



Estudio de la hidrodinámica del Mar Menor. Gastos corrientes.

Informe intermedio

Fdo.: Javier Gilabert Cervera
Departamento de Ingeniería Química y Ambiental
Grupo Investigación Ecosistemas
Cartagena, 22 junio 2023



Región de Murcia
Consejería de Medio Ambiente,
Mar Menor, Universidades e Investigación
Dirección General I+D+i+M+D



**Universidad
Politécnica
de Cartagena**





1. Introducción

En este informe intermedio de resultados del proyecto “Estudio Hidrodinámica del Mar Menor (Gastos Corrientes)” correspondiente al año 2023 se recogen los avances de los trabajos desarrollados en la actualidad. El proyecto es un trabajo ampliamente multidisciplinar que comprende tanto aspectos físicos, como químicos y biológicos. En la actualidad se están poniendo a punto diversas metodologías y se está trabajando en la obtención de datos de muy diferente procedencia. Para ello se están desarrollando rutinas en diferentes lenguajes informáticos. Algunos resultados son todavía provisionales y los definitivos se reportarán en el informe final.

El trabajo incluirá tanto la obtención y análisis de datos obtenidos en el periodo de trabajo como datos de series históricas de estudios previos desarrollados por el equipo de trabajo. Para ello se está realizando un esfuerzo de organización y procesado de los datos, elaborando rutinas informáticas y organizando flujos de trabajo.

Se está reorganización del sistema de modelado oceanográfico regional ROMS redefiniendo tanto el mallado como las condiciones de contorno del



modelo para optimizar el tiempo de cómputo aumentando la resolución. Se está trabajando en la validación de cada paso para comprobar la fiabilidad del nuevo modelo.

Con los datos obtenidos de series históricas se están implementando técnicas de inteligencia artificial aplicadas a los resultados del modelo para obtener los patrones de corrientes característicos del Mar Menor.

Se están revisando y poniendo a punto diferentes técnicas para determinar los flujos de agua por los canales de comunicación entre el Mar Menor y el Mediterráneo. Se están evaluando diferentes formas de cálculo. Para ello se han rescatado series históricas de datos y se están interpolando con datos de diferente procedencia para completar los huecos de las series.

Se han fondeado tres equipos de medida en las golas de las Encañizadas para incrementar las series temporales de intercambio de agua por este sistema de canales. De estos equipos se extrae periódicamente la información y se cambian baterías con el consiguiente trabajo de buzos.

Se está completando también el análisis del oleaje previamente comenzado en 2022 aplicando también técnicas de inteligencia artificial para la clasificación de los principales mapas de oleaje teniendo en cuenta tanto la altura significativa del oleaje como la velocidad orbital en el fondo, el período y la longitud de onda.

También se está realizando una aproximación al transporte de sedimentos a partir de los resultados del modelo de oleaje.

Se están preparando los servidores informáticos para comenzar a implementar el acoplamiento de los modelos hidrodinámicos y de oleaje mediante el modelo COAWST (Coupled-Ocean-Atmosphere-Wave-Sediment Transport Modeling System). Se está evaluando el uso de diferentes mallados para acoplar las condiciones de contorno adecuadamente al mallado del Mar Menor que se está desarrollando.

Para comenzar a abordar el modelado biogeoquímico se ha comenzado a recopilar series temporales de diferentes parámetros químicos como son los nutrientes ampliando la serie a 2023. Uno de los componentes de este modelo es el fitoplancton que se está midiendo a lo largo de 2023 en diferentes estaciones. Dado que el aspecto clave a conocer en este tipo de modelado es la capacidad de asimilación de carbono inorgánico por el fitoplancton a través de la fotosíntesis se está procediendo a una revisión bibliográfica de este proceso y su medida, incluidos sus modelos ópticos y biofísicos. Un método de medida de la capacidad fotosintética del fitoplancton es la fluorescencia activa. Se han preparado los protocolos de tratamiento de los datos obtenidos por el fluorómetro. Se están también recopilando datos históricos para comprobar la validez de los protocolos empleados.

2. Resultados parciales

Los resultados provisionales de los trabajos antes mencionados se agrupan en diferentes secciones y se detallan a continuación:

2.1. Caracterización de la hidrodinámica del Mar Menor en base a mapas de corrientes

Para caracterizar los patrones que presentan los distintos mapas de corrientes que se generan en el Mar Menor, se han revisitado los datos correspondientes a simulaciones previas, concretamente a las obtenidas en 2011. Para ello se ha realizado una caracterización general de los vientos, se hace una descripción oceanográfica general del Mar Menor y se aplican técnicas de inteligencia artificial basadas en redes neuronales para clasificar los diferentes patrones de corrientes que generan los vientos.



2.1.1. Caracterización general de los vientos en el Mar Menor

El mayor forzante de las corrientes en la laguna son los vientos, en cambio el mayor forzante del intercambio efectivo de agua entre la laguna y el Mediterráneo son los desniveles entre los dos mares producidos por cambios en la presión atmosférica. Para este análisis se han utilizado los datos registrados de vientos y otros parámetros atmosféricos por la estación meteorológica de San Javier perteneciente a la Agencia Española de Meteorología (AEMET) de ambos vientos y presiones atmosféricas. Particularmente se han utilizado las series históricas de los años 2010 a 2012 cuando se realizaron también simulaciones hidrodinámicas del Mar Menor con ROMS. Este estudio se ampliará cuando haya disponibles nuevas simulaciones disponibles (a la hora de finalizar este informe ya se dispone de dichas series y queda pendiente para futuros trabajos completar estas tareas).

En este periodo, y por lo general, los vientos están caracterizados por ser de baja intensidad con valores medios entre 0.5 y 2.1 m/s pudiendo llegar a alcanzar un valor máximo entre 12 y 15 m/s de manera puntual en dirección SO. Las direcciones predominantes son NE y SO, seguidas del SE. El análisis de componentes principales de los vientos (que no se muestra aquí) indica que el eje NE-SO representa el 67% de la varianza total del viento.

Se diferencian dos tipos de vientos:

- vientos locales, como por ejemplo las brisas marinas con dirección perpendicular a costa debidas a diferencias de temperatura aire/mar y una cadencia diurna/semidiurna

- vientos no locales, cuya génesis radica en zonas alejadas del área dónde se han registrado, pudiendo presentar diferentes direcciones.

Mediante una rotación de ejes se ha situado el nuevo eje X en dirección paralela a la costa de San Javier, en la que está situada la estación meteorológica coincidiendo con el primer componente principal, denominando a estos vientos longitudinales. El segundo eje, perpendicular al primero y por tanto a la costa, recogerá los vientos que denominaremos transversales.

La Figura 1 muestra la rosa de vientos de este periodo.

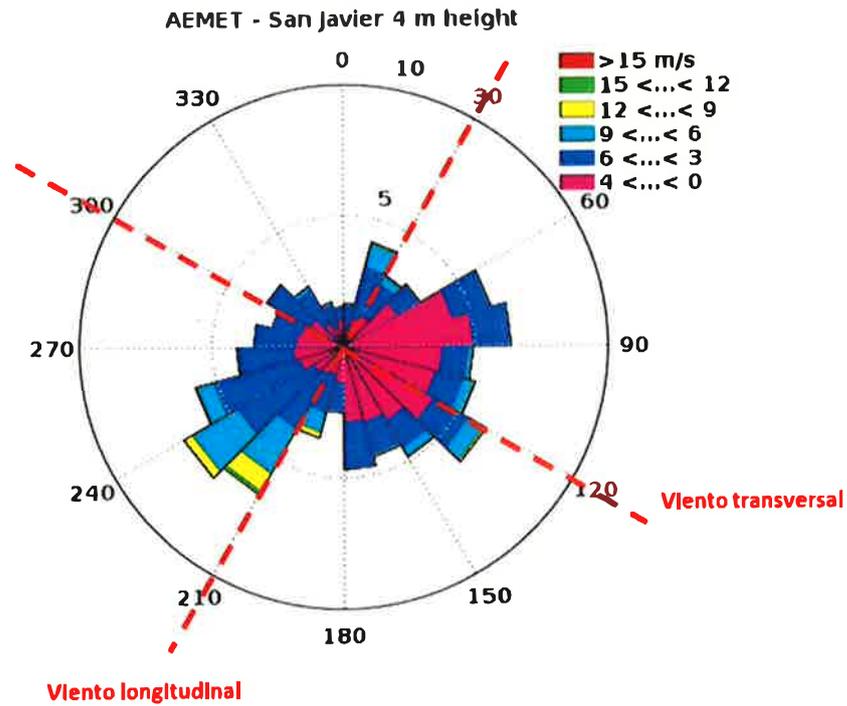


Figura 1. Rosa de vientos de la estación de la AEMET de San Javier entre los años 2010-2012. Las líneas rojas indican los nuevos ejes de rotación y la nomenclatura para cada uno de los vientos.

El análisis de la densidad espectral de potencia para el viento (Figura 2) muestra una periodicidad clara a las 12/24 horas, atribuyéndose a las brisas marinas.

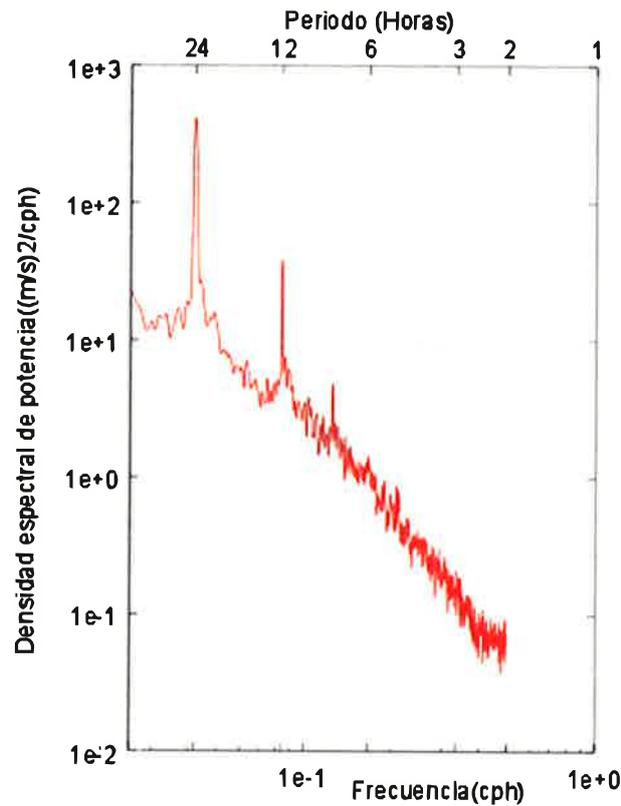


Figura 2. Densidad espectral de potencia obtenida para el viento registrado en la estación de San Javier entre los años 2010 y 2012.

La densidad espectral obtenida para la presión atmosférica (Figura 3) muestra los mismos picos de energía en los periodos de 12 y 24 horas, apuntando a una relación entre ambos procesos. Este resultado es el esperable ya que los cambios en la presión debido a diferencias de temperatura son los causantes de las brisas marinas de periodicidad 12/24 h.

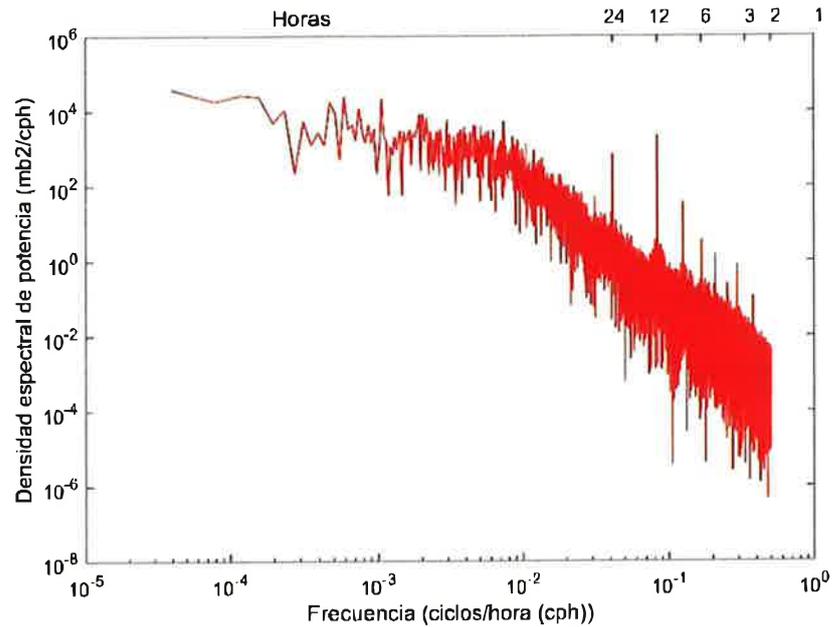


Figura 3. Densidad espectral de potencia obtenido para la presión atmosférica.

2.1.2. Caracterización oceanográfica general del Mar Menor

Las corrientes en el Mar Menor determinan la estructura tridimensional de la columna de agua en la que, a su vez, se definen las diferentes estructuras que varían en el tiempo y que configuran patrones oceanográficos característicos.

El análisis de las simulaciones numéricas muestra que el Mar Menor se comporta de manera homogénea en superficie y en el fondo para velocidades de viento menores de 3 m/s con dirección igual a la del viento. La baja velocidad de la corriente generada no es capaz de provocar una acumulación de agua en alguna

de sus vertientes o la generación de giros debido al estrés lateral entre dos corrientes de diferente dirección. Los vientos causantes de esta situación se dan con una frecuencia del 54%.

La Figura 4 muestra las cuatro zonas en las que se definen las principales corrientes que generalmente se establecen en la laguna y los principales giros.

La corriente costera de Los Urrutias tiene dirección NE-SW discurriendo paralela a la costa NW del Mar Menor. Presenta una velocidad media de 0.04 m/s, fluyendo en casi el 70% de las ocasiones en dirección SW debido a la predominancia de los vientos de levante en la zona. Durante episodios de fuertes vientos, puede alcanzar velocidades máximas de 0.4 m/s, sin embargo, solo en un 5% de las ocasiones supera valores de 0.2 m/s.

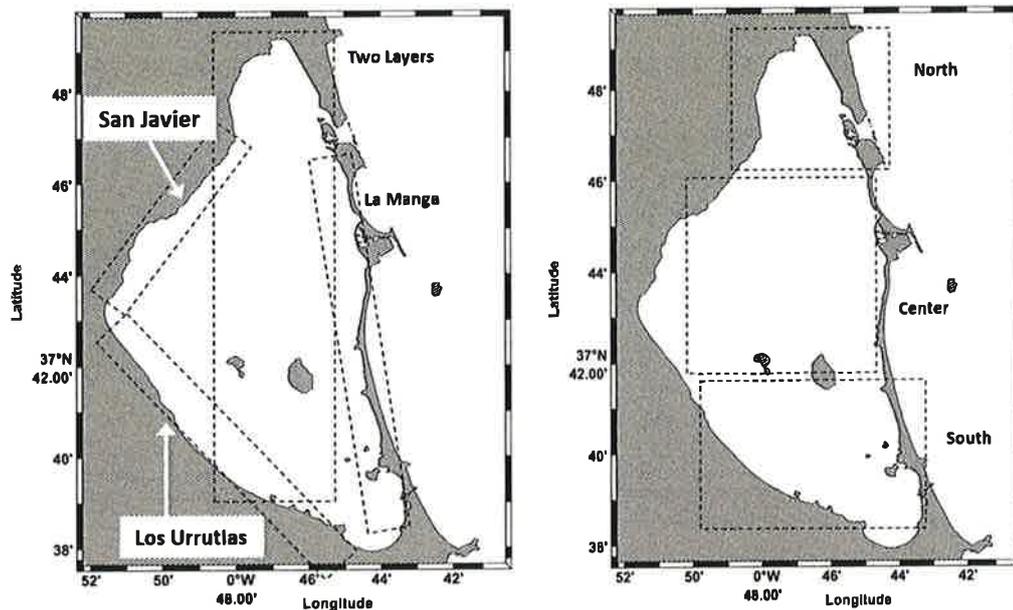


Figura 4. Esquema de las zonas donde se dan las principales corrientes y giros en el Mar Menor.

La corriente costera de Lo Pagán tiene dirección NW-SE discurriendo paralela a la costa SE del Mar Menor. Presenta una velocidad media de 0.02 m/s, fluyendo en casi el 50% de las ocasiones en dirección SE debido a la predominancia de los vientos de levante en la zona. El resto de las ocasiones se reparte entre las demás direcciones con una predominancia del NW. Durante episodios de fuertes vientos, puede alcanzar velocidades máximas de 0.2 m/s, sin embargo, solo en un 2% de las ocasiones supera valores de 0.1 m/s.

La corriente costera de La Manga discurre de norte a sur desde el canal del Estacio hasta la isla del ciervo. Esta corriente transporta agua mediterránea que entra por El Estacio y la desplaza hacia al sur.

Las corrientes superficiales de Norte a Sur (o Sur-Norte) a lo largo del Mar Menor sólo se dan para aquellos vientos que soplan en dirección hacia alguna de las vertientes del Mar Menor con la intensidad suficiente (> 6 m/s) como para producir una acumulación de agua en la costa hacia la que soplan. Este incremento en el nivel del mar se ve compensado por la aparición de una corriente barotrópica en dirección contraria a la de superficie. Al ser los vientos más frecuentes en la zona en las direcciones NE y SO, estas acumulaciones de agua se dan con mayor frecuencia en la zona de Los Urrutias y Las Encañizadas, dándose con una frecuencia cercana al 8%, principalmente en invierno. Estas corrientes de retorno adquieren una especial relevancia en el cálculo de la tasa de renovación de la laguna, en el transporte de sustancias disueltas y particuladas en el agua por el fondo, en la redistribución del oxígeno en la masa de agua o en la conectividad entre poblaciones.

De otro lado, por la geomorfología del Mar Menor se pueden diferenciar tres cubetas- norte, central y sur – que facilitan la formación de giros en condiciones concretas para cada una de ellas. En la cubeta norte suele producirse un giro anticiclónico si bien, y en algunas ocasiones, se pueden formar dos giros, uno en sentido ciclónico y otro anticiclónico en el extremo norte.



El giro central suele ser anticiclónico debido a los vientos del NE, si bien puede fragmentarse en dos cuando los vientos soplan del E, de forma que la vertiente norte es ciclónica y la sur anticiclónica.

2.1.3. Mapas autoorganizados (Self Organizing Maps - SOM)

Los mapas autoorganizados (Self-Organizing Maps, SOM) (Kohonen, 1990) son una técnica de inteligencia artificial con aprendizaje automático no supervisado utilizada para visualizar y analizar datos complejos aplicada. Los SOM son un tipo de red neuronal artificial diseñada para identificar estructuras subyacentes y patrones en conjuntos de datos multidimensionales. Consisten en una cuadrícula bidimensional de nodos o neuronas, donde cada nodo representa un vector en el espacio de características de los datos. Durante el entrenamiento, los nodos se ajustan para capturar las características clave y las relaciones de los datos de entrada.

Durante el entrenamiento, se presenta un vector de entrada a la vez a todas las neuronas y se determina cuál es la neurona más similar, generalmente basándose en un coeficiente de similitud euclidiano. Los n pesos de la llamada unidad de mejor coincidencia se ajustan para lograr una coincidencia aún mejor. Más importante —y esencial para la naturaleza autoorganizada de un SOM— es que



los pesos de las neuronas vecinas alrededor de la unidad de mejor coincidencia también se ajustan, hasta un cierto tamaño de vecindad y con una magnitud decreciente que se describe mejor como disminución de la distancia. En el transcurso de muchas de estas ejecuciones de entrenamiento, la red de baja dimensión de los vectores neuronales comienza a replicar las principales estructuras topológicas existentes en el espacio de entrada de n dimensiones.

A medida que se presentan muestras de datos, los nodos compiten para activarse según la similitud entre su vector de peso y el vector de entrada. El nodo ganador, también conocido como la neurona ganadora, y sus nodos vecinos en la cuadrícula se ajustan para que sus vectores de peso sean más similares al vector de entrada. Este proceso permite la agrupación y organización de datos en el mapa.

