadosamente las áreas de pesca, tráfico marítimo, así como las condiciones batimétricas y dinámicas de las corrientes. El objetivo de este estudio fue minimizar los riesgos asociados y maximizar la efectividad del despliegue.

Después de evaluar las diferentes alternativas, se determinó que la ubicación óptima para la cortina acústica sería una sección transversal en el Estrecho de Gibraltar entre Algeciras y Ceuta (Fig. 1). La cortina acústica consta de un total de 24 fondeos que cubren el Estrecho de Gibraltar, asegurando una cobertura completa y eficaz en esta área.

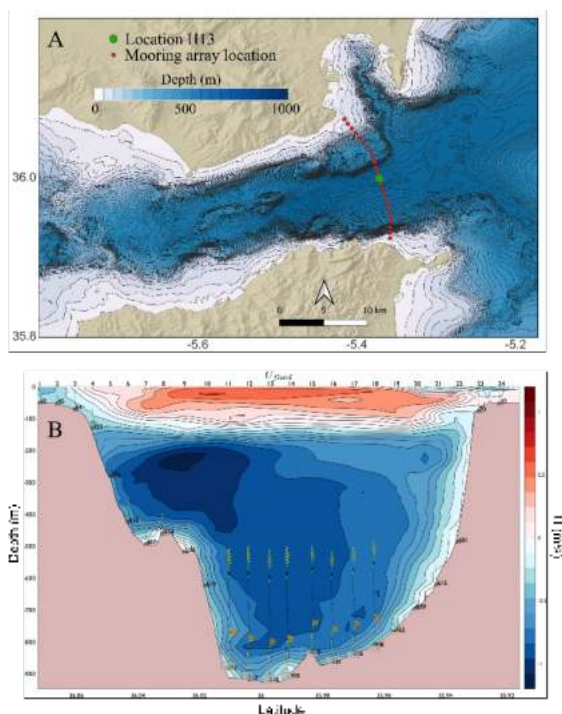


Fig. 1. Diseño de la cortina acústica en el Estrecho de Gibraltar para el seguimiento de los movimientos de diferentes especies marinas. A: Mapa de la localización de la cortina, donde los puntos rojos representan las posiciones de los diferentes fondeos, y el punto verde el fondeo para el test de rango. B: Sección vertical de la componente zonal de la corriente a lo largo de la sección transversal del Estrecho de Gibraltar, datos de simulaciones numéricas de MITGCM. También se muestran la estructura vertical de las líneas de fondeo.

Previo a la instalación, se realizó un test de rango de diferentes receptores acústicos para evaluar la viabilidad de la telemetría acústica y determinar la distancia máxima de detección en las condiciones específicas del Estrecho de Gibraltar. Para ello se realizó un fondeo equipado con diferentes receptores acústicos en la localización más profunda del diseño de la cortina (punto verde, Fig. 1A). Los resultados del test fueron prometedores, con distancias de detección máxima alcanzando hasta 750 metros, lo que asegura un despliegue adecuado de la cortina acústica con receptores separados 750 metros entre sí, asegurando una cobertura completa a lo largo de la sección.

El despliegue de la cortina acústica se llevó a cabo en noviembre de 2023. Cada uno de los fondeos está equipado con receptores acústicos TBR 800 de Thelma Biotel. El TBR 800 es un receptor acústico que opera en el rango de frecuencia de 63-77 kHz, utilizando tecnología avanzada de procesamiento de señal digital de bajo consumo. Este receptor es compatible con la mayoría de los protocolos de comunicación utilizados por diferentes compañías, lo que permite detectar animales marcados con múltiples tecnologías. Además, lleva instalado un sensor de temperatura que monitorea las variaciones de esta variable a lo largo de toda la sección transversal.

Actualmente, la cortina acústica está operativa y recopilando datos valiosos sobre el paso de especies marinas a través del Estrecho de Gibraltar, así como las variaciones de temperatura del agua, contribuyendo a los esfuerzos de comprensión del ecosistema marino. En un principio, los fondeos permanecerán 1 año completo desplegados, por lo que en noviembre del 2024 se comenzarán las tareas de mantenimiento y recopilación de datos. La información recopilada en este primer despliegue será esencial para abordar los desafíos de mejora e implementación permanente.

Las detecciones de la cortina acústica se integrarán en las bases de datos de la Red de Seguimiento Oceánico (OTN, <https://oceantrackingnetwork.org>) y la Red de Seguimiento Europea (ETN, <https://www.europeantrackingnetwork.org>), permitiendo que los investigadores de todo el mundo utilicen estos datos. La OTN y la ETN son redes de monitoreo con experiencia en el sector que facilitan la recopilación y el intercambio de datos sobre los movimientos y comportamientos de las especies marinas. Al contribuir a estas redes, se potenciará la cooperación internacional y se ampliará el alcance y la profundidad de los estudios sobre el comportamiento de las especies marinas, los patrones de migración y las dinámicas ecológicas en el Estrecho de Gibraltar.

Este despliegue de la cortina acústica representa el primer paso en un ambicioso proyecto de monitoreo marino en el Estrecho de Gibraltar. Esta

infraestructura está diseñada para estar en continua mejora y expansión, con planes futuros para incorporar tecnologías adicionales y ampliar el monitoreo a más variables ambientales, como la salinidad, pH, concentración de oxígeno, entre otras. Este enfoque progresivo permitirá una comprensión más integral del ecosistema marino y sus dinámicas.

3. CONCLUSIONES

La implementación de esta infraestructura en un punto clave como el Estrecho de Gibraltar, representa un avance significativo en la capacidad de los científicos para monitorear y comprender la dinámica de las migraciones marinas.

Agradecimientos

Agradecer al programa europeo de desarrollo de infraestructuras científicas (HORIZON-INFRA-2022-DEV-01) por la financiación del proyecto STRAITS (DOI: 10.3030/101094649).

REFERENCIAS

Artículos en revistas:

- Rooker, J. R., Arrizabalaga, H., Fraile, I., Secor, D. H., Dettman, D. L., Abid, N., ... & Santos, M. N. (2014). Crossing the line: migratory and homing behaviors of Atlantic bluefin tuna. *Marine Ecology Progress Series*, 504, 265-276.
- Matley, J. K., Klinard, N. V., Martins, A. P. B., Aarestrup, K., Aspillaga, E., Cooke, S. J., ... & Fisk, A. T. (2022). Global trends in aquatic animal tracking with acoustic telemetry. *Trends in Ecology & Evolution*, 37(1), 79-94.
- Medina, A., Magro, A., Macías, D., & Varela, J. L. (2022). Monitoring the reproductive status of resident and migrant Atlantic bluefin tuna in the Strait of Gibraltar. *Marine Ecology Progress Series*, 697, 97-108.
- Miloslavich, P., Bax, N. J., Simmons, S. E., Klein, E., Appeltans, W., Aburto-Oropeza, O., ... & Shin, Y. J. (2018). Essential ocean variables for global sustained observations of biodiversity and ecosystem changes. *Global Change Biology*, 24(6), 2416-2433.
- Naciones Unidas (2018), *La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe* (LC/G.2681-P/Rev.3), Santiago.

Cruzeiros científicos

A. Nobre (1), S. Pinheiro (1)

(1) Instituto Hidrográfico. ana.nobre@hidrografico.pt.

Resumo: A realização de cruzeiros científicos internacionais em águas sob soberania e jurisdição nacional, por estados, entidades estrangeiras ou organizações internacionais, depende de um processo de autorização solicitado pela embaixada do país requerente ao Estado Português, através do Ministério dos Negócios Estrangeiros. Neste processo, o Instituto Hidrográfico possui a incumbência de realizar um parecer de caráter técnico-científico, no qual participam especialistas de diferentes áreas.

No âmbito do projeto MarIA, encontra-se em desenvolvimento, na infraestrutura de dados geoespaciais marinhos do Instituto Hidrográfico (Hidrográfico+), o sistema de gestão de cruzeiros científicos internacionais. Este sistema permite o carregamento, armazenamento, apresentação e análise geoespacial do catálogo de campanhas oceanográficas levadas a cabo por entidades estrangeiras no espaço marítimo de interesse nacional. O catálogo pode ser visualizado, pesquisado e consultado no geoportal Hidrográfico+ pelos vários utilizadores, navegantes e comunidade científica, que podem encontrar dados, atributos e relatórios recolhidos no âmbito das varias missões oceanográficas.

Palavras chave: cruzeiros científicos, geoportal, infraestrutura de dados geoespaciais marinhos.

1. INTRODUÇÃO

A Convenção das Nações Unidas sobre os Direitos do Mar (CNUDM), celebrada em 1982, na cidade de Montego Bay, Jamaica, e ratificada por Portugal em outubro de 1997, conferiu ao Estado Português direitos de soberania ou jurisdição sobre um vasto espaço marítimo (Silva, 2015).

Estes espaços marítimos dividem-se em: Águas Interiores, Mar Territorial, Zona Económica Exclusiva, Plataforma Continental e Região de Busca e Salvamento Marítimo (Pacheco, 2014).

Enquanto o artigo 238º da CNUDM estabelece que todos os Estados, independentemente da sua situação geográfica, têm o direito de realizar investigação científica marinha, o artigo 240º indica que:

“1. Deve ser realizada exclusivamente com fins pacíficos.

2. Deve ser realizada mediante métodos e meios científicos apropriados.

3. Não deve interferir injustificadamente com outras utilizações legítimas do mar.

4. Deve ser realizada nos termos de todos os regulamentos pertinentes adotados de conformidade com a CNUDM, incluindo os relativos à proteção e preservação do meio marinho”.

O artigo 1º do Decreto-Lei (DL) nº52/85 define “normas gerais sobre gestão, conservação e exploração dos recursos vivos, sistemas e serviços de informação,(...), assim como o regime e procedimentos de autorização a que ficam submetidas as atividades de prospeção e de investigação científica”.

De acordo com o artigo 18º do referido DL, as atividades de investigação científica por estados ou

entidades estrangeiras ou organizações internacionais dependem da autorização do Ministério dos Negócios Estrangeiros, depois de obtido parecer favorável do Ministério da Defesa Nacional (MDN) e dos outros departamentos ministeriais a que diretamente respeitem.

Os pedidos de autorização são solicitados pela embaixada ao Estado Português através de uma nota verbal, e segundo o artigo 19º, do mesmo DL, com a antecedência de seis meses em relação à data prevista para o início do projeto. O pedido de autorização, deve ser acompanhado por uma descrição completa, devendo obrigatoriamente incluir os seguintes elementos (referenciados no artigo 248º da CNUDM):

- a) A natureza e os objetivos do projeto;
- b) O método e os meios a utilizar, incluindo a identificação, a tonelagem, o tipo e as características principais dos navios ou outras estruturas flutuantes, assim como a descrição do equipamento científico.
- c) As áreas geográficas onde o projeto se vai realizar, bem como os portos nacionais em que se prevê terem de entrar os navios;
- d) O calendário e datas previstos da primeira chegada e partida definitiva dos navios de investigação ou da instalação e remoção de equipamento;
- e) Os nomes da instituição patrocinadora, do seu diretor e da pessoa encarregada do projeto;
- f) A indicação das disponibilidades existentes para a participação de cientistas e técnicos portugueses no projeto.

Relativamente ao pedido de autorização realizado pela embaixada que representa a entidade interessada,

o MDN reencaminha-o para o Gabinete do Chefe do Estado Maior da Armada (CEMA)/Autoridade Marítima Nacional (AMN). Esta entidade é responsável por coordenar o processo no âmbito da Marinha/AMN, procedendo à recolha dos pareceres dos demais organismos com competência na matéria, e emitindo o parecer final da Marinha/AMN. Neste contexto, são auscultados o Estado-Maior da Armada (EMA), o Comando Naval (COMNAV) e o Instituto Hidrográfico (IH) (Silva, 2015).

De facto, o Decreto-Lei nº230/2015, de 12 de outubro, indica que uma das atribuições do IH é a de pronunciar-se sobre os pedidos de cruzeiros de investigação científica estrangeiros em águas nacionais e acompanhar a sua realização.

No IH, é assim realizado um parecer onde são consultados especialistas das seguintes divisões técnicas: Oceanografia, Segurança da Navegação, Hidrografia, Geologia Marinha e Química e Poluição do Meio Marinho.

O parecer é enviado então para a Direção-Geral da Autoridade Marítima (DGAM) que, tal como referido, realiza o parecer final. Este parecer informa a instituição requerente dos vários requisitos impostos para a realização do cruzeiro/campanha.

A concessão das autorizações obriga, ainda, a entidade investigadora a garantir, sempre que solicitado, a participação de cientistas e técnicos portugueses no projeto, e fornecer ao Estado Português os relatórios preliminares e, uma vez terminada a investigação, os resultados e as conclusões finais. Deverá ainda facultar o acesso aos dados e amostras resultantes do projeto, fornecer uma avaliação dos dados e amostras, e ajudar o Estado português na sua avaliação ou interpretação (Silva, 2015).

Neste artigo, é descrito o procedimento de registo dos cruzeiros científicos internacionais e a disponibilização deste catálogo na infraestrutura de dados e informação geoespacial marinha Hidrográfico+ (H+).

2. DESENVOLVIMENTO

A infraestrutura H+ está a ser desenvolvida para ser um ponto único de acesso a todos os dados do Instituto Hidrográfico que fornece um conjunto de serviços e funcionalidades aos utilizadores internos e externos (Nunes et al., 2020). No âmbito do projeto MarIA – Plataforma de Inteligência Artificial para o Mar – foi recentemente adicionada a componente de gestão dos cruzeiros científicos internacionais.

Esta nova funcionalidade está disponível através do geoportal de desenvolvimento do projeto H+: (<https://deidev-geoportal.hidrografico.pt/>),

nomeadamente através do botão “Abrir o menu das Campanhas Oceanográficas Internacionais” (Figura 1).

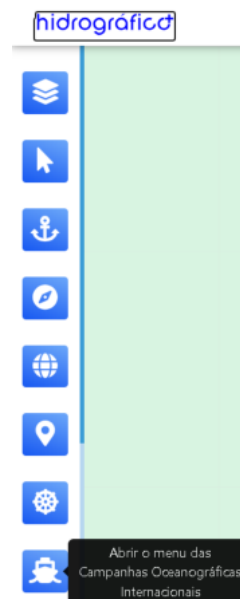


Fig. 1. Geoportal de desenvolvimento

A infraestrutura H+ é constituída por um conjunto de servidores, onde foi instalado o software de Sistema de Gestão de Base de Dados (SGBD) PostgreSQL, que armazena os dados geográficos, bem como os dados administrativos de cada cruzeiro. Esta inserção é realizada através da componente backoffice (https://supportserver2.hidrografico.pt/table/campaig_n), apenas por utilizadores credenciados, através do formulário “Cruzeiros”.

Existem, ainda, uma série de formulários/tabelas que permitem o carregamento de atributos tais como “Campanha”, “Instituição”, “Instrumento”, “Investigador”, “Método”, “Navio”, entre outros (Figura 2).

Campanhas Oceanográficas



Fig. 2. Formulários de inserção de dados das campanhas oceanográficas internacionais

Apresenta-se de seguida, nas figuras 3 e 4, o formulário referente aos cruzeiros. É de salientar que a maior parte dos campos é de escolha múltipla pois os dados são previamente inseridos nos formulários anteriormente referidos. Por exemplo, o navio é seleccionado de uma lista de nomes (previamente inseridos no formulário “Navios”).

Fig. 3. Formulário de inserção de dados de cruzeiros

Fig. 4.. Formulário de inserção de dados de cruzeiros

A localização geográfica de cada campanha é diretamente carregada no formulário “Cruzeiros” com o formato de pontos (estações), linhas (fiadas) e áreas. Estes dados são visualizados através do geoportal H+. A figura 5 revela a geometria do projeto WINDFLOAT2019, em que foram inseridos quatro pontos e uma área.



Fig. 5. Dados geoespaciais visualizados no geoportal de desenvolvimento hidrográfico+

De um modo geral, o IH quando realiza o parecer solicita os relatórios, metadados e dados obtidos em cada campanha oceanográfica. Os relatórios, geralmente enviados pelas entidades estrangeiras em formato PDF, são inseridos no formulário de cruzeiro através do respetivo URL (Figura 6).

Fig. 6. Relatórios disponíveis através de URL

3. RESULTADOS

Dado o considerável número de pedidos de autorização de cruzeiros científicos que anualmente são recebidos no IH, o sistema de gestão em estudo torna-se importante para facilitar a introdução, visualização, pesquisa e análise dos dados geoespaciais e obtenção mais célere do parecer.

O catálogo de cruzeiros científicos internacionais, que pode ser consultado no geoportal de desenvolvimento H+, permite a pesquisa por:

- Área geográfica;
- Atributos distintos tais como data, navio, nacionalidade do navio, cientista chefe, instituição (Figura 7)

Fig. 7. Pesquisas de atributos no geoportal de desenvolvimento H+

A título de exemplo, uma pesquisa pelo navio “PELAGIA” revela a localização geográfica dos vários cruzeiros realizados no navio selecionado (Figura 8). A hiperligação “Ver relatório” permite a exportação para ficheiro PDF e a verificação de informação diversificada tal como nome da campanha, país do cruzeiro, projeto, datas de início e fim, nome do navio, país do navio, escala, nome dos cientistas, instituições e relatório.



Fig. 8. Resultado de uma pesquisa

O sistema de gestão de cruzeiros científicos internacionais contém, assim, dados geoespaciais e atributos de campanhas oceanográficas que decorreram desde o ano de 2005 até ao presente ano de 2024. Em termos de resumo, contém as seguintes funcionalidades:

- Carregamento e armazenamento da geometria e atributos das campanhas e eventualmente de relatórios finais (quando disponibilizados);
- Visualização de dados geoespaciais dos cruzeiros e respetiva informação descritiva, o que permite a sua eficiente análise no âmbito da emissão de pareceres;
- Consulta/pesquisa de acordo com a data, localização geográfica e alguns atributos e geração de ficheiro PDF com a informação consultada.

Pretende-se que, com o seu contínuo desenvolvimento, esta plataforma contenha uma variada panóplia de dados e relatórios obtidos no decorrer das campanhas oceanográficas e que, desta forma, seja consultado pelos navegantes e comunidade científica, que aqui podem encontrar dados geográficos e relatórios relativos ao espaço marítimo de interesse nacional.

4. CONCLUSÕES

O sistema de gestão de cruzeiros científicos internacionais, implementado através do geoportal de desenvolvimento Hidrográfico+, é uma ferramenta fundamental no carregamento, armazenamento, visualização e análise dos dados e atributos das campanhas oceanográficas levadas a cabo por entidades estrangeiras.

Este sistema constitui uma ferramenta de apoio relativamente à emissão dos pedidos de autorização e com a contínua adição de relatórios e dados será certamente uma mais valia para navegantes e comunidade científica em geral.

Em termos de trabalho futuro, é importante relacionar as campanhas com os vários equipamentos utilizados.

REFERÊNCIAS

- Convenção das Nações Unidas sobre o Direito do Mar (1982), de 10 de dezembro. Acedido em julho, 2024, no endereço [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:21998A0623\(01\)&from=EL](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:21998A0623(01)&from=EL)
- Decreto-Lei nº230/2015, de 12 de outubro. Acedido em julho, 2024, no endereço <https://www.hidrografico.pt/recursos/files/legislacao/20151012-Decreto-Lei-230-2015.pdf>
- Decreto-Lei nº52/85, de 1 de março.
- Nunes, P., Saraiva, S., Almeida, S. (2020). Hidrográfico+: O desenvolvimento de uma infraestrutura de dados e informação geoespacial marinha. 6^{as} Jornadas de Engenharia Hidrográfica / 1^{as} Jornadas Luso-Espanholas de Hidrografia.
- Pacheco, M. B. (2014). A geografia marítima de Portugal. O Mar no Futuro de Portugal. Ciência e Visão Estratégica. Acedido em julho, 2024, no endereço https://www.academia.edu/11618658/_A_geografia_Mar%C3%ADtima_de_Portugal_O_MAR_NO_FUTURO_DE_PORTUGAL_CI%C3%8ANCIA_E_VIS%C3%83O_ESTRAT%C3%89GICA
- Silva, J. (2015). Os Cruzeiros de Investigação Científica Estrangeiros nas Zonas Marítimas Sob Soberania ou Jurisdição Portuguesa, Revista de Ciências Militares III (1), 241-267.

POSEIDON: Plataforma de desarrollo, ensayo y validación de gemelos digitales oceanográficos

C. Pérez-Collazo (1), M. Fernández-Gavilanes (1), J.A. González-Prieto (1) y P. Sendín-Raña (1)

(1) Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar, Plaza de España s/n, 36920, Marín, España. (CPC) carlos.perez.collazo@tud.uvigo.es

Resumen: La aplicación de las Tecnologías de la Información y la Comunicación es un tema crucial en la transformación digital de la economía. La creación de gemelos digitales avanzados desempeña un papel fundamental en este proceso, ya que permite una gestión eficiente de los recursos disponibles y una integración inteligente de datos espaciales en un entorno en constante cambio, como lo es el medio marino. El objetivo de este trabajo es establecer los requisitos y sentar las bases para la definición de la arquitectura del proyecto POSEIDON, donde se busca implementar una plataforma que permita desarrollar, ensayar y validar gemelos digitales oceanográficos. En particular se ha procedido a definir los requisitos iniciales de la plataforma, se han identificado las fuentes de datos relevantes para ser implementadas en un sistema de apoyo a la navegación y se ha propuesto una arquitectura de validación en base a una serie de casos de uso tipo.

Palabras clave: SIG, Gemelo Digital, Oceanografía, Meteorología.

1. INTRODUCCIÓN

La cuarta revolución industrial en la que se encuentra inmersa nuestra sociedad viene fomentada por el desarrollo e implantación de las conocidas como tecnologías 4.0 (F. Griffiths y M. Ooi 2018). Tecnologías estas que tienen su razón de ser en la forma en la que tratamos y analizamos los datos, lo cual, sin duda, está cambiando la forma en la que interaccionamos con el mundo físico que nos rodea, permitiendo establecer la definición de las conocidas como “realidades híbridas”, donde el dominio físico se entrelaza con “la nube” o dominio virtual (European Commission et al. 2023).

Una de las tecnologías 4.0 con más potencial de desarrollo, son los conocidos como gemelos digitales (Fig. 1). Estos no son más que modelos informáticos que permiten simular, monitorizar y predecir la realidad mediante replicas virtuales del mundo físico (Kritzinger et al. 2018).

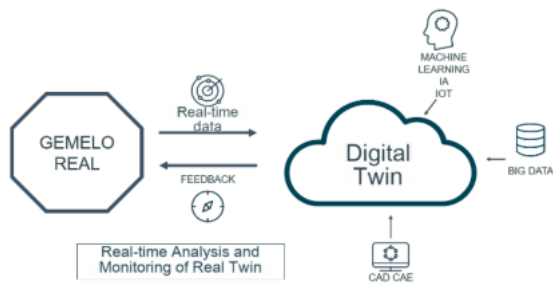


Fig. 1. Representación conceptual del Gemelo Digital (García Valera, Fernández Gavilanes, y Pérez-Collazo 2023).

En oceanografía, a los gemelos digitales se los conoce como gemelos digitales del océano u oceanográficos (GDO). En los últimos años están ganando relevancia desde el mundo académico, impulsados por iniciativas políticas que buscan su uso como palancas

que permitan la transformación de la economía azul (Chen et al. 2023). Los GDO se centran en el modelado de los ecosistemas marinos, como una representación virtual del mundo real, integrando datos de procesos físicos, químicos, biológicos y socioeconómicos del océano (Brönnner, Sonnewald, y Visbeck 2023).

El desarrollo del GDO está siendo promovido, principalmente, por instituciones internacionales mediante proyectos como EDITO (EDITO Infra 2024), ILIAD (ILIAD 2024) o DECADE-DITO (DITTO 2024). Estos proyectos buscan definir gemelos digitales ecosistémicos mediante la integración fuentes de datos masivas abiertas, provenientes de organizaciones internacionales como por ejemplo EMODnet (European Commission 2024b), y Copernicus (European Commission 2024a), y nacionales, como por ejemplo IHM (Instituto Hidrográfico de la Marina 2024), Puertos del estado (Puertos del Estado 2024) y Meteogalicia (Meteogalicia 2024).

El objetivo principal del presente trabajo consiste en establecer los requisitos y sentar las bases para definir la arquitectura de una plataforma de desarrollo, ensayo y validación de gemelos digitales oceanográficos, la cual se enmarca en el proyecto de investigación POSEIDON del Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar (CUD-ENM). Esta tarea se ha llevado a cabo en tres fases: (i) en primer lugar se definen los requisitos iniciales de la plataforma; (ii) a continuación se define in entorno de validación para definir un GDO como sistema aumentado de ayuda a la navegación (SAAN), identificando fuentes de datos y definiendo el ámbito geográfico; y (iii), por último, se define una arquitectura de validación en base a una serie de casos de uso.

El resto del documento se estructura como sigue: la sección 2 aborda la definición de los requisitos iniciales que ha de tener la plataforma POSEIDON para poder trabajar con GDO; la sección 3 define el entorno de validación necesario para crear un GDO-SAAN; la sección 4 presenta una arquitectura que permita implementar y validar POSEIDON; y finalmente, la sección 5 recoge las principales conclusiones extraídas del presente trabajo.

2. DEFINICIÓN DE REQUISITOS

El GDO como sistema aumentado de ayuda a la navegación (GDO-SAAN) surge de la necesidad de conocer el estado del entorno marítimo en tiempo real, de tal forma que dé respuesta a las necesidades crecientes de información sobre el medio marino, y permita así incrementar la seguridad y la eficiencia energética en el transporte marítimo (Mihoc y Cater 2017).

A continuación, se detallan algunos de los requisitos iniciales que ha de tener la plataforma POSEIDON, para que esta permita el desarrollo y validación de un GDO-SAAN:

- **Ser geoconsciente.** Ha de permitir que la embarcación o vehículo usuaria del sistema pueda, a partir de su posición GPS u otros mecanismos de geolocalización disponibles, adquirir geoconsciencia de su entorno próximo, lo cual implica el acceso a bases de datos geoespaciales.
- **Integrar información METOCEAN.** Ha de permitir el acceso a información meteorológica y oceanográfica, tanto a datos de modelos de predicción y reanálisis (climáticos) como a valores observados.
- **Complementar a los sistemas de ayuda a la navegación convencionales:** Ha de poder integrar el acceso a cartas náuticas o datos batimétricos, a la vez que complementar a otro tipo de sistemas como por ejemplo el radar, la navegación inercial o el sistema AIS.
- **Permitir la determinación de rumbos y derrotas.** Ha de poder establecer los rumbos y derrotas seguidos por los usuarios, así como determinar alternativas a seguir, en función de la información contenida en el gemelo, en caso de que sea necesario modificar la ruta planificada.
- **Permitir la fusión de datos observados en el entorno local.** Ha de permitir la integración y fusión de datos observados localmente por los usuarios y/o redes de sensores distribuidas, tales como por ejemplo vehículos no tripulados y boyas oceanográficas, que se encuentran en el entorno de la embarcación.
- **Integrar un sistema Big Data.** Ha de estructurarse en torno a un sistema Big Data que recopile datos de las fuentes de información en la web o locales.

- **Plantearse como un sistema distribuido.** Ha de definirse en torno a una arquitectura distribuida que permita tener diferentes tipos de sistemas descentralizados, de tal forma que el acceso a los datos masivos sea eficiente y adecuado a las diferentes regiones geográficas, y además permita establecer unas garantías de robustez mínimas en las respuestas obtenidas.
- **Plantearse como un sistema multinivel.** Ha de definirse en base a una arquitectura multinivel, que permita tener diferentes niveles de jerarquía en el sistema, asignado roles diferenciados a cada nivel.
- **Adaptarse a entornos con comunicaciones limitadas.** Ha de adaptarse a entornos marinos, donde las comunicaciones son muy variables, de forma que puede producirse transiciones de zonas cercanas a la costa con acceso a redes de comunicación de altas prestaciones (5G), a zonas en alta mar, donde las redes de comunicación disponibles se limitan al uso de constelaciones de satélites, mucho más limitadas en ancho de banda.