Después de entrenar un SOM con un conjunto de datos, se puede utilizar para asignar nuevas muestras a categorías existentes según su similitud con los nodos del mapa. Cada nodo representa una clase o categoría, y las muestras de entrada se asignan a la clase del nodo ganador más cercano. Esta capacidad de clasificación es particularmente útil cuando no hay etiquetas o categorías preexistentes en los datos, ya que el SOM puede agrupar automáticamente los datos e identificar estructuras subyacentes.

Un SOM bidimensional entrenado se puede visualizar de varias formas, incluida la visualización de pesos para una variable particular como sombreado de color en la red neuronal.

Para clasificar los resultados, se emplea un Mapa Auto-Organizado (SOM) utilizando el enfoque descrito por Barbariol et al. (2016). El mapa auto-organizado de Kohonen se refiere a una red neuronal entrenada mediante aprendizaje competitivo. El proceso de aprendizaje competitivo implica seleccionar un elemento de procesamiento ganador basado en ciertos criterios antes del ciclo de aprendizaje. El vector de peso del elemento de procesamiento ganador se ajusta utilizando una ley de aprendizaje específica (Hecht Nielsen, 1990).

En el contexto de las corrientes del Mar Menor, se han introducido para los análisis los mapas resultantes de las simulaciones hidrodinámicas para clasificarlos acorde a su similitud.

2.1.4. Patrones hidrodinámicos de corrientes basados en mapas autoorganizados (SOMs)

El análisis de los mapas autoorganizados ha identificado seis patrones de corrientes en el Mar Menor. Para cada uno de ellos se han obtenidos los rangos

de vientos que los originan, obteniéndose como resultado una correspondencia entre vientos y patrón típico de corrientes.

La Figura 5 representa las rosas de vientos correspondientes a cada uno de los grupos identificados.

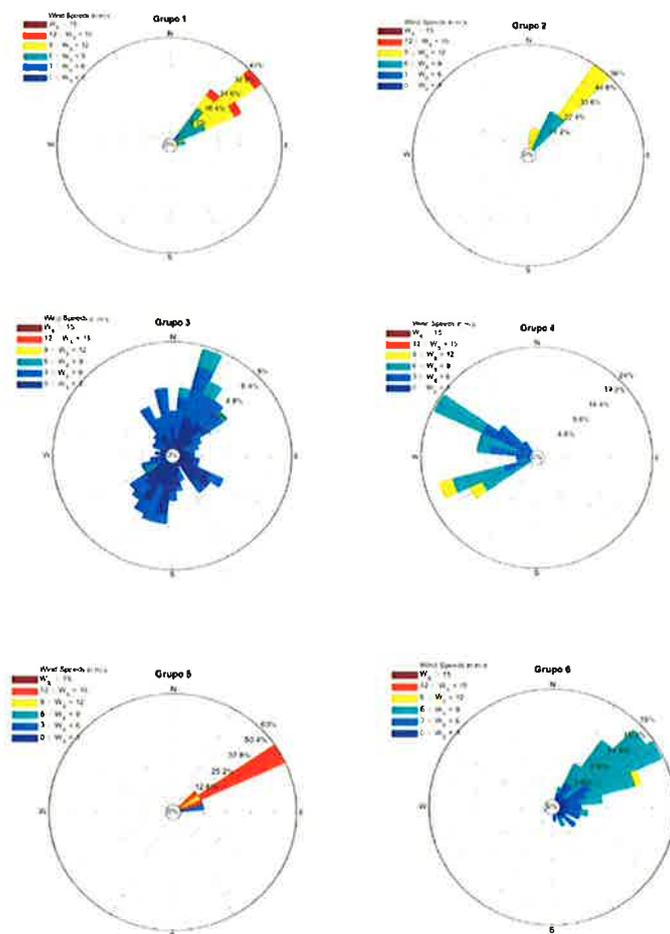


Figura 5. Rosas de viento obtenidas para cada uno de los grupos de patrones de corrientes obtenidas a partir de SOMs. La dirección indica la procedencia del viento.

A cada rango de vientos le corresponde un patrón de corrientes:

Grupo 1 - vientos del NE mayores de 9 m/s

Grupo 2 - vientos del NE entre 6 y 9 m/s

Grupo 3 - vientos del del NE-SW menores de 6 m/s

Grupo 4 - vientos del NW de velocidades inferiores a 9 m/s

Grupo 5 - vientos del NE de velocidades superiores a 12 m/s

Grupo 6 - vientos del NE de entre 2 y 6 m/s

La Tabla 1 especifica el rango de dirección e intensidades para cada grupo.

Tabla 1. Características del viento para cada uno de los patrones de corrientes obtenidos por SOMS.

	Rango Dirección procedencia viento (º)	Rango Intensidad (m/s)
Grupo 1	30-90	6-12
Grupo 2	0-60	<9
Grupo 3	Variado	<6
Grupo 4	240-330	3-9
Grupo 5	30-90	>9
Grupo 6	30-120	3-9

Las Figuras 6 a 11 corresponden a cada uno de los seis patrones de corrientes típicos en el Mar Menor.

El grupo 1 (Figura 6) muestra un patrón de corriente en superficie con un giro central ciclónico y una fuerte corriente de San Javier y La Manga. Este patrón se genera con vientos mayores de 9 m/s del NE. Se originan algunos remolinos en la cubeta sur y una corriente de fondo desde Los Urrutias a Lo Pagán. En el fondo se origina una corriente intensa hacia el Norte.

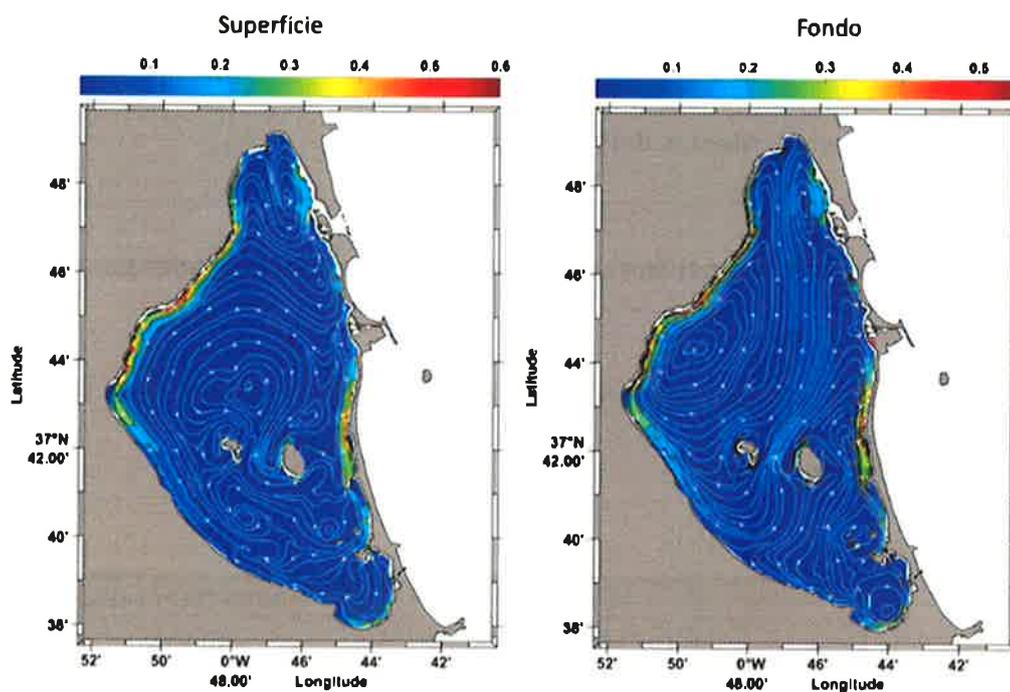


Figura 6. Patrón de corriente en superficie y fondo identificado en el grupo 1 de los SOMs para vientos mayores de 9 m/s del NE.

La Figura 7 muestra el patrón que originan vientos del NE entre 6 y 9 m/s (Grupo 2) donde se identifica un giro central igual al del grupo 1, con velocidades de las corrientes de San Javier y La Manga aproximadamente la mitad de las anteriores y donde desaparecen los remolinos de la cubeta sur en superficie y la velocidad de corriente del giro central disminuye considerablemente.

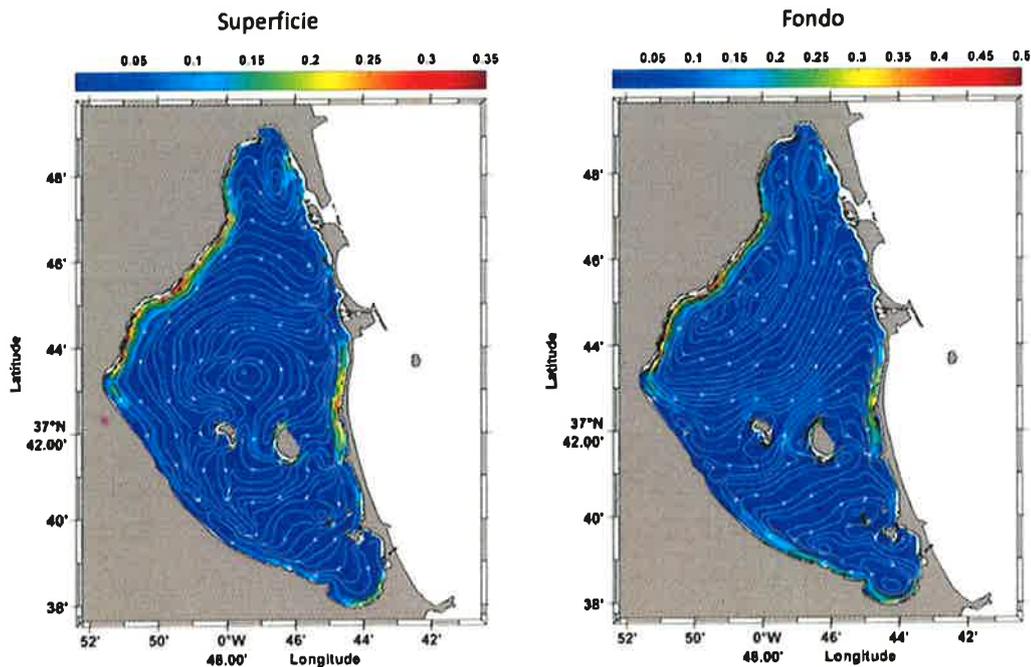


Figura 7. Patrón de corriente en superficie y fondo identificado en el grupo 2 de los SOMs para vientos entre 6 y 9 m/s del NE.

El tercer grupo (Figura 8) lo originan vientos de menos de 6 m/s del NE-SW. Se identifica una corriente de entrada de agua por el canal del Estacio, con las corrientes de San Javier y La Manga muy debilitadas.

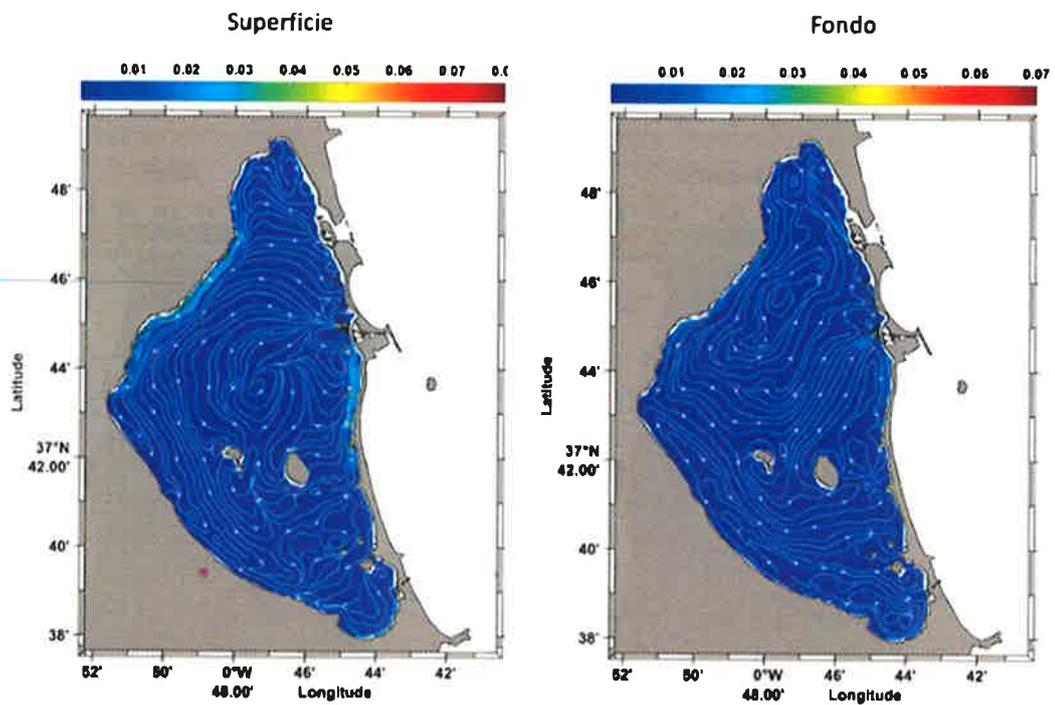


Figura 8. Patrón de corriente en superficie y fondo identificado en el grupo 3 de los SOMs para vientos de menos de 6 m/s del NE-SW.

La Figura 9 muestra el patrón clasificado como grupo 4 originado por vientos de velocidades inferiores a 9 m/s del NW. Es una situación en la que las corrientes de Los Urrutias y la Manga adquieren mayor protagonismo, con la corriente de San Javier adquiriendo una velocidad menor. No se identifica un giro, aunque el sentido de corriente sigue la línea de costa en sentido ciclónico. En cambio, sí se origina una corriente de fondo de norte a sur.

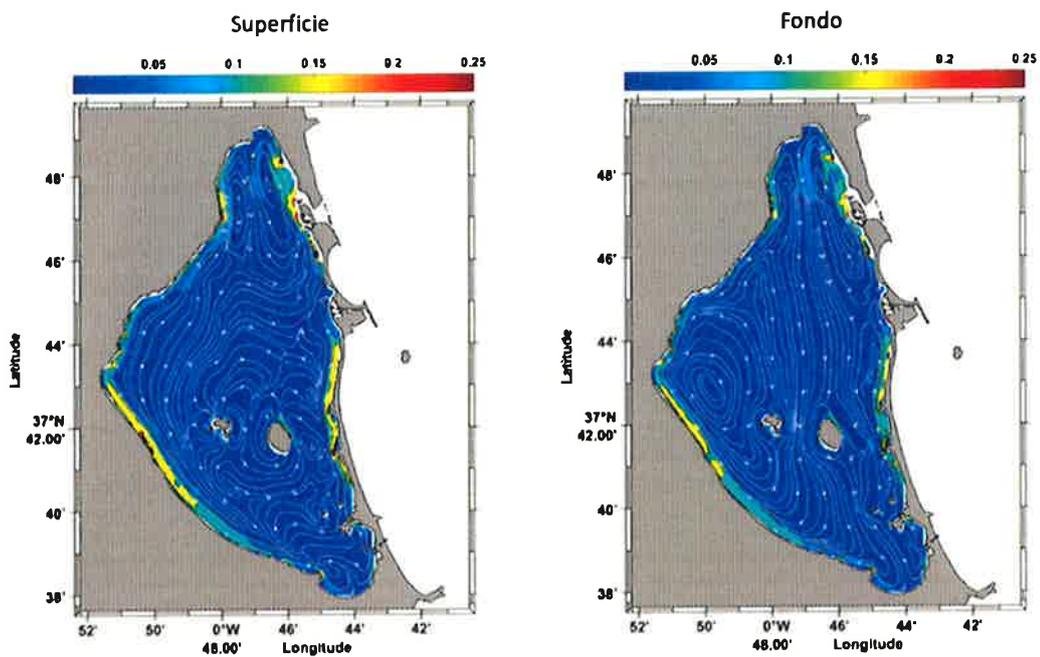


Figura 9. Patrón de corriente en superficie y fondo identificado en el grupo 4 de los SOMs para vientos inferiores a 9 m/s del SW.

La Figura 10 muestra el patrón clasificado como grupo 5 originado por vientos de velocidades superiores a 12 m/s del NE. Es una situación que corresponde a tormentas de Levante típicas de invierno que suelen tener una duración de 3 días. Aquí las corrientes de San Javier, Los Urrutias y La Manga se magnifican y adquieren velocidades elevadas. Se genera un giro ciclónico en el centro de la laguna y varios remolinos en la cubeta sur. A su vez la corriente entre islas se acentúa y se genera una corriente de fondo intensa hacia el norte.

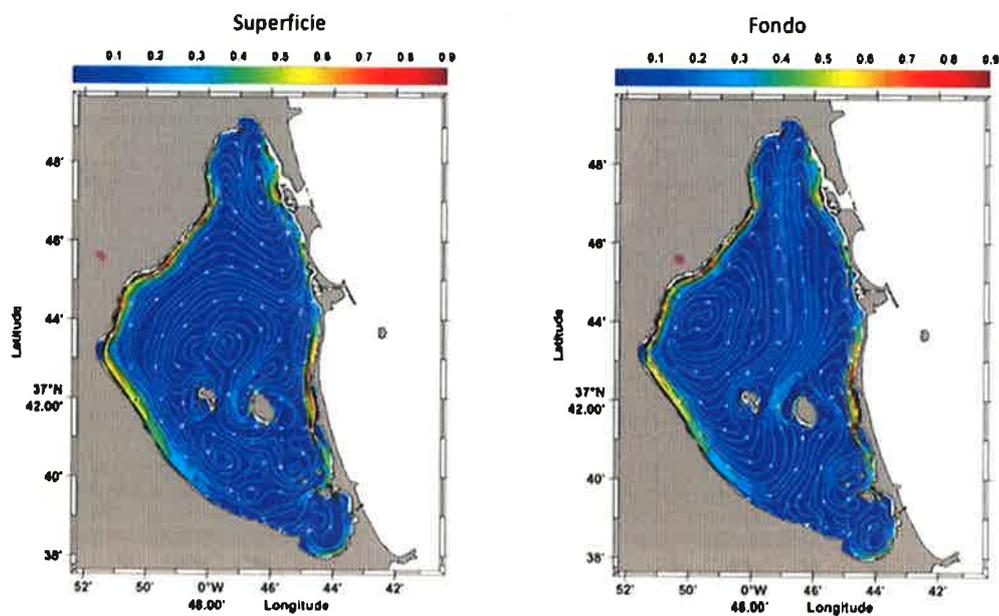


Figura 10. Patrón de corriente en superficie y fondo identificado en el grupo 3 de los SOMs para vientos de menos de 6 m/s del NE-SW.

El último patrón identificado (Grupo 6) corresponde a vientos del NE de entre 2 y 6 m/s (Figura 11). En este grupo se engloban todos los patrones en situación prácticamente de calma, por lo que las corrientes son muy débiles variantes. No obstante, se identifican las tres corrientes costeras principales con velocidad de 0,1 m/s y una corriente de fondo hacia el norte.

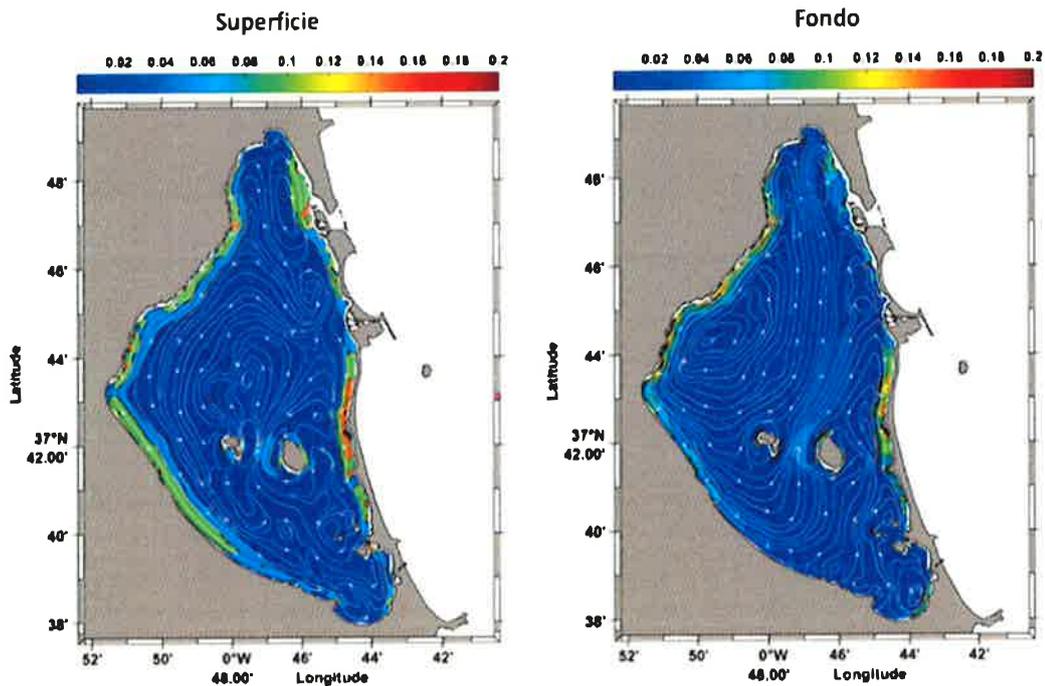


Figura 11. Patrón de corrientes en superficie y fondo identificado en el grupo 6 de los SOMs para vientos de entre 2 y 6 m/s del NE.

2.2. Análisis de datos de presión atmosférica

Dado que la presión atmosférica es el principal forzante de los niveles del mar, que en definitiva fuerzan el intercambio, se procede a realizar un análisis de datos meteorológicos de presión atmosférica para comprobar si la estación de San Javier es representativa de los cambios en el nivel del mar del Mediterráneo y por tanto validar el uso de esta estación como de referencia.

Los datos de la estación meteorológica de San Javier proporcionan una información a pie de agua en la laguna, pero no se ha comprobado si esta estación es representativa de esta zona y también de la cuenca Mediterránea adyacente. Para dilucidar si el efecto barométrico invertido se produce en el Mediterráneo a gran escala o tiene una componente local más importante, se ha procedido a analizar los datos de presión atmosférica en varias estaciones del área de influencia en el Mediterráneo adyacente al Mar Menor y así verificar si la estación de San Javier es representativa.

La Figura 12 muestra la localización de las estaciones meteorológicas seleccionadas, tanto de la zona del Mar Menor como del Mar Mediterráneo, que se indican en la Tabla 2.

Para el Mar Menor se obtuvieron los datos aportados por la Agencia Estatal Meteorológica (AEMET), adscrita al Ministerio para la Transición Ecológica, a través del servicio OpenData. Se escogió la estación meteorológica del Aeropuerto de San Javier.

Tabla 2. Datos informativos sobre las estaciones de observación in-situ seleccionadas para este estudio en la zona de la laguna costera del Mar Menor y en el Mar Mediterráneo occidental.

Nombre	Indicativo	Latitud	Longitud	Frecuencia	Base de datos
San Javier - Aeropuerto	7031X	37.78 °N	0.81 °O	Diaria	AEMET
Palma - Puerto	B228	39.55 °N	2.62 °E	Diaria	AEMET
Alguer	LIEA	40.63 °N	8.29 °E	30 min	IEM
Trapani	LICT	37.91 °N	12.49 °E	30 min	IEM
Argel	DAAG	36.69 °N	3.22 °E	30 min	IEM

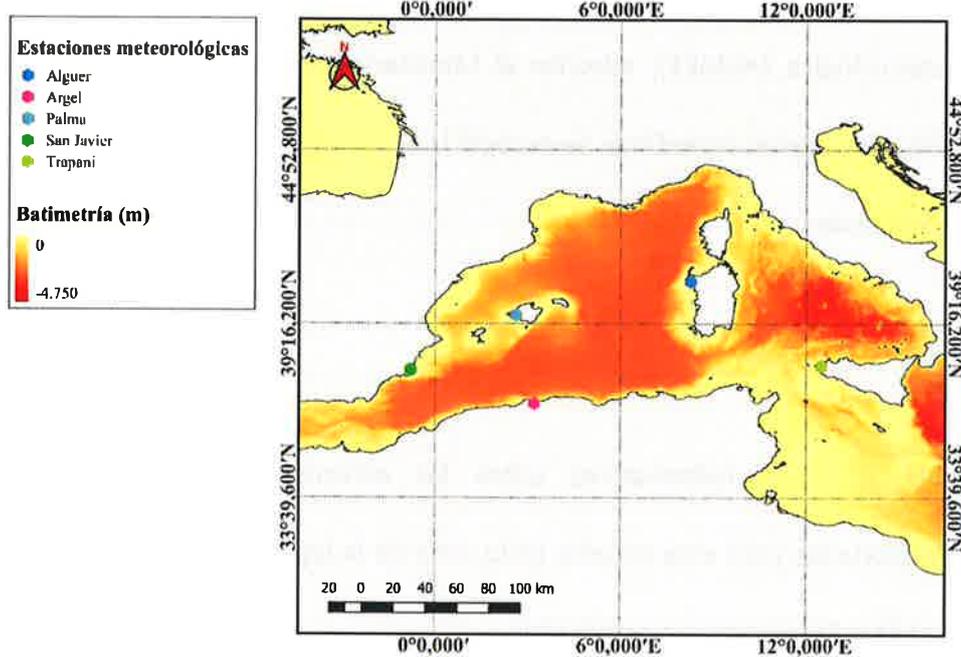


Figura 12. Representación cartográfica de las estaciones meteorológicas (●) seleccionadas en la cuenca occidental del Mar Mediterráneo

Los datos escogidos comprenden desde enero de 2018 hasta agosto de 2023. La frecuencia de los datos es diaria para diferentes variables: temperatura media diaria, temperatura mínima y máxima del día, precipitación diaria, velocidad y dirección del viento, racha máxima del viento, insolación, presión máxima y mínima al nivel de referencia de la estación.

En primer lugar, los datos diarios de la estación situada en el puerto de Palma (Islas Baleares) también proporcionados por la AEMET de la misma red de estaciones meteorológicas. En segundo lugar, se obtuvieron datos de estaciones

meteorológicas automatizadas de aeropuertos del proyecto Mesonet de la universidad estatal de Iowa, Iowa Environmental Mesonet (IEM, www.mesonet.agron.iastate.edu). El IEM tiene como objetivo reunir, recopilar, comparar y difundir y archivar las observaciones de diferentes estaciones repartidas por todo el mundo. Estas observaciones suelen denominarse sensores ASOS o, a veces, AWOS. Las estaciones escogidas en este caso fueron para Alguer (Cerdeña, Italia), Trapani (Sicilia, Italia) y Argel (Argelia). La frecuencia de los datos de la base de datos del IEM es cada 30 minutos, de tal modo que para obtener los datos diarios se hizo una media. Las variables que proporciona dicho sistema son la temperatura del aire, el punto de rocío, la humedad relativa, la dirección y velocidad del viento, altimetría, precipitación, visibilidad, racha de viento, cobertura y altura de nubes y acumulación de hielo. Algunas de las variables se encuentran en el Sistema de Unidades de medida de los Estados Unidos por lo que fueron conversados al Sistema Internacional de Unidades.

Para la comparación de diferentes puntos se representaron las series temporales de las diferentes estaciones con la estación del aeropuerto de San Javier.

Al analizar la presión atmosférica en la cuenca occidental del Mediterráneo, se observa una notable uniformidad en su comportamiento, conforme a los registros obtenidos en diversas estaciones meteorológicas (Figura 13). Las pequeñas diferencias observadas pueden deberse principalmente a

factores locales como la propia topografía, condiciones geográficas y la propia variabilidad natural de los sistemas meteorológicos de los frentes, ciclones y anticiclones.

Esta uniformidad indica una respuesta del nivel del mar uniforme en la cuenca y por tanto, y a falta de un análisis más detallado, los valores de la estación meteorológica de San Javier pueden aceptarse como adecuados para entender la respuesta del nivel del mar del Mediterráneo.

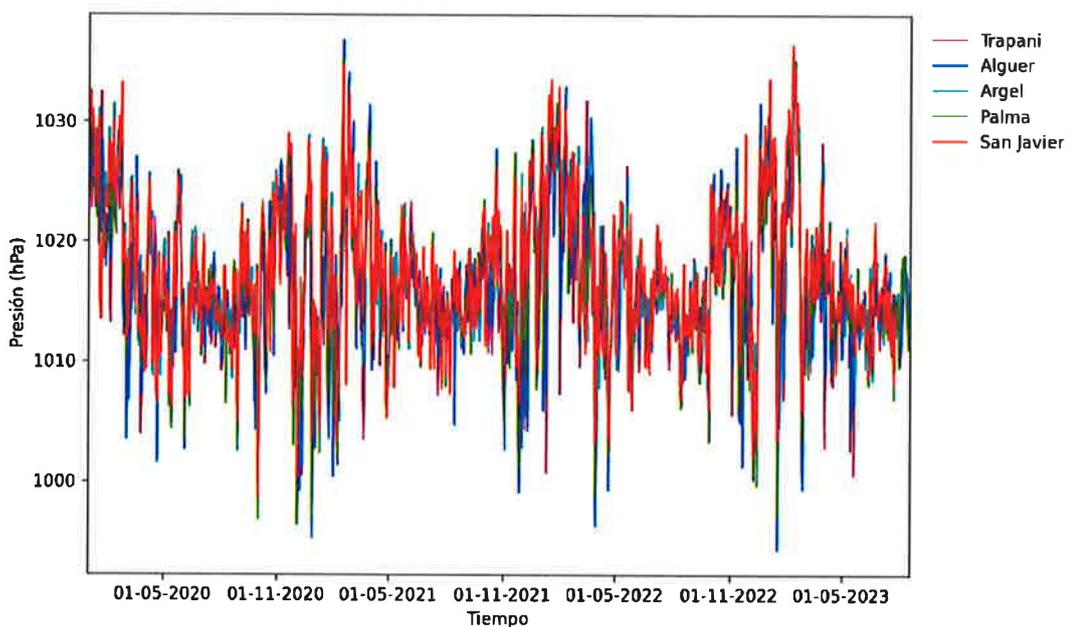


Figura 13. Presión atmosférica en diferentes estaciones meteorológicas de la cuenca occidental del Mediterráneo para la misma secuencia de tiempo.

A efectos prácticos se ha definido en este trabajo el verano y el invierno en la zona de estudio en función de la temperatura, la presión atmosférica a lo largo del año. El verano abarca los meses de junio a septiembre, ya que no solo superan los 22.5 °C (Figura 14), sino que también se caracterizan por una estabilidad en la presión, que se mantiene entre 1010 y 1020 hPa (Figura 15). Por otro lado, mayo y octubre tienden a rondar los 20°C, mientras que, entre noviembre y abril, las temperaturas promedio se sitúan por debajo de los 18°C. Durante esta época, se observa una transición desde bajas presiones que pueden descender hasta 1000 hPa (principalmente en noviembre) a un período en el que predominan las altas presiones, que llegan a alcanzar los 1035 hPa en febrero.

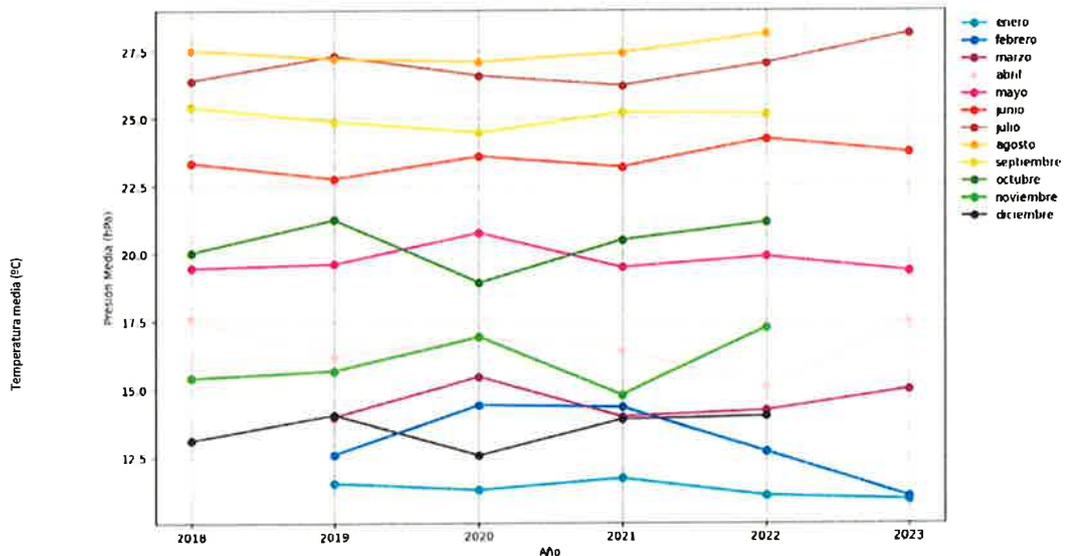


Figura 14. Serie temporal de la media mensual de temperatura (inferior) durante los años de estudio.

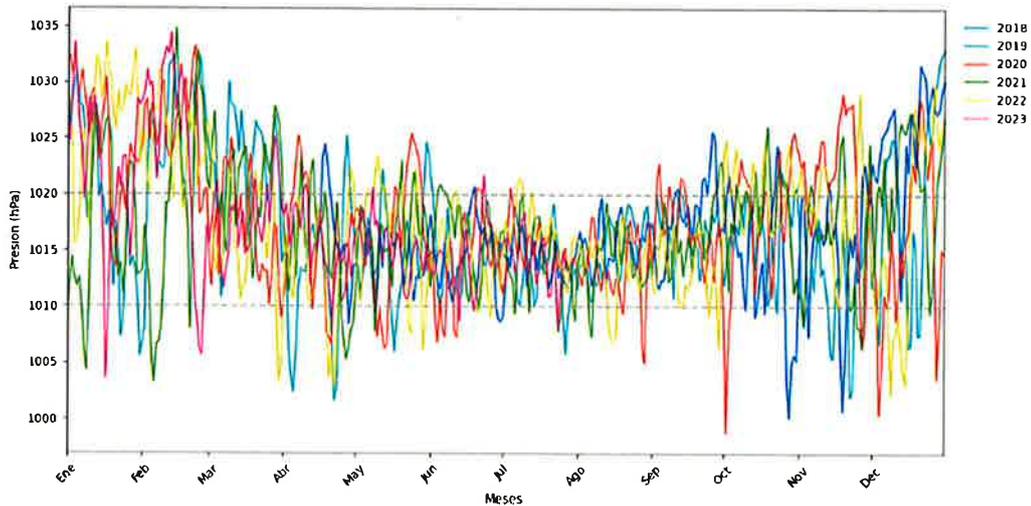


Figura 15. Series temporal diaria para la presión atmosférica (superior), flujo (centro) en los distintos años de estudio.

2.3. Redefinición del sistema de modelado oceanográfico regional ROMS

Se están recopilando los datos históricos de las simulaciones hidrodinámicas realizadas con ROMS de 2011 para poner a punto un algoritmo de inteligencia artificial que sea capaz de clasificar automáticamente los tipos de corrientes en el Mar Menor. La finalidad de este trabajo es poner a punto la metodología que permita simplificar las predicciones de corrientes a partir de vientos que las producen.

En el Mar Menor el mayor forzante de los intercambios de agua con el Mediterráneo son las presiones atmosféricas, mientras que las corrientes en su interior vienen fundamentalmente forzadas por los vientos.

Como paso previo a cualquier nueva simulación se ha reestructurado el mallado del modelo que se estaba utilizando con el fin de acelerar los procesos de cálculo sin comprometer la resolución espacial. Para ello se está desarrollando un mallado curvilíneo que consigue una mayor resolución donde más se necesita, canales y líneas de costa interiores, evitando tener que anidar mallas con el consiguiente aumento en el esfuerzo de cálculo. Los resultados preliminares con el nuevo grid mejoran sensiblemente los resultados. Las Figuras 12 a 14 muestran un detalle de la mayor resolución espacial impuesta en cada uno de los canales de comunicación respectivamente: Las Encañizadas; El Estacio y Marchamalo.

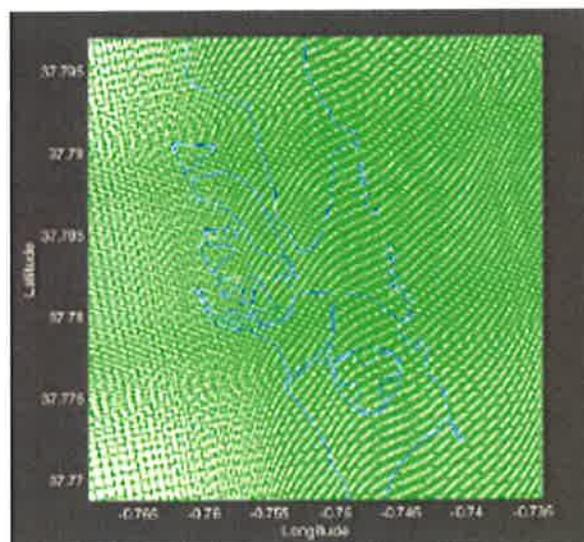


Figura 12. Detalle de mayor resolución espacial en el mallado de Las Encañizadas.

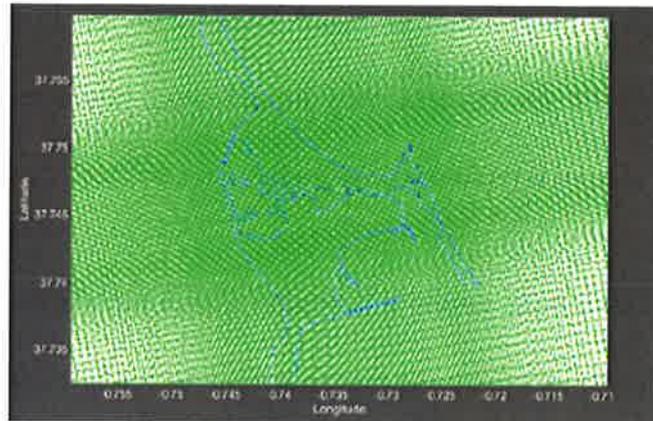


Figura 13. Detalle de mayor resolución espacial en el mallado del Estacio.

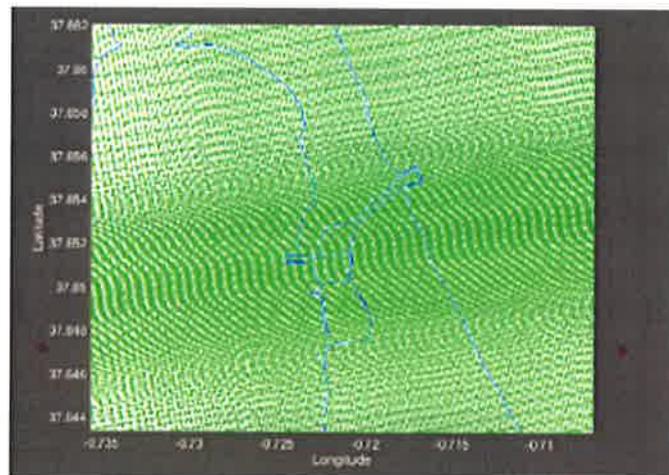


Figura 14. Detalle de mayor resolución espacial en el mallado de Marchamalo.

La Figura 15 muestra un ejemplo de mallado todavía rectilíneo con la batimetría a utilizar en el dominio del Mar Menor.