3. ENTORNO DE VALIDACIÓN

Una vez definidos los requisitos del apartado anterior, es momento ahora de proponer un caso de estudio que sirva de punto de partida para la implementación de POSEIDON.

3.1 Ambito geográfico

La plataforma que se plantea en POSEIDON limita su ámbito geográfico a la zona de actuación habitual de las embarcaciones que forman parte de la Escuela Naval Militar, ubicada en la Ría de Pontevedra en el Noroeste de la España. Delimitándose este a la zona de las Rías Baixas, con un área que limita con Finisterre, al norte, y la desembocadura del Río Miño, al sur (Fig. 2).



Fig. 2. Zona geográfica de cobertura de POSEIDON.

3.2 Fuentes de datos

Considerando que el objetivo del proyecto POSEIDON es definir una plataforma que permita desarrollar, ensayar y validar un GDO-SAAN, se propone un sistema Big Data escalable, que permita incorporar nuevas fuentes de datos a medida que se van definiendo y poniendo en práctica nuevas funcionalidades de este. Es por esto, que se ha

limitado las fuentes de datos a considerar en esta fase del proyecto a tres tipos:

Datos hidrográficos

Dentro de este tipo de datos podemos diferenciar claramente dos grupos: (i) las batimetrías de alta resolución, del Instituto Hidrográfico de la Marina y otras de mayor cobertura global como EMODnet o GEBCO (GEBCO 2024), aunque de menor resolución; y (ii) los servicios web de datos geoespaciales WMS (*web map services*) y WFS (*web feature server*).

Cabe resaltar el servicio de información geográfica dependiente de la Infraestructura de datos Espaciales del Instituto Hidrográfico de la Marina (IdeIHM), es sin duda una de las fuentes de datos esenciales. Entre los servicios prestados por el IdeIHM, que son de interés para este trabajo, se encuentran, por ejemplo: la cartografía náutica electrónica, las líneas de costa y los límites marítimos.

Datos meteorológicos

Estos datos son relativos al comportamiento de la atmósfera, describiendo fenómenos físicos como, por ejemplo, el viento, las precipitaciones, la nubosidad, la temperatura, la presión atmosférica y la visibilidad.

Las fuentes de datos más destacables son agencias meteorológicas como AEMET o MeteoGalicia, de las cuales se pueden obtener datos de sus redes de observación o de sus modelos numéricos de predicción.

Datos oceanográficos

Análogamente al caso anterior, los datos oceanográficos el comportamiento del océano, principalmente describiendo fenómenos físicos como, por ejemplo: el oleaje y las corrientes, la salinidad, la temperatura del agua o la turbidez.

Las fuentes de datos más destacables son, bien agencias meteorológicas (como en el caso anterior), bien agencias estatales como Puertos del Estado, o europeas como Copernicus.

4. ARQUITECTURA PROPUESTA

Para el desarrollo del GDO-SAAN planteado por POSEIDON se propone una arquitectura distribuida multinivel, que permita el desarrollo de aplicaciones de software y su posterior validación en un entorno operativo real. La Fig. 3 esboza los tres niveles en los que se estructura la arquitectura propuesta en POSEIDON:

- **Nivel 1:** un nodo central, capaz de integrar datos procedentes de unificar diferentes tipos de datos de diversas fuentes, a la vez que permite su consulta.
- **Nivel 2:** un nodo embarcado en un buque que tenga capacidad de consulta del nodo central, y que a su vez pueda alimentar de información al nivel 1, y además con capacidad de integrar datos de su propia red de sensores y que se alimente de los nodos de apoyo. Este nivel se encarga de tratar datos del entorno marítimo a nivel local, dentro del área de influencia del buque. La integración de datos locales al GDO generado en el nivel 1 permite así incrementar las capacidades del nodo embarcado.
- **Nivel 3:** una red de sensores distribuida, bien fijos o a bordo de vehículos no tripulados, capaces de alimentar con datos locales al GDO de niveles 1 y 2. Este nivel lleva a la práctica el uso de la tecnología IoT y Big Data para integrar en tiempo real datos recogidos de redes de sensores distribuidos (ej., redes de boyas oceanográficas, y sensores acústicos fijos en el fondo marino), así como datos de vehículos no tripulados.

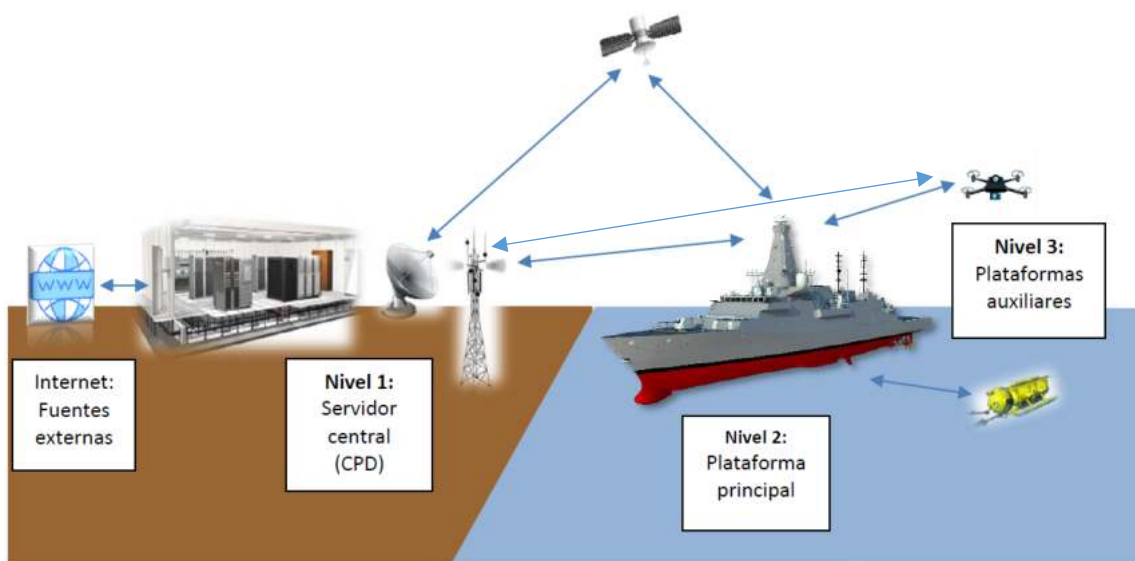


Fig. 3. Arquitectura de POSEIDON (Ramírez Morán 2024).

El funcionamiento básico de la arquitectura propuesta requiere que un usuario del Nivel 2, consulte la información contenida en el GDO generado en el Nivel 1, para una posición específica. El Nivel 1, facilitará la información requerida dentro de un radio de acción definido según las particularidades de la navegación en curso. El GDO local, ahora funcional desde el Nivel 2, se verá completado mediante la fusión con datos de sensores locales, bien a bordo del mismo buque o bien de un Nivel 3, esto es, vehículos autónomos o redes de sensores inteligentes.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se recogen parte de los resultados iniciales del proyecto del CUD-ENM POSEIDON. Dónde aborda la definición inicial de una plataforma de desarrollo, ensayo y validación de gemelos digitales oceanográficos, entendidos estos como un sistema aumentado de ayuda a la navegación.

Se han analizado los requisitos que un GDO ha de implementar para que este sea funcional como SAAN, definiendo un marco de desarrollo futuro que sirva para establecer una futura hoja de ruta. Además, se ha definido el entorno de validación planteado para el GDO, definiendo el ámbito geográfico y las fuentes de datos. Finalmente, se ha definido la arquitectura propuesta para la plataforma POSEIDON.

Agradecimientos

Este trabajo se llevó a cabo con el apoyo financiero del proyecto de investigación del Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar (CUD-ENM) con referencia (PICUD-2023-01) con título “*Plataforma de desarrollo, ensayo y validación de un gemelo digital oceanográfico (POSEIDON)*”, así como también de las ayudas para financiar estancias cortas en centros de investigación del CUD-ENM, con referencia (PAM_EC_2023-01 y PAM_EC_2023-02).

REFERENCIAS

Brönner, U., M. Sonnewald, y M. Visbeck. 2023. «Digital Twins of the Ocean can foster a sustainable blue economy in a protected marine environment». *The International Hydrographic Review* 29(1):26-40. doi: 10.58440/ihr-29-a04.

Chen, Ge, Jie Yang, Baoxiang Huang, Chunyong Ma, Fenglin Tian, Linyao Ge, Linghui Xia, y Jianhui Li. 2023. «Toward digital twin of the ocean: from digitalization to cloning». *Intelligent Marine Technology and Systems* 1(1):3. doi: 10.1007/s44295-023-00003-2.

DITTO. 2024. «DITTO – Digital Twins of the Ocean - Ditto». Recuperado 3 de julio de 2024 (<https://ditto-oceandecade.org/>, <https://ditto-oceandecade.org/>).

EDITO Infra. 2024. «European Digital Twin Ocean - Powered by EDITO». *EDITO-Infra*. Recuperado 3 de julio de 2024 (<https://edito-infra.eu/>).

European Commission. 2024a. «Copernicus Marine Service». Recuperado 3 de julio de 2024 (<https://marine.copernicus.eu/>).

European Commission. 2024b. «European Marine Observation and Data Network (EMODnet)». Recuperado 3 de julio de 2024 (<https://emodnet.ec.europa.eu/en>).

European Commission, Joint Research Centre, I. Hupont Torres, V. Charisi, G. De Prato, K. Pogorzelska, S. Schade, A. Kotsev, M. Sobolewski, N. Duch Brown, E. Calza, C. Dunker, F. Di Girolamo, M. Bellia, J. Hledik, I. Nai Fovino, y M. Vespe. 2023. *Next generation virtual worlds – Societal, technological, economic and policy challenges for the EU*. Publications Office of the European Union.

F. Griffiths y M. Ooi. 2018. «The fourth industrial revolution - Industry 4.0 and IoT [Trends in Future I&M]». *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine* 21(6):29-43. doi: 10.1109/MIM.2018.8573590.

García Valera, P., M. Fernández Gavilanes, y C. Pérez-Collazo. 2023. «Gemelo Digital Oceanográfico: Discretización del entorno marino mediante un modelo multinivel de mallas H3». en *X Congreso Nacional de I+D en Defensa y Seguridad (DESEi+d 2023)*. Cartagena.

GEBCO. 2024. «GEBCO - The General Bathymetric Chart of the Oceans». *GEBCO*. Recuperado 4 de julio de 2024 (<https://www.gebco.net/>).

ILIAD. 2024. «Digital Twins of The Ocean - The Iliad Project». Recuperado 3 de julio de 2024 (<https://ocean-twin.eu/>).

Instituto Hidrográfico de la Marina. 2024. «Infraestructura de datos espaciales del Instituto Hidrográfico de la Marina». Recuperado 3 de julio de 2024 (<https://ideihm.covam.es/>).

Kritzinger, Werner, Matthias Karner, Georg Traar, Jan Henjes, y Wilfried Sihm. 2018. «Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification». *16th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing INCOM 2018* 51(11):1016-22. doi: 10.1016/j.ifacol.2018.08.474.

Meteogalicia. 2024. «MeteoGalicia». Recuperado 3 de julio de 2024 (<https://www.meteogalicia.gal/>).

Mihoc, Ariana, y Kirsten Cater. 2017. «Augmenting Navigational Aids: The Development of an Assistive Maritime Navigation Application». *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Science Index, Computer and Information Engineering* 3:2432.

Puertos del Estado. 2024. «Puertos del Estado».

Ramírez Morán, Sergio. 2024. «Gemelo Digital de Entorno Operativo Marítimo: Propuesta de arquitectura de integración de datos y operación». Trabajo Fin de Máster, Universidade de Vigo, Marín.

Eventos com Orcas na Costa Ibérica

S. Pinheiro (1), J. Fonseca (2), T. Dias (3), P. Carvalho (3), C. Fradique (4) and F. Vieira (3)

- (1) Instituto Hidrográfico, Portugal; cintra.pinheiro@marinha.pt
- (2) Instituto Politécnico de Setúbal, Portugal
- (3) Instituto Hidrográfico, Portugal
- (4) Marinha Portuguesa, Divisão de Inovação e Transformação do EMA

Abstract: Since 2020, interactions with orcas, from the Iberian subpopulation, have raised safety concerns for sailors in the Strait of Gibraltar to Galicia, including Portugal's coast. These unique interactions, mainly with sailboats, led the Instituto Hidrográfico (IH) to develop online tools like Web Maps and Dashboards within an ArcGIS Storymap. These tools provide geospatial information on orca sightings and interactions, helping sailors identify high-risk areas and plan their navigation more safely. The IH has recorded 1 484 events, with 577 sightings (39%) and 907 interactions (61%). The platform aims to enhance navigational safety, assist in travel planning, support maritime authorities in rescue operations, and facilitate event reporting. Following specific safety protocols in Portuguese and Spanish waters is crucial during such events.

Key words: Navigational warnings, Interoperability, Geographic Information Systems.

1. INTRODUÇÃO

As interações de Orcas (*Orcinus orca*) com embarcações, têm sido tema de preocupação para os navegantes e autoridades competentes. Desde 2020 que um grupo da subpopulação de orcas denominada Orca Ibérica, demonstram um particular interesse nos lemes de veleiros. Conduzidas inicialmente por um reduzido grupo de orcas juvenis, são atualmente, realizadas por um número de elementos mais alargado, não sendo claro o motivo de tais comportamentos. Estas interações que se verificam predominantemente entre o Estreito de Gibraltar e a Galiza, incluindo portanto, a costa de Portugal continental, resultam muitas vezes em lemes partidos e consequente desgoverno das embarcações colocado as tripulações em perigo (Zerbini et al., 2024).

Consequente das embarcações à deriva pelas interações de orcas, entidades portuguesas e espanholas processaram à emissão de avisos à navegação e Protocolos de Segurança. A par das medidas, foram criados grupos de trabalho e ainda *Websites* para a exibição de eventos georreferenciados, distinguidos entre Interações, definidas pelo contacto de orcas com a embarcação, e Avistamentos, observação de orcas sem contacto por parte das mesmas. Neste trabalho na sequência do projeto do IH, a mesma distinção foi aplicada, de forma a apoiar os navegantes e contribuir para a segurança da navegação, produzindo-se Web Maps e Dashboards, produtos online com informação geospatial dos eventos incorporados num ArcGIS Storymap.

1.1 ORCAS IBÉRICAS

As Orcas são cetáceos com dentes, da família dos golfinhos e diferentes de baleias (cetáceos de barbatanas). Distribuídas por quase todos os oceanos e mares, geralmente em latitudes mais elevadas, águas frias e profundas, mas também, perto da costa. Os espécimes presentes ao largo da costa Ibérica denominam-se como Orcas Ibéricas constituindo uma subpopulação pequena, com a estimativa de 37 indivíduos, destes, apenas uma pequena parte são adultos. Classificadas como Criticamente em Perigo segundo o Livro Vermelho dos Mamíferos de Portugal Continental e Vulneráveis pelo Ministério do Meio Ambiente Espanhol (Zerbini et al., 2024).

Estes mamíferos alimentam-se principalmente de Atum-Rabilho do Atlântico que atravessam o Atlântico Norte em direção ao Mediterrâneo, onde se reproduzem entre junho e agosto. Estes últimos, sobreexplorados por pescadores e classificados como em perigo de extinção pela lista vermelha da International Union for Conservation of Nature (IUCN), são perseguidos até à exaustão pelas orcas no Estreito de Gibraltar e predados quando já capturados por artes de pesca palangre e à linha (Guinet et al. 2007; Esteban et al. 2016).

2. MEDIDAS DE SEGURANÇA A ADOTAR

Para uma navegação mais segura, existem recomendações e Protocolos de Segurança a conhecer, em águas portuguesas, do Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas (ICNF), e em águas espanholas, o Protocolo redigido pelo *Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico* (MITECO) e *Ministerio de*

Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (MITMA). Em nenhuma ocasião se deve colocar a integridade das orcas em risco, classificadas como Criticamente em Perigo na lista vermelha da IUCN. As recomendações gerais que não se revelam 100% eficazes para resolver o problema, passam por: (1) Proibição da aproximação ativa em caso de avistamento e mudar o rumo de forma a afastar-se das mesmas; (2) Em caso de interação, imobilizar a embarcação, não desligando o motor, deixado o leme solto ou engrenar a ré e navegar assim durante o tempo considerado necessário, sem mudanças bruscas de direção, sendo que as entidades espanholas sem especificar a forma de navegar, recomendam que se realize em direção à costa, para águas mais rasas. Recomendando-se aos navegantes notificar as observações ou interações de que sejam alvo, aos meios para isso identificados, recolhendo se possível, imagens dos exemplares envolvidos e que contactem a entidade a que diz respeito para o reboque no caso do leme acabar incapacitado (ICNF, 2023; Zerbini et al., 2024; MITECO, 2024).

Segundo Zerbini et al. (2024), as interações de orcas com embarcações são vistas como um comportamento de caráter social, de diversão, não sendo apropriado usar o termo “Ataques”. O mesmo grupo de especialistas sugere que os navegantes sigam as recomendações com maior rigor durante os meses de abril a agosto, especialmente entre o Golfo de Cádiz e o Estreito de Gibraltar, por se tratar de uma zona com elevada probabilidade da presença de orcas.

3. METODOLOGIA

Para agregar as diversas fontes de informação sobre eventos com orcas em torno da Península Ibérica num único mapa, foram criados Web Maps e Dashboards. Estes produtos online apresentam informação geográfica distinguida entre avistamentos e interações, e estão integrados num ArcGIS Storymap.

Os dados são armazenados numa base de dados PostgreSQL, sendo importados e atualizados automaticamente através de scripts Python. Estes, derivam de fontes internas à Marinha Portuguesa, nomeadamente, avisos da plataforma ANAVNET, o Comunicado Hidrográfico (Formulário online) criado pelo IH, e também, entidades colaboradoras como a OrcaIberica - Grupo de Trabajo Orca Atlántica (GTOA) e Orcas.pt.

Por fim, são gerados Web Feature Services (WFS) utilizando o software open source Geoserver, que são posteriormente importados e visualizados nos Web Maps e Dashboards. Desta forma, a disponibilização dos eventos torna-se acessível, atualizada e interativa.

Na Fig. 1 visualiza-se o Dashboard que exibe a distribuição das três fontes de dados geoespaciais. Com ocorrências desde 2020, não só é possível verificar onde existe a maior densidade de eventos, por fonte, como também filtrar por tipo de evento e

por data, de forma a simplificar a análise para um dado período, quer seja nos últimos dias ou para a comparação de períodos homólogos. Os dois gráficos também presentes, auxiliam na comparação de eventos em períodos homólogos para os anos respetivos de cada fonte através das colunas com o número de eventos, e por linha, no presente ano civil em comparação com o ano precedente. Todas as camadas do mapa podem ser desativadas ou ativadas, consoante o interesse, que para além de



Figura 1 - Dashboard sobre os eventos com orcas da infraestrutura de dados geoespaciais criada. Disponível em:

<https://storymaps.arcgis.com/stories/fd1a14097eb841f7a6b0ce287ddf8099>

representarem as ocorrências, também foi adicionado um WFS da densidade de tráfego marítimo.

4. RESULTADOS

Como resultado da criação da infraestrutura de dados geoespaciais, até 28 de junho de 2024, foi possível reunir um total de 1 484 eventos, dos quais 577 (39%) correspondem a avistamentos e os restantes 907 (61%), a interações (Tab. I).

Tabela I - Inventário de eventos com orcas.

Fonte	Avistamentos	Interações
OrcaIberica	316	651
Orca.pt	204	216
Anavnet	57	40
Total	577	907

A maioria dos eventos localizam-se ao longo da costa ibérica atlântica, mas também se verificam residualmente na costa de Marrocos e França.

No exercício de se comparar períodos homólogos, os números de eventos podem demonstrar uma subida ou descida de interações, contudo, a tendência identificada não pode ser interpretada como mudança definitiva do comportamento dos referidos mamíferos. A alteração da quantidade e localização do principal alimento pode variar tendo impacto na distribuição das orcas, por fim, podem ocorrer casos de não comunicação de eventos com orcas. Assim,

para uma maior fidedignidade é necessário divulgar os meios para a comunicação dos eventos, destacando que, mesmo avistamentos, são um elemento importante para criação de avisos à navegação e de um histórico importante, de forma a se analisar os registos cruzados com um grupo robusto de variáveis antropogénicas e ambientais, p.e. tráfego marítimo de veleiros e outras embarcações de pequenas dimensões, tipos de equipamentos (eletrónicos ou suscetíveis de causar sons subaquáticos) utilizados pelos navegantes em casos de interação, distribuição de presas, profundidades, correntes oceánicas, etc.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Dado que não existe nenhum método 100% eficaz, para além da opção de não navegar, de forma a se evitar as interações com orcas e as suas consequências danosas, é essencial apoiar os navegantes e contribuir para a segurança da navegação, assim o trabalho desenvolvido demonstra-se útil para: (1) Identificar os locais onde ocorrem os eventos, por data e tipo; (2) Apoio ao planeamento de viagem; (3) Apoio ao planeamento dos meios de socorro por parte das Autoridades Marítimas; (4) Reportar eventos.

Para futuros desenvolvimentos, pretende-se calcular a distribuição espacial das orcas ibéricas, por época do ano, para tal é necessário a incorporação de variáveis que sejam preditivas da espécie, de difícil implementação devido à escassez de dados em formatos espaciais suportados pelos Sistemas de Informação Geográfica (SIG).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Esteban, R., Verborgh, P., Gauffier, P., Giménez, J., Guinet, C., & de Stephanis, R. (2016). Dynamics of killer whale, bluefin tuna and human fisheries in the Strait of Gibraltar. *Biological Conservation*, 194, 31–38. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2015.11.031>
- Guinet, C., Domenici, P., De Stephanis, R., Barrett-Lennard, L., Ford, J. K. B., & Verborgh, P. (2007). Killer whale predation on bluefin tuna: Exploring the hypothesis of the endurance-exhaustion technique. *Marine Ecology Progress Series*, 347, 111–119. <https://doi.org/10.3354/meps07035>
- Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas. (2023). EDITAL - PROIBIÇÃO DE APROXIMAÇÃO ATIVA A GRUPOS DE ORCAS POR EMBARCAÇÕES MARÍTIMO-TURÍSTICAS. Disponível em: <https://www.icnf.pt/api/file/doc/2d862d452c9c2fb9>
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2024, maio). MITECO y MITMA ofrecen recomendaciones a los navegantes en

caso de emergencia. Disponível em: <https://www.miteco.gob.es/es/prensa/ultimas-noticias/2024/mayo/miteco-y-mitma-ofrecen-recomendaciones-a-los-navegantes-en-caso-.html>

ZERBINI, A., DE LA CITA LÓPEZ, M., DONOVAN, G., FERNÁNDEZ-MALDONADO, C., GARCÍA-BELLIDO, E., BESSEGA, M., ... TIXIER, P. (2024). WORKSHOP REPORT - INTERACTIONS BETWEEN IBERIAN KILLER WHALES AND VESSELS: MANAGEMENT RECOMMENDATIONS. INTERNATIONAL WHALING COMMISSION, 1-45. Disponível em: <https://archive.iwc.int/pages/download.php?direct=1&noattach=true&ref=22172&ext=pdf&k>



ARQUEOLÓGICA
SUBACUÁTICA

El calendario lunar de Santa Catalina

Miguel Francisco Goërg Martín

Ex catedrático de Metalurgia E.O.N. y de Ciencia de los Materiales E.S.M.C. de Cádiz.

Ciudad Ducal, nº 26. El Puerto de Santa María Cádiz

miguel.martin@uca.es

Resumen: Estudio semiológico de un petroglifo descubierto en el litoral gaditano, en el que aparece la representación de un ciclo lunar y un numeroso grupo de constelaciones cuya disposición se remonta a los ciclos del IV milenio a.n.e.

Palabras clave: Arqueoastronomía, Calendarios lunares, Ciclo de las mareas, Precesión.

1. INTRODUCCIÓN

En la barrera de arrecifes que enmarcan los vestigios de antiguos corrales de pesca de El Puerto de Santa María, tuvo lugar el hallazgo de un pequeño canto rodado, objeto de un lascado por impacto, circunstancia que suscitó nuestro interés por analizar las características de la rotura. La sorpresa surge al descubrir en el negativo de la lasca algunos trazados geométricos, realizados por incisión, que ponían en evidencia la naturaleza antrópica de un instrumento cuya finalidad tratamos de descubrir.



Ilustración 1

provocada mediante una depurada técnica de labrado. La rotura es el resultado de un único y violento impacto. En el punto de percusión aparece la zona de desintegración intergranular y un amplio plano de desprendimiento transgranular, de naturaleza concoide.



Ilustración 2

Posteriormente, utilizando punzones de material friable, se practicaron incisiones irregularmente distribuidas sobre toda la superficie del nódulo de piedra

2. LAS CARACTERÍSTICAS ANTRÓPICAS

Se trata de un canto rodado de cuarcita, lacado antrópicamente. A pesar del natural desgaste al que el objeto se ha visto sometido durante una prolongada estancia en zona de reflujos, el núcleo residual evidencia la morfología de una fractura

SEMIOTICA DE LOS GRABADOS

De las circunstancias de lugar, la naturaleza de la fractura y la aparición de grabados de naturaleza geométrica surgen de dar respuesta a los interrogantes que plantea este singular hallazgo. Se trata, sin duda de un documento cuya

intencionalidad no ha sido fácil de averiguar. Numerosas noches de observación y el análisis de las circunstancias (1) en las que tuvo lugar su génesis, nos han permitido interpretar su significado y valorar la datación de su trabajo.

SEMIOTICA DE LA LASCA

En el interior de la lasca y en el conjunto de su superficie se encuentran representados: La Osa Mayor, un ciclo lunar con las 21 lunas nocturnas y 5 diurnas, asimilables a unos corrales.

- A. La identificación de las marcas situadas en la zona superior de la lasca, son el resultado de una oportuna intuición, como resultado de su extraordinaria semejanza con la imagen de la **Osa Mayor** del cuadro “*Noche estrellada sobre el Ródano*”, de Vincent Van Gogh. Intuición confirmada posteriormente por su sincronía con el escenario astronómico del conjunto.



Ilustración 3

- B. Un ciclo lunar, que da comienzo en Cuarto Creciente. Le siguen luego dos Lunas Llenas visibles y las 14 correspondientes a la fase decreciente, para desaparecer finalmente al amanecer con la Luna Nueva. Sigue luego un intervalo con un trazado difuso con el que se inicia el Cuarto Creciente diurno. Su interpretación fue posible aplicando los criterios plasmados en el “*calendario galo de Coligny*”.



Ilustración 4

- C. En la parte inferior de la lasca encontramos estructuras semejantes a los arrecifes y corrales de pesca los localizados en la zona del hallazgo.

CONCLUSIÓN

A la vista de nuestras primeras investigaciones, nos encontramos en presencia de un calendario lunar, cuya relación con la práctica de la pesca pasiva y el marisqueo parece evidente. Podríamos decir que se trata de un auténtico calendario de mareas con el que optimiza los horarios de las capturas.

En tal caso, los grabados distribuidos en el contorno de la piedra podrían representar la localización astronómica de la luna durante la estación de pesca. Para evitar la natural inducción en los resultados, utilizamos el recurso de designar las estructuras observadas mediante alguna pareidolia elemental, como las utilizadas por cierto pastor extremeño. “*La Polar es el techo del cielo; la Culebra da vueltas en su entorno; La Hoz, colgada en invierno, se descuelga con la llegada del verano; y el Camino de los franceses, en junio conduce al Sur, y en agosto hacia Santiago*”.

LAS CONSTELACIONES

En la identificación de un gran número de asterismos distribuidos en el contorno de la piedra fueron tomadas toda una serie de precauciones. De manera aleatoria y utilizando iluminación transversal, se realizaron numerosas macrografías con las que revelar las huellas incisas que parecen irregularmente dispersas, con las que, a manera de calcos, se obtuvieron una serie de posibles “*asterismos*”, que

posteriormente serían contrastados con las estructuras del calendario zodiacal.



Ilustración 5



Ilustración 6

DISPOSICION DE LOS ASTERISMOS

A. *La Culebra*. El más notable de estos asterismos se encuentra localizado en la zona superior, donde encontramos una profunda incisión coloreada que destaca como fondo de un pequeño alveolo. En su entorno, las leves marcas dejadas por la acción humana describen un trazado serpenteante que nos proporciona nuestro primer “asterismo”. El calco obtenido relacionando geoméricamente el conjunto de muescas nos proporciona un trazado singular, muy semejante a la estructura de una de las constelaciones circumpolares, la constelación de **Drago** en la que cabe destacar la estrella *Thuban*, antigua estrella polar de los griegos.



Ilustración 7

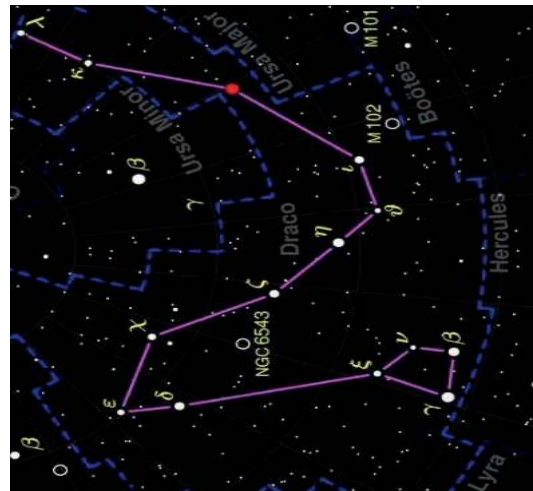


Ilustración 8

B. De las numerosas macrografías obtenidas solo una decena de conjuntos con cierto grado de proximidad guardan una estructura o simetría como para proceder a su asociación como posibles *asterismos*. Esquematzados los correspondientes calcos se procede a encontrar su semejanza con algunas de las constelaciones recogidas en la guía astronómica del Grupo Astrófilo Lauriano.

Comparando la posición en la que se encuentran distribuidos los asterismos, con la distribución cartográfica de las constelaciones afines, el resultado presenta un extraordinario grado de coincidencia.

Un *Nido*, una *Cuadra*, la *Cruz*, y la *Cometa* con su *Estela*, dispuestas en trayectoria descendente, se corresponden con las constelaciones **Corona**, **Borealis Hércules**, **Cignus** y **Águila**; esta última gravitando sobre la traza de la *Vía Láctea*. Más abajo, cerca ya del extremo inferior, encontramos una disposición en *Triangulo*, que se prolonga hasta llegar a un *Cuadrado* con una cola se se abre en una trayectoria ascendente. Se trata, sin duda de **Capricornius**, **Pegasus** y

Andrómeda cuya posición, al extremo inferior de la piedra guarda relación con la altura alcanzada por la luna en su lunasticio de verano.

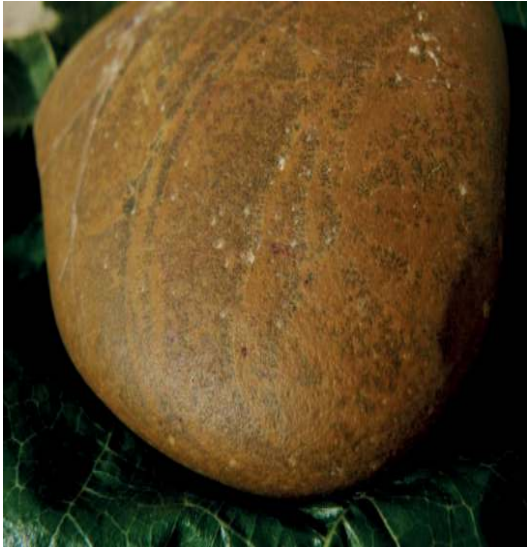


Ilustración 9

3. INTERPRETACION

La análoga disposición de once *asterismos*, ordenados de acuerdo con la situación cartográfica de otras tantas constelaciones astronómica nos permite confirmar la semiología de los grabados. Nos encontramos ante una representación de los conjuntos estelares por los que, a modo de una eclíptica, transita la luna a lo largo del periodo estival. El punto culminante es el lunasticio de verano, cuando la luna llena se eleva tan solos unos 30° sobre el horizonte Sur, donde están representadas las constelaciones de Pegaso y Andrómeda y el Norte astronómico aparece representado en Alpha Drago

La concordancia en la distribución de 11 “asterismos” sobre la piedra y la disposición en la cartografía astronómica de 12 de constelaciones, ordenadas siguiendo la trayectoria de una eclíptica lunar, no puede ser atribuida al azar. La matemática estadística nos permite determinar la probabilidad de una

coincidencia fortuita, con un factor de error del orden de $1/11! = 1/30.000.000$

Una disonancia notable surge cuando consideramos la disposición en la que aparece grabadas sobre el petroglifo las coordenadas de eclíptica lunar, con un eje astronómico en Drago y un coluro en Pegaso, lo que de acuerdo con la precesión de los equinoccios, que solo pudo suceder a lo largo del IV milenio A.N.E.

4. CONCLUSIONES:

- *En el negativo de la lasca encontramos la representación de un mes lunar utilizado como un calendario lunar de mareas.*
- *Aparecen igualmente representadas las constelaciones que conforman una “eclíptica lunar” entre equinoccios, con un coluro lunar en Pegaso y un eje astronómico en Thuban, de la constelación de Drago y la Osa Mayor traspuesta, en posición de septiembre.*
- *Teniendo en cuenta la precesión de los equinoccios, el escenario representado sobre este petroglifo nos remonta a los cielos del IV milenio a.n.e.*

(1) **Parámetros locales:** Puerto de Santa María.

Latitud PSM: (36°36,613' N) aprox. 36,5°N

Longitud PSM: (6°14,414' W) aprox. 6,24°W

Azimet del orto solar:

Verano: 60°

Invierno: 120°

Altura cenital alcanzada en los coluros:

Solsticio de verano: 77° (Lunasticio de invierno)

Solsticio de invierno 30° (Lunasticio de verano):

Equinoccios: 53, 5°

5. REFERENCIAS: Martin Goerg, Miguel Fco. (2014) El Calendario Neolítico del Aculadero.

<http://hdl.handle.net/10498/15889>

Desaparición del *Reina Regente*: Posibles causas y localización. Primeros datos obtenidos

Ó. S. Ortega¹, M. Bethencourt², N. C. Ciarlo³, T. Fernández-Montblanc⁴

- (1) Armada Española-Instituto Hidrográfico de la Marina, España, oortper@oc.mde.es
- (2) Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales, Universidad de Cádiz, Cádiz, España.
- (3) Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) – Instituto de Arqueología de la Facultad de Filosofía y Letras de la Universidad de Buenos Aires (IA, FFyL-UBA), Ciudad Autónoma de Buenos Aires,
- (4) Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales, Universidad de Cádiz, Cádiz, España.

Resumen: El crucero *Reina Regente* de la Armada fue un buque moderno e innovador para la época. Sin embargo, desde un principio, existieron dudas de su diseño y comportamiento en la mar. El 10 de marzo de 1895, en medio de un temporal en el Estrecho de Gibraltar, desapareció con toda su dotación. A día de hoy aún se desconoce su ubicación precisa.

Para tratar de contribuir a la localización del *Reina Regente* se realizó un estudio integral de diferentes evidencias. Se analizó la documentación histórica de la construcción para determinar el estado operativo en su última singladura. Posteriormente, combinando información de los restos encontrados del naufragio y los datos meteorológicos del temporal, se desarrolló un modelo físico-matemático de dispersión lagrangiana para evaluar probabilísticamente su ubicación. Por último, se presentarán los primeros datos obtenidos en las exploraciones de la zona del plan de prospección propuesto, definido con base en los resultados de las investigaciones previas.

Palabras Clave: Crucero *Reina Regente*, Armada Española, modelo de dispersión lagrangiana, patrimonio cultural subacuático.

El crucero *Reina Regente* de la Armada, botado en 1887, fue un buque de guerra moderno e innovador para la época, de líneas elegantes y con capacidades teóricas de maniobra, autonomía y combate extraordinarias para un buque de su porte (figura 1). En la mañana del día 10 de marzo de 1895, salió de la Bahía de Tánger e inició navegación en demanda del puerto de Cádiz. En esos momentos, arreciaba un temporal muy duro del suroeste y mar muy gruesa a arbolada. El *Reina Regente* nunca llegó a Cádiz, en medio de ese temporal desapareció junto con los 412 marinos de su dotación. A día de hoy aún se desconoce la localización de este pecio.

Prácticamente desde su entrada en servicio, comenzaron a plantearse dudas en cuanto al acierto de su diseño, condiciones de estabilidad, así como de su comportamiento en la mar, que se vieron acentuadas a partir de las importantes modificaciones realizadas en

su diseño original. En esencia, estas consistieron en la sustitución de su artillería principal por otra de mayor calibre, lo que supuso un aumento en los pesos altos del buque. Al respecto, tras el estudio de la curva de estabilidad del *Reina Regente* (CF Villaamil, 1896) y comparando los resultados con criterios actuales (CEFLOT, 2018), se concluye que esta modificación afectó a su estabilidad y comportamiento marino, aunque sin llegar a comprometer su seguridad en la navegación.

Por otra parte, las evidencias analizadas sugieren la existencia de deficiencias en el estado de alistamiento del buque el día de su última singladura. Principalmente, en la estanquidad de varios compartimentos, en los sistemas de achique, en la planta eléctrica y en las condiciones de habitabilidad (AGMAB, 1176/615; ACCGAR, 07/13)

A partir de todo lo anterior, de informes de la época y alegatos de testigos de las primeras maniobras a su salida de Tánger (AGMAB, 1176/614), se plantea la hipótesis de que el *Reina Regente* sufrió importantes inundaciones en sus compartimentos de más a proa, a las que tuvo que enfrentarse con medios de fortuna debido a sus ya citadas deficiencias de alistamiento. Ante esta situación, viendo peligrar el buque, su Comandante debió decidir abandonar la derrota original en demanda de Cádiz e invertir rumbo, tratando de capear el temporal y buscar resguardo.



Fig. 1 - Crucero *Reina Regente* (Museo Naval de Madrid. MN-92030)

Teniendo en cuenta que, navegando popa a la mar, una ola puede disminuir hasta un 70% las condiciones de estabilidad de un buque (CEFLOT, 2018), es probable que en algún momento el *Reina Regente* pudiera ser alcanzado por una ola de longitud de onda similar a su eslora, acabando con su ya mermada estabilidad, que le hizo zozobrar y hundirse prácticamente al instante.

Al analizar documentación de la época, se obtuvo información coherente con la hipótesis anterior. En este sentido, tienen especial importancia las investigaciones realizadas por el CF Aguirre en abril de 1895 (AGMAB 1176/614). Los resultados alcanzados entonces, junto con las hipótesis planteadas referentes a la derrota y causas del naufragio, permiten establecer de forma tentativa una primera aproximación a la zona donde ocurrió el naufragio. El polígono así establecido está ubicado entre los meridianos de Punta Camarinal y Cabo Trafalgar. Posteriormente, teniendo en cuenta los antecedentes de exploraciones en la zona, se consiguió definir un sector más reducido, que a los fines del estudio se denominó Área Inicial de Búsqueda (AIB) (figura 2).

En los días y semanas posteriores al naufragio, la mar arrojó diversos restos en distintos puntos de la costa. Partiendo de información inédita de estos restos (AGMAB, 1176/614), de la caracterización realizada del temporal del 10 de marzo de 1895, así como de datos oceanográficos y geofísicos de la zona, se ha implementado un modelo físico-matemático de dispersión lagrangiana con el objeto de simular las trayectorias de los restos del naufragio y determinar el



Fig. 2 - Croquis AIB (elaboración propia sobre visor IDE-IHM).

punto de partida de dichos objetos, es decir el lugar donde probablemente se hundió el *Reina Regente*. La metodología utilizada se basa en trabajos de investigación anteriores, relacionados con el pecio del *Fougueux* (1805) (Fernández-Montbanc et al, 2018). Los datos obtenidos representan zonas definidas en términos probabilísticos. Aunque en este caso tiene un carácter preliminar, los resultados son coherentes con la reducción de la primera aproximación de zona de

naufragio a la AIB, como zona más probable de localización del pecio del *Reina Regente*.

Con base en todo lo anterior, en el marco del estudio desarrollado por el autor principal para completar el Máster en Arqueología Náutica y Subacuática de la Universidad de Cádiz (Ortega, O. 2020), se propuso un plan de prospección para la localización e identificación del *Reina Regente*. Este plan incluye la utilización de medios pertenecientes a la Armada, pero también contempla la necesaria coordinación y participación de otros organismos de las distintas administraciones del Estado con competencias en materia de patrimonio cultural sumergido, todo ello en cumplimiento de la normativa vigente (Armada Española, 2019; Ley 16/1985; Ley 14/2007).

A lo largo de los años, distintas unidades a flote del IHM efectuaron diversas exploraciones sistemáticas en el AIB, todo ello con el objetivo principal de llevar a cabo los cometidos y responsabilidades que legalmente tiene asignadas, en el cumplimiento de su misión principal de estado, consistente en la actualización permanente y el mantenimiento de la cartografía básica náutica. Lo anterior es parte imprescindible para contribuir a garantizar la seguridad en la navegación en las aguas de interés y de responsabilidad del País

De todas estas exploraciones, efectuadas, por su mayor proximidad temporal y por la utilización de tecnología más moderna, se destacan las efectuadas por el BH Tofiño en octubre de 2020 y marzo 2021. Los principales medios y sensores utilizados fueron sondador multihaz, sonar de barrido lateral, magnetómetro y perfilador de fondo.

Procesados y evaluados los primeros datos extraídos de estas exploraciones sistemáticas, se comprueba que en principio estos son coherentes con las hipótesis y los resultados obtenidos de las investigaciones y trabajos previos efectuados. Esto esencialmente consistió en la clasificación y priorización de las anomalías detectadas atendiendo a su probabilidad de correspondencia con el pecio del *Reina Regente*, según las características y datos obtenidos por el momento de cada una de ellas

Por lo tanto, y en caso de confirmarse estos resultados preliminares durante el desarrollo de fases posteriores del plan propuesto, los análisis efectuados podrían llegar a tener una mayor relevancia, al poder ser considerados como un posible ejercicio metodológico cuya aplicabilidad puede extenderse a otros contextos de naufragios de época moderna y contemporánea.

Agradecimientos:

Al Coronel IM D. Miguel Aragón por su inestimable ayuda.

REFERENCIAS

Archivo Central del Cuartel General de la Armada (ACCGAR). 007/13. Estado de vida y fuerza del Reina Regente del día 01 febrero de 1895.

Armada Española-Centro de Doctrina de la Flota (2018). *I-CP-03(B) Estabilidad del buque*. B.N Rota, Cádiz.

Armada Española (2019). Plan del Almirante de la Flota para la protección del Patrimonio Arqueológico Subacuático (Revisión 2).

Archivo General de Marina Álvaro de Bazán (AGMAB). *Buques, Reina Regente, Pérdida 1895*. 1176/614.

AGMAB. *Buques, Reina Regente, Hundimiento 1895*. 1176/615.

Fernández-Montblanc T., Izquierdo, A. y Bethencourt, M. (2018). Scattered shipwreck site prospection: the combined use of numerical modelling and documentary research (Fougueux, 1805). *Archaeological and Anthropological Sciences*, 10, pp. 141-156.

Ley 14/2007 del Patrimonio Histórico de Andalucía, 19 de diciembre 2007, núm 248, pp. 6-28.

Ley 16/1985 del Patrimonio Histórico Español, BOE, 29 junio de 1985, núm 155, pp. 59193-59311.

Ortega, O. (2020) *Desaparición del Reina Regente: Hipótesis de sus causas y localización. Propuesta de plan de prospección*. Trabajo de Fin de Master Oficial en Arqueología Náutica y Subacuática. Universidad de Cádiz

Villaamil, F. y Castellote, J. (1896). *Informe acerca de las causas probables de la pérdida del crucero Reina Regente*. Madrid.

E
C
O
N
O
M
Í
A

A
Z
U
L



Análisis colorimétrico de pigmentos algales procedentes de la Costa de Granada

F. Bolívar-Galiano (1), J. De la Rosa-Álamos (2), L. Cuberos-Cáceres (1), M. Bolívar-Feriche (1), A. Yebra-Rodríguez (3) e P. Sánchez-Castillo (2)

(1) Facultad de Bellas Artes. Dpto. Pintura. Universidad de Granada.

(2) Facultad de Ciencias. Dpto. Botánica. Universidad de Granada.

(3) Facultad de Ciencias. Dpto. óptica. Universidad de Granada.

*email: fbolivar@ugr.es

Resumen: Las algas son una fuente de materias primas para multitud de aplicaciones, debido a la gran diversidad de componentes químicos que se pueden obtener de ellas y apenas se han desarrollado en aplicaciones artísticas. Por ello, nuestro grupo de investigación HUM 1031: Ligalismo (Artes y Ciencias), con amplia experiencia en el uso artístico de las algas de la Alhambra, está realizando análisis con metabolitos extraídos de algas procedentes de la costa de Granada. El objetivo es crear nuevos materiales artísticos, principalmente pigmentos de origen natural, sostenibles, no tóxicos y que tendrían una alta importancia cultural en la protección y conservación de nuestras costas. Para ello, se han seleccionado cuatro macroalgas y se han extraído sus pigmentos algales. Asimismo, se han realizado análisis de color tras someterlos a un proceso de envejecimiento acelerado (CIELab y CIEDE2000), con diferentes factores de deterioro, con el objetivo final de obtener productos naturales y biosostenibles.

Palabras clave: pigmentos, algas, colorimetría, conservación y material artístico.

1. INTRODUCCIÓN

La biodiversidad marina en su conjunto es vital para la vida en la Tierra, ya que presta toda una serie de servicios ecosistémicos como la producción de oxígeno, el secuestro de carbono, la regulación del clima, la protección de las costas o el suministro de alimento. Por eso es importante protegerla y conservarla para garantizar no sólo su supervivencia, sino también la nuestra a largo plazo. En este contexto, las algas, dado su papel como productores primarios y, por tanto, como base de la cadena alimentaria oceánica, cobran especial relevancia en relación con su conservación.

Por otro lado, las algas son una fuente de materias primas para multitud de aplicaciones, debido a la gran diversidad de compuestos químicos que pueden obtenerse a partir de ellas. Los compuestos de mayor interés comercial incluyen, entre otros, polisacáridos, pigmentos, lípidos, ácidos grasos, proteínas y compuestos fenólicos (Stengel, Connan y Popper, 2011). Son utilizadas por ejemplo en la producción de biofuel (Sudhakar et al., 2018), como biofertilizantes, protectores contra la radiación solar (Campanini Maciel et al., 2017), en biomedicina (David Wang et al., 2017), farmacia, nutrición (Biancarosa et al., 2018), cosmética (Bueno Ariede et al., 2017) o en el tratamiento de aguas residuales.

En técnicas artísticas y en conservación-restauración apenas se han desarrollado aplicaciones, por ello es que nuestro grupo (HUM 1031 Ciencia y Arte), con experiencia en utilización artística de algas de la Alhambra, está dispuesto a adaptar los métodos, que

en un lugar tan valioso son extremadamente respetuosos con los materiales nazaries y, por ende, ahora lo serán con la sostenibilidad de las comunidades marinas de algas. Los pigmentos que contienen son de las moléculas con mayor interés para las técnicas artísticas. Entre los distintos grupos de algas, encontramos tres tipos de colorantes: clorofilas (pigmentos verdes), carotenoides (carotenos y xantofilas, que van del color amarillo al naranja-rojizo) y ficobiliproteínas (rojas, azules y verde-azuladas) (Prasanna et al., 2007). Estos pigmentos, especialmente los carotenoides y ficobiliproteínas, tienen diversas aplicaciones y, entre otras cosas, se emplean cada vez más como colorantes naturales en la industria alimentaria, cosmética o como marcadores fluorescentes.

2. DESARROLLO

2.1. Material biológico.

Para realizar este estudio se seleccionaron cuatro algas marinas del mediolitoral e infralitoral de la costa de Granada (Caleta de Salobreña): tres especies; *Ulva lactuca*, *Codium bursa*, *Halopteris scoparia* y una exótica invasora *Rugulopteryx okamurae*. Esta selección es el resultado de estudios previos del laboratorio.

Una vez que las algas fueron seleccionadas, se procedió a su recolección. El muestreo se llevó a cabo en el mes de junio del 2023. La recolección se llevó a cabo manualmente, y con el uso de equipos de buceo autónomo para las especies infralitorales (*H. scoparia*, *R. okamurae*, *C. Bursa*). Se tomaron entre 1.2-1.3 Kg de material fresco de *H. scoparia* y *R.*

okamurae, mientras que para *U. lactuca* se recolectaron, aproximadamente 0.445 kg. Las muestras se trasladaron en frío y en oscuridad.

2.2. Obtención de pigmentos.

Una vez obtenida la biomasa, el primer paso fue la eliminación de sus impurezas, mediante varias limpiezas con agua destilada. Seguidamente, se almacenaron a 20°C, durante 48h. Este proceso facilita la ruptura de sus paredes celulares, cuyo fin es facilitar la extracción de sus pigmentos. El segundo paso, fue la deshidratación de las muestras. En la que, cada muestra se colocó en una estufa Liebeherr Profiline FKS 3600 index, y se sometió a diferentes temperaturas de forma gradual, con la finalidad de no desnaturalizar las proteínas presentes en las muestras. Se comenzó por una temperatura de 30°C (10h), después se aumentó a 35°C (8h) y finalmente a 40°C (8h). A continuación, las muestras se trituraron con la ayuda de un mortero hasta obtener un grano fino similar al usado en las preparaciones de pigmentos de uso artístico. Una vez obtenido el grano fino, previo pesado se colocó en un matraz de balón de fondo plano de 500 mL, y se le añadió 300 mL de acetona pura. Se realizó una extracción sólido-líquido por el método Soxhlet. Para ello, las muestras se colocaron en columnas refrigerantes DROG-500-001, a una temperatura de 58°C durante 5 horas. A continuación, para la eliminación total del disolvente, se utilizó un rotavapor modelo IKA RV HB ECO S099, a máxima velocidad y a 56°C, hasta que no quedó rastro del disolvente. Finalmente, se obtuvo el pigmento puro de cada una de las muestras.

2.3. Preparación de los ensayos.

Para evaluar la estabilidad cromática y su posible aplicación en técnicas pictóricas. Como soporte, se utilizó papel de acuarela Sennelier 100% algodón, de 300 gramos, grano fino y libre de ácidos, utilizando varios pinceles y lavando y secando cada uno de ellos tras cada uso para evitar la contaminación de las muestras. Las dimensiones de cada lienzo fueron 2x5 cm, siguiendo las indicaciones de la norma ISO 9124:2003. Se realizaron tres ensayos, con tres réplicas cada uno: una de control, mantenida en oscuridad a 22°C y 50 ± 10% HR, otra destinada a someterse a ciclos de envejecimiento acelerado, y la última se expuso en exterior, a una temperatura de 22°C e iluminación artificial de forma intermitente durante dos semanas.

2.4. Ensayos de envejecimiento acelerado.

Se realizaron estos ensayos para conocer la estabilidad química y los cambios físicos que se

generan en condiciones climatológicas extremas, así como los mecanismos y procesos de degradación que sufren los pigmentos de las algas al ser empleadas en técnicas artísticas. Es importante destacar que en este ensayo no se han empleado protectores solares o estabilizantes, con el fin de estudiar aisladamente el comportamiento de los materias seleccionados sin la interferencia de aditivos. Para el ensayo, se utilizó una cámara equipada con cinco lámparas fluorescentes TL-D 36W BLB 1SL/25 de luz negra, con vapor de mercurio a baja presión que emite onda larga (UVA) con una distribución espectral de energía dentro del intervalo 300-400 nm. Los parámetros de irradiación, temperatura y humedad relativa (HR) se modificaron adaptándolas a la naturaleza orgánica de las muestras a estudiar, con una temperatura de 60°C y la HR se mantuvo a 50-60%.

Las muestras estuvieron dentro de la cabina un total de 2 semanas, de las que se sacaban una vez por semana para realizar las medidas de color. En total se realizaron tres medidas, la original el mismo día que se pintaron (t_0), transcurrida una semana (t_1) y la segunda semana (t_2).

2.5. Análisis colorimétrico.

Una de las características más importantes de las algas, sobre todo si van a servir como base para la extracción de pigmentos, es el color. Para realizar las medidas colorimétricas y especificar el color de las muestras se utilizó el espacio CIELab (figura 1), ampliamente utilizadas en la industria, pero, debido a las recomendaciones de la Comisión Internacional de la Iluminación (CIE, 2004), también calculamos las diferencias de color con la fórmula CIEDE2000 (figura 2) (Luo *et al.*, 2001), mejor correlacionada con la percepción visual. El aparato usado es un colorímetro de la marca PCE, el modelo PCSE-XXM30, el cual nos da unos valores de L^* , a^* y b^* de las muestras medidas. Se tenía especial cuidado con que el colorímetro fuera posicionado cada vez que se hacía una medida en la misma zona de la muestra. Además, antes de medir se realizaba un calibrado del colorímetro. Todas las medidas fueron obtenidas con un iluminante Standard D65 y con el observador patrón de 10°.

$$\Delta E_{ab} = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}}$$

Figura 1. Fórmula CIELab. Donde: ΔL : diferencia de la luminosidad o claridad del color; Δa : diferencia de la posición del color en el eje verde-rojo; Δb : diferencia de la posición del color en el eje azul-amarillo.

$$\Delta E_{00} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L'}{\kappa_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C'}{\kappa_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H'}{\kappa_H S_H}\right)^2} + R_T \cdot \left(\frac{\Delta L'}{\kappa_L S_L}\right) \cdot \left(\frac{\Delta H'}{\kappa_H S_H}\right)$$

Figura 2. Fórmula CIEDE2000. Donde ΔL': diferencia en luminosidad; ΔC': diferencia en cromaticidad; ΔH': diferencia en matiz; $\kappa_L, \kappa_C, \kappa_H$: son parámetros de ajuste de luminosidad, cromaticidad y matiz; S_L, S_C, S_H : son las funciones de peso que tienen en cuenta la influencia de las condiciones de iluminación y observación en la evaluación de la diferencia de color y R_T : factor de rotación.

3. RESULTADOS

3.1. Obtención de la biomasa.

Tras el proceso de lavado, deshidratación y trituración, se obtuvo una cantidad de grano fino con el que se realizaron los ensayos. Hay que tener en cuenta que el mayor % de contenido de las algas es agua, por lo que su peso inicial con respecto al final tuvo una gran diferencia. Debido a ello, no se obtuvo tanta cantidad de biomasa, haciendo que los ensayos en algunas de las cepas fueran difíciles.

3.2. Obtención de los pigmentos algales.

A partir de la biomasa de peso seco se procedió a la extracción de los pigmentos. Para una mayor concentración de pigmento algal, se utilizó todo el grano fino obtenido de cada una de las cepas. Como se puede apreciar en la tabla i, se obtuvo un mayor contenido de pigmento algal en las algas pardas, siendo la mayoritaria la *R. Okamurae*. En cambio, las algas verdes a pesar de que se obtuvo gran cantidad de la *C. Bursa*, debido a su alto contenido en agua, se quedó en 0.001 Kg, dificultando así su estudio junto con la *U. Lactuca*.

Tabla i. Biomasa total tras la extracción de los pigmentos algales.

Macroalga	Grano fino + Acetona	Biomasa total Tras la Extracción
<i>U. lactuca</i>	0.020 Kg + 300 mL	0.001 Kg
<i>C. bursa</i>	0.0237 Kg + 300 mL	0.001 Kg
<i>H. scoparia</i>	0.055Kg + 300 mL	0,0023 Kg
<i>R. okamurae</i>	0.062 Kg + 300 mL	0,004 Kg

3.3. Análisis de colorimetría.

Tras someterse a los tratamientos de envejecimiento acelerado durante 2 semanas, dos de las muestras estudiadas mostraron un desvanecimiento del color bastante evidente a simple vista, mientras que las otras sufrieron un ligero cambio. Los resultados que se muestran a continuación corresponden a la diferencia de color del primer día (t_0) y la última semana (t_2). Como se puede apreciar en la figura 3, todas las

muestras tienen al principio un tono muy verde o parduzco, pero con el paso del tiempo vemos que en cada sesión las muestras se tornaban en gris, como era el caso de *C. Bursa* o blanquecina en *U. Lactuca*. En cambio, las algas pardas mantenían su tono o parte de él.