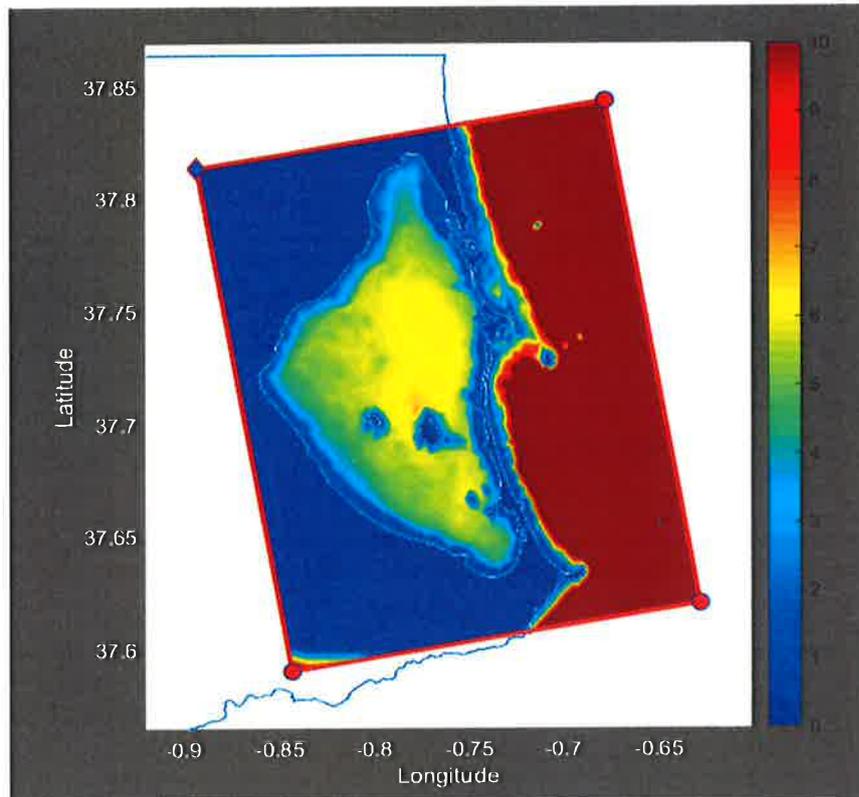


Figura 15. Mallado ortogonal con la batimetría a utilizar en el dominio del Mar Menor.

Como el Mar Menor en su ribera interna tiene una forma triangular, es conveniente utilizar un mallado curvilíneo que se ajuste a la línea de costa. La Figura 16 muestra la diferencia entre una porción del mallado ortogonal y curvilíneo en una porción de la ribera interna del Mar Menor. El resultado final es un mallado que capta tanto la morfología de la línea de costa como una alta resolución en los canales.

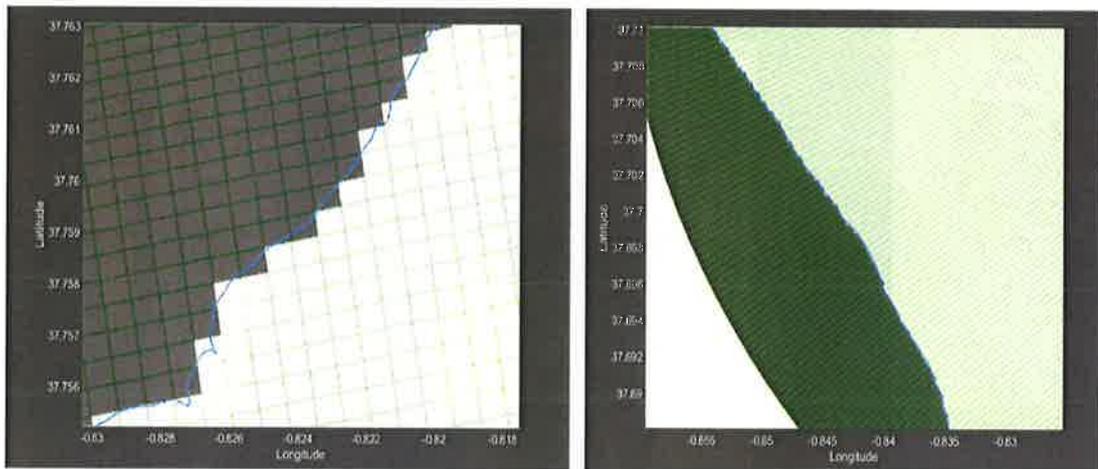


Figura 16. Diferencia entre mallado ortogonal (izquierda) y curvilineal (derecha).

Al mallado se le ha impuesto, a su vez, el algoritmo de interacción atmósfera / agua COARE (Fairall et al. 1994) ajustando los parámetros al Mar Menor. Las pruebas realizadas sobre mallados provisionales parecen responder con mayor precisión a como se hacía con el antiguo mallado. La Figura 17 muestra como ejemplo unos resultados de temperatura y salinidad.

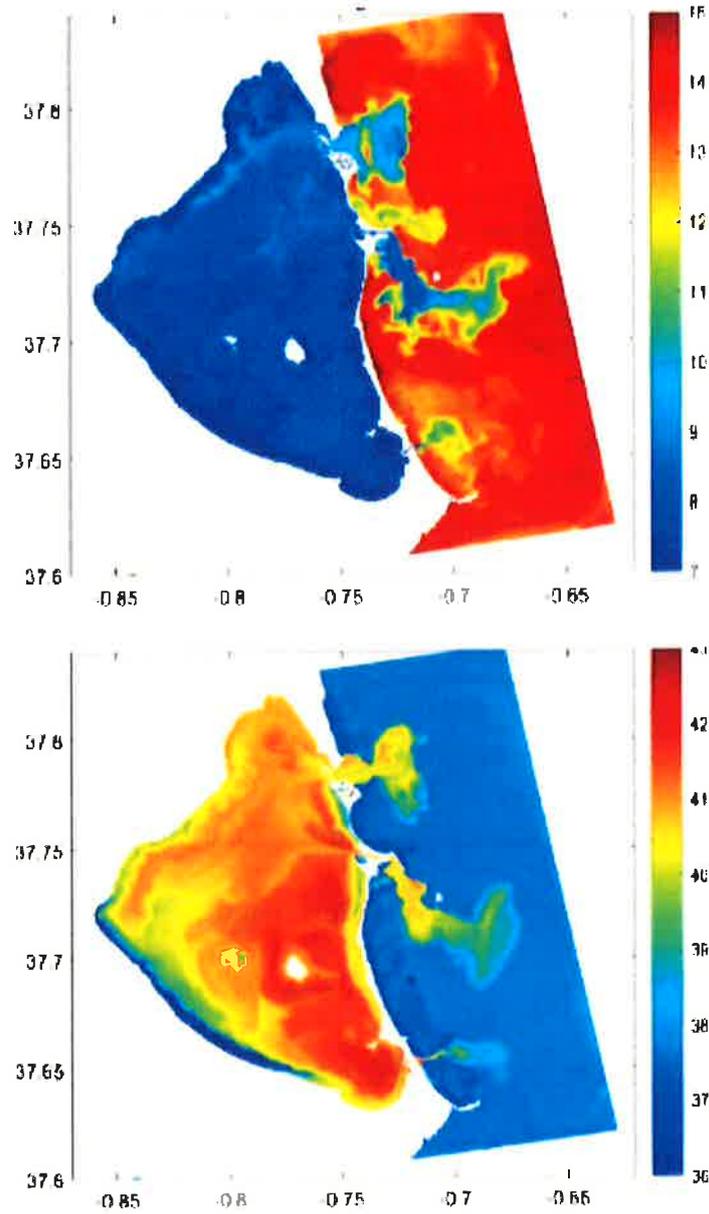


Figura 17. Ejemplo de salida del modelo con el nuevo mallado para temperatura (arriba) y salinidad (abajo).

2.4. Herramienta basada en desniveles entre mares para el cálculo del flujo por los canales.

Se describen aquí algunos de los resultados parciales obtenidos en el trabajo que se desarrolla para la obtención de nuevas ecuaciones mejoradas del flujo en los canales a partir de los desniveles entre los dos mares.

Se dispone de ocho sensores de presión que miden el nivel del mar en diferentes puntos dentro y fuera de la laguna. Dado que las diferencias de nivel del mar son el principal mecanismo que fuerza el intercambio de agua, se han tomado dos de estos sensores como representativos, el del club náutico de Lo Pagán en el Mar Menor y el del puerto de San Pedro del Pinatar en el Mediterráneo. A partir de estos sensores se elaboraron (Gilabert et al., 2022) una serie de ecuaciones empíricas que se han utilizado para calcular el intercambio de agua en cada uno de los canales y comparar estas medidas con las que proporciona el modelo hidrodinámico. Se ha intentado expandir la serie lo más posible y para ello se han recopilado los datos existentes, se han organizado correspondientemente y se han intentado cubrir los huecos de las series cuando faltaban. Para ello se han incorporado en la serie algunos datos del nivel del mar Mediterráneo obtenidos del mareógrafo del Instituto Geográfico Nacional en el puerto de Cartagena.



Para el tratamiento de los datos se están desarrollando rutinas nuevas, tanto en MATLAB como en Python, puesto que los datos provienen de múltiples fuentes y por su naturaleza requieren tratamientos diferentes antes de poder utilizarlos en un análisis conjunto.

De esta forma se incluye en esta sección un trabajo más bien metodológico cuyos resultados deben ser todavía validados y por ello no se utilizarán definitivamente hasta su validación.

2.4.1. Medidas de ADCPs

En cada uno de los canales se han fondeado perfiladores de corriente de efecto Doppler (ADCP). Estos instrumentos hidroacústicos, registran principalmente la velocidad y dirección del agua en un rango determinado de profundidad, pero también disponen de sensor de presión, brújula magnética, sensor de temperatura del agua y un inclinómetro para la corrección de las medidas, etc. Se fondeó uno en el canal de Marchamalo, otro en el canal de El Estacio y tres en la zona de Encañizadas compuesta por las golas de La Torre, El Charco y Veneziola. Los ADCP usados para este estudio tienen una capacidad de medida en un rango de 10 m/s y una precisión del 1 % del valor medio 0.005 m/s. Las baterías son de hasta 100 W permitiendo una autonomía estimada de 70 días.



En cada fondeo se genera un archivo que, tras ser procesado por la aplicación del fabricante del equipo, da lugar a una serie de archivos de texto con toda la información necesaria, tanto los metadatos, información del instrumento y parámetros de programación de trabajo, como de las medidas tomadas en ese periodo de tiempo. Para este trabajo se han necesitado los datos de presión para el cálculo de la profundidad, las medidas de la velocidad del agua (m/s) en el plano horizontal (x, y) para la determinación de la intensidad y dirección del flujo, y la amplitud de la señal para diferenciar las medidas válidas de las que no. En todos ellos cada fila representa un instante de tiempo de lectura y cada columna una capa diferente en la columna de agua. Siendo la primera capa la más cercana del fondo, en El Estacio las 12 celdas de 50 cm proporcionan medidas hasta los 6 m de altura desde el fondo, y en el caso de Marchamalo y Encañizadas son 10 celdas de 30 cm.

Para cada uno de los fondeos de ADCP se aplica el siguiente procedimiento:

- Rotación de ejes: puesto que la dirección del flujo calculado debe ser paralelo a la orientación del canal, en El Estacio, Marchamalo y La Torre, que están orientados de Oeste a Este se ha usado la velocidad en el eje X sin rotar; pero en los casos de El Charco y Veneziaola a esta velocidad se le ha aplicado una rotación de ejes de 45 grados.

- Limpieza de datos: atendiendo a las siguientes fuentes de error de lectura;

a) medidas tomadas con una amplitud inferior a 30 implican aguas demasiado limpias (sin suficientes partículas en suspensión) y por tanto, medidas poco fiables; b) los momentos en los que el ADCP no está fijo e inmóvil en el fondo se detectaron por cambios bruscos en la lectura de presión del sensor.

- Capas fuera del agua: en base a la profundidad existente en cada instante, se detectaron las capas que pertenecían al espacio aéreo, es decir, que no estaban sumergidas y que por tanto no debían tenerse en cuenta para la media de velocidad de columna del agua. Las lecturas en capas que incluían parte de agua y parte de aire tampoco fueron consideradas válidas en este estudio.

- Unión de datos en un solo fichero: una vez todos los archivos estaban procesados de esta manera, se unieron dando lugar a un único fichero para cada canal, con datos de instante de tiempo, profundidad y velocidad del agua en la dirección paralela al canal, siendo el signo positivo para aguas salientes del Mar Menor hacia el Mar Mediterráneo.

A partir de estos ficheros se pueden calcular los flujos (m^3/s) mediante la Ecuación 1 para cada instante de tiempo de medición. En esta ecuación, la



velocidad usada es la media aritmética de la velocidad en todas las capas con medidas válidas, el ancho del canal es el mostrado en la Tabla 3, y la altura vertical es la profundidad total existente en cada instante de tiempo. Es decir, aunque no se ha usado la velocidad medida en la última capa que incorporan parte de aire, al usar la profundidad completa sí se puede incorporar esta parte en el volumen total de agua desplazado.

$$Q \text{ (m}^3/\text{s)} = v \text{ (m/s)} \cdot W_c \text{ (m)} \cdot H_c \text{ (m)} \quad \text{(Ecuación 1)}$$

donde Q es el flujo, v es la velocidad de corriente por el canal, Wc es la anchura del canal y Hc es la altura vertical del canal.

Tabla 3. Anchura de canal y ángulo a aplicar en la rotación de ejes para cada uno de los canales.

Canal	Ángulo de rotación (°)	Anchura (m)
El Estacio	0	39
Marchamalo	0	25.5
La Torre	0	31
El Charco	45	110
Veneziola	45	28

2.4.2. Datos de elevación posteriores a octubre 2020

Las 8 estaciones en las que existen medidas de elevación son: Los Alcázares, Los Urrutias, Mar de Cristal, Encañizadas, Lo Pagán, La Isleta, Tomás Maestre y San Pedro. Son equipos S-WIDE de Widhoc S.L. con sensores de presión LMK807 corregidos atmosféricamente de BD-Sensors (Alemania) que ofrecen medidas de altura del nivel de mar con una frecuencia aproximada de 10 minutos. Como se ha comentado, y partiendo del estudio de López Castejón (2017), las dos estaciones que representan el nivel del mar en el Mediterráneo y Mar Menor son el CN Villa de San Pedro del Pinatar y el Club Náutico de Lo Pagán, respectivamente. De ahí que todo el proceso aquí desarrollado esté enfocado en estas dos únicamente. El sensor de San Pedro presenta medidas desde el 29/09/2020, mientras que el de Lo Pagán se instaló más tarde y sus primeras medidas son del 14/10/2020. Aunque actualmente siguen funcionando, en este trabajo se han usado los datos de ambas estaciones hasta 08/08/2023.

El procedimiento aplicado a cada una de las estaciones por separado ha es el siguiente:

- Pasar de hora local con cambios entre horario de verano e invierno a hora UTC.



- Eliminar las anomalías más acentuadas

En estos puertos no existen nivelaciones disponibles para usar como ceros de referencia, por tanto, se ha usado el nivel medio de cada uno de los sensores como cero y se ha usado el valor residual. Además, se detectó un cambio de esta referencia el 14 enero 2021 entre las 17:30 y las 18:30 por movimiento del sensor. Esto se solucionó usando dos referencias distintas para antes y después del suceso.

Se aplicó una media móvil de 3 horas para suavizar los datos para eliminar valores puntuales demasiado extremos. Con un suavizado de 1 hora la diferencia no era notable y con 6 horas se perdía la variabilidad inducida por el efecto de la marea.

Se interpolaron las medidas linealmente para obtener datos cada 5 minutos exactos por igual en ambos sensores (una interpolación de tipo spline cubico no proporcionó resultados mejores). Esta frecuencia se tomó para que coincidiera con la de los datos del ADCP con los que posteriormente se tenían que comparar. Como se comprobó anteriormente que no había huecos temporales superiores a 15 minutos, no se comete mucho error en la interpolación.

Por último, se calculó el desnivel entre ambas estaciones para cada instante de tiempo atendiendo a la Ecuación 2. De esta manera un desnivel negativo implica un nivel mayor en San Pedro que en Lo Pagán y, por tanto, un flujo de signo también negativo del Mediterráneo al Mar Menor, es decir, de entrada de agua del Mediterráneo al Mar Menor. Por el contrario, un desnivel positivo indica mayor nivel en Lo Pagán que en San Pedro y por tanto un flujo positivo de salida de agua del Mar Menor hacia el Mediterráneo. Así pues, se define el sentido de los flujos de acuerdo con el sentido de la corriente en el eje X, hacia la derecha positivo, hacia la izquierda negativo.

$$\text{Desnivel} = \text{Elevación Lo Pagán} - \text{Elevación de San Pedro} \quad (\text{Ecuación 2})$$

2.4.3. Datos de elevación anteriores a octubre 2020

Los sensores de presión se fondearon ocho veces consecutivas entre el 21/06/2019 y el 01/09/2020 para medir el nivel del mar de Lo Pagán. Al igual que los ADCP, tienen una fecha inicial y una fecha final de lectura, y por tanto se le ha aplicado el mismo tratamiento para eliminar las lecturas erróneas. Posteriormente al conjunto de medidas, unidas ya en un único archivo, se obtuvo el residual, se le

aplicó una media móvil de tres horas y una interpolación lineal para tener datos cada cinco minutos.

El nivel del mar de Cartagena se usó como punto de referencia del Mar Mediterráneo y, por ende, de San Pedro del Pinatar. Se obtuvieron de la base de datos de la Red de Mareógrafos perteneciente al Instituto Geográfico Nacional (IGN, www.ign.es/web/ign/portal/inicio), institución configurada como una dirección general del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana de España. La mayoría de las estaciones mareográficas de la red se encuentran en el interior de los puertos, como es en el caso de Cartagena. La estación está en una caseta donde se encuentra un pozo que conecta con el mar, ya sea directamente o por un sistema de filtrado, evitando así registrar el oleaje. Como mareógrafo presenta codificadores angulares, al igual que le acompañan sensores radar que emiten impulsos cortos de radar que se reflejan en el agua y regresan al sensor en forma de eco.

La serie temporal comprende desde enero de 2018 hasta la fecha y la frecuencia de los datos brutos llega a variar en diferentes partes del intervalo de estudio, siendo minutal en algunos instantes y diezminutales en otros. Por este motivo, se hizo una limpieza de datos mediante una interpolación de los valores según las series temporales de los datos de observación, es decir, se hizo una interpolación cada diez minutos.



Tras eliminar la tendencia positiva observada su serie temporal, se compararon estas medidas con las de elevación ofrecidas por el sensor situado en San Pedro del Pinatar en las fechas en las que coincide la disponibilidad de ambas, dando lugar a una clara relación lineal con un R^2 de 0.8. Por tanto, se usó la elevación de Cartagena para estimar la elevación de San Pedro en las fechas anteriores a octubre 2020.

De esta manera se obtuvo un nuevo desnivel entre el Mar Menor y el Mar Mediterráneo con el que estimar el flujo de agua usando las ecuaciones empíricas explicadas anteriormente.

2.4.4. Ecuaciones empíricas

Con se ha comentado previamente se habían diseñado ecuaciones empíricas para el cálculo de los flujos de intercambio de agua por los canales. No obstante, y al ampliar las series temporales de medidas, se han reescrito las ecuaciones aumentando su exactitud.

Para ello se parte de los periodos en los que se dispone simultáneamente de medidas de elevación en ambos mares y de ADCP en los distintos canales por separado, se han obtenido las cinco ecuaciones que estiman el flujo de agua en cada uno de ellos.

Se han enfrentado las medidas de flujo de agua frente a las de desnivel dando lugar a gráfico de dispersión de puntos. Sobre la nube de puntos se han probado distintas ecuaciones de ajuste usando diferentes funciones. Entre las opciones más barajadas cabe destacar la lineal, la polinomial de tercer grado y distintas sigmoidales. El análisis sobre la bondad del ajuste se ha basado principalmente el valor de r^2 y la forma en la que representa el comportamiento del flujo tanto con valores de desnivel bajos como con valores extremos ya sean positivos o negativo. Finalmente, como describe la Figura 18, se optó en todos los casos por aplicar una ecuación polinomial de grado 3. Seguidamente se estableció el valor máximo del flujo (positivo o negativo) como constante a partir de desniveles superiores (positivos o negativos también).



Figura 18. Procedimiento aplicado a la ecuación de tercer grado para la obtención de la curva final con la que se ha estimado el flujo en base al desnivel.

De esta forma se llegó a los ajustes mostrados en la Figura 19 con un r^2 de 0.77, 0.68 y 0.56 para los canales de El Estacio, Marchamalo y Encañizadas respectivamente.