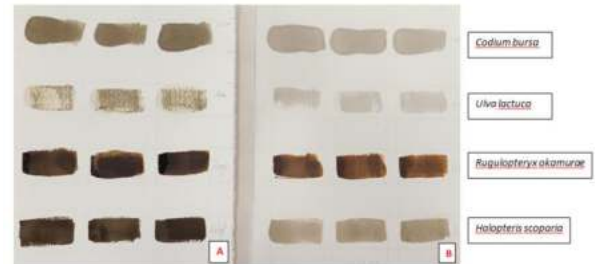


Figura 3. A) Pigmentos algales en la primera semana, antes de someterse a envejecimiento acelerado. B) Pigmentos algales después de dos semanas sometidas a envejecimiento acelerado.

Como se puede apreciar en la figura 4 los cambios generados en los controles (cámara de oscuridad) son mayores en las algas verdes respecto a los desarrollados en los pigmentos algales tras su exposición a ciclos de envejecimiento acelerado. En cambio, las algas pardas presentaron una mayor resistencia. Las muestras que han presentado un mayor desvanecimiento del color corresponden a las algas verdes.



Figura 4. Diferencias de color de los pigmentos algales. A) Después de someterse a dos semanas de envejecimiento. B) Después de dos semanas al exterior. C) Control, tras someterse a dos semanas en cámara de oscuridad.

En la figura 5 vemos que con el paso del tiempo la mayoría de las muestras se sitúan sobre el $a^*=0$ lo que significa que las muestras van pasando de un verde intenso a un tono algo más amarillento. Si además de acercarse a este eje, van bajando al origen de coordenadas 0-0 (acromático) significa que pasan a un color más blanco. En el caso de *C. bursa*, se puede apreciar que con el envejecimiento, la muestra disminuye su ángulo de tonalidad, es decir, paso de un tono amarillo verdoso a un tono amarillento. Por otro lado, *U. lactuca* presenta un color más saturado (más croma) que la muestra anterior, y con el envejecimiento también pierde ángulo de tonalidad, volviéndose más amarillenta. En el caso de las algas pardas, por ejemplo *R. okamurae* podemos observar que esta muestra cambia poco en sus coordenadas cromáticas a medida que envejece, volviéndose

más acromática con el paso de los días sin cambiar de tonalidad. Por último, la *H. scoparia* se muestra más estable en cuanto al color, ya que su croma y matriz apenas cambian (tampoco lo hace la luminancia, aunque no se aprecia en la gráfica 5) con el envejecimiento.

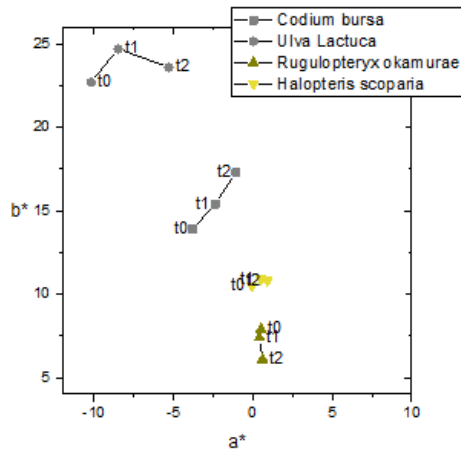


Figura 5. Medidas del color en las coordenadas L, a y b, de cada una de las muestras.

4. CONCLUSIONES

Con los resultados obtenidos se pone de manifiesto que las algas pardas *R. okamurae* y *H. scoparia*, podrían ser buenas candidatas para ser aprovechadas para su aprovechamiento con el fin de desarrollar pigmentos utilizables en técnicas artísticas, debido a la variedad de colores que ofrecen, junto a su estabilidad cromática. Entre ellas cabe destacar, la macroalga *R. okamurae*, que muestra gran resistencia ante condiciones climatológicas extremas, siendo el organismo que mejores resultados ha mostrado en cuanto a la persistencia del color y estabilidad ante los factores de degradación. En cambio, las algas verdes han presentado menor estabilidad del color, cambiándose de verde intenso a un color grisáceo.

No obstante se hace necesario seguir investigando en este terreno, para conseguir una mayor gama de tonalidades y la estabilidad de color como un diseño de secuestrantes de color, realizar ensayos con otras especies, así como un diseño de secuestrantes de color con la finalidad de obtener unos pigmentos de calidad, estables, de baja toxicidad, y biosostenibles a partir de algas marinas.

Agradecimientos

Esta investigación se ha podido llevar a cabo gracias a la financiación que ha recibido el Grupo de Investigación, por el Ministerio de Ciencia e Innovación del Gobierno de España (número de subvención PID2029-107816GB-I00/SRA/10.13039/501100011033). Proyecto:

“Nuevos colores para la transición verde y digital” (ECODIGICOLOR).

REFERENCIAS.

Artículos en revistas:

- Luo, MR., Cui, G., Rigg, B. (2001). The development of the CIE 2000 colour difference formula: CIEDE2000. *Color Res Appl* 26, 340–350.
- Prasanna, R., Sood, A., Suresh, A., Nayak, S. y Kaushik, B.D. (2007). “Potentials and applications of algal pigments in biology and industry.” *Acta Botanica Hungarica*, 49, 131-156.
- Stengel, D.B., Connan, S. y Popper, Z.A. (2011). “Algal chemodiversity and bioactivity: sources of natural variability and implications for commercial application.” *Biotechnology advances*, 29, 483-501.
- Bueno Ariede, M., Marcílio Candido, T., Morocho Jacome, A.L. Valéria Robles Velasco, M., de Carvalho, J.C.M., & Rolim Baby, A. (2017). “Cosmetic attributes of algae- A review”. *Algal research*, 25, 483-487.
- Campanini Maciel, O.M., Napoleão Tavares, R.S., Engracia Caluz, D.R., Gaspar, L.R. & Debonsi, H.M. (2017). “Photoprotective potential of metabolites isolated from algae-associated fungi *Annulohyphoxylon stygium*”. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 178, 316–322.
- David Wang, H.M., Li, X.C., Lee, D.J. & Chang, J.S. (2017). “Potential biomedical applications of marine algae”. *Bioresource technology*, 244, 1407-1415.
- Biancarosa, I., Belghit, I., Bruckner, C.G., Liland, N.S., Waagbø, R., Amlund, H., Heesch, S. & Lock, E.J. (2018). “Chemical characterization of 21 species of marine macroalgae common in Norwegian waters: benefits of and limitations to their potential use in food and feed”. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98, 2035-2042.
- Sudhakar, K., Mamat, R., Samykano, M., Azmi, W. H., Ishak, W. F. W. & Yusaf, T. (2018). “An overview of marine macroalgae as bioresource”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91, 165-179.

Experiencia piloto de aprovechamiento de corrientes mareales en la costa de Huelva (TidUtil)

Autores: A. de la Cruz (1), J. Morales (1), M. Sedrati (2), J. Hernández (1), J. Clavijo (1) y M. Reyes (1)

(1) Universidad de Huelva, España.

(2) Université Bretagne, Francia.

Resumen: La integración de tecnologías de energía renovable con la selección innovadora de sitios es esencial para abordar los desafíos energéticos globales. En este contexto, la propuesta de instalar una turbina de marea en la desembocadura del río Tinto en Huelva ofrece un potencial significativo para futuros estudios e instalaciones similares. Colocar el dispositivo debajo del puente donde se unen los ríos Tinto y Odiel permitirá ensayar distintos métodos de control y contar con un sistema innovador de monitorización y control remoto, convirtiéndose en un referente de la Industria 4.0. La construcción de una planta en la costa de Huelva fortalecerá las infraestructuras de I+D en Andalucía

Palabras clave: Corrientes mareales, Energía renovable marina, Microturbinas.

1. INTRODUCCIÓN

En este proyecto se aborda la necesidad de encontrar nuevos recursos energéticos para satisfacer la creciente demanda mundial de energía de manera eficiente y sostenible. Las fuentes de energía actuales, como los combustibles fósiles, son limitadas y generan problemas significativos, incluyendo emisiones de dióxido de carbono que afectan el clima y la salud pública, particularmente en áreas industriales como Huelva.

La energía mareal, en particular, ofrece una oportunidad significativa en la provincia de Huelva. Desde el siglo XVIII, se han utilizado construcciones como el Molino del Pintado en Ayamonte para aprovechar esta energía, utilizando la diferencia de altura entre la bajamar y la pleamar para moler trigo. La historia y geografía de Huelva, con sus amplios humedales, han facilitado el uso de la energía mareal a lo largo de su costa.

Los ciclos de mareas en nuestra provincia son de doce horas, estos permitirían un suministro estable y predecible de energía a lo largo del día. Por supuesto, el proyecto no estará exento de retos como el adverso ambiente alcalino al que se enfrentan los materiales sumergidos debajo del agua o a las bajas velocidades de flujo que se presentan en periodos de mareas muertas.

La energía oceánica tiene un potencial significativo, aunque difícil de cuantificar. Los estudios más optimistas sugieren que se podrían generar hasta 32 TW de electricidad al año (Wahyudie et al. 2017). Estudios más conservadores estiman un potencial total de 337 GW y 885 TWh al año (De Andres et al. 2017).

Las turbinas mareales extraen energía cinética de las corrientes generadas por las mareas, similar a las

turbinas eólicas, pero con diferencias clave. Los flujos de las corrientes mareales están confinados entre el lecho marino y la superficie del mar, y pueden concentrarse en un canal, a diferencia de la energía eólica. Las turbinas mareales, con la misma capacidad de potencia nominal que los aerogeneradores, pueden producir cuatro veces más energía por año/m² (Hussain, Arif, y Aslam 2017). Aunque las turbinas mareales operan con velocidades de flujo más bajas, el agua tiene una densidad de 1025 kg/m³ comparada con 1.25 kg/m³ del aire, compensando así los efectos y produciendo la misma potencia (Bahaj et al. 2007).

Este efecto se puede apreciar en la ecuación que modela la potencia producida por una turbina.

$$P(t) = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot A \cdot v(t)^2$$

- P(t) es la potencia hidráulica por unidad de superficie, medida en [W].
- C_p es el coeficiente de potencia, que varía dependiendo de la microturbina considerada.
- A es el área barrida del rotor de la microturbina o el área frontal de la microturbina, medida en [m²].
- v(t) es la velocidad del flujo, medida en [m/s].

El proyecto consistirá en la instalación de una turbina mareal debajo del puente que cruza la desembocadura del río Tinto, dirección Mazagón. Conectando la instalación a red y a un sistema de baterías, el comportamiento de la instalación será monitorizado y servirá de ejemplo para otras instalaciones del mismo tipo que se quieran implantar.

En este artículo se presentan los trabajos realizados para establecer la ubicación de la turbina y los primeros análisis de la distribución del flujo en el emplazamiento elegido.

2. DESARROLLO

Descripción del emplazamiento.

Tras una prospección en las posibles ubicaciones (Desembocadura del Río Tinto y en la Zona 9 del puerto de Huelva) para la turbina en torno a la desembocadura de los ríos Tinto y Odiel en la ría de Huelva, se determina que el lugar con mayor potencial energético para la instalación de la turbina es la desembocadura del río Tinto, en lo que se conoce como Punta del Sebo. La turbina irá instalada debajo del puente del Tinto, el cual une la autovía H-30 con la carretera nacional N-442, en el arco número 14 contando desde la Punta del Sebo ($37^{\circ}12'35''N$ $6^{\circ}56'08''W$), *figura 1*. La colocación de la turbina debajo del puente supone una ventaja, ya que no será necesario instalar grandes extensiones de cable submarino, además de poder usar el puente como estructura para colocar el generador fuera del agua abaratando más los costes de instalación.



Fig. 1. Localización de la instalación.

Modelo 3D.

Para la creación del modelo en tres dimensiones se partieron de unas batimetrías antiguas aportadas por el Puerto de Huelva. Estos datos batimétricos venían en formato CAD, con el sistema de coordenadas ED 50, *figura 2*. Las batimetrías vienen modeladas por polilíneas con elevación.

El primer objetivo consiste en crear un modelo TIN (Triangulated Irregular Network) de la zona. Para crear el modelo geométrico se usará el programa ArcGIS Pro, en el cual se combinarán los datos de batimetría y los datos cartográficos de IGN, no antes sin haber preprocesado los datos de batimetría y los datos cartográficos.

Una vez procesados los datos de la *figura 2* y completados los datos al lado este del puente con datos de la web Navionics, se tienen las batimetrías listas para ser exportadas en ArcGIS.

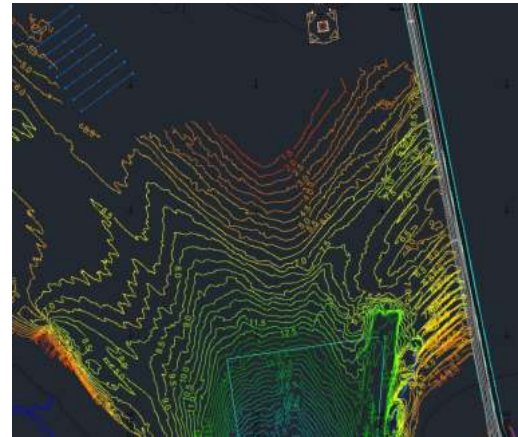


Fig. 2. Batimetrías en formato CAD sin procesar.

En ArcGIS se creará a partir de estas polilíneas un archivo en formato TIN, que posteriormente será transformado a Raster.

Una vez tenemos las batimetrías en formato Raster, estas se unen al modelo digital de la zona que se obtuvo del IGN (PNOA-2020- AND-682-4122-ORT-CLA-CIR.LAZ) para después obtener el modelo digital completo de la zona que se muestra en la *figura 3*.

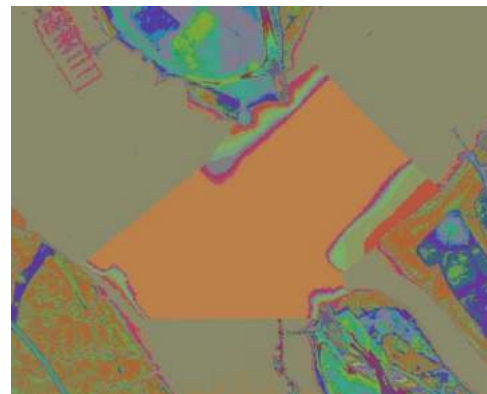


Fig. 3. Modelo 3D final, que incluye la unión con la capa del IGN.

Análisis del flujo.

Los datos de flujo se obtuvieron mediante una campaña de medidas con un dispositivo ADCP (Teledyne RD Instruments, modelo WorkHorse Centinela), que se inició el día 27 de febrero de 2024 y terminó el 13 de marzo del mismo año. El dispositivo de medida en cuestión se instaló en el mismo lugar en el que se tiene planeado situar la turbina.

Los datos que se han obtenido de la campaña de medida incluyen datos a distintas profundidades, la primera medida se encuentra a 1.05 metros del fondo y después tenemos 33 más separadas 0.5 metros entre cada una. Por lo que estamos registrando valores de dirección y magnitud de la corriente a distintas distancias del fondo.

Los datos obtenidos del ADCP también tuvieron que ser procesados ya que había datos de medida de flujo para alturas que se encontraban por encima de la superficie.

3. RESULTADOS

Las velocidades horizontales a lo largo de la capa de agua han mostrado una tendencia en la que sus magnitudes aumentaban a medida que nos acercamos a la superficie y nos alejamos del fondo, *figura 4*.

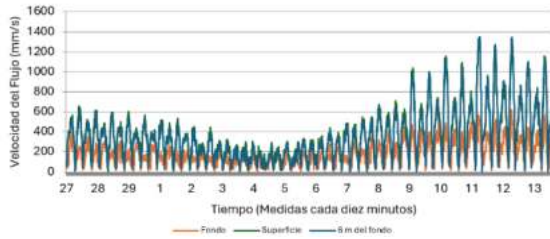


Fig. 4. Magnitud de las velocidades horizontales a distintas profundidades.

Se aprecia que las mayores velocidades se dan cercanas a la superficie, pero las de mayor calidad en

cuanto a dirección y a dispersión del flujo se encuentra a 5.55 m del fondo, *figura 5*.

De forma proporcional a las velocidades obtenemos resultados de las potencias, por lo que es obvio que los mejores lugares para instalar la turbina son aquellos en los que las velocidades son mayores. Y por lo tanto mayores serán las energías también.

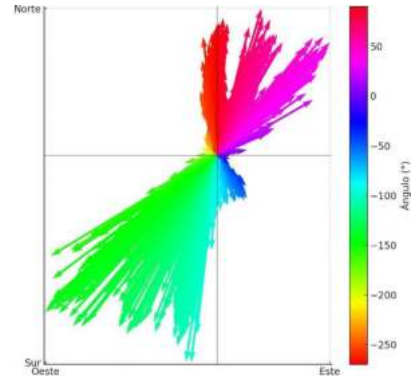


Fig. 5. Dirección de flujo a 5,55 metros del fondo.

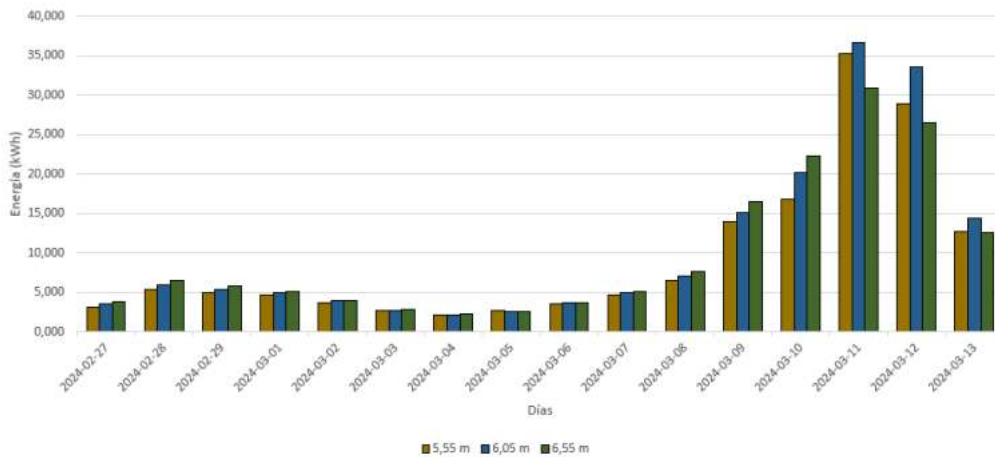


Fig. 6. Energía diaria producida en las profundidades más cercanas a la superficie.

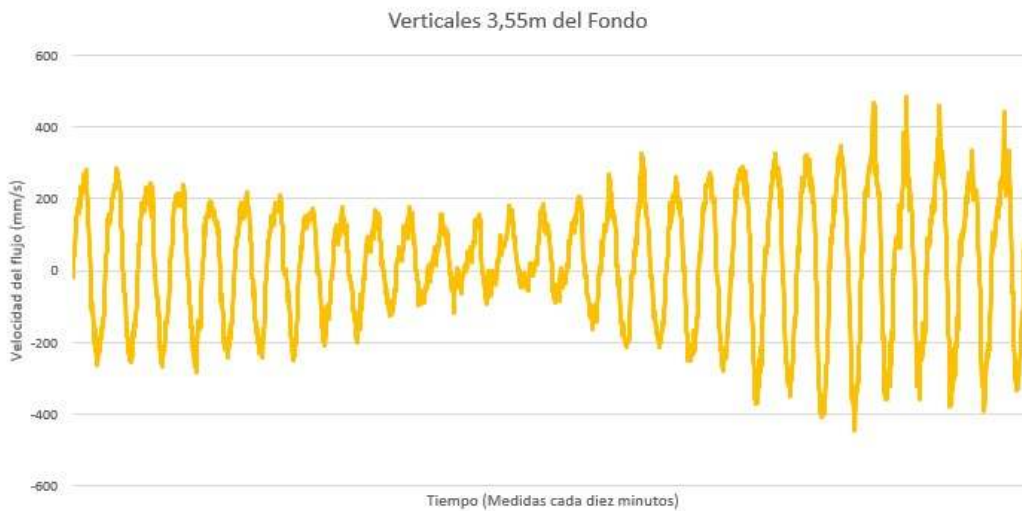


Fig. 7. Corrientes verticales a 3.55 metros del fondo.

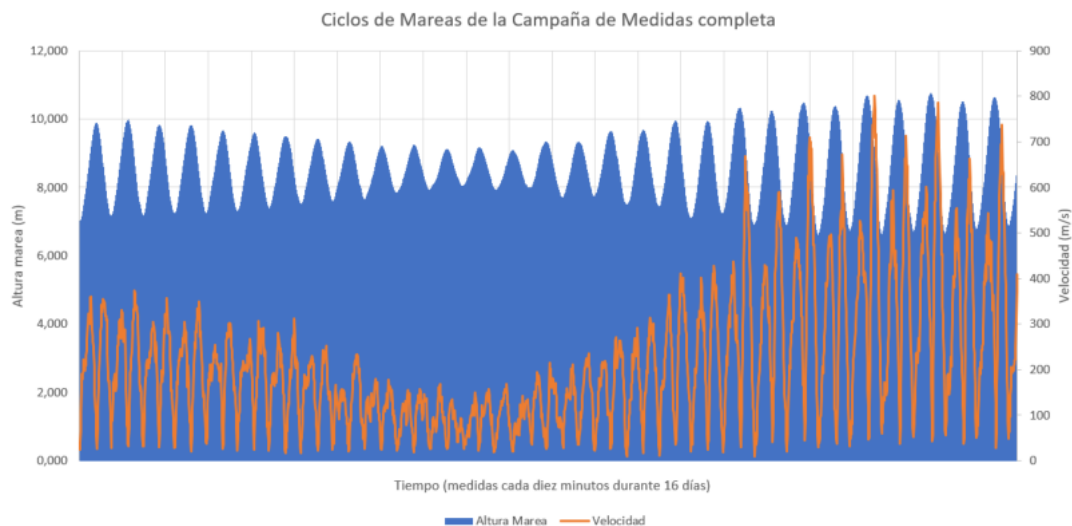


Fig. 8. Gráfica de velocidades medias y altura de marea.

En la *figura 6* se han representado las tres profundidades con mayores energías diarias acumuladas.

En cuanto a las corrientes verticales, se observó que éstas eran de muy baja intensidad además de ser prácticamente constantes con la profundidad, un ejemplo de sus magnitudes se encuentra en la *figura 7*.

Resultó que para las mareas vaciantes se dan flujos de mayor intensidad que para las mareas de régimen llenante. Este comportamiento se ilustra en la *figura 8*.

4. CONCLUSIONES

Con los resultados mencionados anteriormente se han llegado a las siguientes conclusiones:

En primer lugar, se ha cumplido con el desarrollo de un modelo geométrico en formato raster que servirá para simulaciones hídricas del proyecto, además de haber sido de utilidad para la obtención de perfiles de la cuenca del río que más tarde han sido utilizados para graficar la sección útil para la instalación de la turbina.

En cuanto al análisis de las corrientes se ha concluido que la profundidad óptima para la instalación de la turbina es a 5.55 m del lecho marino, obteniéndose ahí los valores óptimos de velocidad, dirección y energía. Además, se tiene margen de agua por encima de la turbina para que no se quede nunca al descubierto por las mareas equinocciales y que los barcos no puedan dañarla. Esa profundidad también asegura que la turbina esté protegida de los sedimentos del fondo.

Agradecimientos

Proyecto del Plan Complementario de Ciencias Marinas. Código de expediente PCM_00024, cofinanciado por la Junta de Andalucía y por la Unión Europea a través de los fondos NextGenerationEU del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia.

REFERENCIAS

- Bahaj, A.S., A.F. Molland, J.R. Chaplin, y W.M.J. Batten. 2007. «Power and Thrust Measurements of Marine Current Turbines under Various Hydrodynamic Flow Conditions in a Cavitation Tunnel and a Towing Tank». *Renewable Energy* 32(3): 407-26. doi:10.1016/j.renene.2006.01.012.
- De Andres, Adrian, Andy MacGillivray, Owain Roberts, Raul Guancho, y Henry Jeffrey. 2017. «Beyond LCOE: A Study of Ocean Energy Technology Development and Deployment Attractiveness». *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 19: 1-16. doi:10.1016/j.seta.2016.11.001.
- Hussain, Akhtar, Syed Muhammad Arif, y Muhammad Aslam. 2017. «Emerging Renewable and Sustainable Energy Technologies: State of the Art». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 71: 12-28. doi:10.1016/j.rser.2016.12.033.
- Wahyudie, A., M.A. Jama, T.B. Susilo, O. Saeed, C.S.A. Nandar, y K. Harib. 2017. «Simple Bottom-up Hierarchical Control Strategy for Heaving Wave Energy Converters». *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 87: 211-21. doi:10.1016/j.ijepes.2016.10.010.

Evaluación a corto y medio plazo de la inclusión una mezcla de microalgas en piensos para larvas de dorada (*Sparus aurata*)

P. Fernández-Morell (1), M^a. I. Sáez (1)

(1) Departamento de Biología y Geología, CeiMAR, Universidad de Almería, 04120 Almería, España. pfm990@ual.es

Resumen: El crecimiento de la población mundial plantea el desafío de producir alimentos suficientes y sostenibles, evitando la sobreexplotación del planeta. La acuicultura es crucial para la alimentación humana por su eficiencia, y los piensos basados en microalgas son una opción prometedora debido a su buen perfil nutricional y bajo impacto ambiental. Sin embargo, la estructura celular de algunas microalgas puede dificultar la liberación de nutrientes, por lo que se propone un pretratamiento enzimático para mejorar su biodisponibilidad. Este estudio evaluó el impacto de piensos funcionales con microalgas en la larva de dorada (*Sparus aurata*). A corto plazo, no hubo diferencias significativas en el crecimiento, pero se observó una menor deposición de lípidos y mayor proteína a medio plazo. La inclusión de microalgas mejoró la actividad enzimática digestiva y la respuesta antioxidante. Los resultados sugieren que las microalgas en dietas de destete son beneficiosas, aunque se recomienda seguir investigando para optimizar su uso.

Palabras clave: acuicultura, etapa larvaria, hidrólisis enzimática, microalgas, *Sparus aurata*.

1. INTRODUCCIÓN

La población mundial se encuentra en constante crecimiento. Se estima que la población aumentará, casi 2000 millones de personas en los próximos 30 años. Este aumento constante de la población supone una mayor demanda de alimentos (Yarnold et al., 2019). Ante este escenario se plantea el desafío de conseguir desarrollar alimentos que sean a la par sostenibles y con alta calidad nutricional. En este sentido, la acuicultura desempeña un papel cada vez más relevante en la alimentación. La producción acuícola alcanzó los 126 millones de toneladas en 2021; siendo 91 millones de toneladas de animales acuáticos toneladas de algas (FAO, 2021).

El aumento de la producción acuícola ha llevado a la mejora de harinas y piensos de pescado en la búsqueda por una acuicultura más sostenible. La harina de pescado se ha utilizado como la fuente predominante de proteína en alimentación en acuicultura, sin embargo, ésta es limitada debido a la sobreexplotación de las poblaciones silvestres y el encarecimiento de estas. Los piensos con inclusión de microalgas son una solución prometedora en la búsqueda de una acuicultura con piensos más completos y ricos nutricionalmente. La inclusión de microalgas en la producción acuícola supone un avance en la búsqueda de una mayor bioeconomía circular apoyando varios objetivos de desarrollo sostenible de las Naciones Unidas (N.º 1: fin de la pobreza, N.º 2: hambre cero, N.º 12: producción y consumo responsables y N.º 14: vida marina).