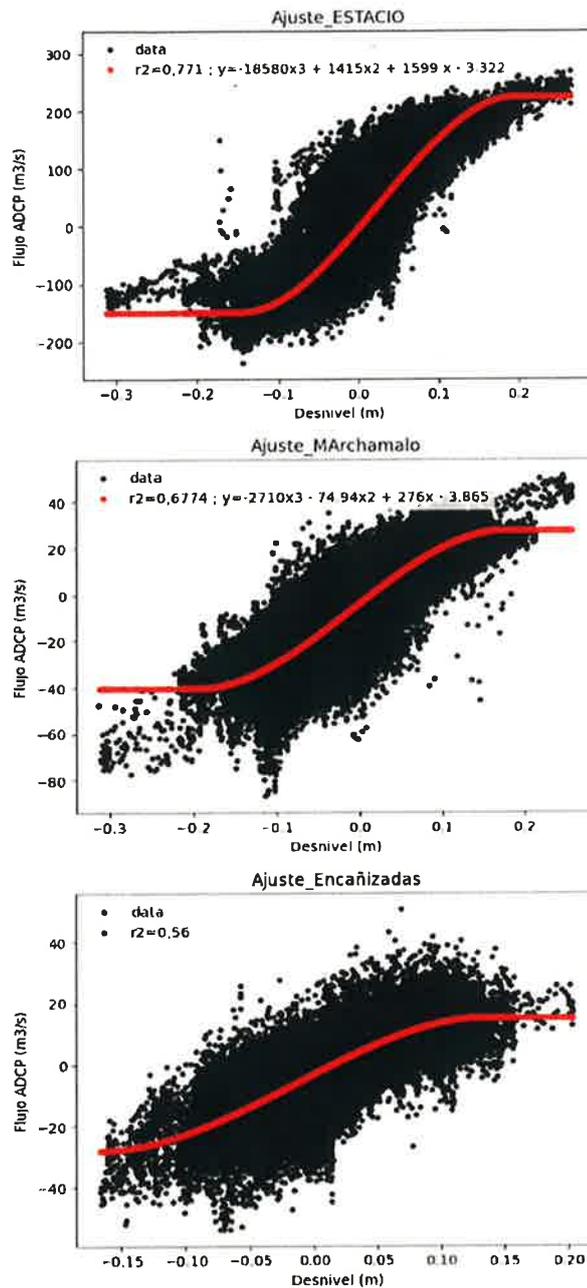


Figura 19. Flujo medido por ADCP (m³/s) frente al desnivel entre ambos mares y curva de ajuste (línea roja) para El Estacio, Marchamalo y Las Encañizadas.



En el caso de El Estacio, se mantuvo fuera de la ecuación un fondeo de ADCP (mayo y junio 2021) que presentaba profundidades anómalas y cuyos valores en la dispersión de puntos también eran sospechosos. Hay que destacar también que, aunque en las Encañizadas hay tres canales diferenciados se usó el sumatorio de los tres para la obtención de la ecuación general de la zona que integra mejor los resultados. Los valores disponibles para cada canal por separado son todavía pocos para establecer valores de alta fiabilidad.

La ecuación de Las Encañizadas se calculó asumiendo la suma de los flujos de los canales que componen el sistema. Todavía se dispone de series temporales de datos demasiado cortas como para establecer relaciones fiables tal y como indican la Figura 20 y la Tabla 4 donde se recogen las ecuaciones resultantes.

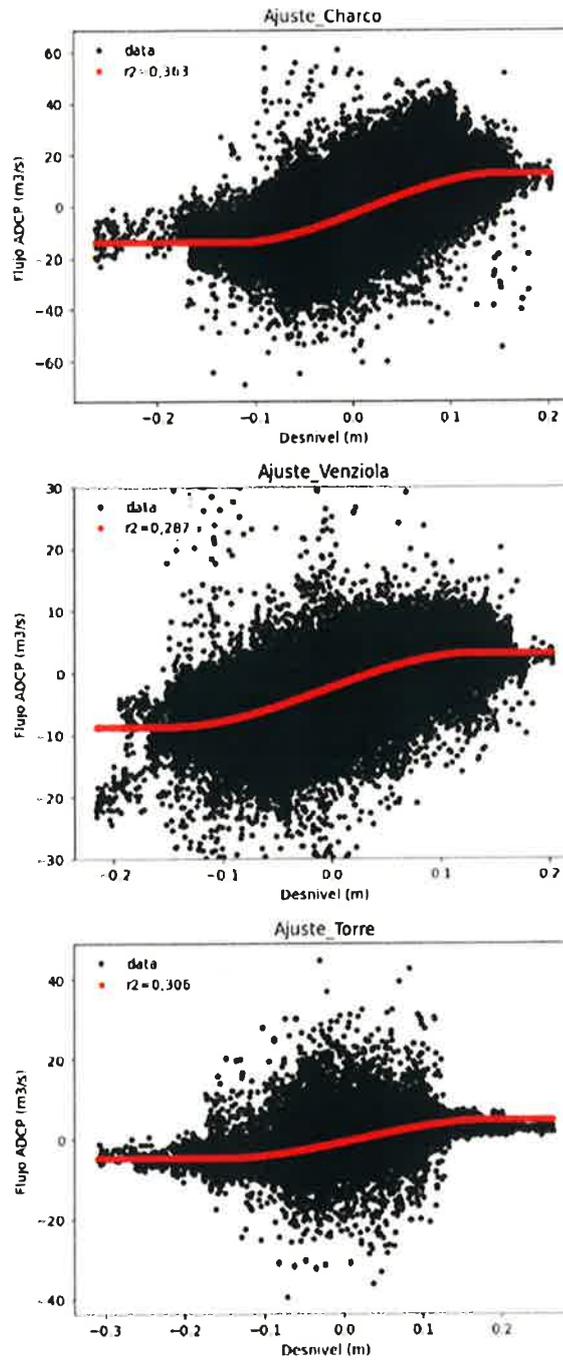


Figura 20. Flujo medido por ADCP (m³/s) frente al desnivel entre ambos mares y curva de ajuste (línea roja) para las golas del El Charco, La Torre y el canal de Veneziaola.



Tabla 4. Ecuaciones de ajuste y coeficiente de determinación del flujo frente a los desniveles entre mares para cada canal.

Gola	Ecuación	r ²
ESTACIO	$y = -18580x^3 - 1415x^2 + 1599x - 3.322$	0.771
MARCHAMALO	$y = -2710x^3 - 74.94x^2 + 276x - 3.865$	0,678
ENCAÑIZADAS	$y = -3150x^3 - 142.9x^2 + 213.4x - 3.08$	0.560
Charco	$y = -2700x^3 + 119.2x^2 + 146x - 2.836$	0.363
Torre	$y = -469.3x^3 + 27.28x^2 + 41.19x - 0.7924$	0.306
Veneziola	$y = -1109x^3 - 22.81x^2 + 63.86x - 2.35$	0.287

2.5. Análisis de oleaje.

Se están re-analizando los datos del estudio de oleaje iniciado en 2022 con técnicas de aprendizaje automático como son las redes neuronales SOM descritas previamente.

2.5.1. Mapas autoorganizados (Self Organizing Maps - SOM) de oleaje

En el contexto del modelo de oleaje SWAN, se han generado numerosos mapas. Los mapas analizados en este estudio se refieren a la altura de las olas, el

período de las olas, la longitud de onda y la velocidad orbital cerca del fondo. Se han designado un total de 25 neuronas para clasificar los mapas.

2.5.2. Series temporales de parámetros del oleaje

2.5.2.1. Vientos

La serie de viento utilizada para las simulaciones del modelo SWAN incluyó siete períodos de tiempo observados durante los cuales la velocidad del viento alcanzó aproximadamente 10 m/s. De estos episodios, cinco se caracterizaron por vientos que soplaban en dirección suroeste, mientras que los dos restantes tenían vientos que provenían del noroeste. Estas direcciones de viento están influenciadas por el área de generación de viento con el fetch más largo, que en este caso corresponde al Mar Mediterráneo. Por otro lado, los vientos de tierra adentro tenían velocidades máximas de alrededor de 5 m/s.

Se ha realizado un análisis estadístico básico de los datos de viento, y los resultados se resumen en la Tabla 5. La tabla probablemente incluye parámetros como la velocidad media del viento, la desviación estándar, los valores mínimo y máximo, y otras medidas estadísticas relevantes.

Tabla 5. Análisis estadístico de vientos de entrada.

Parámetros de viento	Medidas estadísticas	Serie temporal 1	Serie temporal 2
Velocidad del viento (m/s)	Mínimo	0	0
	Máximo	14.1	14.8
	Media	4.5	4.26
Dirección del viento (°)	Media	208	206

Para proporcionar una representación visual de las características del viento la Figura 21 presenta la serie temporal de dirección e intensidad del viento. También se incluye la distribución empírica acumulativa de probabilidad para ambas variables, lo que permite comprender la probabilidad de que ocurran direcciones e intensidades específicas de viento.

Al analizar la serie de viento y presentar las medidas estadísticas y representaciones visuales, el estudio proporciona información valiosa sobre los patrones y características del viento en el área de estudio que contribuyen a una mejor comprensión de las condiciones ambientales y su influencia en la dinámica de las olas en el Mar Menor.

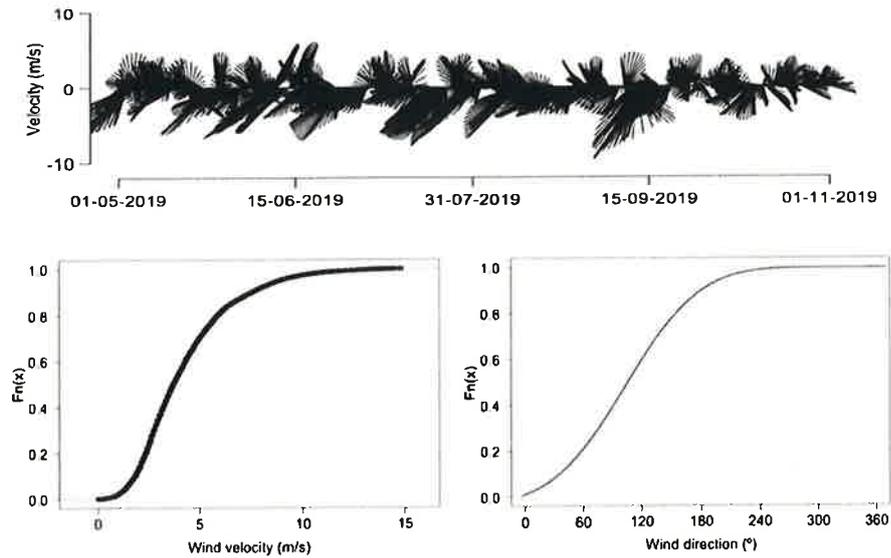


Figura 21. Distribución acumulativa de la probabilidad de la velocidad y dirección del viento.

La Figura 21 ilustra también la distribución acumulativa de probabilidad de las velocidades del viento y las direcciones del viento. Las medidas estadísticas para la velocidad del viento indican una media de 4.24 m/s y una desviación estándar de 2.34 m/s. Estos valores ofrecen una indicación de la media y la variabilidad de los datos de velocidad del viento.

De manera similar, para la dirección del viento, las medidas estadísticas revelan una media de 201.12 grados y una desviación estándar de 93.04 grados. Estos valores describen la tendencia central y la dispersión de los datos de dirección del viento.

La distribución acumulativa de probabilidad representada en la Figura 21 permite comprender visualmente la probabilidad de que ocurran diferentes velocidades y direcciones del viento. Al examinar la distribución, se pueden evaluar las probabilidades asociadas con rangos específicos de velocidad o dirección del viento.

Estas medidas estadísticas y la distribución acumulativa de probabilidad ofrecen información importante sobre las características del viento en la zona de estudio, lo que permite comprender mejor los patrones predominantes del viento y su impacto potencial en la dinámica de las olas en el Mar Menor.

2.5.2.2. *Altura significativa del oleaje*

La caracterización de las olas seguirá un enfoque similar al análisis del viento. Se llevará a cabo un análisis estadístico para examinar los parámetros de las olas, incluyendo la altura significativa de las olas, el período y la dirección. El objetivo es calcular la media y la desviación estándar para cada uno de estos parámetros y determinar sus respectivas probabilidades acumulativas.

Además, la altura significativa de las olas se analizará más a fondo dentro de tres tipos distintos de eventos que se pueden identificar en la serie temporal de olas. Estos eventos pueden corresponder a condiciones específicas de las olas



o fenómenos de interés, como tormentas, períodos de calma u otros eventos significativos de olas. Al examinar la altura significativa de las olas dentro de estos tipos de eventos, se pueden obtener conocimientos valiosos sobre su ocurrencia, duración y características.

El análisis estadístico y la caracterización de los parámetros de las olas proporcionarán una comprensión integral del clima de olas en la zona de estudio. Facilitará la identificación de condiciones de olas predominantes, variaciones e impactos potenciales en el entorno costero.

2.5.2.3. Oleaje medido por ADCP y simulado por SWAN

La altura significativa de las olas registrada en la zona de estudio se mantuvo por debajo de 0.6 metros durante la mayoría de los períodos observados, lo que indica condiciones de olas relativamente calmadas. Sin embargo, hubo cuatro eventos durante los cuales la altura significativa de las olas superó este umbral (Figura 22). Estos eventos fueron generados principalmente por vientos procedentes del Mar Mediterráneo.

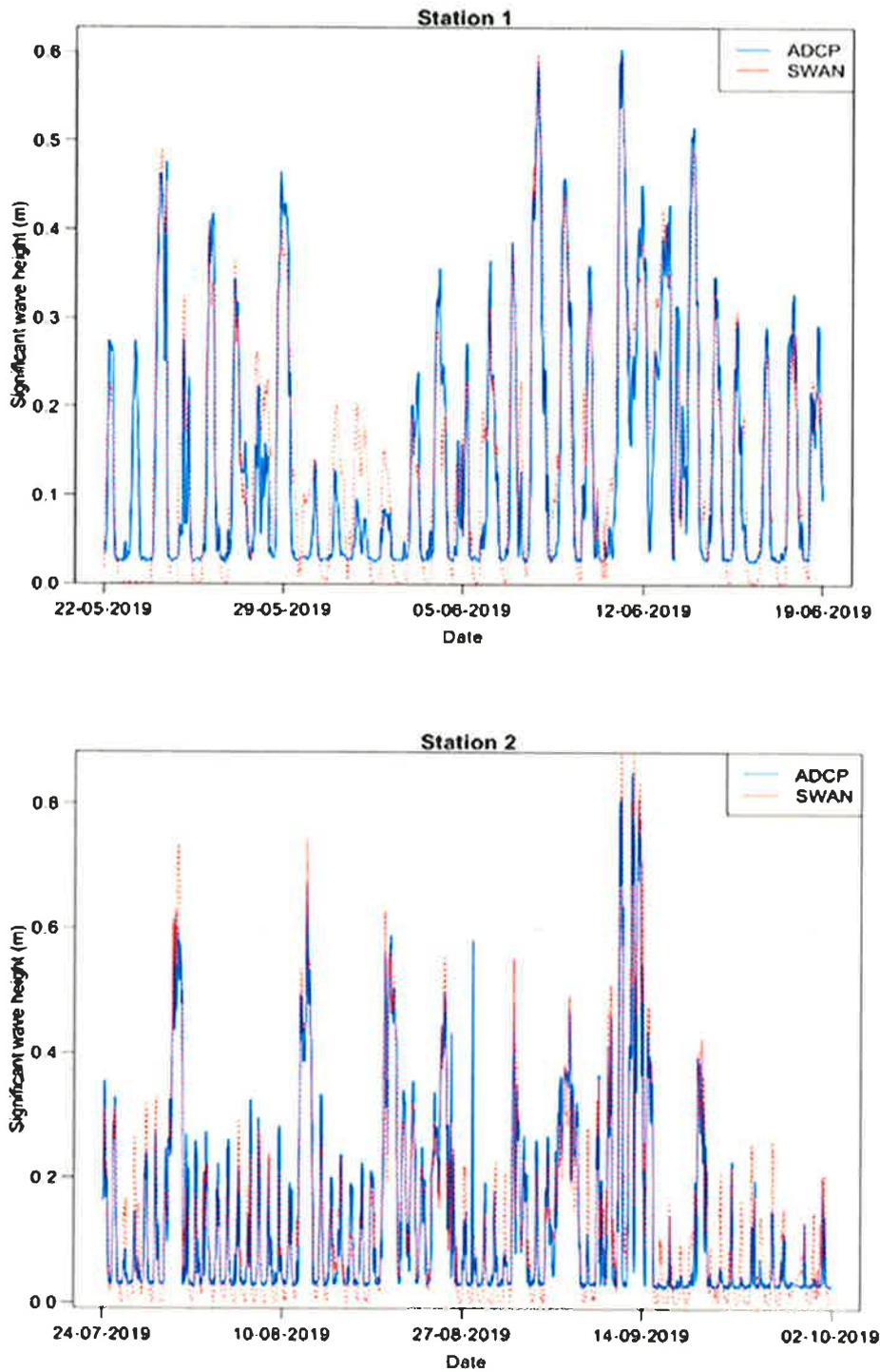


Figura 22. Serie temporal de altura significativa predicha por el modelo SWAN y la observada con el ADCP.

Entre estos eventos, destaca un episodio en particular, el de la DANA que ocurrió del 12 al 15 de septiembre de 2019, como altamente significativo. Durante este período, la altura significativa de las olas superó los 0.6 metros durante una duración extendida, y en ciertos momentos, incluso alcanzó alturas cercanas a un metro.

La caracterización de las olas medias simuladas por SWAN se ha basado en episodios de olas con una probabilidad de ocurrencia del 85%, lo que corresponde a una altura de ola de 0,30 metros, como se muestra en la Figura 22. Se definen como olas altas aquellas que tienen una altura significativa que oscila entre 0,3 metros y 0,6 metros. En la serie temporal de la altura significativa de la ola (Figura 4), hay 22 episodios que cumplen con este criterio.

Por otro lado, las olas extremas se caracterizan por tener una altura significativa de ola que supera los 0,6 metros. Este umbral se elige porque tiene una probabilidad de ocurrencia inferior al 0,5%, como se indica en la Figura 22. En la serie temporal de la altura significativa de la ola, hay tres períodos que cumplen con este criterio. Sin embargo, solo uno de estos períodos presenta olas sostenidas de esa altura o más. Por lo tanto, la caracterización de las olas extremas se basa principalmente en las alturas de las olas registradas durante el período del 12 al 15 de septiembre.



Cabe destacar que este evento registrado coincidió con fuertes lluvias torrenciales a lo largo de la costa mediterránea española, lo que indica la influencia de las condiciones meteorológicas en la ocurrencia de eventos extremos de olas. La combinación de olas altas y lluvias intensas durante este período probablemente contribuyó al daño significativo experimentado en la laguna costera.

Al caracterizar las olas medias, altas y extremas según su probabilidad de ocurrencia y analizar su relación con las condiciones meteorológicas, el estudio proporciona información valiosa sobre la dinámica de las olas en el Mar Menor y su impacto potencial en el entorno costero.

La información estadística proporcionada incluye la distribución acumulativa de probabilidad (Figura 23), así como la media y la desviación estándar de la altura significativa de las olas. La altura media significativa de las olas se calcula en 0.15 metros, con una desviación estándar correspondiente de 0.14 metros. Estas medidas estadísticas ofrecen información valiosa sobre la distribución general y la variabilidad de las alturas significativas de las olas en la zona de estudio.

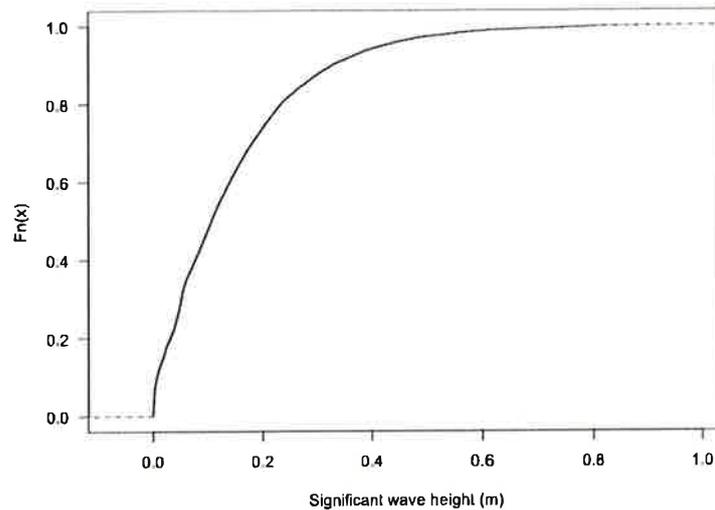


Figura 23. Distribución acumulativa de la probabilidad de la altura significativa del oleaje.

2.5.2.4. Validación del Hindcast de SWAN frente ADCP

La validación del modelo SWAN implicó la comparación de las alturas significativas de las olas obtenidas de los ADCPs durante sus respectivos períodos de anclaje. Se utilizaron datos de un mes del ADCP en la parte norte de la laguna y datos de tres meses del ADCP en la parte sur con este propósito. Esto proporcionó un total de cuatro meses diferentes para validar el rendimiento de SWAN. Es importante destacar que todos estos meses caen dentro de la

temporada de verano, y por lo tanto, la caracterización y validación se centraron específicamente en este período del año.

La Figura 22 mostraba la comparación entre las alturas significativas de las olas derivadas de SWAN y las medidas en el campo utilizando los ADCPs. Además, se utilizó un Diagrama de Taylor (Figura 24) para visualizar los resultados de la validación. Para evaluar aún más el rendimiento del modelo, se presentan parámetros estadísticos para cada serie de olas en las Tablas 6 y 7, junto con los resultados de validación. Estos análisis proporcionan una evaluación integral de la concordancia entre las predicciones del modelo SWAN y las alturas reales de las olas medidas, mejorando así nuestra comprensión de la precisión del modelo para simular las condiciones de olas en el Mar Menor.

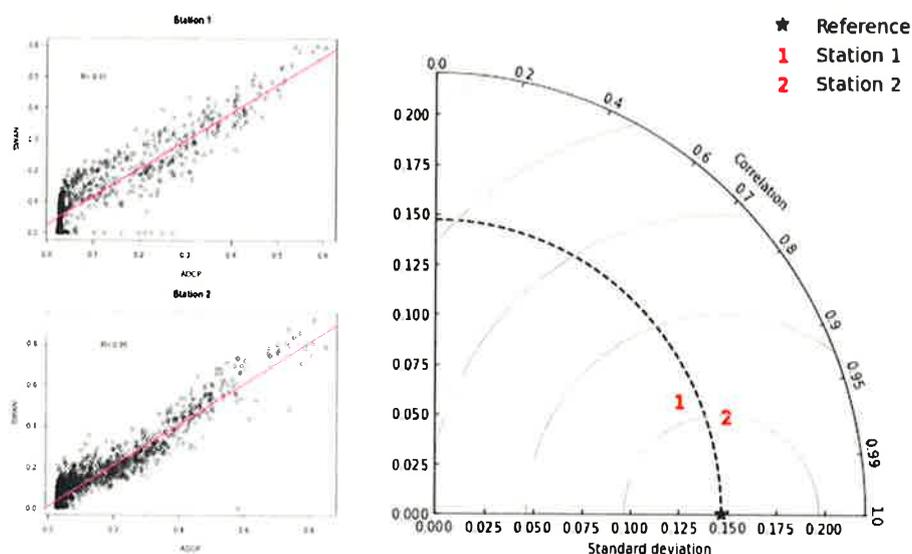


Figura 24. Diagrama de puntos a la izquierda y diagrama de Taylor a la derecha

Tabla 6. Parámetros estadísticos de las series temporales de oleaje.

	ADCP sur		ADCP norte	
	SWAN	ADCP	SWAN	ADCP
Media	0.141	0.132	0.149	0.117
Desviación estándar	0.157	0.152	0.137	0.119
Max	0.922	0.850	0.599	0.630
Min	0.000	0.024	0.000	0.003
Nº datos	11521	1703	9073	684

Tabla 7. Parámetros estadísticos de la validación de la altura significativa de SWA.

Parámetro	Sur	Norte
R	0.95	0.91
R ²	0.897	0.825
Desviación estándar	0.157	0.137
RMS	0.0028	0.003552
bias	-0.0091	-0.01
SI	0.0196	0.023877

2.5.2.5. *Periodo de ola SWAN*

El periodo de las olas obtenido mediante SWAN se presenta utilizando la misma representación gráfica que en el análisis anterior, como se muestra en la Figura 25, y la información estadística correspondiente se proporciona en la Tabla 8. Es importante señalar que los ADCP utilizados en este estudio no cuentan con la sensibilidad suficiente para una comparación directa con los resultados de SWAN. Sin embargo, se llevará a cabo un análisis comparativo entre ambos en una investigación futura, utilizando ADCP recientemente adquiridos diseñados específicamente para este propósito.

En el futuro, el periodo de las olas se caracterizará en función de los datos obtenidos de las simulaciones de SWAN. La información estadística incluye la distribución acumulativa de probabilidad, como se representa en la Figura 23. Además, se calcula que el periodo medio de las olas es de 1.63 segundos, con una desviación estándar de 0.52 segundos. Estas medidas estadísticas ofrecen valiosos conocimientos sobre la distribución y variabilidad de los periodos de las olas en el Mar Menor, mejorando aún más nuestra comprensión del comportamiento de las olas en la zona de estudio.

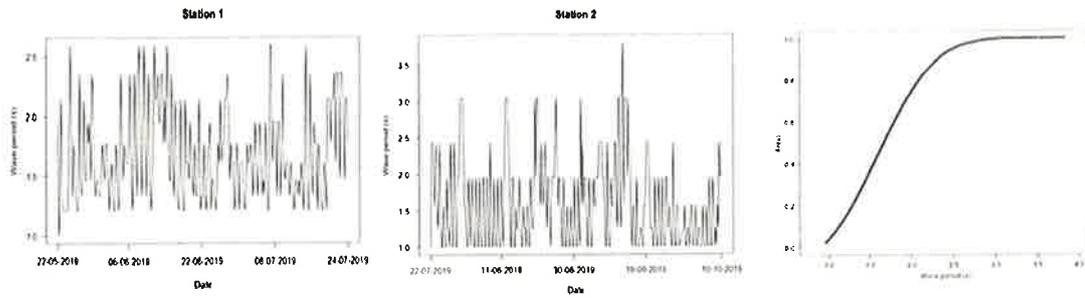


Figura 25. Serie temporal del periodo de las olas y distribución acumulativa de probabilidad del periodo de las olas.

Tabla 8. Estadísticas resumidas del periodo de las olas para las dos series temporales y distribución acumulativa de probabilidad del periodo de las olas.

	ADCP norte	ADCP sur
	SWAN	SWAN
Media	1.676	1.623
Desviación estándar	0.3866	0.6599
Max	2.853	4.758
Min	1	1
Nº datos	11521	9073

2.5.2.6. Dirección de ola SWAN

La dirección de las olas obtenida a partir de las simulaciones de SWAN se presenta en un formato similar a los análisis anteriores, como se muestra en la Figura 26. La información estadística, que incluye la distribución acumulativa de probabilidad, se resume en la Tabla 9.

En adelante, la dirección de las olas se caracterizará aún más en función de los datos obtenidos de las simulaciones de SWAN. Las medidas estadísticas ofrecen valiosos conocimientos sobre la distribución y variabilidad de las direcciones de las olas en el Mar Menor. La distribución acumulativa de probabilidad, representada en la Figura 26, ilustra la probabilidad de que ocurran diferentes direcciones de las olas en la zona de estudio.

Además, se calcula que la dirección media de las olas es de 182.75 grados, con una desviación estándar de 55.16 grados. Estas medidas estadísticas nos ayudan a comprender la dirección predominante de las olas y la variabilidad en las direcciones de las olas dentro del Mar Menor.

Un resumen de la caracterización se muestra en la Tabla 10.

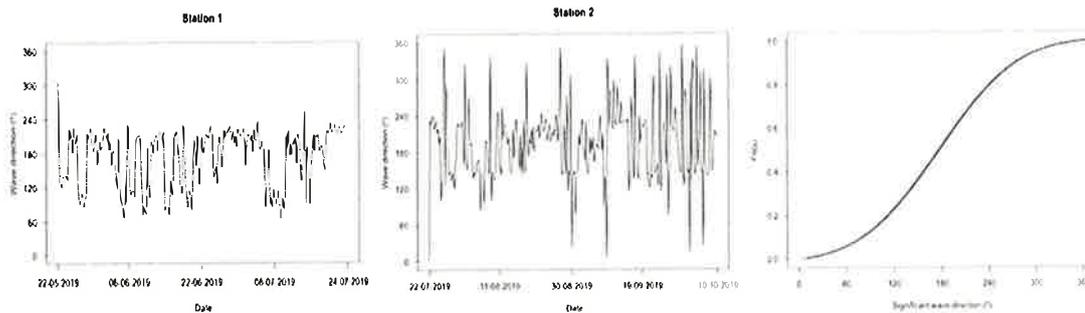


Figura 26. Serie temporal de la dirección de las olas y distribución acumulativa de probabilidad de la dirección de las olas.

Tabla 9. Resumen de estadísticos para la dirección de ola.

	ADCP norte	ADCP sur
	SWAN	SWAN
Media	171.5	191
Desviación estándar	49.79	58.47
N° datos	11521	9073

Tabla 10. La caracterización de las olas promedio, altas y extremas.

Periodo	Dirección de ola	Periodo de ola	Velocidad orbital	Velocidad del viento	Dirección del viento
Media	188°	1.44 s	0.0022 m/s	3.44 m/s	196.7°
Alto	215°	2.66 s	0.045 m/s	7.84 m/s	230.6°
Extremo	225°	3.23 s	0.13 m/s	11.65 m/s	220°

2.5.2.7. Velocidad orbital de fondo obtenida por SWAN

El modelo SWAN ha proporcionado la velocidad orbital cerca del fondo, la cual será analizada en términos de su influencia en la resuspensión de sedimentos en el fondo, especialmente en relación con las velocidades críticas de corte. Este aspecto se discutirá en una sección posterior. La Figura 27 ilustra el comportamiento temporal de la velocidad orbital cerca del fondo en los lugares donde se instalaron los ADCP. Una visión integral de las propiedades estadísticas de la serie temporal se proporciona en la Tabla 11.

Tabla 11. Estadísticas resumidas de la velocidad orbital de fondo.

	ADCP norte	ADCP sur
	SWAN	SWAN
Media	0.008412	0.009166
Desviación estándar	0.01503	0.02391
Max	0.11329	0.20415
Min	0	0
Nº datos	11521	9073

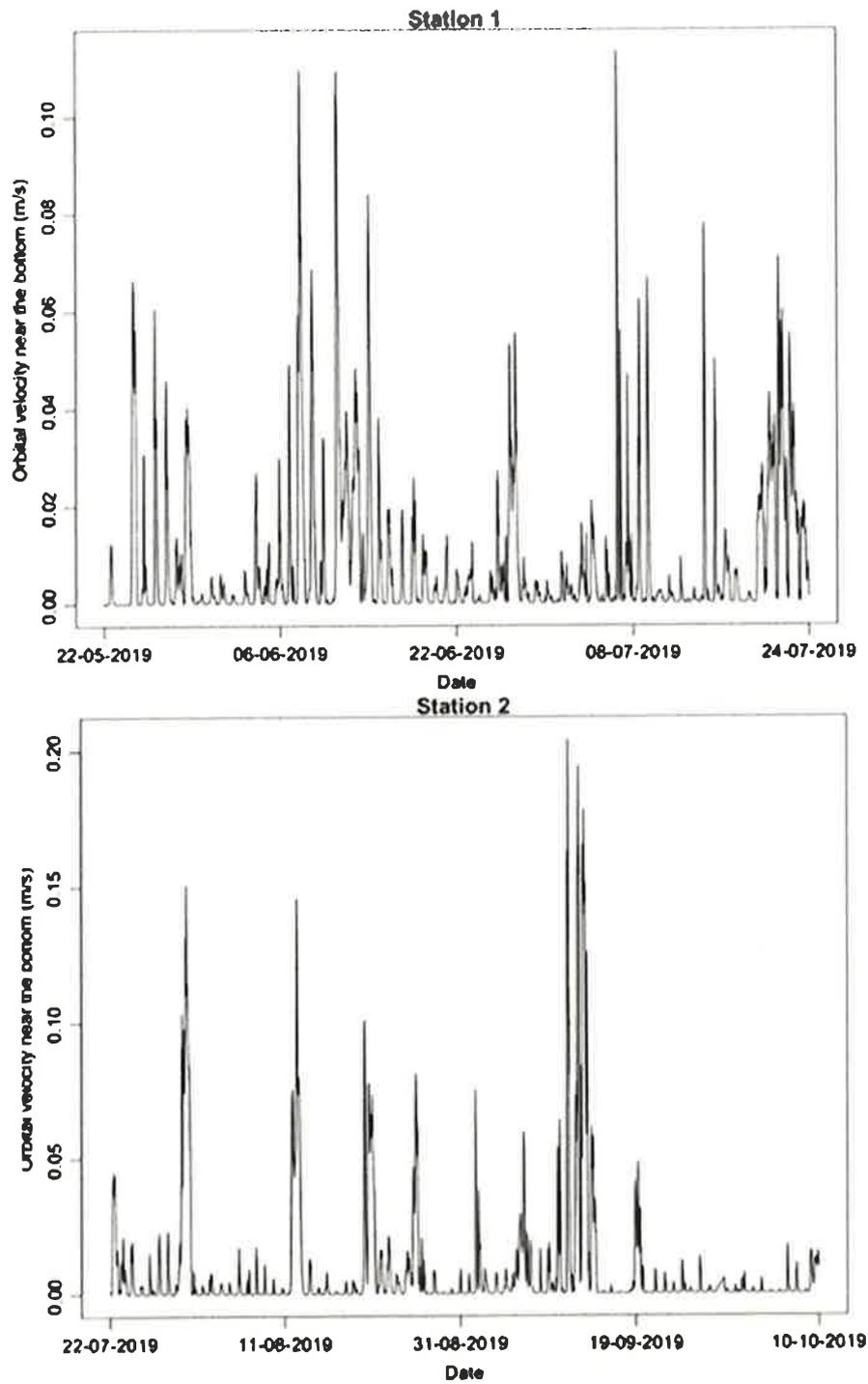


Figura 27. Series temporales de la velocidad orbital de fondo.

2.5.7.8. Distribución espacial de los parámetros de oleaje en el Mar Menor

Después de la presentación de los resultados de la simulación de SWAN en los puntos de validación, se muestra la distribución espacial de las variables simuladas. Las variables elegidas para la visualización son la altura significativa de las olas y la velocidad orbital cerca del fondo, las cuales desempeñan un papel vital en el transporte de sedimentos y la difusión de contaminantes en entornos marinos. Se presentan tres escenarios diferentes con características distintas. El primer escenario muestra un estado del mar tranquilo, como se representa en la Figura 28. El segundo escenario ilustra un estado del mar moderado (Figura 29), mientras que el tercer escenario muestra un estado del mar extremo (Figura 30).

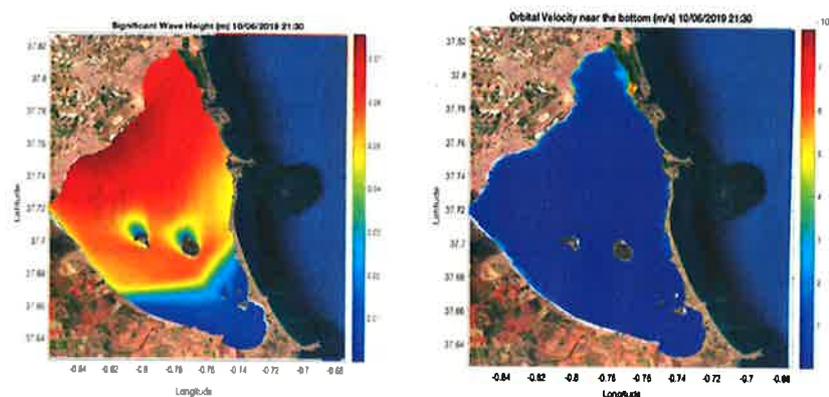


Figura 28. Altura significativa de las olas y velocidad orbital de fondo para un mar en calma.

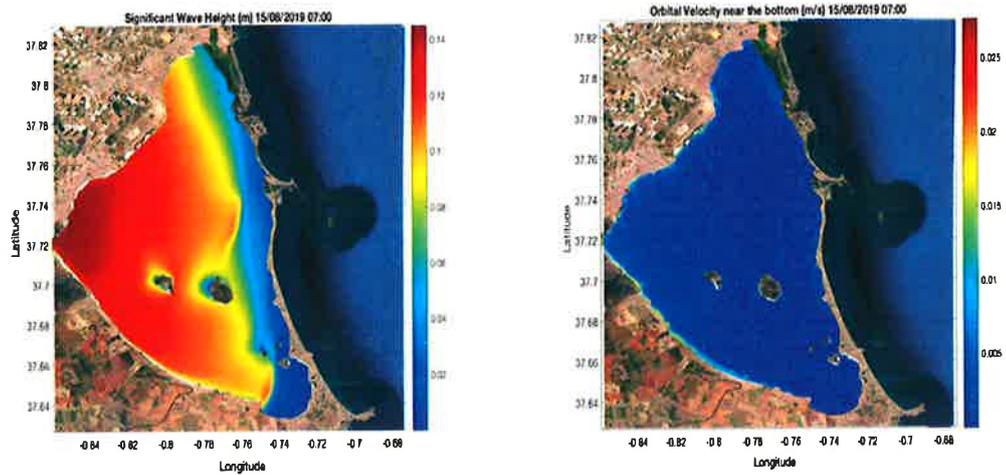


Figura 29. Altura significativa de las olas y velocidad orbital de fondo para un estado del mar intermedio.

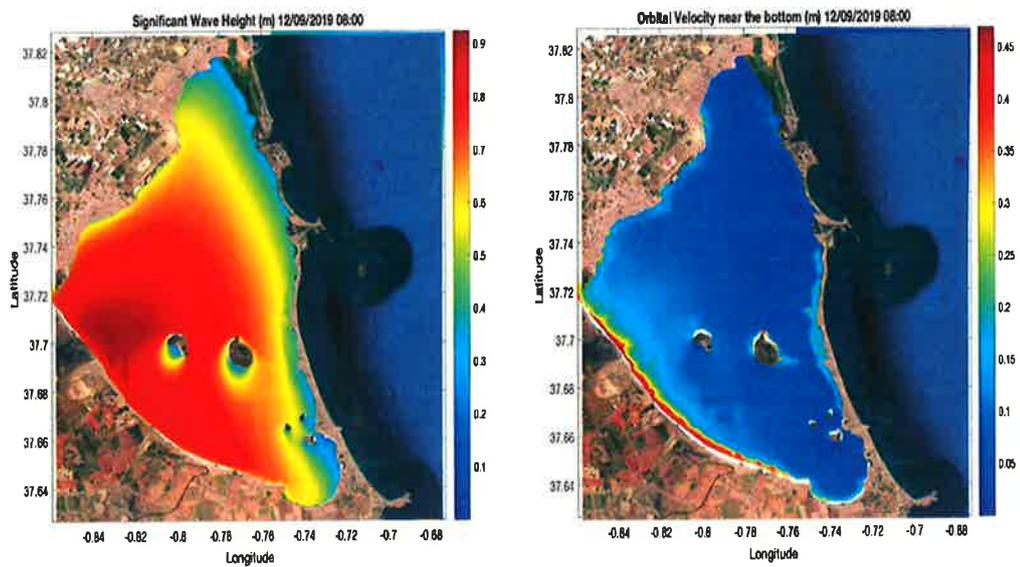


Figura 30. Altura significativa de las olas y velocidad orbital cerca del fondo para un estado del mar extremo.

2.5.7.8.1. Altura significativa de oleaje

El primer paso implica analizar el número de grupos en los que se ha clasificado los datos. La Figura 31 ilustra la distribución de los datos en grupos, revelando un total de 6 grupos. Entre estos grupos, dos grupos emergen como notablemente más representativos. También se presentan las neuronas asociadas a cada conglomerado y un mapa de altura de olas correspondiente a cada conglomerado.