Se ha demostrado que las microalgas pueden mejorar la fisiología digestiva de los peces (Eze et al., 2013)

especialmente si se añaden en pequeñas proporciones a modo de aditivos funcionales debido a su riqueza en compuestos bioactivos. Estas pueden conformar hasta un 60% de proteínas y carbohidratos y un 70% de aceites (Rendón et al., 2015). Algunas son especialmente ricas en B-caroteno, aportando vitamina A, alta capacidad para producir el ácido graso poliinsaturado DHA, así como el ácido graso poliinsaturado EPA.

Aunque las microalgas son una fuente diversa de proteínas, lípidos y otras sustancias bioactivas, su estructura celular puede dificultar la liberación de los nutrientes que contienen las microalgas. Esta barrera física impide la asimilación directa de los nutrientes por los peces. Una alternativa es el uso de enzimas hidrolíticas capaces de debilitar las paredes celulares de las microalgas para mejorar la biodisponibilidad de nutrientes y compuestos bioactivos (Vizcaíno et al., 2019).

Muchas de las dietas formuladas hasta ahora son en su mayoría para la etapa de preengorde, no pudiendo extrapolarse a las dietas de etapa larvaria, ya que sus requerimientos nutricionales, así como la adsorción y digestión varía (Cahu & Zambonino Infante, 2001). De igual forma, se ha demostrado que alimentaciones puntuales con piensos suplementados con biomasa algal producen efectos a largo plazo sobre la composición nutricional y perfil de ácidos grasos del filete, pigmentación, parámetros texturales y nivel de oxidación lipídica del filete. Los resultados de los estudios anteriores validan la primera etapa de alimentación como una ventana de programación nutricional eficaz (Balasubramanian et al., 2016).

Surge entonces la hipótesis de si una programación nutricional basada exclusivamente en la dieta durante

el periodo larvario pudiera tener resultados a medio plazo aun cuando la exposición a esta dieta haya terminado. Así pues, aunando la necesidad de desarrollar alimentos sostenibles, con la búsqueda de una formulación óptima de dietas para peces en sus primeros estados de desarrollo, el presente estudio trata de evaluar la inclusión a baja proporción (5 y 10% p/p) de microalgas, crudas e hidrolizadas en la dieta de la dorada en estado larvario, y el efecto a medio plazo en etapa juvenil.

2. DESARROLLO

Para llevar a cabo este estudio, se realizó un ensayo de alimentación en la Planta de Cultivos Marinos del Instituto Español de Oceanografía (IEO) ubicada en Mazarrón (Murcia). Cada grupo de peces fue alimentado con una dieta experimental, 5 en total, elaboradas por el Servicio de Piensos Experimentales de la Universidad de Almería. Se utilizaron un total de 15 tanques de una capacidad de 200 L, evaluándose cada tratamiento por triplicado. El ensayo tuvo una duración de 135 días y se realizó en un circuito de flujo abierto, manteniendo la tasa de renovación del agua de mar en función de la necesidad de la dorada. Tras los 45 y 135 días de experimentación los animales fueron sacrificados por sobredosis de anestésico, seguido del corte de la espina dorsal. Figura 1.

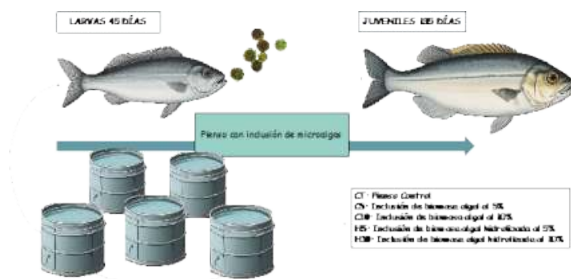


Fig. 1. Resumen general del diseño experimental.

A continuación, se tomaron muestras de intestino para actividad enzimática, músculo para oxidación de lípidos (TBARS, Thiobarbituric acid reactive substances), composición proximal y pigmentación de la piel en el caso de los juveniles. Para la composición proximal se midió porcentaje de humedad, ceniza, proteína bruta y lípidos totales. Se examinaron las actividades de enzimas tanto de secreción pancreática (tripsina, quimotripsina y proteasa alcalina total) como de enzimas de secreción intestinal (fosfatasa alcalina y leucina aminopeptidasa).

El nivel de oxidación de lípidos se evaluó mediante la cuantificación de las sustancias reactivas al ácido tiobarbitúrico (TBARS) en muestras de músculo. En los individuos juveniles se midió el color en la parte dorsal de la piel utilizando un colorímetro portátil según el sistema L*, a* y b*. El parámetro L*

representa la luminosidad en una escala de 100 puntos, donde el negro es 0 y el blanco es 100; el parámetro a* con valores positivos indica tonos rojizos y valores negativos indican tonos verdosos; mientras que el parámetro b* con valores positivos representa tonos amarillos y valores negativos representan tonos azulados.

3. RESULTADOS

Los resultados obtenidos indican que la inclusión de mezclas de microalgas en el pienso no causó efectos negativos sobre el crecimiento a corto plazo (45d) ni a medio plazo (135d), no observándose diferencias significativas ni en el peso ni longitud entre los lotes evaluados. Si consultamos literatura encontramos resultados contradictorios al respecto. Además, estudios previos han mostrado que la inclusión dietética de ciertas microalgas podría limitar el crecimiento debido a factores nutritivos en dichas algas.

El contenido proteico de los peces a los 45 días se vio afectado por el tratamiento, con valores superiores significativos en los peces alimentados con la dieta CT respecto a las dietas experimentales. En cuanto a los lípidos, aunque estos efectos no fueron estadísticamente significativos, si se determinó una tendencia hacia una mayor deposición de lípidos en los peces alimentados con la dieta CT, tal y como se describe en otros trabajos. Los lípidos son esenciales para el desarrollo de los peces, porque muchos de ellos no pueden producirlos por sí mismos, principalmente en peces marinos, como es el caso de los PUFAs-n3 de cadena larga, como EPA y DHA. No obstante, un gran contenido de estos lípidos implica un alto riesgo de estrés oxidativo, ya que son los principales sustratos de las especies reactivas del oxígeno (ERO) (Habte Tsion et al., 2020). Aunque las ERO desempeñan funciones importantes en la señalización celular y en la defensa contra patógenos, su exceso puede ser perjudicial. Un alto contenido de lípidos puede aumentar el riesgo de que las ERO ataquen y dañen estas moléculas. La peroxidación lipídica daña las membranas celulares y puede conducir a la pérdida de función celular y a la muerte celular, contribuyendo a diversas enfermedades y trastornos degenerativos y trastornos degenerativos (Gaxiola Robles et al., 2013).

Día de muestreo	Dietas	Parámetros(%)			
		HUMEDAD	CENIZAS	LÍPIDOS	PROTEÍNAS
45 d	CT	71.48 ± 2.84	16.67 ± 0.60	17.19 ± 0.34	65.28 ± 2.95*
	C5	72.96 ± 0.78	15.15 ± 1.60	16.36 ± 1.60	63.31 ± 0.28*
	C10	75.22 ± 2.63	16.09 ± 1.16	16.88 ± 0.39	64.19 ± 0.24*
	H5	75.31 ± 0.16	16.41 ± 1.93	15.77 ± 1.64	62.34 ± 2.14*
	H10	74.27 ± 0.46	15.73 ± 0.85	15.98 ± 0.44	63.21 ± 2.14**
	valor-p	0.292	0.785	0.175	0.006
	DOSIS	0.569	0.646	0.545	0.007
	PRETTQ	0.517	0.752	0.231	0.424
	DOSIS x PRETTQ	0.170	0.364	0.798	0.424
	135 d	CT	75.62 ± 0.39*	7.29 ± 0.27*	25.66 ± 1.13
C5		76.28 ± 0.26*	7.89 ± 0.33*	25.99 ± 0.67	70.81 ± 0.94
C10		74.86 ± 0.38*	7.69 ± 0.19*	24.40 ± 1.02	72.49 ± 0.24
H5		75.43 ± 0.31*	7.76 ± 0.09*	24.52 ± 1.49	73.00 ± 3.89
H10		76.6 ± 0.20*	7.56 ± 0.08**	24.20 ± 1.19	72.03 ± 0.86
valor-p		< 0.001	0.042	0.139	0.594
DOSIS		0.873	0.096	0.131	0.961
PRETTQ		0.165	0.723	0.083	0.245
DOSIS x PRETTQ		< 0.001	0.321	0.155	0.884

Tab i. Composición proximal del músculo (% del peso corporal).

En cuanto a la actividad enzimática, cabe esperar que, en un proceso normal de actividad enzimática, la tripsina, quimotripsina y proteasa aumenten de forma simultánea o en cadena, dándose una correlación entre ellas. Esto ocurre, por ejemplo, a los 135 días de experimentación. Sin embargo, a los 45 días, las larvas podrían estar aún en proceso de maduración de su actividad enzimática para hacer frente a la inclusión de las microalgas. De esta forma, en H10 la alta concentración de microalgas hidrolizadas podría liberar una mayor cantidad de compuestos bioactivos y péptidos. La tripsina es la enzima proteolítica clave en el proceso digestivo, que es autoactivada o activada por la enzima enteropeptidasa. Al comienzo, la tripsina podría aumentar su actividad en respuesta al incremento de sustratos. Sin embargo, a medida que la cantidad de productos de la digestión (aminoácidos y péptidos más pequeños) se acumulan, estos productos pueden actuar como inhibidores de la tripsina mediante retroalimentación negativa (Buddington & Krogdahl, 2004). Este aumento de compuestos bioactivos representa un estímulo significativo para las enzimas digestivas, de forma que se requiera una mayor actividad de proteasa para su digestión que podría saturar la respuesta enzimática específica para la tripsina, resultando en una actividad relativamente más baja. Con la actividad de la tripsina inhibida, otras proteasas pueden aumentar su actividad para compensar la demanda digestiva. En el caso del tratamiento H10, esto se reflejaría en un incremento significativo de la actividad de proteasa total a los 45 días. Por su parte, en los peces del lote H5, la concentración más baja de microalgas hidrolizadas podría proporcionar un estímulo suficiente para aumentar la actividad de tripsina sin saturar la respuesta enzimática. Además, la presencia de microalgas crudas en C5 y C10 puede inducir una respuesta más equilibrada de ambas enzimas, pero no tan marcada como en H5. Figura 2.

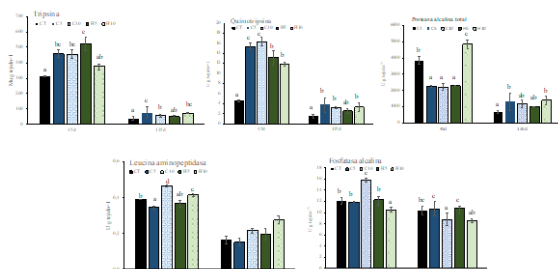


Fig. 2. Actividades enzimáticas digestivas medidas en extractos intestinales de larvas y juveniles de *S. aurata* alimentados con las dietas experimentales durante 45 y 135 días respectivamente. Los valores son la media \pm SD ($n = 9$, nueve extractos de intestinos por tratamiento dietético).

La actividad de algunas enzimas de la membrana del borde en cepillo, como la leucina amino-peptidasa y la fosfatasa alcalina, revela la integridad y la capacidad de absorción de la mucosa intestinal. La leucina amino-peptidasa, podría estar relacionada con aumento en la longitud de las microvellosidades y en

el área apical de los enterocitos. Según estudios previos, la inclusión en la dieta de diferentes especies de microalgas ejerce efectos positivos sobre la integridad del borde en cepillo apical, como el aumento de la longitud de las microvellosidades, el área apical de los enterocitos y el aumento de la superficie de absorción en los enterocitos (Vizcaíno et al., Galafat et al., 2020). En nuestro caso de estudio se observaron efectos superiores en el tratamiento crudo de alta concentración. Esto podría reflejar una capacidad reducida para liberar aminoácidos de la proteína de la dieta con inclusión de microalgas hidrolizadas. Además, este retraso en la tasa de entrega de aminoácidos libres de las proteínas de la dieta hidrolizada como consecuencia de la reducción de las actividades de las aminopeptidasas se sumaría a procesos menos eficientes de absorción y transporte a través de la mucosa intestinal. En este sentido, la actividad de la fosfatasa alcalina medida en la dieta cruda de alta concentración fue mayor y refleja la posibilidad de una mayor eficiencia en los procesos de absorción. Por otra parte, el pretratamiento con hidrolizado de la biomasa microalgal fue responsable de un aumento significativo de la respuesta antioxidante, en comparación con los peces CT, y también con aquellos alimentados con las dietas enriquecidas con microalgas crudas. Estos resultados sugieren que podría haberse producido un aumento de la liberación y mayor biodisponibilidad de algunos compuestos bioactivos internos contenidos en las células. Se ha descrito que la hidrólisis de la biomasa aumenta la capacidad antioxidante de las microalgas, probablemente debido a una mayor liberación de las sustancias antioxidantes intracelulares. Es interesante observar, que este efecto antioxidante se mantuvo, aunque en menor concentración, hasta la etapa juvenil, alimentados con pienso comercial trabajos (Sáez et al., 2022).

Respecto a la pigmentación, se observó que la inclusión de biomasa microalgal en las dietas influía en los parámetros de color, específicamente en la disminución de los valores a^* y el aumento de los de b^* . Aunque las tendencias observadas para la pigmentación sugieren que las microalgas crudas intensificaron estos efectos en comparación con la biomasa hidrolizada, el efecto de la inclusión de biomasa algal cruda a mayor concentración (C10) fue significativamente mayor al resto. Esto podría explicarse por el hecho de que algunos pigmentos contenidos en la biomasa hidrolizada podrían haber sido dañados en mayor medida al ser expuesto a las altas temperaturas propias de los tratamientos de extrusión a los que se somete los piensos para acuicultura (Sáez et al., 2022).

Resumiendo, la administración de biomasa de una mezcla de microalgas cruda a mayor dosis (C10) mostró en líneas generales, una mayor actividad enzimática; altos valores de tripsina y quimotripsina, mayor capacidad para liberar aminoácidos de la

proteína de la dieta y mayor eficiencia de absorción y transporte a través de la mucosa intestinal. El tratamiento hidrolizado de alta concentración mostró mejores resultados en el TBARS, con una disminución significativa de la oxidación de lípidos tanto en 45 como en 135 días. A grosso modo podemos decir que la inclusión de microalgas mostró una mejora en todos los parámetros frente al control, sin diferencias en el crecimiento a los 45 días y los 135 días.

4. CONCLUSIONES

Estos hallazgos indican que la inclusión de microalgas en las dietas de destete es una estrategia prometedora con efectos tanto a corto como a medio plazo en la dorada. Sin embargo, se recomienda continuar estudiando las combinaciones de especies de microalgas más idóneas, así como diferentes métodos de procesamiento, para optimizar el crecimiento y respuesta fisiológica de especies acuicultivadas en etapas tempranas

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto "Caracterización de hidrolizados de biomasa algal y evaluación de sus efectos sobre la funcionalidad digestiva, la calidad del músculo y vida útil del filete de la dorada (HYDRALGAE4BREAM- PID2021-122287OB-C21)

REFERENCIAS

Artículos en revistas:

- Balasubramanian, M. N., Panserat, S., Dupont-Nivet, M., Quillet, E., Montfort, J., Le Cam, A., Medale, F., Kaushik, S. J., & Geurden, I. (2016). Molecular pathways associated with the nutritional programming of plant-based diet acceptance in rainbow trout following an early feeding exposure. *BMC Genomics*, 17 (1), 449. <https://doi.org/10.1186/s12864-016-2804-1>
- Buddington, R. K., & Krogdahl, A. (2004). Hormonal regulation of the fish gastrointestinal tract. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A*, 139(2), 261–271. <https://doi.org/10.1016/j.cbpb.2004.09.007>
- Cahu, C., & Zambonino Infante, J. (2001). Substitution of live food by formulated diets in marine fish larvae. *Aquaculture*, 200(1-2), 161-180. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(01\)00699-8](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(01)00699-8)
- Eze CN, Onyejiaka CK, Ihim SA, Ayoka TO, Aduba CC, Ndukwe JK, Nwaiwu O, Onyeaka H. Bioactive compounds by microalgae and potentials for the management of some human disease conditions. *AIMS Microbiol.* 2023 Feb 7;9(1):55-74. doi: 10.3934/microbiol.2023004.

- FAO. (2024). *Fishery and Aquaculture Statistics – Yearbook 2021*. Roma, Italia: FAO. <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cc9523en>
- Galafat, A., Sáez, M. I., Perera, E., Vizcaíno, A. J., Mancera, J. M., Martos Sitcha, J. A., ... & Alarcón, F. J. (2021). Efecto de la inclusión de dos aditivos basados en microalgas sobre la funcionalidad digestiva en dorada. *Recursos Naturales Instituto de Ciencias Marinas de Andalucía (ICMAN). Digital. CSIC.* <http://hdl.handle.net/10261/268025>
- Gaxiola Robles, R., Bitzer Quintero, O. K., Méndez Rodríguez, L. C., Labrada Martagón, V., García Martagón, V., García-González, A., Ramírez González, A., Ramírez-Jirano, L. J., Veléz Jirano, L. J., Veléz-Alavez, M., & Alavez, M., & Zenteno-Zenteno--Savín, T. (2013). Peroxidación de lípidos y la respuesta del sistema de Savín, T. (2013). Peroxidación de lípidos y la respuesta del sistema de defensa antioxidante en el diabético tipo 2 obeso en comparación al diabético tipo 2 sin obesidad. *Nutrición Hospitalaria*, 28(6), 1966-1973. <https://doi.org/10.3305/nh.2013.28.6.6946>
- Habte-Tsion, H.-M., Kolimadu, G. D., Rossi Jr., W., Filer, K., & Kumar, V. (2020). Effects of Schizochytrium and micro-minerals on immune, antioxidant, inflammatory and lipid-metabolism status of *Micropterus salmoides* fed high- and low-fishmeal diets. *Scientific Reports*, 10(1), 7457. <https://doi.org/10.1038/s41598020-64214-3>
- Rendón, L. J., Ramírez, M. E., & Vélez, Y. (2015). Microalgas para la industria alimenticia. Editorial Universidad Pontificia Bolivariana.
- Sáez, M. I., Galafat, A., Vizcaíno, A. J., Chaves Pozo, E., Ayala, M. D., Arizcun, M., Alarcón, F. J., Suárez, M. D., & Martínez, T. F. (2022). Evaluation of Nannochloropsis gaditana raw and hydrolysed biomass at low inclusion level as dietary functional additive for gilthead seabream (*Sparus aurata*) juveniles. *Aquaculture*, 556, 738288. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2022.738288>
- Vizcaíno A.J., Sáez M.I., Martínez T.F., Acién F.G., Alarcón F.J. (2019). Differential hydrolysis of proteins of four microalgae by the digestive enzymes of gilthead sea bream and Senegalese sole, *Algal Research*, Volume 37, Pages 145-153, ISSN2211-9264. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2018.11.018>.
- Yarnold, J., Karan, H., Oey, M., & Hankamer, B. (2019). Microalgal Aquafeeds As Part of a Circular Bioeconomy. *Trends in Plant Science*, 24(10), 959-970. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2019.06.005>

Valorización del uso del biofloc como fuente proteica alternativa a la harina de pescado en el diseño de piensos para acuicultura sostenible

A. E. Ortiz-Maldonado (1), E. E. Rufino-Palomares (2), L. Pantoja-Echevarría (1), M. Ramos-Barbero (1), C.E. Trenzado (3), A. Pérez-Jiménez (1)

- (1) Departamento de Zoología, Universidad de Granada. anaestherom@ugr.es
- (2) Departamento de Bioquímica y Biología Molecular I, Universidad de Granada
- (3) Departamento de Biología celular, Universidad de Granada

Resumen: El presente trabajo se enmarca dentro del proyecto INNOVAFLOC-Potencial biotecnológico del biofloc en combinación con acuaponía para la optimización de un cultivo sostenible en mugilidos. Los resultados presentados corresponden a la fase inicial del mismo, en el que se produjeron harinas de biofloc como alternativa sostenible a la harina de pescado, bajo el prisma de la economía circular, a partir de subproductos de la industria agroalimentaria. Se ensayaron dos líneas de biofloc mezclando dos fuentes hidrocarbonadas: melaza y salvado de trigo (MST) y melaza y salvado de avena (MSA) con el fin de determinar su rendimiento, perfil nutricional y capacidad antioxidante. MSA obtuvo mejor rendimiento, con 150 g de harina seca/m³ de biofloc frente a MST, con 102.5 g de harina seca/m³. La microfauna asociada a base de flóculos bacterianos, protozoos ciliados, rotíferos, vorticelas, nematodos, copépodos, crustáceos y cianobacterias filamentosas constata al biofloc como fuente nutricional prometedora para especies de interés acuícola.

Palabras clave: biofloc, microfauna, salvado de avena, salvado de trigo.

La creciente demanda global de consumo de productos del mar ha conducido a la producción intensiva de especies acuáticas. En la búsqueda de soluciones que mitiguen el efecto del calentamiento global y reducción de la huella de carbono, están emergiendo nuevas técnicas de acuicultura sostenible en el marco de la economía circular, entre ellas, el cultivo en sistemas biofloc. Esta propuesta se presenta como una alternativa a los sistemas tradicionales de recirculación, (Recirculation Aquaculture System, RAS), al reducir prácticamente a cero la renovación de agua durante el cultivo de especies acuáticas en altas densidades, siendo de especial interés en aquellas áreas geográficas donde haya escasez de recursos hídricos o estén sobreexplotados (Otoshi *et al.*, 2007; Samocha *et al.*, 2012).

En los sistemas biofloc (Biofloc Technology, BFT) la nitrificación la llevan a cabo bacterias heterótrofas aerobias, entre ellas, *Bacillus sp.*, *Sphingomonas sp.*, *Pseudomonas sp.*, *Nitrospira sp.*, *Nitrobacter sp.* (Hosseini y Mohammadi, 2022) que consumen el nitrógeno total amoniacal (Total Ammonium Nitrogen, TAN) y crecen en forma de flóculos si se modifica la relación carbono/nitrógeno. Estas convierten el amonio en proteína alimentaria, que a su vez actúa como alimento para los organismos acuáticos, (Avnimelech, 1999; Ebeling *et al.*, 2006). Para ello, se ha de mantener una relación C: N de 15-20:1, a través de la adición de una fuente de carbohidratos a base de melaza, salvados de cereales, (trigo, arroz, avena), dextrosa o glicerol. La adición de carbohidratos reduce la fracción tóxica de amonio, promueve la proliferación de bacterias heterótrofas para la producción de proteína y la

inhibición del crecimiento de agentes patógenos (Panigrahi *et al.* 2019b).

Con estas bacterias heterótrofas cohabita un mesocosmos de microalgas, protozoos, nematodos, cianobacterias, zooplancton y materia orgánica que conforma un ecosistema integrado e interdependiente (Hargreaves, 2013), contribuyendo además con la bioseguridad e inhibición del crecimiento de agentes patógenos (Emerenciano *et al.* 2017). Constituye un alimento vivo natural con alto contenido en proteína, 25-50%, grasa, 0.5-15%, vitaminas, minerales y fósforo (Verster, 2017), además de ser un excelente probiótico (Ferreira *et al.* 2015; Jamal *et al.* 2020).

Sin embargo, los sistemas biofloc pueden acumular sólidos en suspensión en exceso (Schveitzer *et al.*, 2013), que pongan en riesgo el bienestar de las especies cultivadas por obstrucción branquial. No todas las especies toleran el cultivo bajo este sistema. En sistemas dulceacuícolas estos efluentes pueden ser usados como fertilizantes agrícolas (König *et al.*, 2018), mientras que en sistemas de agua salada la alternativa podría estar en la deshidratación de los flóculos para la elaboración de harinas que sustituyan en parte a la harina de pescado (Barman, 2020).

Una forma de aprovechar las ventajas de los sistemas biofloc evitando algunos de sus inconvenientes, sería la obtención de harinas de biofloc, que con la composición nutricional del cultivo propio de este sistema, pudieran ser empleadas en la elaboración de dietas funcionales. Por ello, y siempre con la perspectiva de la economía circular, el objetivo del presente estudio

fue evaluar el potencial de los flóculos bacterianos generados en un sistema biofloc (BFT) como fuente proteica alternativa a la harina de pescado, mediante el uso y reciclaje de subproductos de la industria agroalimentaria.

1. METODOLOGÍA

Se ensayaron dos líneas de biofloc mezclando dos fuentes hidrocarbonadas: melaza y salvado de trigo (MST) y melaza y salvado de avena (MSA) para la determinación de su rendimiento, perfil nutricional y capacidad antioxidante, estableciendo como hipótesis de partida que la composición proximal de la fuente hidrocarbonada empleada repercutirá en la calidad de la harina de biofloc elaborada.

El punto de partida de ambas líneas se llevó a cabo en tanques de reducido volumen (50L) en laboratorio húmedo, para servir posteriormente de inóculos a los tanques experimentales de producción, que consistieron en cuatro tanques cilindrocónicos de fibra de poliéster (2000L). Se establecieron dos réplicas para cada línea MST y MSA, ubicados en espacio exterior bajo estructura invernada y protegidos de la radiación solar intensa para evitar la proliferación excesiva de microalgas. Los tanques estaban provistos de aireación intensa mediante parrilla de fondo y temperatura y salinidad constantes de 25°C y 36 ‰, respectivamente, rango de pH entre 7.4-8, contenido amoniacal total (TAN) ≤ 1 mg/L, oxígeno disuelto (OD) $>75\%$ saturación, alcalinidad ≥ 100 mg/L y sólidos sedimentables (SS) ≤ 10 ml/L, de acuerdo con los requerimientos propios para los sistemas biofloc (BFT) (Emerenciano *et al.* 2017). El periodo experimental fue de 16 semanas.

Para el seguimiento de los parámetros físico-químicos del agua se empleó: para temperatura, salinidad pH y OD diariamente mediante sonda portátil multiparamétrica Hanna® HI98196; TAN se monitoreó dos veces en semana mediante fotómetro Hanna® HI96175. La alcalinidad, una vez por semana mediante kit volumétrico Merck® y la concentración de SS semanal mediante conos de sedimentación Imhoff.

Para la formación de flóculos se empleó como fuente proteica pienso comercial para peces marinos con un 48% de proteína. El contenido de nitrógeno en las proteínas fue del 16%, mientras que el contenido en carbono para melaza, trigo y avena fue de 40%, 21.72% y 60%, respectivamente.

Los cálculos para mantener la ratio C: N de 20: 1 en las dos líneas experimentales MST y MSA se hicieron según Avnimelech (1999); Pérez *et al.* (2016); Coehlo *et al.*, (2017) y Semwal *et al.* (2021). Con periodicidad semanal se añadió fermento probiótico a base de *Saccaromyces cerevisiae* de 24 horas de incubación (1 mg/L) con melaza (4 mg/L) y 0.1 mL de agua dulce filtrada y desinfectada.

La obtención de harina se hizo a partir del tamizado de un 3.5% diario del volumen del tanque, usando para ello tamiz de nylon de 70 μ m de luz de malla, posteriormente deshidratado en estufa 10h a 60°C y finalmente molido y conservado en frío.

2. RESULTADOS

La cantidad y calidad de los flóculos bacterianos se evaluó a partir de los sólidos sedimentables tras un mínimo de 15 minutos de sedimentación en los conos Imhoff (Sharma *et al.* 2018). A las dos semanas del cultivo se apreció una microfauna asociada a base de flóculos bacterianos, protozoos ciliados, vorticelas, nematodos, copépodos, crustáceos, cianobacterias filamentosas, hidrozoos y larvas de insectos quironómidos, que reflejan la calidad del ecosistema generado (Figura 1.a-i).