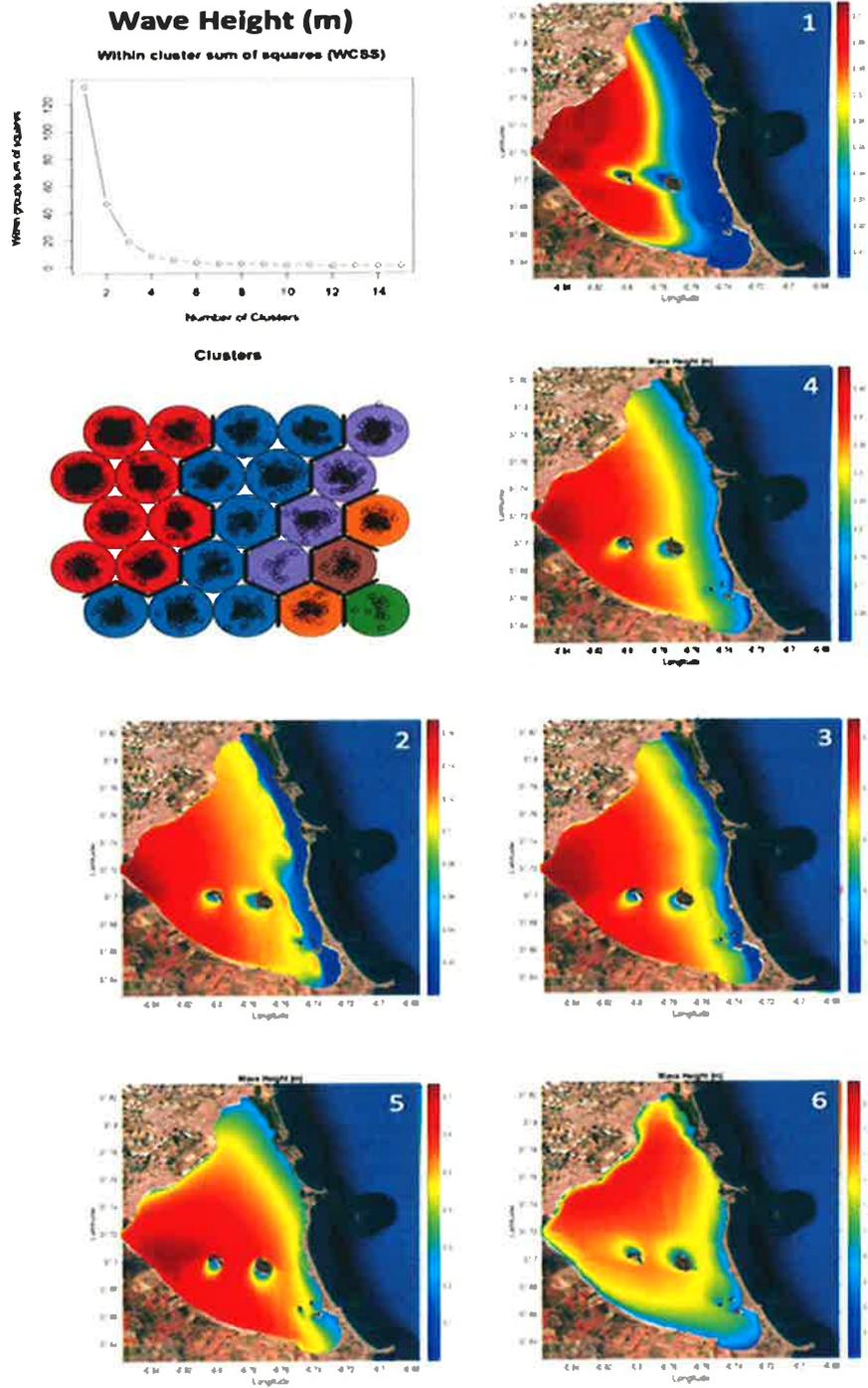
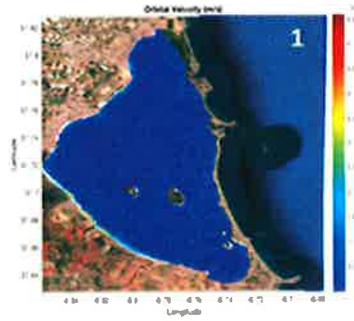
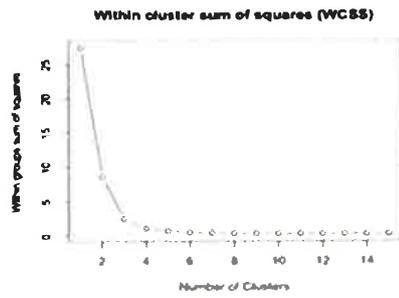


Figura 31. SOM de la altura significativa de oleaje.

2.5.7.8.2. Velocidad orbital

La Figura 32 muestra la clasificación de los mapas de velocidad orbital en grupos, revelando un total de 6 grupos. Dentro de estos grupos, un conglomerado se destaca como particularmente representativo. También se incluyen las neuronas asociadas a cada conglomerado y un mapa de velocidad orbital correspondiente a cada conglomerado.

Orbital Velocity (m/s)



Clusters

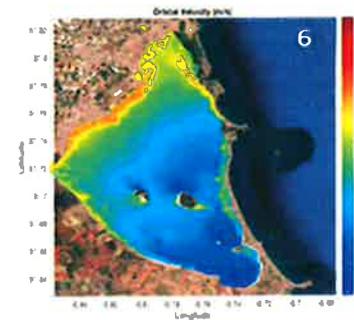
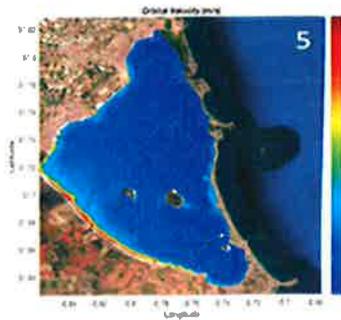
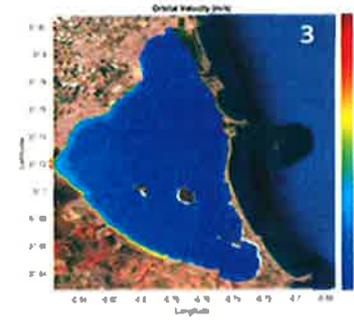
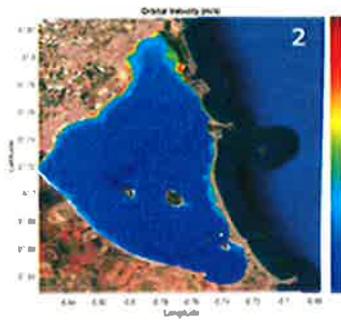
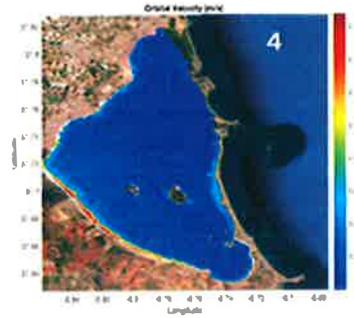
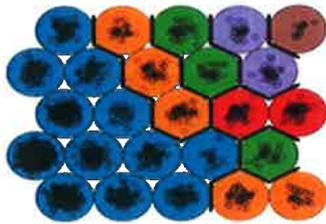


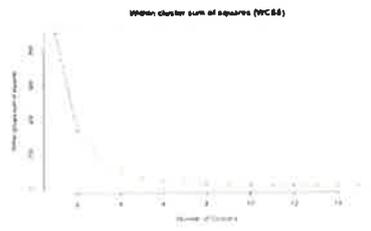
Figura 32. SOM de la velocidad orbital.



2.5.7.8.3. Periodo de oleaje

La Figura 33 muestra la clasificación de los mapas de período de ondas en grupos, revelando un total de 6 grupos. Dentro de estos grupos, uno se destaca como notablemente más representativo que los demás. También se presentan las neuronas asociadas a cada conglomerado y un mapa de período de ondas correspondiente a cada conglomerado.

Wave Period (s)



Clusters

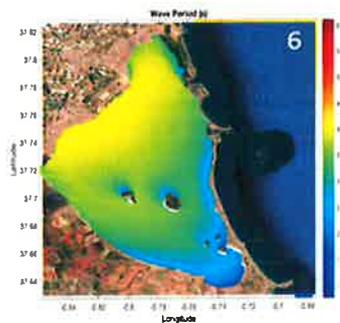
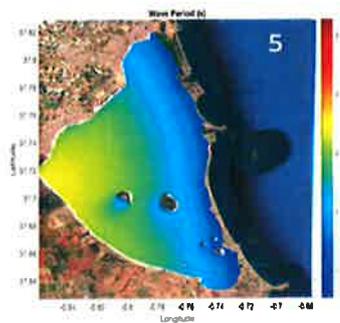
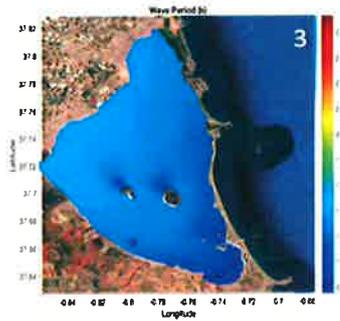
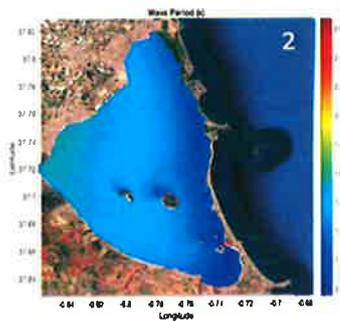
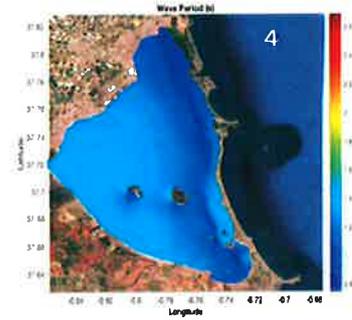
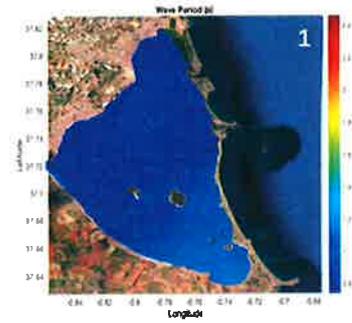
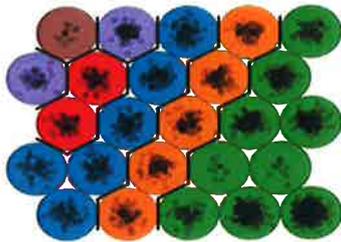


Figura 33. SOM del periodo de oleaje.



2.5.7.8.4. Longitud de onda

La Figura 34 muestra la clasificación de los mapas de longitud de onda en grupos, revelando un total de 6 grupos. Dentro de estos grupos, tres de ellos muestran una representación significativa. La figura incluye las neuronas asociadas a cada conglomerado y un mapa de longitud de onda correspondiente a cada conglomerado.

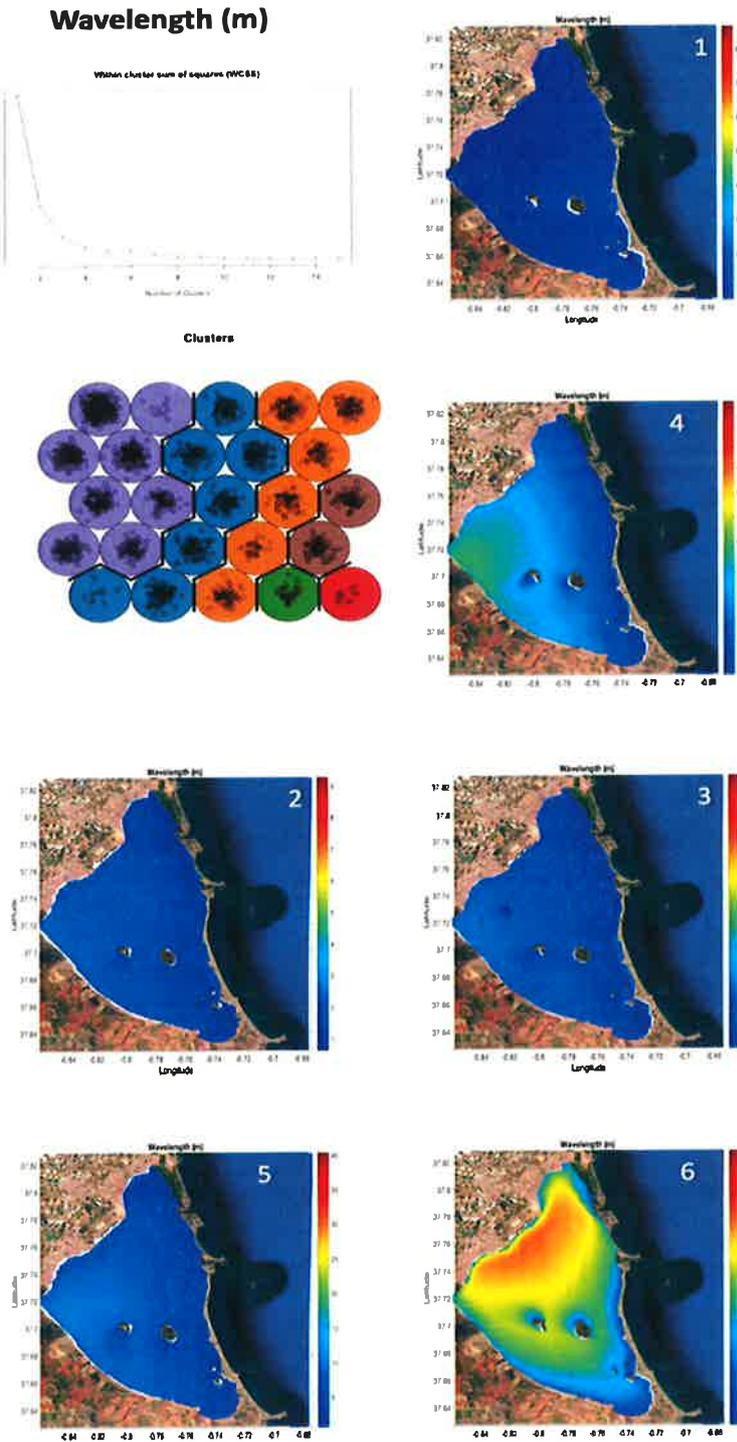


Figura 34. SOM de longitud de onda.



2.6. Datos preliminares sobre el modelado de la resuspension de sedimentos

Reconociendo la importancia de las olas en los procesos de resuspensión de sedimentos, se proporcionan resultados preliminares como base para la implementación del modelo de transporte de sedimentos.

Aplicando la metodología descrita en Mehta (2022) a los sedimentos cohesivos presentes en el Mar Menor, se ha determinado que las arcillas depositadas en el área occidental pueden resuspenderse a profundidades que van de 0 a 2.5 metros bajo la influencia de velocidades orbitales cercanas al fondo, generadas por la altura significativa media de las olas en el Mar Menor, como se explicó en secciones anteriores.

Durante eventos extremos, como el que ocurrió entre el 12 y el 15 de septiembre de 2019, la resuspensión de arcillas alcanzó profundidades de 4 metros. Esto destaca el potencial para un transporte significativo de sedimentos y resuspensión durante tales eventos, lo que puede tener importantes implicaciones para la dinámica ecológica y la calidad del agua en el Mar Menor. Estos hallazgos preliminares sientan las bases para investigaciones adicionales sobre el transporte de sedimentos en el Mar Menor, con un enfoque específico en sedimentos cohesivos y su interacción con las olas.

Comprender los procesos de resuspensión de sedimentos y sus profundidades de influencia es crucial para evaluar la dinámica general de los sedimentos y su impacto en el ecosistema de la laguna. Al incorporar estos hallazgos en futuros estudios, se puede lograr una comprensión más completa del transporte y la resuspensión de sedimentos en el Mar Menor, lo que lleva a estrategias efectivas de gestión y conservación para la laguna.

De los datos anteriores, y a modo de resumen, se puede concluir que las simulaciones realizadas arrojaron coeficientes de correlación de Pearson de 0,91 y 0,95, indicando una fuerte correlación entre los resultados del modelo y los datos de campo, considerando un paso de tiempo de 10 minutos. Sin embargo, cabe destacar que, en condiciones de olas bajas, los resultados del modelo muestran una mayor desviación de las medias de campo debido a la sensibilidad de los ADCP. Por lo tanto, cuando esté disponible una data más precisa de olas mediante ADCP, la validación para alturas de olas más pequeñas deberá ser reexaminada. No obstante, para alturas de olas medias a extremas, el modelo demuestra un alto nivel de precisión, mostrando su confiabilidad en una amplia gama de escenarios.

Además, se realizó un análisis de sensibilidad del paso del tiempo, revelando que aumentar el paso del tiempo a 30 minutos disminuye significativamente el ajuste del modelo a valores cercanos a 0,7. Esto destaca la importancia de seleccionar un paso de tiempo adecuado y asignar recursos



computacionales suficientes para lograr una modelización precisa de las olas en el Mar Menor.

El análisis de olas revela que las alturas de olas más altas en el Mar Menor ocurren cuando los vientos soplan desde el noreste, lo que corresponde a la dirección con el fetch más largo. Esto concuerda con la realidad física de la región, y el modelo SWAN capta con éxito esta relación. Con los resultados obtenidos, ahora es posible cuantificar las olas predominantes en el Mar Menor, brindando una comprensión cuantitativa que anteriormente no se tenía y dependía únicamente de explicaciones cualitativas.

En cuanto a la distribución espacial de los parámetros de las olas, es destacable que la costa suroeste experimenta las alturas de olas más altas, ya que es donde convergen las olas de los vientos con el fetch más largo. Además, en esta misma área, las velocidades orbitales cerca del fondo son más altas, indicando su importancia en la resuspensión de sedimentos, un problema persistente en la región. En el caso de las olas medias, la dirección del viento cambia, volviéndose del Este. Como resultado, con un fetch reducido, las alturas de las olas también disminuyen. En el escenario de mares en calma, se observa un cambio significativo en la dirección de las olas, con las alturas de las olas más altas ocurriendo en el área norte. Este cambio sugiere un giro en la dirección del viento, con vientos del sur predominando en este caso.

A través del análisis de las distribuciones espaciales de las olas, se pueden extraer varias conclusiones. Durante las tormentas, la dirección del viento dominante es desde el noreste, lo que conduce a las alturas de olas más altas en la zona suroeste. La dirección del viento predominante es desde el este, lo que resulta en la mayoría de las olas desarrollándose en la zona oeste. Finalmente, la dirección menos influyente del viento es desde el sur, lo que resulta en un mar en calma con olas pequeñas en la zona norte. Este análisis confirma y cuantifica las hipótesis sobre el comportamiento de las olas en el Mar Menor, proporcionando descripciones precisas a través de diversos enfoques analíticos.

El análisis de la velocidad orbital cerca del fondo revela que durante las tormentas, la resuspensión de sedimentos puede ocurrir en casi todas las áreas del Mar Menor, excepto en la zona más profunda. En cambio, con olas medias, la resuspensión solo ocurre en el área occidental, lo que concuerda con la presencia de manchas blanquecinas de alta reflectancia observadas en imágenes satelitales. La combinación de lodo no consolidado y sedimentos finos depositados durante lluvias torrenciales, junto con altas velocidades del viento durante las tormentas, crea condiciones ideales para la resuspensión de sedimentos. Obtener un modelo preciso de olas es crucial para entender los procesos hidrodinámicos dentro del Mar Menor, ya que estos procesos influyen en gran medida en otros fenómenos ecológicos que ocurren dentro de la laguna costera.

El viento predominante en la zona, que es del este, genera olas de aproximadamente 10 cm de altura. Las velocidades orbitales cerca del fondo son muy bajas a lo largo de la costa y casi nulas en el resto de la laguna. Esta situación transforma al Mar Menor en una trampa de sedimentos, donde los sedimentos depositados en el fondo permanecen inmóviles y no pueden movilizarse fácilmente.

En general, la comprensión integral de la dinámica de las olas y la resuspensión de sedimentos en el Mar Menor es esencial para evaluar y gestionar la salud ecológica de la laguna. El modelo preciso de olas obtenido en este estudio sirve como una base crucial para investigaciones adicionales sobre los intrincados procesos hidrodinámicos y las interacciones ecológicas dentro del Mar Menor.

La caracterización estadística del viento y las olas en el Mar Menor presentada en este estudio marca un hito significativo, ya que es la primera vez que se realiza dicho análisis. Esta necesidad ha surgido en los últimos años debido a los proyectos continuos de regeneración de playas y otras iniciativas importantes destinadas a revitalizar el Mar Menor. Hasta ahora, estos proyectos debían llevarse a cabo sin un análisis cuantitativo preciso y validado de las olas en la zona, lo que llevó a problemas como la erosión de playas durante las tormentas. La mayoría de los materiales utilizados para la regeneración de playas se obtienen fuera del Mar Menor, y cuando se movilizan durante las tormentas, pueden perturbar la dinámica de la laguna al introducir sedimentos adicionales en el

fondo. Además, las aportaciones de sedimentos desde barrancos durante eventos de lluvia intensa contribuyen aún más a la naturaleza compleja de la distribución de sedimentos en la laguna.

La caracterización completa de las olas presentada en esta investigación brinda la oportunidad de abordar el problema de la erosión de playas y reducir la entrada de sedimentos no nativos. La información obtenida permite una comprensión completa del comportamiento de las olas en el Mar Menor, y se presenta en un formato gráfico para facilitar su uso en el desarrollo de proyectos futuros. Esta caracterización también será valiosa para otros estudios científicos realizados en el Mar Menor, el diseño de infraestructuras costeras y la reevaluación de los períodos de retorno para la infraestructura existente. Por ejemplo, la tormenta que ocurrió en septiembre de 2019 se clasificó inicialmente con un período de retorno de 500 años, pero los resultados presentados en la Figura 6 indican un período de retorno aún más largo.

Aunque este estudio se centró en el análisis estadístico durante los meses de verano, representa efectivamente el clima atmosférico de la zona, especialmente considerando que las principales tormentas a menudo ocurren en verano. Estudios futuros buscarán validar los datos obtenidos mediante simulaciones durante todo el año para mejorar nuestra comprensión de la dinámica del Mar Menor a lo largo de todo el año.

Los resultados obtenidos con SWAN fueron analizados mediante mapas autoorganizativos (SOM). Se identificó un mínimo de 6 grupos para caracterizar el oleaje en el Mar Menor. Los 5 grupos más comunes estaban asociados con vientos provenientes del este, siendo el grupo 1 el que representaba las olas de menor intensidad. Este grupo exhibió las características de olas más comunes, que coincidieron con los valores medios. En los grupos 2 a 5, las características de las olas aumentaron progresivamente, siendo el grupo 5 el que representaba un evento de tormenta que ocurrió en septiembre de 2019. Sin embargo, el grupo 6 caracterizaba un evento desconocido previamente en el que las alturas de las olas superaron 1.5 metros con un viento del sur, que corresponde al fetch más corto en el Mar Menor. A lo largo del uso de SOM, este evento se caracterizó con éxito, arrojando luz sobre su influencia en un incidente de mortandad de peces que ocurrió en octubre de 2019. Antes de este estudio, ninguna investigación había determinado el impacto del oleaje en la movilización de una masa de agua anóxica desde el fondo del Mar Menor hacia el área norte, lo que resultó ser un factor significativo en el incidente.

De los resultados obtenidos de aplicar los mapas autoorganizativos se han considerado algunos ejemplos de cada grupo y se han superpuesto al gráfico de evolución de viento (Figura 35). Esta figura ilustra la relación entre las características del viento y las olas extraídas mediante los mapas autoorganizativos, brindando valiosas perspectivas sobre la dinámica del Mar Menor.

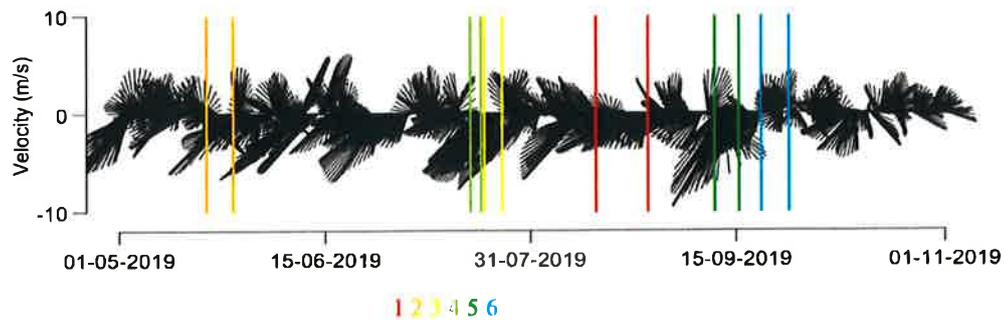


Figura 35. Grupos clasificados por el SOM sobre la serie temporal de vientos.

2.7. Aproximación al modelado del transporte de sedimentos

También se ha implementado, aunque únicamente a modo de prueba, el transporte de sedimentos en ROMS. Se tiene previsto el fondeo de equipos de medida de sedimentos para la continuidad de este trabajo.

Se han considerado sedimentos cohesivos y no cohesivos. Cada tipo de sedimento puede tener un número ilimitado de clases de tamaño definidas por el usuario. Cada clase de sedimento tiene atributos fijos de diámetro de grano, densidad, velocidad de sedimentación, esfuerzo cortante crítico para la erosión y la constante de erosión. Cada clase de sedimento puede transportarse mediante carga suspendida y/o carga de fondo. El sedimento suspendido que se deposita, o

la carga del fondo que se transporta a una celda computacional, se agrega a la capa del lecho superior. Después de calcular la erosión y la deposición, el espesor de la capa activa se recalcula y las capas del lecho se reajustan para acomodarlo.

El sedimento suspendido en la columna de agua se transporta, como otros trazadores conservadores (temperatura y salinidad) resolviendo la ecuación de advección-difusión con un término fuente-sumidero para asentamiento vertical y erosión.

Los granos del sedimento depositados en el fondo se desplazarán cuando las tensiones de corte en el fondo, que se producen por el flujo de agua, excedan un valor crítico. Este valor varía en cada clase de sedimento.

La versión de ROMS utilizada implementa dos métodos para calcular el transporte de fondo que son la formulación de Meyer-Peter-Müeller (1948) y las fórmulas de Soulsby y Clarke (2005). Ambas fórmulas dependen de las características de las clases de sedimentos individuales.

El modelo del lecho tiene en cuenta los cambios en la elevación del fondo marino como resultado de la convergencia o divergencia en los flujos de sedimentos. Estos cambios morfológicos pueden tener una influencia significativa en el flujo y el transporte cuando son mayores que un pequeño porcentaje de la profundidad del agua. Los cambios morfológicos se explican igualando la

condición del límite inferior de la velocidad vertical a la tasa de cambio de elevación del fondo marino. Este método conserva completamente la masa.

Se ha realizado una simulación preliminar de la entrada de tierra por la DANA de 2019 por la rambla del Albuñón para los sedimentos cohesivos en el fondo. La Figura 36 muestra los mapas de sedimentos en el fondo desde las 0 a las 24 horas del día 13 de septiembre de 2019 con intervalos de 4 hora desde el inicio de la tormenta. Se inserta la imagen del satélite Sentinel2 del 13 de septiembre de 2019 y se observa la avenida de sedimentos al Mar Menor con su desplazamiento hacia el sur. La Figura 37 muestra desde las 16 a las 24 horas desde el inicio de la tormenta cuando hubo un cambio de viento que desplazó la pluma de sedimentos entrante hacia el norte.

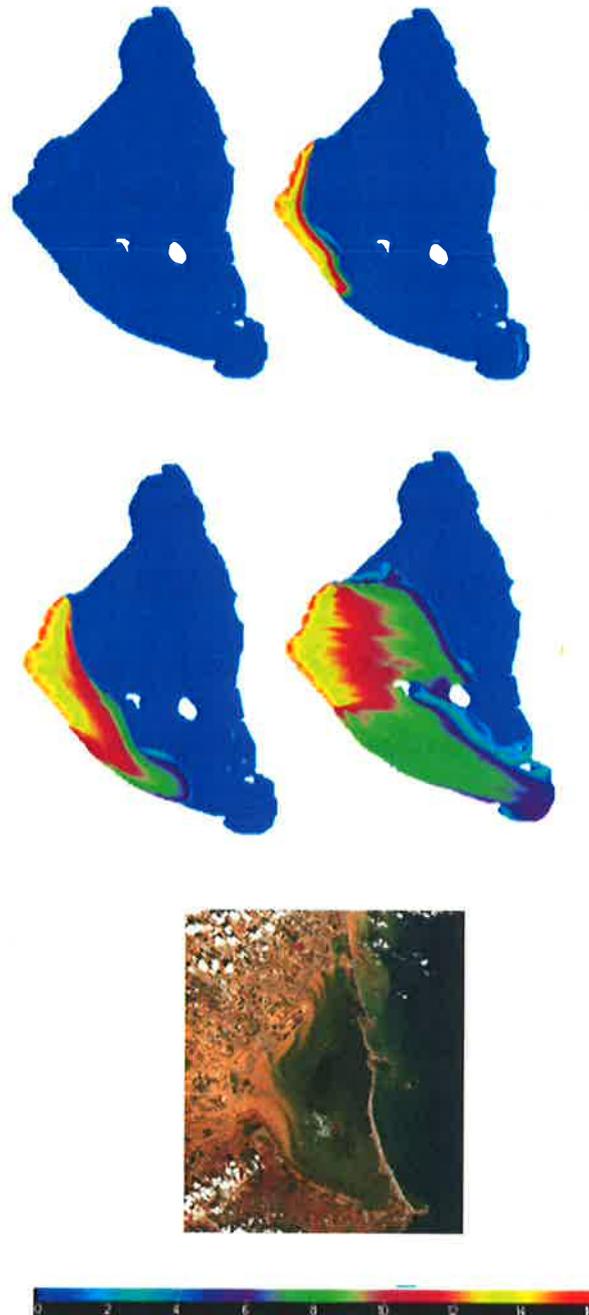


Figura 36. Ejemplo de salida del modelo de transporte de sedimentos para la DANA de septiembre de 2019, desde el inicio de la tormenta hasta transcurridas 12 horas.

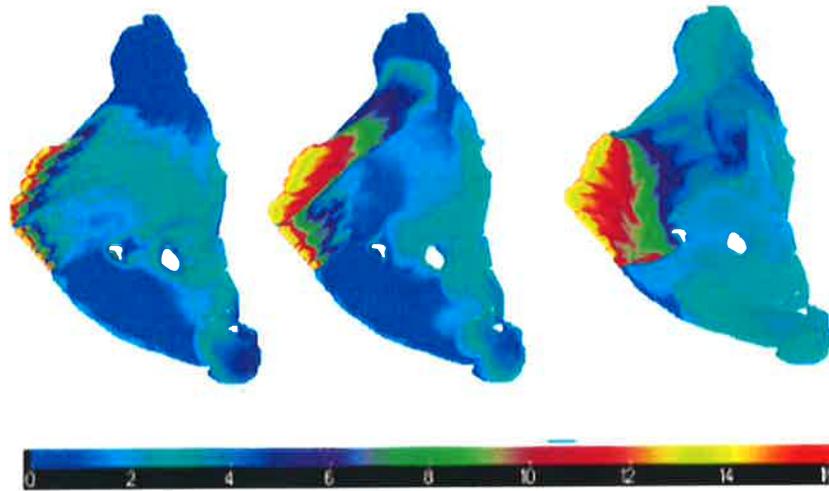


Figura 37. Ejemplo de salida del modelo de transporte de sedimentos para la DANA de septiembre de 2019, desde el inicio de la tormenta hasta transcurridas 12 horas.

2.8. Implementación del modelo (Coupled-Ocean-Atmosphere-Wave-Sediment Transport Modeling System – COAWST)

Se está trabajando en la integración de estos tres módulos - aire-agua, oleaje y sedimentos – en una versión de ROMS denominada COAWST (Coupled-Ocean-Atmosphere-Wave-Sediment Transport Modeling System). Una vez se disponga del mallado refinado y validado se irán implementando los diferentes

módulos hasta conseguir el sistema de modelado completo esperable para el final del proyecto.

COAWST es una herramienta de código abierto que combina muchos sistemas sofisticados que proporcionan componentes relativos del sistema terrestre necesarios para investigar la dinámica de los impactos de las tormentas costeras. Específicamente, el Sistema de modelado COAWST incluye un componente oceánico: el Sistema regional de modelado oceánico (ROMS); componente atmosférico: Modelo de pronóstico e investigación meteorológica (WRF), componente de hidrología: WRF_Hydro; componentes de olas— Simulación de olas cerca de la costa (SWAN) y componente de transporte de sedimentos (Figura 38).

Se está evaluando la posibilidad de que algunos miembros del equipo de trabajo se desplacen en estancias de investigación a diferentes centros de modelado en el extranjero donde se han desarrollado este sistema de modelado. Para ello se está evaluando la solicitud de una modificación presupuestaria del proyecto que permita abordar este tipo de imputación económica.

COAWST Modeling System

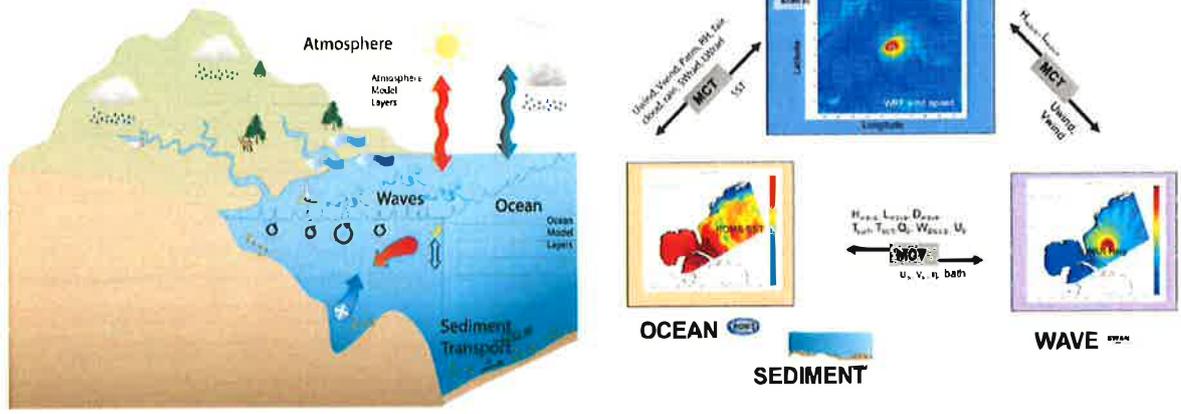


Figura 38. Esquema del sistema de modelado COAWST.

2.9. Introducir nuevos procesos biogeoquímicos

Se está explorando, además, la incorporación de los ciclos biogeoquímicos al modelado con ROMS. En particular se está trabajando en la implementación del modelo de Fennel et al. (2006). Este modelo predice 12 variables de estado (Figura 39) entre las que se incluyen nitratos y amonio, clorofila, fitoplancton, zooplancton y detritos. En este momento se están evaluando la toma de datos para la validación posterior del modelo preparando los diseños experimentales para la obtención de datos.

#	Index	Description	Units	NetCDF variable
1	iNO3_	Nitrate concentration	mmol/m ³	NO3
2	iNH4_	Ammonium concentration	mmol/m ³	NH4
3	iChlo	Chlorophyll concentration	mmol/m ³	chlorophyll
4	iPhyt	Phytoplankton biomass	mmol/m ³	phytoplankton
5	iZoop	Zooplankton biomass	mmol/m ³	zooplankton
6	iLDeN	Large detritus N-concentration	mmol/m ³	LdetritusN
7	iSDeN	Small detritus N-concentration	mmol/m ³	SdetritusN
8	iLDeC	Large detritus C-concentration	mmol/m ³	LdetritusC
9	iSDeC	Small detritus C-concentration	mmol/m ³	SdetritusC
10	iTIC_	Total inorganic carbon	mmol/m ³	TIC
11	iTAlk	Alkalinity	mmol/m ³	alkalinity
12	iOxyg	Oxygen concentration	mmol/m ³	oxygen

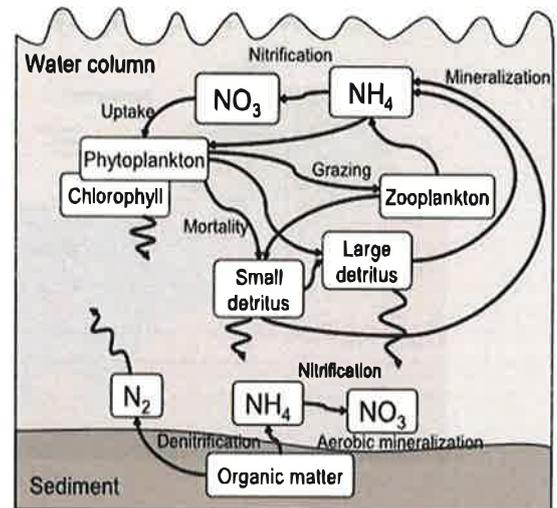


Figura 39. Esquema y parámetros del modelo de Fennel et al. 2006.

Se está trabajando con las series temporales de parámetros fotosintéticos obtenidas a lo largo de los años. Estas series comprenden parámetros fotosintéticos medidos in situ que permitirán validar e introducir los valores en el modelo biológico de Fennel una vez implementado. Estos datos son de naturaleza compleja y requieren de otras muchas medidas den el agua para determinar los valores de carbono fijado por el fitoplancton.

La fotosíntesis, a su vez, se ve ampliamente influida por la limitación de nutrientes, principalmente nitrógeno. Se están también analizando las concentraciones de nutrientes en el agua. El procesado de ambos es una tarea complicada, para ello se han elaborado rutinas informáticas necesarias tanto para cargar los datos brutos en las bases de datos como para procesarlos y poder recuperarlos en forma de datos elaborados y gráficos.

3. Bibliografía

Barbariol, F., F.M. Falcieri, C. Scotton, A. Benetazzo, S. Carniel, M. Sclavo. 2016.

Wave extreme characterization using self-organizing maps. *Ocean Science*

12(2):403-415. DOI: 10.5194/os-12-403-2016

Fennel, K., J. Wilkin, J. Levin, J. Moisan, J. O'Reilly, D. Haidvogel. 2006. Nitrogen

cycling in the Middle Atlantic Bight: Results from a three-dimensional

model and implications for the North Atlantic nitrogen budget. *Global*

Biogeochemical Cycles 20(3):GB3007.

Gilabert, J., F. López-Castejón, C. Rodríguez de Mesas, B. Morote-Sánchez. 2022.

Modelo Hidrodinámico de Alta Resolución del Mar Menor. Estudio del

intercambio de agua entre el Mar Menor y el Mediterráneo. Dirección

General del Mar Menor. Comunidad Autónoma de Murcia.

Hecht-Nielsen, R. 1990. On the algebraic structure of feedforward network

weight spaces. In *Advanced Neural Computers*. Elsevier. pp. 129–135.

Kohonen, T. 1990. The Self-Organizing Map. *Proceedings of the IEEE* 78:1464–

1480.



López Castejón, F. 2017. Caracterización de la hidrodinámica del Mar Menor y los flujos de intercambio con el Mediterráneo mediante datos in situ y modelado numérico. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cartagena.

Mehta, A.J. 2022. An Introduction to Hydraulics of Fine Sediment Transport. Second Edition. 56 Advanced Series On Ocean Engineering. World Scientific.

Meyer-Peter, E., R. Müller. 1948. Formulas for Bed-Load Transport. Proceedings of the 2nd Meeting of the International Association of Hydraulic Research, pp:39-64.

Soulsby, R.L., S. Clarke. 2005. Bed Shear-stresses Under Combined Waves and Currents on Smooth and Rough Beds. Hydraulics Research Report, 1905(August), TR 137.