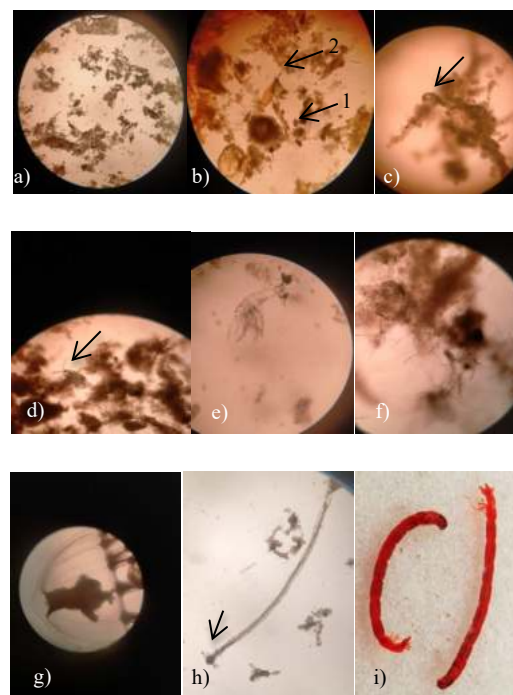


Fig.1. (a-i) Micrografías donde se muestra la microfauna asociada al biofloc obtenido en los tanques de producción (10x). a): Flóculos bacterianos; b): Protozoos ciliados *Euplotes* sp. (1) y *Vorticella* sp. (2); c): Nematodos; d): Copépodo *Tigriopus* sp.; e): Crustáceo anfípodo *Gammarus* sp.; f): cianobacterias filamentosas; g): Hidrozoo *Cladonema radiatum*; h): Hidra sp.; i): *Chironomus* sp.

Los resultados mostraron un mejor rendimiento en el biofloc generado con melaza y salvado de avena MSA frente al de melaza y salvado de trigo MST. Se produjo un promedio de 150 g de harina/m³ en MSA empleando menos materia prima proteica e hidrocarbonada que en la línea MST, que con mayores cantidades empleadas de fuente de proteína y carbohidratos, se produjo un promedio de 102.5 g/m³ (Figuras 2 y 3). Se emplearon 1.90 kg de fuente proteica, 2.62 kg de melaza y 3.13 kg de salvado de trigo para la línea MST, generando un promedio de 3.05 ml/L de sólidos sedimentables (SS), frente a

1.74 kg de fuente proteica, 2.40 kg de melaza y 1.07 kg de salvado de avena para la línea MSA, generando un promedio de 4.11 ml/L de sólidos sedimentables, SS (Figura 2). Se calculó un índice de conversión, IC, para precisar la cantidad de harina de biofloc producida por kg de materia prima proteica e hidrocarbonada empleadas en su elaboración, expresada mediante la siguiente fórmula:

$$IC: \frac{\sum[P (kg) + CH (kg)]}{Kg \text{ harina de biofloc}}$$

Siendo P el peso seco de la fracción proteica y CH el peso seco de la fracción de carbohidratos.

Los resultados mostraron IC_{MST}: 10.35 para la línea MST frente a IC_{MSA}: 6.32 para la línea MSA (Figura 4).

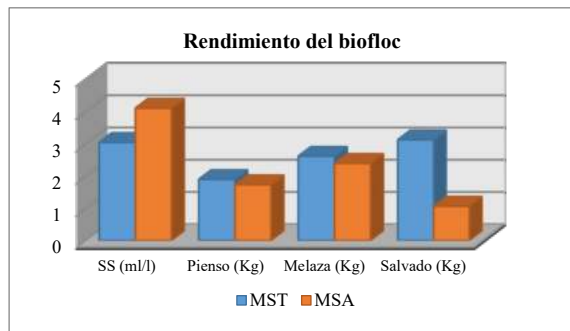


Figura 2. Rendimiento del biofloc según insumos de materias primas de fuentes de proteína y carbohidratos. SS: Sólidos sedimentables; MST: Melaza y salvado de trigo; MSA: Melaza y salvado de avena.

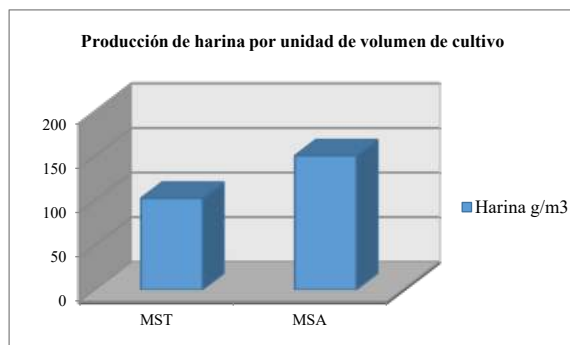


Figura 3. Producción de harina de biofloc por unidad de volumen según la fuente hidrocarbonada. MST: Melaza y salvado de trigo; MSA: Melaza y salvado de avena.

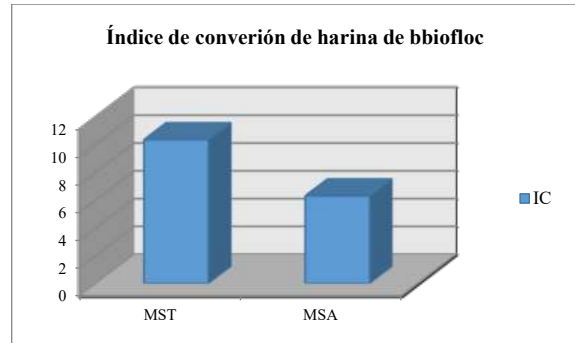


Figura 4. Índice de conversión de harina seca procesada en función de las materia prima seca, tanto proteica como hidrocarbonada empleada. MST: Melaza y salvado de trigo; MSA: Melaza y salvado de avena.

3. CONCLUSIONES

La tecnología biofloc se presenta como una innovadora biotecnología microbiana muy efectiva en la que los componentes nitrogenados tóxicos son convertidos por las bacterias heterótrofas del medio en proteína útil como complemento en la dieta de especies acuícolas. Esta tecnología se presenta como una alternativa sostenible que permite el cultivo de especies a altas densidades sin depender de la renovación de agua, al mismo tiempo que se le da un uso a subproductos agrícolas como es la melaza y salvados de cereales, en consonancia con la economía azul. El presente trabajo supone un avance en la innovación hacia técnicas más sostenibles basadas en el aprovechamiento de los flóculos como fuente proteica alternativa a la harina de pescado, de uso cada vez más controvertido en la elaboración de dietas para peces por su encarecimiento e insostenibilidad, y abriendo una oportunidad a la diversificación de las especies cultivables de alto valor nutricional.

Agradecimientos: Esta ponencia es parte de la ayuda PCM_00020, financiada por la Consejería de Universidad, Investigación e Innovación y el Gobierno de España y por la Unión Europea – NextGenerationEU.

REFERENCIAS

Avnimelech, Y. (1999). Carbon/nitrogen ratio as a control element in aquaculture systems. *Aquaculture* 176: 227-235.

Barman, D. (2020). Biofloc Based Fish Farming (BFT): A New Approach for employment generation & sustainable aquaculture in India. *Aquaculture Europe*. 45:14-17.

Coehlo, M.G., Martínez-Córdova, L.R., Martínez-Porchas, M. y Miranda-Baeza, A. (2017). Biofloc Technology (BFT): A Tool for water quality management in aquaculture. En H. Tutu (Ed.), *Water Quality*. Capítulo 5: 91-109.

Ebeling, J. T. (2006). Engineering analysis of the stoichiometry of photoautotrophic, autotrophic,

- and heterotrophic removal of ammonia-nitrogen in aquaculture systems. *Aquaculture* 257: 346-358.
- Emerenciano, M. G. C., Martínez-Córdova, L. R., Martínez-Porchas, M., Miranda-Baeza, A. (2017). Biofloc technology (BFT): a tool for water quality management in aquaculture. *Water quality* 5: 92-109.
- Ferreira, G.S., Bolívar N.C., Pereira, S.A., Guertler, C., Vieira, F.N., Mouriño, J.L.P., Seiffert, W.Q. (2015) Microbial biofloc as source of probiotic bacteria for the culture of *Litopenaeus vannamei*. *Aquaculture* 448: 273–279.
- Hargreaves, J.A. (2013). *Biofloc production systems for aquaculture*. (Vol. 4503, pp.1-11). Stoneville MS, USA: Southern Regional Aquaculture Center.
- Hossein, M., Mohammadi, A. (2022). Microorganisms in biofloc aquaculture system. *Aquaculture Reports*, 26(May), 101300
- Jamal, M. T., Sumon, A. A., Pugazhendhi, A., Al Harbi, M., Hussain, A., Haque, F. (2020). Use of probiotics in commercially important finfish aquaculture. *International Journal of Probiotics & Prebiotics* 15: 7-21.
- König, B., Janker, J., Reinhardt, T., Villarroel, M., Junge, R. (2018). Analysis of aquaponics as an emerging technological innovation system. *Journal of cleaner production* 180: 232-243.
- Otoshi, C. N. (2007). Shrimp behaviour may affect culture performance at super-intensive stocking densities. *Global Aquaculture Advocate* 2): 67-69
- Panigrahi, A., Sundaram, M., Chakrapani, S., Rajasekar, S., Syama Dayal, J., Chavali, G. (2019). Effect of carbon and nitrogen ratio (C: N) manipulation on the production performance and immunity of Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei* (Boone, 1931) in a biofloc-based rearing system. *Aquaculture Research* 50: 29-41.
- Pérez, J., Hernández, M., Pérez, C., Fogel, I. (2016). C: N ratios affect nitrogen removal and production of Nile tilapia *Oreochromis niloticus* raised in a biofloc system under high density cultivation. *Aquaculture* 452: 247-251.
- Samocha, T. M., Schweitzer, R., Krummenauer, D., Morris, T. C. (2012). Recent advances in super-intensive, zeroexchange shrimp raceway systems. *Global Aquaculture Advocate* 15: 70-71.
- Senwal, A., Kumar, A., Arya, P., Upreti, U. (2021). Chapter9. Biofloc Technology: *Intensive Aquaculture Practice*. En J. Kumar (Ed.),
- Research Trends in Fisheries and Aquatic Sciences. 12: 173-196.
- Sharma, A., Bandhana, R. S., Sangotra, R. (2018). Comparison of water quality and composition of bioflocs reared in indoor and outdoor conditions. *International Research Journal of Biological Sciences* : 1-9.
- Schweitzer, R. A. (20013). Effect of different biofloc levels on microbial activity, water quality and performance of *Litopenaeus vannamei* in a tank system operated with no water exchange. *Aquaculture Engineering* 56: 59-70.
- Verster, N. (2017). Comparison of growth rates of tilapia species (*Oreochromis mossambicus* and *Oreochromis niloticus*) raised in a biofloc and a standard recirculating. *Master's Thesis. Ghent University, St. Pietersnieuwstraat, Belgium*.

Assessment of salt-marsh restoration in an eco-dynamic hot-spot area in the Guadalquivir Estuary (Spain): A remote-sensing and stochastic approach.

A. Ríos (1), P. Magaña (1), M. Díez-Minguito (1), M. Cobos (1), I. Caballero (2) y E. Contreras (3)

- (1) Instituto Interuniversitario De Investigación Del Sistema Tierra En Andalucía (IISTA). ariosan1@ugr.es.
(2) Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)
(3) Universidad de Córdoba (UCO).

Resumen: Este estudio identifica el área óptima para la recuperación de marismas en el estuario del Guadalquivir. Se evaluaron cuatro áreas potenciales en el bajo estuario basándose en criterios como proximidad al canal principal, topografía, vegetación, temperatura y huella histórica humana. Utilizando teledetección, se analizaron índices de vegetación (NDVI), agua superficial (LSWI), cambios en la cobertura vegetal (SAVI), estrés hídrico (MSI) y temperatura superficial (T) y mediante un análisis multicriterio se seleccionó el área óptima. Los resultados mostraron variabilidad en las zonas, vinculada a ciclos estacionales y sequías. Un análisis estocástico corroboró estos ciclos y una tendencia descendente de los índices entre 2015 y 2022. El análisis multicriterio destacó la zona 2 por su consistencia en vegetación, agua superficial, topografía plana y menor variación de temperatura. La zona 2 es ideal para mejorar la salud ambiental y fomentar áreas de cría en el Golfo de Cádiz.

Palabras clave: estuario, Guadalquivir, marisma, teledetección, vegetación.

1. INTRODUCCIÓN

Las marismas representan un importante activo socioeconómico y ecológico dentro de los ecosistemas estuarinos. Proporcionan una variedad de servicios medioambientales, incluyendo producción primaria, captura de sedimentos, protección contra inundaciones y secuestro de carbono a largo plazo. Sin embargo, los procesos antropogénicos dentro de estos ecosistemas han llevado a una degradación continua debido a la reclamación de tierras y actividades socioeconómicas, resultando en una erosión constante y un balance negativo en la estabilidad del sistema. Estas actividades humanas pueden resultar en hipertrubidez y eutrofización dentro de estas regiones (Ruiz et al., 2017). Además, el cambio climático también juega un papel significativo en la degradación de las marismas. Estudios recientes indican que la subida del nivel del mar está aislando y fragmentando los hábitats en los ecosistemas estuarinos, los cuales no pueden expandirse debido a la ocupación humana. Por ello, los esfuerzos se centran en la recuperación y restauración de estos ecosistemas, ya que mitigan eficazmente los efectos del cambio climático.

Se han llevado a cabo proyectos previos de restauración, como la restauración de la mayor marisma mareal en la Bahía de Delaware (Teal and Weinstein, 2002), demostrando la capacidad de estas áreas en proporcionar producción primaria constante.

Boerema et al. (2016) con el modelo Marsed demostraron las capacidades de captura de sedimentos y la sucesión ecológica. Duarte et al. (2013) destacaron el papel de la vegetación de marismas en la mitigación de inundaciones y su potencial para adaptarse al cambio climático. Silan et al. (2024) demostraron que los humedales dominados por *Phragmites australis* tienen una gran capacidad excepcional de secuestro de CO₂.

El estuario del Guadalquivir a su vez ha sufrido proyectos piloto de restauración de marismas durante las últimas dos décadas. Gallego Fernández et al. (2007) propusieron una metodología en la que se realizaron dos restauraciones en la parte baja del estuario del Guadalquivir, dividiendo la marisma en dos zonas: una sujeta a intervención humana continua y la otra dejada a su curso natural. Un proyecto de restauración reciente, a manos de WWF, ha demostrado la capacidad del humedal Lucio Adventus para capturar sedimentos y CO₂ del estuario y devolver agua fresca y limpia al sistema (Rodríguez-Gómez et al., 2023).

Estas experiencias piloto en el estuario han estado limitadas en escala y carecen de una monitorización a largo plazo para evaluar sus impactos, tanto localmente como en todo el estuario. Además, se necesitan áreas de mayor tamaño para tener un impacto ecológico significativo. Actualmente, no existe una evaluación integral para identificar las

zonas más óptimas para la restauración de marismas en la región del Guadalquivir.

El estuario del Guadalquivir está sujeto a condiciones de alta turbidez (Caballero et al., 2014; Ruiz et al., 2017) y fragmentación del hábitat, lo que reduce su producción primaria. Esto resulta en la formación de un sistema con bajo oxígeno disuelto, alto dióxido de carbono y una gran cantidad de sólidos en suspensión (Ruiz et al., 2017), lo que a su vez limita la producción primaria. Las principales causas son las actividades humanas en el estuario, como dragados, reclamación de tierras, corte de meandros y regulaciones de la cuenca (Ruiz et al., 2015). Siles-Ajamil et al. (2019), en consonancia con propuestas de diferentes organizaciones y administraciones públicas y las tendencias actuales en la recuperación de ecosistemas, analizaron los impactos hidrodinámicos de la recuperación de marismas mareales en el estuario del Guadalquivir. Un estudio de las marismas de Doñana ha revelado que el intercambio de aguas con el estuario del Guadalquivir tiene un impacto beneficioso en el estado biogeoquímico del sistema estuarino. Este intercambio convierte al sistema en un sumidero de CO₂ y CH₄, debido a la regulación de la metanogénesis por factores como la temperatura y la salinidad, y la influencia de los ciclos hidrológicos en las emisiones de gases (Huertas et al., 2017; Huertas et al., 2019).

El objetivo general de este estudio es identificar áreas óptimas de marismas dentro del estuario del Guadalquivir con el fin de mejorar la calidad del agua y la producción biológica. Se busca mejorar el intercambio biogeoquímico y la captura de sedimentos, reduciendo así la turbidez y aumentando la conectividad y complejidad de la red de caños.

Para lograr este objetivo, se seleccionaron cuatro zonas en la parte baja del estuario. Se evaluaron sendos índices NDVI, LSWI, SAVI, MSI y temperatura(T) para cuantificar la salud de la vegetación y la humedad del suelo y se realizó un análisis multicriterio, teniendo en cuenta los factores principales que influyen en la restauración de marismas y se eligió el área idónea en base a su resultado.

2. DESARROLLO

Se seleccionaron 4 áreas dentro del bajo estuario para el estudio:

Zona 1: Albardones (1.41 km²): Principalmente marisma, con tierras improductivas y susceptibles de convertirse en pastizales (Gallego Fernández et al., 2007). **Zona 2:** Codo de la Esparraguera (2.8 km²): Importante para la acuicultura, designada como improductiva por el SIGPAC. **Zona 3:** Seno de la

Esparraguera (1.45 km²): Proyecto de restauración de marismas en desarrollo, adecuado para uso agrícola. **Zona 4:** Isla Mayor (1.44 km²): Historial de cultivo de arroz, adecuada para arado y pastoreo.

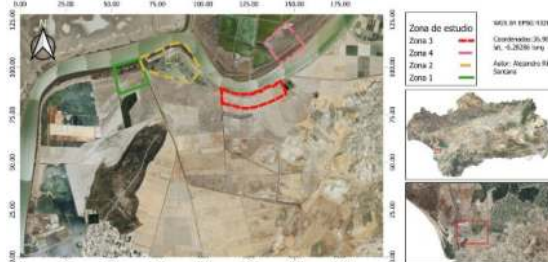


Figura 1: Localización de las zonas de estudio dentro del estuario del Guadalquivir.

Google Earth Engine se utilizó para programar los índices mencionados, con imágenes de Sentinel-2 y Landsat-8.

En el análisis de datos, se empleó el paquete Marine Tools de Python según la metodología de Cobos et al. (2022).

Finalmente, se ha llevado a cabo un análisis multicriterio de todas las variables que afectan dentro de una restauración de marismas y se elige la zona más óptima en consecuencia.

3. RESULTADOS

3.1 Variabilidad espacial

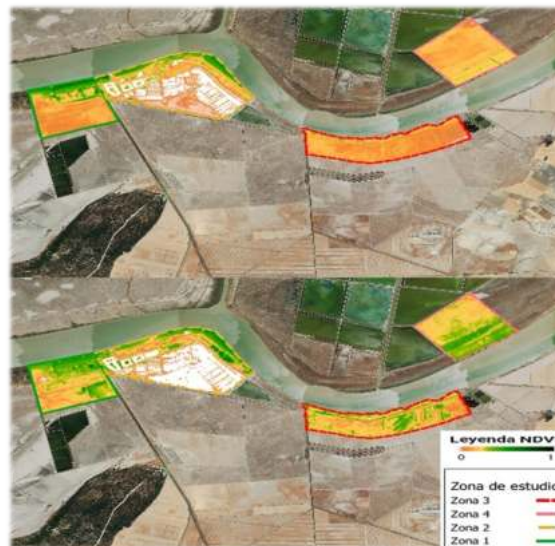


Figura 2: Índice NDVI representado en las estaciones de verano (arriba) e invierno (abajo). Colores cobrizos corresponden a suelos desnudos mientras que los verdosos a suelos vegetados.

Durante el verano, la vegetación es escasa y se localiza generalmente en las riberas de las zonas 1 y 2 debido al intercambio de agua y la humedad del suelo en estas áreas. La zona 1 presenta los valores más altos de NDVI, lo cual se atribuye a la conversión

de la parte norte en una marisma, constituida por una red de caños mareales que facilitan el flujo de agua dentro y fuera del humedal. La zona 2 también muestra valores notables de NDVI, principalmente en la zona ribereña, lo que puede explicarse por su topografía distintiva que permite la inundación y el crecimiento de vegetación cerca del canal principal. En contraste, las zonas 3 y 4 presentan valores de NDVI comparables y poca vegetación, lo que podría deberse a la topografía del área o la presencia de vegetación estacional que solo florece durante el invierno.

Además, las temperaturas más altas en verano en las zonas 3 y 4 contribuyen a esta escasez de vegetación. En general, las zonas 1 y 2 retienen cierta vegetación durante los períodos de sequía, lo que podría ser de interés para futuras consideraciones de restauración de marismas. Durante el invierno, la vegetación se localiza principalmente cerca del canal principal del estuario, probablemente debido a la humedad del suelo en estas áreas y a las temperaturas más bajas que se experimentan en esta estación. Esta humedad facilita un crecimiento sustancial de vegetación en las áreas ribereñas. Las zonas 1 y 2 exhiben un color verde más oscuro, lo que indica una vegetación abundante en comparación con las zonas 3 y 4, que presentan valores de NDVI más bajos. Esto podría deberse a la humedad del suelo o a la presencia de vegetación característica que florece en una estación específica. La zona 3 muestra parches de vegetación situados a una considerable distancia de la ribera, sugiriendo que esta vegetación depende menos de la humedad del suelo o de la existencia de una red de caños mareales que proporcionan flujo de agua hacia el interior. Además, los episodios de precipitación durante los meses de invierno en climas mediterráneos tienen un impacto significativo en el crecimiento de la vegetación por lo que sería otra variable a tener en cuenta.

3.2 Variabilidad temporal

La figura 3 ofrece información sobre los índices en cada zona. El índice NDVI muestra que cada máximo coincide con un máximo previo en el índice LSWI, sugiriendo los tiempos de asimilación de agua por la vegetación y su respuesta en el crecimiento. El índice MSI tiene mínimos simultáneos con los máximos de LSWI, señalando menos estrés vegetal. El efecto de la temperatura se puede observar a simple vista, denotando mínimos en NDVI y LSWI cuando se produce un máximo y siguiendo tendencia similar al MSI. Las series temporales del NDVI revelan variaciones estacionales consistentes, con la zona 2 mostrando los valores más bajos pero estables. Las zonas 3 y 4 tienen los valores más altos en invierno, decreciendo en verano por falta de agua.

Las zonas 1 y 2, cerca del estuario, mantienen su vegetación característica incluso en los meses de

verano. El índice LSWI muestra patrones distintivos, con máximos y mínimos sincronizados en todas las zonas excepto 1, 3, y 4, que caen por debajo de cero indicando sequedad predominante. La zona 2 retiene agua superficial consistentemente, facilitando el crecimiento de la vegetación. Las zonas 3 y 4 tienen los valores más altos y bajos de LSWI, indicando vegetación densa durante meses húmedos pero suelo improductivo el resto del año. En conclusión, este análisis destaca cómo los índices reflejan variaciones estacionales en la vegetación y humedad del suelo, mostrando diferencias significativas entre zonas con acceso constante al agua y aquellas dependientes de precipitación estacional.

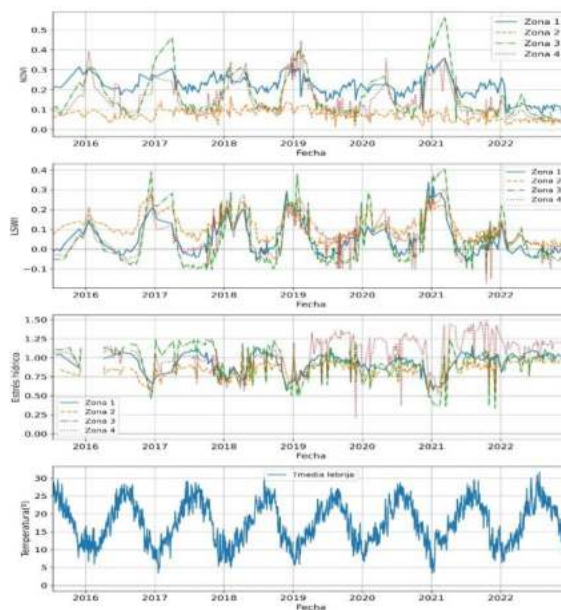


Figura 3: Series temporales para los índices y la temperatura. Eje y representa la variable de estudio mientras que el eje x su evolución a lo largo del periodo de estudio.

3.3 Análisis multicriterio

La restauración de marismas requiere un análisis detallado de múltiples factores para identificar las mejores áreas. Se ha realizado un análisis multicriterio para evaluar variables clave que afectan la viabilidad y el éxito del proyecto. Se ha utilizado una tabla la cual evalúa el peso de cada variable en la restauración y en base a ello, le asigna una puntuación, la cual sumada al resto de variables entregará un valor final para cada zona.

Factor	Indicador	Peso	Puntuaje				
			Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	
NDVI/SAVI	Cantidad y salud de la vegetación	0,5	5	1,5	4	4,25	
LSWI	Agua superficial contenida	0,7	4,9	7	4,55	3,5	
MSI	Estrés hídrico	-0,25	-2,125	-1,75	-2	-2,5	
Elevación Área	Elevación del terreno	-0,35	-2,8	-2,1	-2,8	-2,8	
Localización	Área de la zona de estudio	-0,10	-0,5	-1	-0,5	-0,5	
Temperatura	Existencia de accesos/caños	0,45	4,5	4,5	4,5	4,5	
Marisma	Temperatura media de la zona	-0,25	-2,25	-1,25	-2,5	-2,25	
Interconexión	Existencia de marisma histórica	0,2	2	2	2	0	
Restauración	Conexión con z.marismas colindantes	0,25	2,5	2,5	2,5	0	
	Impacto producido por la propia rest.	-0,15	-1,5	-1,5	-1,5	-1,5	
	Total		1	9,725	9,9	8,25	2,7

Tabla 1: Pesos y puntuación de cada variable en cada zona de estudio.

Las puntuaciones se han asignado en función del valor de los índices y la presencia o ausencia de alguno de los indicadores, como la presencia de caños, si era marisma histórica, si existe conexiones entre zonas, etc.

En concordancia con los resultados presentados por la tabla, la zona óptima para recuperación sería la zona 2, seguida de la zona 1, la 3 y por último la 4.

4. CONCLUSIONES

Acorde con los resultados, la Zona 2 se presenta como la ubicación óptima para la restauración de marismas. Esta zona destaca por tener la topografía más baja y los valores más altos de LSWI, además de contar con una red de caños mareales bien desarrollada. Los resultados del análisis estocástico indican que la Zona 2 muestra la menor variabilidad entre las cuatro zonas evaluadas.

Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada Junta de Andalucía - Consejería de Universidad, Investigación e Innovación - Proyecto ProyExcel_00375, EPICOS.

REFERENCIAS

- Boerema, A.; Geerts, L.; Oosterlee, L.; Temmerman, S.; Meire, P. Ecosystem service delivery in restoration projects: the effect of ecological succession on the benefits of tidal marsh restoration. *Ecology and Society* 2016, 21, art10. <https://doi.org/10.5751/ES-08372-210210>.
- Caballero, I.; Morris, E.P.; Ruiz, J.; Navarro, G. Assessment of suspended solids in the Guadalquivir estuary using new DEIMOS-1 medium spatial resolution imagery. *Remote Sensing of Environment* 2014, 146, 148–158. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.047>.
- Cobos, M.; Otiñar, P.; Magaña, P.; Baquerizo, A. A method to characterize climate, Earth or environmental vector random processes. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 2022, 36, 4073–4085. <https://doi.org/10.1007/s00477-022-02260-9>.
- Duarte, C.M.; Losada, I.J.; Hendriks, I.E.; Mazarrasa, I.; Marbà, N. The role of coastal plant communities for climate change mitigation and adaptation. *Nature Climate Change* 2013, 3, 961–999. <https://doi.org/10.1038/nclimate1970>.
- Huertas, I.E.; Morris, E.P. Dissolved carbon dioxide within aquatic areas of Doñana Natural Area (2010–2013). *Estuaries and Coasts* 2017, 40, 14. <https://doi.org/10.20350/DIGITALCSIC/850514>.
- Huertas, I.E.; De La Paz, M.; Perez, F.F.; Navarro, G.; Flecha, S. Methane Emissions From the Salt Marshes of Doñana Wetlands: Spatio-Temporal Variability and Controlling Factors. *Frontiers in Ecology and Evolution* 2019, 7, 32. <https://doi.org/10.3389/fevo.2019.00032>.
- Gallego Fernández, J.B.; García Novo, F. High-intensity versus low-intensity restoration alternatives of a tidal marsh in Guadalquivir estuary, SW Spain. *Ecological Engineering* 2007, 30, 112–121. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2006.11.005>.
- Rodríguez-Gómez, S.; Montes-Pérez, J.J.; Warren-Jiménez, P.; Gil Gil, T.; Conejo-Orosa, T.; Moreno-Ostos, E. La desecación de humedales favorece la emisión de CO2 desde los sedimentos emergidos. *Ecosistemas* 2023, 32, 2494. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2494>.
- Ruiz, J.; Polo, M.J.; Díez-Minguito, M.; Navarro, G.; Morris, E.P.; Huertas, E.; Caballero, I.; Contreras, E.; Losada, M.A. The Guadalquivir Estuary: A Hot Spot for Environmental and Human Conflicts. In *Environmental Management and Governance*; Finkl, C.W.; Makowski, C., Eds.; Springer International Publishing: Cham, 2015; Vol. 8, pp. 199–232. Series Title: Coastal Research Library, https://doi.org/10.1007/978-3-319-06305-8_8.
- Ruiz, J.; Macías, D.; Navarro, G. Natural forcings on a transformed territory overshoot thresholds of primary productivity in the Guadalquivir estuary. *Continental Shelf Research* 2017, 148, 199–207. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2017.09.002>.
- Silan, G.; Buosi, A.; Bertolini, C.; Sfriso, A. Dynamics and drivers of carbon sequestration and storage capacity in *Phragmites australis*-dominated wetlands. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 2024, 298, 108640. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2024.108640>.
- Siles-Ajamil, R.; Díez-Minguito, M.; Losada, M. Tide propagation and salinity distribution response to changes in water depth and channel network in the Guadalquivir River Estuary: An exploratory model approach. *Ocean & Coastal Management* 2019, 174, 92–107. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2019.03.015>.
- Teal, J.M.; Weinstein, M.P. Ecological engineering, design, and construction considerations for marsh restorations in Delaware Bay, USA. *Ecological Engineering* 2002, 18, 607–618. [https://doi.org/10.1016/S0925-8574\(02\)00023-X](https://doi.org/10.1016/S0925-8574(02)00023-X).

Evaluación de la biomasa cruda e hidrolizada de una mezcla de microalgas más *Alaria esculenta* a bajo nivel de inclusión como aditivo funcional en la dieta de juveniles de dorada

Ruiz-Rodríguez, Isabel (1); Morell, Paloma (1); Sáez, M^a Isabel (1)

(1) Departamento de Biología y Geología, CeiMAR, Universidad de Almería, 04120 Almería, España. isabelruizrodriguez2002@gmail.com

Resumen: El objetivo de este estudio fue la evolución mediante un ensayo *in vivo* del crecimiento, composición proximal, pigmentación de la piel, oxidación lipídica, perfil de ácidos grasos del músculo y funcionalidad digestiva de juveniles de dorada (*Sparus aurata*) alimentados durante 90 días con dietas experimentales que contenían una baja inclusión de una mezcla compleja de microalgas (5% y 10%) y la macroalga *Alaria esculenta* (0,5% y 1 %). La inclusión de la biomasa algal se realizó en estado crudo (C5 y C10) y en estado hidrolizado (H5 y H10). Los juveniles de los tratamientos C10 y H5 mostraron un mayor crecimiento. Del mismo modo, los peces alimentados con las dietas suplementadas con algas mostraron una disminución del contenido lipídico, reducción de la oxidación lipídica y mejor coloración de la piel, más vercosa y amarillenta. Las actividades enzimáticas mostraron una mejora, salvo la fosfatasa alcalina.

Palabras clave: *Alaria esculenta*, hidrólisis enzimática, microalgas, *Sparus aurata*.

1. INTRODUCCIÓN

El sector acuícola se encuentra en auge en las últimas décadas (Ahmad *et al.*, 2022). Este incremento se debe principalmente al estancamiento de la pesca y a la necesidad de proveer pescado a la población. Además se espera que el consumo mundial *per capita* de pescado aumente hasta los 21,2 kg para el año 2030, con respecto a los 20,5 kg registrados entre los años 2018 y 2020 (FAO, 2022).

Tradicionalmente, los piensos acuícolas han sido formulados a base de harina y aceite de pescado por su alto contenido en proteínas y perfil de ácidos grasos poliinsaturados de cadena larga de la serie omega 3 (EPA y DHA) (Chen *et al.*, 2021; Idenyi *et al.* 2022). Sin embargo, no es una vía sostenible por la fuerte disminución de peces silvestres cada vez más acentuada por su sobreexplotación. Por ello, surge la necesidad de encontrar alternativas más sostenibles y eficientes (Ansari *et al.*, 2021).

Una de estas alternativas es el uso de harinas derivadas de fuentes vegetales como soja, maíz o trigo. Presentan una serie de características positivas como su disponibilidad y bajo costo, su alto contenido en proteínas, vitaminas y aminoácidos (Zaretabar *et al.*, 2021; Watson *et al.*, 2020). Sin embargo, presentan también ciertas limitaciones como deficiencia en ciertos aminoácidos esenciales, como lisina y metionina, pobres en ácidos grasos omega 3 y además contienen factores antinutricionales que en altas proporciones en piensos pueden dificultar la digestión de estos ingredientes afectando negativamente a los peces, ocasionando lesiones intestinales o afectar a las branquias (Kokou y Fountoulaki., 2018; Ansari *et al.*, 2021).

Por todo ello, surge otra alternativa basada en el uso de microalgas y macroalgas. Las algas presentan un elevado contenido en proteínas (20-55%), con una proporción equilibrada de aminoácidos esenciales y no esenciales. El contenido lipídico oscila entre un 20-55%, siendo especialmente ricas en ácidos grasos poliinsaturados de cadena larga de la serie omega 3 (Ahmad *et al.*, 2022; Galafat *et al.*, 2022; Sáez *et al.*, 2022). Además, son fuente de vitaminas, pigmentos, minerales y polisacáridos. Algunas de las algas más recurrentes son *Arthrospira platensis* y *Chlorella vulgaris*, muy ricas en proteínas; *Microchloropsis gaditana*, que se caracteriza por su contenido en EPA; *Isochrysis galbana* y *Schizochitrium* sp., que sintetizan gran cantidad de DHA; *Dunaliella salina* y *Haematococcus pluvialis*; muy ricas en carotenoides con propiedades antioxidantes como β -caroteno y astaxantina; y *Alaria esculenta*, empleada por su alto contenido en compuestos bioactivos. Su inclusión es inferior al 10% debido a su elevado precio, por lo que no se usan como ingrediente sino como aditivo funcional, ya que se ha observado que a pesar de incluirse en baja proporción mejoran las características generales del pescado.

A pesar de todas estas consideraciones, las micro y macroalgas presentan una pared celular polisacáridica que podría dificultar la accesibilidad de los compuestos intracelulares de interés (Sáez *et al.*, 2022). Además, la mayoría de especies de peces acuicultivos no poseen las enzimas digestivas necesarias para degradar estos polisacáridos. De esta forma, surge la necesidad de diseñar estrategias para debilitar o romper la pared celular, siendo una opción viable la realización de pretratamientos enzimáticos sobre la biomasa algal (Zuorro *et al.*, 2016; Galafat *et al.*, 2022)

2. DESARROLLO

Se formularon y elaboraron 5 dietas experimentales en el Servicio de Dietas Experimentales de la Universidad de Almería. Una dieta control a base de harina y aceite de pescado (CT), seguida de dos piensos enriquecidos con un 5% de una mezcla compleja de microalgas y un 0,5% de la macroalga *Alaria esculenta*, uno de ellos con la biomasa cruda (C5) y otro con la biomasa hidrolizada (H5). Los dos últimos piensos contienen un 10% de una mezcla compleja de microalgas y un 1% de la macroalga *Alaria esculenta*, uno de ellos con la biomasa cruda (C10) y el último presenta un pretratamiento enzimático (H10). Cada uno de estos tratamientos se divide en tres tanques con 30 peces, los cuales fueron alimentados con sus respectivas dietas. A los 45 y 90 días del inicio del ensayo de alimentación, se tomaron 12 individuos por tanque para sus análisis pertinentes.

Se analizó la composición proximal del músculo y de las diferentes dietas. Para ello, se midió el porcentaje de materia seca, cenizas y proteína cruda, la cantidad de lípidos totales y el perfil de ácidos grasos. Seguidamente, se determinó la oxidación de lípidos en el músculo e hígado.

Para la determinación de la pigmentación de la piel, se realizaron tres mediciones en la piel del músculo dorsal anterior de 10 peces de cada tanque utilizando un espectrofotómetro portátil (Chroma Meter CR-400, KONICA-MINOLTA) que trabaja en el espacio de color CIE, que incluye los siguientes parámetros: L*, hace referencia a la luminosidad, donde el valor 100 es blanco y el valor 0 es negro; el parámetro a* representa con valores positivos, la coloración rojiza, y con valores negativos, la coloración verdosa; y el parámetro b* representa, con valores positivos, tonalidades amarillentas, y con valores negativos, tonalidades azuladas.

Finalmente, la determinación de la actividad de las enzimas digestivas se llevó a cabo mediante la preparación de los extractos enzimáticos digestivos utilizando 4 intestinos por tanque, homogeneizando, sonicando y centrifugando las muestras y conservándolas a -20°C para, posteriormente, analizar la funcionalidad digestiva de dos grupos enzimáticos: pancreáticas (tripsina, quimotripsina y proteasa alcalina total) e intestinales (leucina aminopeptidasa y fosfatasa alcalina) espectrofotométricamente en microplaca.

3. RESULTADOS

En general, todos los peces triplicaron su peso tras 90 días del ensayo de alimentación, siendo los peces de los lotes C10 y H5 aquellos que mostraron un mayor peso, lo cual resulta interesante ya que una inclusión más baja de biomasa hidrolizada de microalgas (5%) resulta en un crecimiento similar al que se observa en

aquellos peces alimentados con piensos con un 10% de biomasa cruda de algas (Fig. 1).

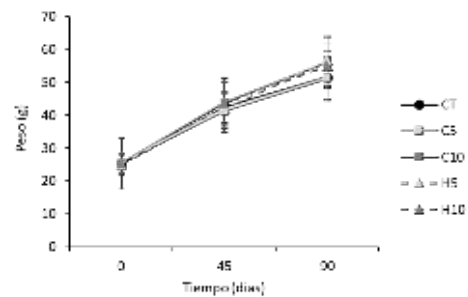


Fig. 1. Evolución del peso (gramos) de los juveniles de dorada alimentados con las dietas experimentales tras 45 y 90 días del ensayo de alimentación.

En cuanto a la composición proximal del músculo, no se observaron diferencias significativas en el contenido proteico del músculo de los juveniles alimentados con las diferentes dietas experimentales. Por su parte, el contenido lipídico de los músculos de los juveniles disminuyó significativamente en los tratamientos C5, C10 y H5, hecho que podría explicarse con el uso energético de lípidos del músculo de los juveniles alimentados con algas. Además de medir la cantidad de lípidos, es importante medir la calidad de estos. De esta forma, se observó una tendencia al alza del contenido de ácidos grasos saturados, al igual que de ácidos grasos monoinsaturados, pero sin diferencias significativas entre tratamientos, salvo en el contenido del ácido graso 16:0 y el ácido oléico (18:1n9), superior en tratamientos con inclusión algal. El contenido en ácidos grasos poliinsaturados fue similar en todos los grupos. Esto podría deberse a que la baja proporción de microalgas incluidas, no podría haber sido suficiente para que su efecto se reflejara.

En cuanto a la oxidación lipídica tanto en el músculo como en el hígado de los peces, se observó una mayor respuesta antioxidante en aquellos juveniles alimentados con las dietas que contenían biomasa algal (C10 y H10). Resultado que podría deberse al gran contenido en pigmentos y compuesto fenólicos de las microalgas, que podría ejercer efectos antioxidantes en los peces (Fig. 2).

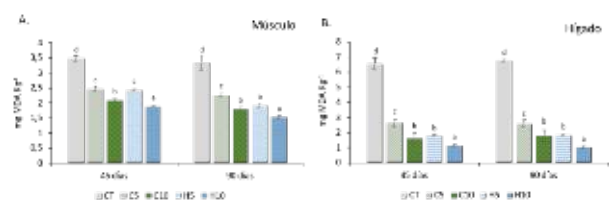


Fig. 2. Contenido en sustancias reactivas del ácido tiobarbitúrico (TBARS) en el músculo (A) e hígado (B) de los juveniles de dorada alimentados durante 45 y 90 días con las dietas experimentales.

El color de la piel de los peces cultivados es un factor crucial para la aceptación del producto entre los consumidores, sobre todo su similitud con los ejemplares salvajes. Además, las algas pueden modificar la pigmentación de los peces como se ha observado en este estudio. En general, los juveniles alimentados con piensos suplementados con algas presentan una piel más luminosa, verdosa y amarillenta con respecto al tratamiento control (Fig. 3).

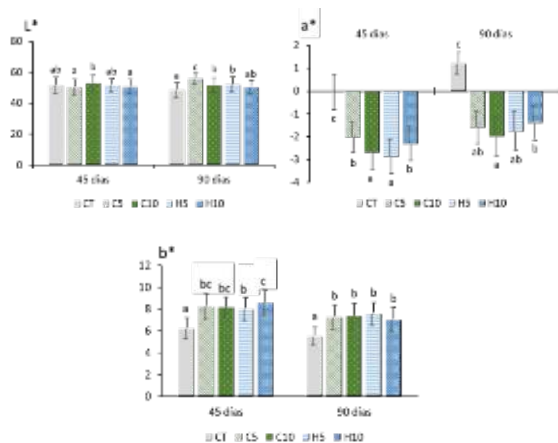


Fig. 3. Color de la piel de los juveniles de dorada alimentados con las diferentes dietas experimentales durante 45 y 90 días.

La actividad de las enzimas digestivas es un buen indicador de la digestión intestinal y la capacidad de absorción intestinal en peces. Tras 45 días de ensayo de alimentación, los peces del tratamientos H5 fueron los que mostraron una mayor actividad de tripsina, quimotripsina y proteasa alcalina total. Este incremento esta relacionado con una mejor digestión. Sin embargo, tras 90 días del ensayo de alimentación, se siguen observando diferencias significativas entre los diferentes tratamientos, pero en general, se aprecia una estabilización del sistema digestivo, ya que los valores de las actividades de estas enzimas pancreáticas siguen una tendencia similar en todos los tratamientos (Fig. 4).

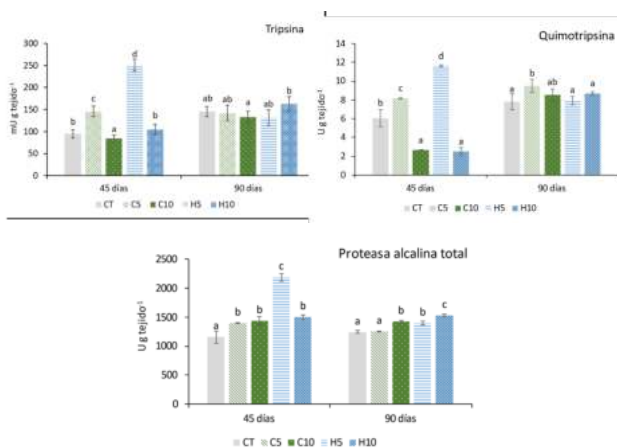


Fig. 4. Actividad enzimática digestiva de secreción pancreática medidas en el intestino de los juveniles de dorada tras 45 y 90 días.

Del mismo modo, la actividad de algunas enzimas de la mucosa intestinal, como la leucina aminopeptidasa y la fosfatasa alcalina, es un factor importante en las etapas finales de la digestión y absorción de nutrientes, por lo que se utiliza como un marcador general de la integridad y capacidad de absorción a nivel intestinal. La actividad leucina aminopeptidasa fue mayor en el tratamiento H10 a los 45 días del ensayo, y a los 90 días no se observaron diferencias significativas. Por su parte, la fosfatasa alcalina mostró una disminución significativa en aquellos juveniles alimentados con biomasa algal con respecto al tratamiento CT. Esta enzima participa en el transporte activo y asimilación de nutrientes, y teniendo en cuenta estos resultados y que el crecimiento de los peces es incluso superior en aquellos tratamientos suplementados con algas, se sugiere la existencia de mecanismos compensatorios que permiten la utilización adecuada de los nutrientes a pesar de estas diferencias. No obstante, este cambio cuantitativo en la actividad de enzimas específicas involucradas en los procesos de absorción podría indicar que las microalgas podrían modular la funcionalidad del intestino en *S. aurata*, por lo que sería necesario profundizar en este aspecto (Fig. 5).

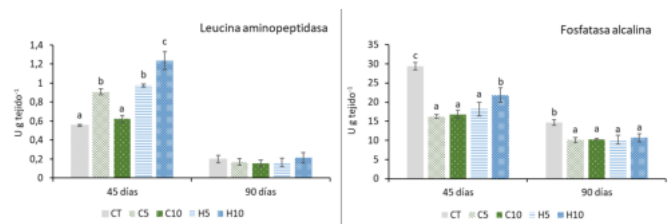


Fig. 5. Actividades enzimáticas digestivas de secreción intestinal medidas en el intestino de los juveniles de dorada tras 45 y 90 días del ensayo de alimentación.

4. CONCLUSIONES

Estos resultados indican que el uso de piensos suplementados con bajas proporciones de biomasa algal para juveniles de dorada ejerció efectos positivos en numerosos parámetros estudiados. Si bien, es necesario seguir profundizando en el efecto de estas dietas sobre la funcionalidad digestiva e integridad de la mucosa intestinal, metabolismo y estado inmunitario de los peces. Además, es conveniente seguir estudiando y optimizando diferentes procedimientos y mezclas algales para mejorar el crecimiento y la respuesta fisiológica de las especies acuicultivadas que se están estudiando.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto “Caracterización de hidrolizados de biomasa algal y evaluación de sus efectos sobre la funcionalidad digestiva, la calidad del músculo y vida útil del filete de la dorada (HYDRALGAE4BREAM- PID2021-122287OB-C21)

REFERENCIAS

- Ahmad, A., W. Hassan, S., y Banat, F. (2022). An overview of microalgae biomass as a sustainable aquaculture feed ingredient: Food security and circular economy. *Bioengineered*, 13(4), 9521-9547.
- Ansari, F. A., Guldhe, A., Gupta, S. K., Rawat, I., y Bux, F. (2021). Improving the feasibility of aquaculture feed by using microalgae. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(32), 43234-43257.
- Chen, F., Leng, Y., Lu, Q., y Zhou, W. (2021). The application of microalgae biomass and bio-products as aquafeed for aquaculture. *Algal Research*, 60, 102541.
- FAO (2022). *El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2022. Hacia la transformación azul*. Roma, FAO.
- Galafat, A., Vizcaíno, A. J., Sáez, M. I., Gómez-Pinchetti, J. L., Ación, F. G., Martínez, T. F., y Alarcón, F. J. (2022). Evaluation of the *in vitro* protein bioaccessibility of several microalgae and cyanobacteria as potential dietary ingredients in gilthead seabream (*Sparus aurata*) juveniles. *Journal of Applied Phycology*, 34(4), 2075-2088.
- Idenyi, J. N., Eya, J. C., Nwankwegu, A. S., y Nwoba, E. G. (2022). Aquaculture sustainability through alternative dietary ingredients: Microalgal value-added products. *Engineering Microbiology*, 2(4), 100049.
- Kokou, F., y Fountoulaki, E. (2018). Aquaculture waste production associated with antinutrient presence in common fish feed plant ingredients. *Aquaculture*, 495, 295-310.
- Sáez, M. I., Galafat, A., Vizcaíno, A. J., Chaves-Pozo, E., Ayala, M. D., Arizcun, M., Alarcón, F.J., Suárez, M.D., y Martínez, T. F. (2022). Evaluation of *Nannochloropsis gaditana* raw and hydrolysed biomass at low inclusion level as dietary functional additive for gilthead seabream (*Sparus aurata*) juveniles. *Aquaculture*, 556, 738288.
- Watson, A. M., Napolitano, M. P., Schock, T. B., Bowden, J. A., Frost, J., Yost, J., y Denson, M. R. (2020). Evaluation of graded levels of soy oil as a fish oil replacement in high soy protein feeds for juvenile red drum, *Sciaenops ocellatus*. *Aquaculture*, 529, 735627.
- Zaretabar, A., Ouraji, H., Kenari, A. A., Yeganeh, S., Esmaeili, N., y Amirkolaei, A. K. (2021). One step toward aquaculture sustainability of a carnivorous species: Fish meal replacement with barley protein concentrate plus wheat gluten meal in Caspian brown trout (*Salmo trutta caspius*). *Aquaculture Reports*, 20, 100714.
- Zuorro, A., Miglietta, S., Familiari, G., y Lavecchia, R. (2016). Enhanced lipid recovery from *Nannochloropsis* microalgae by treatment with optimized cell wall degrading enzyme mixtures. *Bioresource technology*, 212, 35-41.

Evaluación de la viabilidad de *Caenorhabditis elegans* como modelo para la producción a bajo coste de proteínas diagnósticas utilizables en la técnica ELISA

J. Sabio (1) y M. I. Sáez (2)

(1) Departamento de Biología y Geología, CEIMAR. Universidad de Almería, 04120 Almería, España. jss344@inlumine.ual.es

(2) Departamento de Biología y Geología, CEIMAR. Universidad de Almería, 04120 Almería, España.

Resumen: El presente trabajo trata de evaluar el uso de *Caenorhabditis elegans* como modelo animal para la transfección oral de ADNp a través de nanoplexes inertes copolimerizados con el fin de producir proteínas antigénicas, las cuales son imprescindibles para la evaluación de la respuesta inmune mediante la titulación de anticuerpos específicos con la técnica ELISA. Para ello, se utilizó la construcción pCMV β , que codifica para la enzima bacteriana β -galactosidasa. Los resultados obtenidos permitieron detectar secuencias específicas del pCMV β mediante PCR convencional, así como cuantificar los niveles de actividad de dicha enzima expresada mediante ensayo enzimático. También la enzima β -galactosidasa bacteriana recombinante expresada en *C. elegans* mostró su utilidad en ensayos mediante la técnica ELISA. Este hecho abre nuevas posibilidades para la producción masiva de proteínas diagnósticas utilizando organismos modelos como *C. elegans*, con potencial uso para el diagnóstico en acuicultura, sector clave de desarrollo en la economía azul.

Palabras clave: *C. elegans*, nanoplexes, proteínas diagnóstico, técnica ELISA, transfección oral.

1. INTRODUCCIÓN

La búsqueda de sistemas de expresión eucariotas capaces de sintetizar proteínas recombinantes complejas de manera eficiente es un importante campo de estudio en la actualidad, y la utilización de organismos modelo fáciles de multiplicar en condiciones de laboratorio con la finalidad de obtenerlas es el principal objetivo de este trabajo.

A la hora de evaluar la eficacia de la respuesta del sistema inmune en peces ante una vacuna recombinante existen diversos protocolos disponibles, siendo la PCR cuantitativa, así como la titulación de anticuerpos específicos mediante técnicas ELISA, los procedimientos usados más habitualmente con esta finalidad.

Para la titulación de anticuerpos mediante ELISA es imprescindible disponer de proteínas antigénicas de calidad, para su inmovilización en el fondo de los pocillos de las placas, de modo que se garantice una eficiente interacción de éstas con los anticuerpos séricos. Por tanto, resulta obligado disponer del microorganismo patógeno en cultivo para utilizarlo (bien completo, o bien fracciones purificadas del mismo) con esta finalidad. Este hecho obliga a su vez a disponer de todo el equipamiento necesario para el mantenimiento de los patógenos vivos, con las limitaciones relacionadas con los aspectos de bioseguridad, así como de precio (por ejemplo, necesidad de mantener cultivos de líneas celulares en el caso de los virus). Así, disponer del equipamiento necesario para mantener patógenos vivos resulta el principal factor limitante para cualquier laboratorio

con potencial para diseñar proteínas antigénicas recombinantes.

Dado que el diseño de vacunas recombinantes implica la utilización de los mecanismos intracelulares de los animales a los que se destinan para fabricar el antígeno proteico, este hecho podría aprovecharse precisamente para obtener también dicho antígeno con fines diagnósticos. Bastaría con expresarlo en un modelo animal mucho más fácil de manejar y de mantener que los propios microorganismos patógenos, y que, además, permitiese prescindir de las medidas de contención de los mismos por motivos de bioseguridad.

Caenorhabditis elegans es una especie de nematodo de la familia Rhabditidae, y desde 1974 se ha usado como organismo modelo de forma generalizada (Rodríguez Aguilera, 2008). Distintas características han fundamentado este amplio y creciente uso como modelo animal, siendo las más destacadas: i) mantenimiento en el laboratorio sencillo y barato, necesitando un medio de cultivo simple basado en *E. coli* como fuente de alimentación; ii) es un organismo transparente, hecho que permite la observación y análisis de su morfología; iii) su reducido tamaño corporal en su fase adulta (1,3 mm) permite su mantenimiento en placas de Petri; iv) posee un ciclo de vida corto (3 días); v) presenta dimorfismo sexual y suelen dejar una descendencia de entre 250-300 huevos embrionados por cada hermafrodita, y, vi) su cría y mantenimiento no presenta problemas éticos pues no es considerado a efectos legales un animal incluido en el ámbito de aplicación de la normativa de bienestar de los animales de experimentación (RD 53/2013, de 1 de febrero).

En este sentido, en este trabajo se propone el uso del modelo animal *C. elegans* como “biofábrica” de proteínas recombinantes antigénicas con uso como proteínas diagnósticas en técnicas ELISA (Enzyme-Linked Immunosorbent Assay). Las principales técnicas de transfección de ADN usadas en este organismo modelo son la microinyección intragonadal y el bombardeo con micropartículas (Lok *et al.*, 2012). Sin embargo, con vistas a producción industrial de proteínas recombinantes antigénicas, el escalado mediante estas técnicas resulta inviable. La transfección oral podría ser una alternativa simple, barata y de aplicación práctica a nivel industrial, pero hasta el momento, no existen estudios en los que se haya demostrado la expresión de proteínas recombinantes en *C. elegans* como resultado de una vehiculación oral. Entre los requisitos previos para el éxito de la vía oral cabe citar los siguientes: i) la especie de elegida debe poder alimentarse con una dieta artificial; y ii) la construcción plasmídica debería resistir el paso por el tubo digestivo del organismo. Un hipotético éxito de la transfección por vía oral de *C. elegans* implicaría que las construcciones de ADNp fuesen capaces de superar el tránsito por el tubo digestivo, resistiendo la acción de las enzimas digestivas. En este contexto, la encapsulación se planteó una posible estrategia alternativa al uso de *E. coli* como vehículo oral de ADNp, que consistiría en la utilización de biopolímeros inertes como forma de encapsulación de los plásmidos, una vía que puede considerarse como inexplorada con esta finalidad en *C. elegans*, atendiendo a la literatura consultada, si bien con antecedentes exitosos en otros animales muy diversos, como los peces (Sáez *et al.*, 2017). Esta aplicación podría tener importante repercusión en el diagnóstico serológico de anticuerpos para el estudio de la eficiencia del uso de proteínas recombinantes para la inmunización de peces de acuicultura, sector clave dentro de la economía azul como productor de alimentos de alto valor biológico.

2. DESARROLLO

Para la realización del trabajo experimental se utilizó el vector de expresión pCMVβ, el cual contiene el gen lacZ, que codifica para la enzima bacteriana β-galactosidasa. Dicha construcción plasmídica fue mantenida y multiplicada en la cepa DH5α de *E. coli* y posteriormente purificada. El ADNp obtenido fue nanoencapsulado en nanoplexes, evaluando en cada lote el rendimiento de encapsulación, según el procedimiento descrito por Sáez *et al.* (2017).

Se utilizó la cepa salvaje N2 del nematodo *Caenorhabditis elegans*, la cual se cultivó en placas de Petri con medio de cultivo NGM. Tras el cultivo del nematodo las placas fueron incubadas entre 20-25°C para favorecer su crecimiento.

Para los ensayos de transfección oral, previamente se sincronizó el cultivo de *C. elegans* con el fin de partir

de una población en el mismo estadio de desarrollo. Tras esto, un número variable entre 25-50 gusanos contenidos en un cuadrado (1 x 1 cm) de placa sincronizada se traspararon a placas con medio NGM sembradas con 10 μg de pCMVβ nanoencapsulado en nanoplexes y resuspendidos en 100 μL de *E. coli* DH5α autoclavada (20 minutos, 121°C). Se cultivaron 10 placas y se dejaron crecer durante 4 días a 20-25°C. Posteriormente, se recogieron los nemátodos con 2 mL de PBS por placa y se almacenaron en tubos eppendorf a -20°C hasta su posterior uso. Tras su descongelación, los extractos se centrifugaron a 2.000 rpm durante 10 min a 4°C y en el precipitado se identificaron secuencias específicas de pCMVβ mediante PCR convencional según la metodología descrita en Sáez *et al.* (2017) a partir del ADN extraído de los nemátodos (DNeasy Tissue Kit, Quiagen).

Para la detección *in situ* de la expresión del plásmido pCMVβ se tomaron plugs de placa con medio NGM que contenían nemátodos transfectados con los nanoplexes conteniendo pCMVβ. Se preparó una solución de 0,3 g/L de S-Gal en 0,5 g/L de citrato de amonio férrico según el protocolo descrito en Sáez *et al.* (2017) y se añadió sobre el plug con nemátodos. La placa con la solución se incubó durante 24 h, observándose los resultados a microscopio óptico. Esta detección *in situ* está fundamentada en la capacidad del plásmido de expresar la enzima β-galactosidasa que usa S-Gal como sustrato. En presencia de citrato de amonio férrico, el producto de la reacción precipita dando lugar a una coloración negra.

La posible expresión del gen testigo lacZ contenido en el plásmido pCMVβ, supone la síntesis intracelular de la enzima bacteriana β-galactosidasa en el insecto, cuya expresión puede medirse mediante la respuesta inmunológica mediante un ensayo ELISA indirecto (Enzyme-Linked Immunosorbent Assay).

Para ello se siguió la metodología descrita en Sáez *et al.* (2018) con ligeras modificaciones que se describen a continuación. Se tomaron 10 mg de ejemplares frescos, los cuales se sonicaron con 500 μl de agua. Posteriormente, los homogeneizados se centrifugaron a 10.000 rpm, 10 minutos a 4°C, eliminándose el sobrenadante. El pellet obtenido se disolvió en tampón 0,1 M carbonato-bicarbonato, pH 9,6; en una concentración de 10 mg/mL. Para el desarrollo del ensayo ELISA, los pocillos de las microplacas de poliestireno especiales para dicha técnica se sensibilizaron y se cubrieron durante 12 h a 4°C con 100 μl de los diferentes extractos preparados. Como control positivo, se utilizó la enzima comercial purificada (*E. coli*-β-galactosidasa para inmunoensayo, Sigma Aldrich, Madrid) a una concentración de 10 μg/mL, diluida también en tampón 0,1 M carbonato-bicarbonato, pH 9,6.

Posteriormente, los pocillos fueron lavados tres veces con tampón 20 mM fosfato sódico (PBS) conteniendo 0,05% Tween 20 (PBST), y el antígeno β -gal fue bloqueado con una solución de seroalbúmina bovina (BSA) al 1% en PBS (200 μ l por pocillo) durante 2 h a 22°C en agitación continua. Nuevamente, los pocillos fueron lavados una vez más con tampón PBST, y seguidamente se le añadieron 100 μ l de suero extraído de ejemplares juveniles de dorada (*Sparus aurata*) a las que se le había inyectado en el músculo dorsal derecho 10 μ g de β -galactosidasa comercial en 50 μ l de solución salina, como antígeno. Se realizaron diluciones seriadas de dicho suero sanguíneo (1:2 a 1:32) en tampón PBS. Las placas se agitaron durante 3 h a 22°C, y posteriormente fueron lavadas con tampón PBST con el fin de eliminar el anticuerpo sanguíneo no pegado al pocillo. A continuación, se añadieron a los pocillos 100 μ l de anticuerpo monoclonal contra IgM de dorada (Aquatic diagnostics Ltd, Stirling, UK), preparado siguiendo las instrucciones del fabricante, y las placas estuvieron en agitación continua durante 1 h a 22°C. Tras este periodo, las placas se lavaron 3 veces con PBST, y se añadieron a los pocillos 100 μ l de una solución diluida 1/10.000 del anticuerpo conjugado de cabra anti IgG-peroxidasa de ratón (Sigma Aldrich, Madrid), incubándose en agitación nuevamente durante 1 h a 22°C. Después de lavar la placa 3 veces con PBST, se reveló el conjugado adherido a la placa mediante la adición de 100 μ l de solución comercial de sustrato peroxidasa (3,3',5,5'-tetramethylbenzidine, TMB; Sigma Aldrich). Tras 10 minutos de incubación a 22°C, la reacción enzimática se detuvo con 50 μ l de H₂SO₄ 2M, y la intensidad del color fue medida espectrofotométricamente (Multiskan EX, Thermo) a 450 nm. Cada ensayo se realizó por triplicado, incluyendo controles negativos y positivos.

3. RESULTADOS

Mediante la separación electroforética de los productos de PCR obtenidos como resultado de amplificar secuencias específicas del ADNp con los cebadores propios del pCMV β , se pudo confirmar su presencia en los extractos de nemátodos transfectados oralmente a través de ADNp protegido en nanoplexes. Dichos resultados nos confirman que la transfección oral con ADNp nanoencapsulado es exitosa, superando las barreras fisiológicas del tubo digestivo de *C. elegans*.

Como se ha comentado anteriormente, la posible expresión del gen testigo lacZ contenido en el plásmido pCMV β , supone la síntesis intracelular de la enzima bacteriana β -galactosidasa, cuya expresión no sólo puede detectarse mediante un revelado *in situ* con un sustrato específico como el S-Gal. Sin embargo, las células epidérmicas de *C. elegans* secretan una cutícula conformada por una matriz extracelular especializada, compuesta principalmente por colágeno, lípidos y glicoproteínas (Page y

Johnstone, 2007). Esta gruesa y fuerte cutícula puede dificultar la extracción del material genético de los nemátodos. Para ello se incluyó una etapa de homogenización adicional con un homogeneizador potter-Elvehjem de vidrio y otra etapa de sonicación en hielo. La Fig. 1 muestra la cuantificación de la actividad β -gal en los extractos de los tejidos de *C. elegans* usando el método de extracción optimizado.



Fig. 1. Detección *in situ* de la actividad β -galactosidasa con el sustrato específico S-Gal.

Los resultados de la titulación de IgM sérica anti- β -galactosidasa mediante ELISA se muestran en la Fig. 2. Como se puede observar, el uso del extracto de *C. elegans* sirvió como proteína diagnóstica en ensayos de ELISA indirecto con suero de juveniles de dorada, si bien fueron capaces de fijar menor cantidad de anticuerpos IgM séricos de dorada que el antígeno comercial purificado, hecho que no resulta sorprendente, puesto que no se realizó purificación alguna del extracto crudo de *C. elegans*. En este sentido, se abre una vía novedosa a explorar donde el uso de extractos de *C. elegans* ricos en los antígenos recombinantes entomosintetizados podría abaratar costes en esta técnica.

Por tanto, las plataformas de expresión de proteínas recombinantes basadas en *C. elegans* ofrecen unas perspectivas muy prometedoras como método eficiente para la producción de multitud de proteínas con efectos biológicos de interés en investigación tanto básica como aplicada.

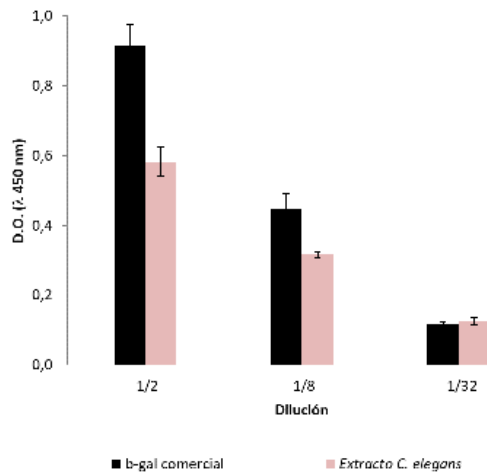


Fig. 2. Titulación ELISA de IgM anti-galactosidasa en suero de juveniles de dorada (*S. aurata*) usando antígeno comercial purificado (enzima β -galactosidasa comercial) y extractos de *C. elegans* (media \pm SE).

4. CONCLUSIONES

1. Los resultados preliminares obtenidos en este trabajo determinan que es posible una transfección oral con ADNp en *C. elegans* con nanopartículas de ADNp.
2. La técnica de nanoencapsulación utilizada permite una protección del ADNp incluido en la dieta artificial de la degradación química y enzimática durante el tránsito por el tubo digestivo del nematodo cuando se administra por vía oral.
3. La enzima β -galactosidasa bacteriana recombinante entomoexpresada en *C. elegans* mostró su utilidad en ensayos inmunológicos de titulación sérica de anticuerpos específicos mediante la técnica de ELISA. Este hecho abre nuevas posibilidades para la producción masiva de este tipo de proteínas diagnósticas utilizando este organismo modelo, con la gran ventaja de poder prescindir de la infraestructura de mantenimiento de cultivos de microorganismos patógenos.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto INSECTIVAC-PCM_00080 (Plan Complementario de Ciencias Marinas y Plan de Recuperación, transformación y Resiliencia, en su convocatoria para el ejercicio 2023).

REFERENCIAS

- Lok, J. B. (2012). Nucleic acid transfection and transgenesis in parasitic nematodes. Cambridge University Press. *Parasitology*, 139, 574-588.
- Page, A. P. y Johnstone, I. J. (2007). The cuticle. WormBook.
- Real Decreto 53/2013, de 1 de febrero, por el que se establecen las normas básicas aplicables para la protección de los animales utilizados en

experimentación y otros fines científicos, incluyendo la docencia. *Boletín Oficial del Estado*, 34, de 8 de febrero de 2013. <https://www.boe.es/eli/es/rd/2013/02/01/53>

- Rodríguez-Aguilera, J. C. (2008). *Caenorhabditis elegans*, un espejo de 959 células. Centro Andaluz de Biología del Desarrollo. Universidad Pablo Olavide, CSIC, Sevilla.
- Sáez, M. I., Vizcaíno, A. J., Alarcón, F. J. y Martínez, T. F. (2017). Comparison of lacZ reporter gene expression in gilthead sea bream (*Sparus aurata*) following oral or intramuscular administration of plasmid DNA in chitosan nanoparticles. *Aquaculture*, 474, 1–10.
- Sáez, M. I., Vizcaíno, A. J., Alarcón, F. J., e Martínez, T. F. (2018). Feed pellets containing chitosan nanoparticles as plasmid DNA oral delivery system for fish: *In vivo* assessment in gilthead sea bream (*Sparus aurata*) juveniles. *Fish and Shellfish Immunology*, 80, 458-466.

LEvaluación de las larvas de *Tenebrio molitor* como plataforma de expresión de proteínas recombinantes de interés en inmunización acuícola

M.I. Sáez

Departamento de Biología y Geología. Escuela Superior de Ingeniería. CEIMAR. Universidad de Almería. 04120 – Almería, Spain. msc880@ual.es

Resumen: Este trabajo propone el uso de una dieta artificial incluyendo ADN plasmídico (ADNp) nanoencapsulado como sistema de transfección oral en insectos, específicamente en *Tenebrio molitor*. La hipótesis de partida es que esta vía de transfección oral puede resultar en la expresión eficaz de los genes testigo incluidos en el ADNp (pCMV β y pEGFP-N2). Los resultados obtenidos confirmaron que se produjo una transfección oral eficiente siendo posible la medición de la actividad biológica de las proteínas recombinantes (enzima β -galactosidasa y fluorescencia) sintetizadas. Estos resultados exploran una nueva vía de inmunización oral en acuicultura, sector clave dentro de la economía azul, usando una harina de un insecto autorizado para alimentación animal, *Tenebrio molitor*, que previamente hayan expresado el antígeno de interés vacunal.

Palabras clave: antígeno vacunal, harina de insecto, nanoplexes, transfección oral, vacunación en peces.

1. INTRODUCCIÓN

Dentro de la economía azul, la acuicultura juega un papel crucial al proporcionar una fuente sostenible de alimentos de alto valor biológico y empleo, reduciendo la presión sobre las poblaciones de peces silvestres y apoyando la conservación marina.

El control de enfermedades en granja acuícolas es esencial para mantener la salud de los stocks, garantizar la productividad y reducir la dependencia de antibióticos. Esto asegura productos de alta calidad y minimiza el impacto ambiental, promoviendo prácticas sostenibles en la industria. Desde el punto de vista práctico, la posibilidad de administrar vacunas orales mediante utilizando el pienso como vehículo podría ser considerada como la vía ideal de inmunización debido a que permitiría utilizarse en acuicultura extensiva, no provoca estrés, mientras que posibilita la administración en masa en animales de cualquier tamaño, permitiendo inmunizar en etapas tempranas a peces de un pequeño tamaño (Rivas-Aravena *et al.*, 2013). Además, simula la vía natural de entrada de patógenos, así como el consiguiente mecanismo natural de reconocimiento y desencadenamiento de la respuesta inmune tanto celular como humoral (Hølvod *et al.*, 2014). Sin embargo, a pesar de todas estas características, a día de hoy tanto la inmersión en preparado vacunal como la vía parenteral siguen siendo las principales formas de administración de vacunas a escala comercial.

En cuanto al tipo de vacuna a utilizar, en los últimos años una de las principales estrategias de vacunación consiste en la obtención de proteínas antigénicas recombinantes (PR), a través de plásmidos recombinantes (Tonheim *et al.*, 2008). Estas PR

posteriormente se podrán emplear directamente como vacunas. Si bien se necesitan organismos capaces de actuar como biorreactores, utilizando sus mecanismos de expresión para sintetizar la proteína antigénica codificada por un determinado gen contenido en el plásmido recombinante. En este sentido, en los últimos años, el uso de insectos como biorreactores para producir PR se ha convertido en un campo de investigación muy prometedor (Targovnik *et al.*, 2016). Esto es debido a que presentan numerosas ventajas: sencillez de la infraestructura de cría y manipulación, gran cantidad de proteína recombinante expresada de calidad (capaz de conservar su funcionalidad como antígeno), ciclos vitales cortos y una gran capacidad de reproducción, están exentos de los requisitos normativos relativos a animales de experimentación (Alonso-Padilla *et al.*, 2010). Pero más allá de los aspectos económicos y/o productivos fundamentales para un escalado industrial, hay que destacar que actualmente la harina de insectos se está utilizando como ingrediente estándar en formulaciones, primero con fines de investigación, y a día de hoy en piensos comerciales. En este contexto especies como *Tenebrio molitor* y *Hermetia illucens* destacan por sus características bromatológicas y facilidad de producción (Hameed *et al.*, 2022).

Sin embargo, un limitante de esta estrategia puede ser la vía de transfección del ADN plasmídico (ADNp) a los insectos, donde en la mayor parte de investigaciones se basan en la utilización de baculovirus transformados como vehículo de transfección. Sin embargo, no todas las especies de insectos son susceptibles a los baculovirus y este método conlleva problemas de bioseguridad asociados al trabajo con vectores víricos, que desencadenan en una limitación sustancial para su

escalado industrial. Una alternativa podría ser la realización de una transfección vía oral con partículas no virales utilizando partículas inertes. Para ello, el ADNp tendría que ser protegido mediante técnicas de encapsulación y administrado en una dieta para su ingestión por insectos. Esta vía puede considerarse como inexplorada con esta finalidad, si bien con antecedentes exitosos en otros animales como en peces (Sáez *et al.*, 2017). Además, si la transfección es eficiente, permitiría usar al propio insecto productor de PR como ingrediente del pienso, sin necesidad de costosos procedimientos de purificación.

Teniendo en cuenta los antecedentes detallados anteriormente, el objetivo de este trabajo preliminar es evaluar si las larvas de *Tenebrio molitor* suponen un modelo animal valioso que podría permitir la expresión de antígenos recombinantes. En caso de obtener resultados satisfactorios, el uso de insectos bioreactores de PR tendrían potencial para ser utilizados como ingredientes de piensos vacunales en acuicultura.

2. DESARROLLO

Se han seleccionado dos construcciones plasmídicas diseñadas para expresar genes testigo en células de organismos eucariotas. Por un lado, el plásmido pCMV β (contiene el gen lac-Z, que codifica para la enzima bacteriana β -galactosidasa), y por otro, el plásmido pEGFP-N2 (porta el gen de una variante modificada de la forma salvaje de la proteína verde fluorescente, EGFP). Ambos fueron mantenidos y multiplicados en la cepa DH5 α de *E. coli* y posteriormente purificados. El ADNp obtenido para ambos plásmidos fue nanoencapsulado conjuntamente, evaluando en cada lote el rendimiento de encapsulación, según el procedimiento descrito por Sáez *et al.* (2017).

La cría de *T. molitor* se realizó a partir de ejemplares adultos obtenidos a partir de larvas adquiridas comercialmente. Con el fin de vehicular los nanoplexes de ADNp a concentración precisa se diseñó una dieta artificial. Se establecieron cuatro lotes experimentales de larvas (con 25 individuos por lote), de la misma edad y estadio de desarrollo (tamaño de larva entre 1,5-2cm), y que consistían en un grupo control (sin ADNp en la dieta) y cuatro grupos con tratamiento que incorporaban los dos plásmidos nanoencapsulados simultáneamente, a distintas concentraciones, asegurando una ingestión final de 2,5, 5 y 10 μ g ADNp total/ individuo. Una vez consumida la porción de las respectivas dietas, todas las larvas fueron realimentadas con dieta control durante 3 días. Pasado este tiempo, las larvas se congelarán a -20 °C, para su posterior uso para las diferentes determinaciones. Se tomaron 5 larvas de cada grupo experimental, identificándose secuencias específicas de ambos plásmidos mediante PCR

convencional según la metodología descrita en Sáez *et al.* (2017) a partir del ADN extraído de las larvas (GENEJET DNA Purification kit, Thermo Scientific).

Tras la detección de secuencias específicas, se procedió a la cuantificación del número de copias RT-qPCR. Para ello, se aisló el ARN de 5 larvas por tratamiento dietario, utilizando un kit comercial (GENEJET RNA Purification kit, Thermo Scientific). Se determinó la cantidad de ARN extraído (Qubit, Thermo Scientific), y la retrotranscripción se realizó utilizando el kit comercial First Strand cDNA Synthesis Kit (Thermo Scientific), partiendo de una cantidad de 500 ng de ARN total como molde. Las reacciones de RT-qPCR se llevaron a cabo en un termociclador 1000 Touch™ (BioRad, España) con el módulo óptico CFX96™ (BioRad, España) para mediciones de fluorescencia, siguiendo la metodología descrita en Cerezo *et al.* (2021) y usándose como referencia los genes de proteína ribosómica S10 (rsp10), gliceraldehído 3-fosfato deshidrogenasa (gadh) y β -actina(β -act).

Posteriormente, se cuantificó la posible expresión de dichas proteínas recombinantes como resultado de la transfección oral efectiva en 5 larvas de cada lote. En el caso de la enzima β -galactosidasa, se medió su expresión mediante el método enzimático basado en el protocolo de An *et al.* (1982) realizándose extractos de dichas larvas en agua destilada (200 mg mL⁻¹). En el caso de la expresión de la proteína EGFP, se detectó la fluorescencia en dichos extractos acuosos a las longitudes de onda de excitación y emisión de 488 y 532 nm, respectivamente, mediante fluorimetría (Fluoroskan Ascent, Thermo Scientific).

3. RESULTADOS

A través de la separación electroforética de los productos de PCR obtenidos como resultado de amplificar secuencias diana del ADNp con los cebadores específicos para cada plásmido, se pudo confirmar la presencia de ambos plásmidos recombinante (pCMV β y pEGFP-N2) en extracciones de ARN a partir de larva que fueron transfectadas oralmente a través de la dieta artificial con ADNp protegido en nanocápsulas. Dichos resultados nos confirman que la transfección oral si el ADNp está encapsulado puede ser exitosa, superando las barreras fisiológicas del tubo digestivo.

Los cambios relativos de expresión obtenidos en los tejidos para ambos plásmidos recombinantes evidenció un aumento progresivo a medida que aumentaban las concentraciones de los mismos en la dieta experimental, que fue diseñada específicamente para las larvas del coleóptero. Este hecho reafirma que, a medida que aumenta la concentración de ADNp encapsulado en nanoplexes, también aumenta

la incorporación de copias de los genes testigo a los tejidos del insecto.

A fin de comprobar si la presencia de las secuencias específicas del plásmido pCMV β estuvo acompañada de la expresión en el interior de las larvas de *T. molitor* del gen lacZ, se midió en los extractos de las larvas la presencia de actividad enzimática β -galactosidasa. Como se puede comprobar en la Fig. 1. fue posible detectar actividad β -galactosidasa cuantificable por espectrofotometría en los extractos larvarios en el lote transfectado oralmente, mientras que en los individuos controles la actividad β -galactosidasa encontrada fue residual. Estos resultados indican que la transfección oral de pCMV β en *T. molitor* es posible, ya que da lugar a una expresión de la enzima β -galactosidasa en sus tejidos con plena funcionalidad.

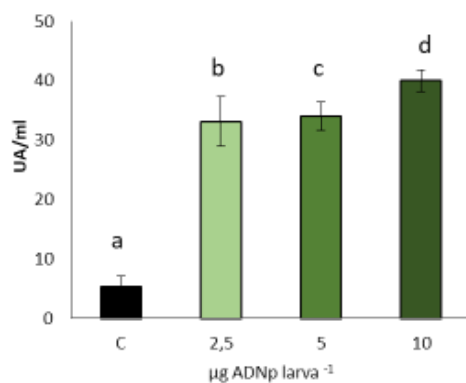


Fig. 1. Actividad de la enzima β -galactosidasa cuantificada por espectrofotometría en individuos de *T. molitor* transfectados oralmente por el plásmido pCMV β y en individuos controles (media \pm SE). Diferentes letras denotan diferencias significativas entre tratamientos ($P \leq 0,05$).

Por su parte, la posible expresión del gen testigo del plásmido pEGFP puede llevarse a cabo por métodos fluorimétricos, debido a la fluorescencia emitida por EGFP cuando se excita previamente con luz ultravioleta. Este plásmido tiene la capacidad de expresar en células eucariotas la proteína verde fluorescente (EGFP), capaz de emitir bioluminiscencia en la zona verde del espectro visible. El gen que codifica para la proteína verde fluorescente ha sido clonado y es utilizado ampliamente en biología molecular como marcador. Como se observa en la Fig. 2 en los extractos preparados a partir de larvas procedentes del lote transfectado oralmente con el plásmido pEGFP a mayor concentración existe fluorescencia cuantificable del orden de más de cuatro veces mayor que la que se observó en los individuos controles. Estos resultados ponen de manifiesto, por una parte, que tuvo lugar una transfección oral de las larvas con el plásmido, pero también, por otra parte, que los extractos larvarios de *T. molitor* per se emiten cierto grado de fluorescencia cuando son excitados (λ 490

nm) y se miden con el filtro de emisión propio de la proteína GFP (λ 509 nm). Con estos resultados podemos corroborar que la presencia de secuencias específicas de ADNp en los tejidos ha estado acompañada también por la expresión de los dos genes testigos portados en ambos plásmidos.

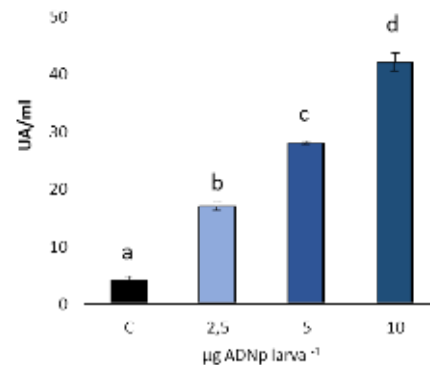


Fig. 2. Fluorescencia emitida por la proteína EGFP en larvas de *T. molitor* transfectadas oralmente con el plásmido pEGFP y en individuos controles (media \pm SE). Diferentes letras denotan diferencias significativas entre tratamientos ($P \leq 0,05$).

4. CONCLUSIONES

La incorporación de moléculas de ADNp en nanoplexes, y su posterior inclusión en dietas artificiales para larvas del coleóptero *Tenebrio molitor* ha permitido confirmar la validez de esta estrategia para la transfección oral de los insectos con ADNp, al haber podido detectar secuencias específicas de los dos plásmidos considerados en este estudio (pCMV β y pEGFP-N2) en los tejidos de larvas de dicha especie. Además, ha tenido lugar la expresión de los genes testigo incluidos en el ADNp, dado que se ha podido detectar y cuantificar dicha expresión mediante la cuantificación de la actividad biológica de las proteínas codificadas por ambos genes testigo (lacZ y EGFP).

Estos resultados preliminares permiten seguir profundizando en el diseño de un pienso vacunal que presenta como ingrediente harina de insecto, previamente transfectado oralmente con ADNp nanoencapsulado, como vía de inmunización en masa para la producción acuícola, fortaleciendo dicho sector estratégico en la economía azul.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto INSECTIVAC-PCM_00080 (Plan Complementario de Ciencias Marinas y Plan de Recuperación,

transformación y Resiliencia, en su convocatoria para el ejercicio 2023).

REFERENCIAS

- Alonso-Padilla, J., de Oya, N. J., Blázquez, A. B., Loza-Rubio, E., Escribano, J. M., Saiz, J. C., e Escribano-Romero, E. (2010). Evaluation of an enzyme-linked immunosorbent assay for detection of West Nile virus infection based on a recombinant envelope protein produced in *Trichoptusia ni* larvae. *Journal of virological methods*, 166, 37-41.
- An, G., Hidaka, K., e Siminovitch, L. (1982). Expression of bacterial β -galactosidase in animal cells. *Molecular and Cellular Biology*, 2, 1628–1632.
- Cerezo-Ortega, I.M., Di Zeo-Sánchez, D.E., García-Márquez, J. Ruíz Jarabo, I., Sáez, M.I., Balebona, M.C., Moriñigo, M.A. e Tapia-Paniagua, S.T. (2021). Microbiota composition and intestinal integrity remain unaltered after the inclusion of hydrolysed *Nannochloropsis gaditana* in *Sparus aurata* diet. *Scientific Reports* 11, 18779.
- Hameed, A., Majeed, W., Naveed, M., Ramzan, U., Bordiga, M., Hameed, M., Ur Rehman, S. e Rana, N. (2022). Success of aquaculture industry with new insights of using insects as feed: a review. *Fishes*, 7, 395
- Hølvod, L.B., Myhr, A.I., Dalmo R.A. (2014). Strategies and hurdles using DNA vaccines to fish. *Veterinary Research*, 45, 21-32.
- Sáez, M. I., Vizcaíno, A. J., Alarcón, F. J., e Martínez, T. F. (2017). Comparison of lacZ reporter gene expression in gilthead sea bream (*Sparus aurata*) following oral or intramuscular administration of plasmid DNA in chitosan nanoparticles. *Aquaculture*, 474, 1–10.
- Rivas-Aravena, A., Sandino, A.M. e Spencer E. (2013). Nanoparticules and microparticules of polymers and polysaccharides to administer fish vaccines. *Biological Research*, 46, 407–419.
- Targovnik, A. M., Arregui, M. B., Bracco, L. F., Urtasun, N., Baieli, M. F., Segura, M. M., Simonella, M. A., Fogar, M., Wolman, F. J., Cascone, O., e Miranda, M. V. (2016). Insect larvae: A new platform to produce commercial recombinant proteins. *Current Pharmaceutical Biotechnology*, 17, 431–438.
- Tonheim, T.C., Bøgwald, J. e Dalmo, R.A. (2008). What happens to the DNA vaccine in fish? A review of current knowledge. *Fish and Shellfish Immunology*, 25, 1–18.

Patrocinadores



exail



Instituto Hidrográfico de la Marina
Plaza de San Severiano s/n, Cádiz, España
Tel.: +34 956 545 049, ihmesp@fn.mde.es
www.armada.defensa.gob.es/ciencia/ihm