



BELICH Monitorización
Estudio y
Modelización del
Mar Menor

Informe de resultados del sistema de monitorización oceanográfica del Mar Menor del IEO-CSIC: síntesis 2025

Instituto Español de Oceanografía (IEO-CSIC)



CSIC

CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS



Financiado por
la Unión Europea
NextGenerationEU



Plan de Recuperación,
Transformación
y Resiliencia



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y EL RETO DEMOGRÁFICO

MINISTERIO
DE CIENCIA
E INNOVACIÓN



Marco de Actuaciones
Prioritarias para Recuperar
el Mar Menor

Informe de resultados del sistema de monitorización oceanográfica del Mar Menor del IEO-CSIC: síntesis 2025

Mayo 2026

Informe del proyecto BELICH (2023-2026):
Monitorización, Estudio y Modelación del Mar Menor

Fuentes de financiación:

- Proyecto DMMEM. IEO-CSIC.
- Proyecto BELICH, IEO-CSIC: Marco de Actuaciones Prioritarias para recuperar el Mar Menor. Sub-Actuación 8.1. Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico (MITERD).
- MRR EU Next Generation y Presupuestos Generales del Estado del MITERD.

Este informe debe citarse de la siguiente forma:

IEO-CSIC (2026). Informe de resultados del sistema de monitorización oceanográfica del Mar Menor: síntesis 2025. Proyecto BELICH: Monitorización, Estudio y Modelización del Mar Menor (MAPMM-MITECO). IEO-CSIC. <https://belich.ieo.csic.es/publicaciones/>

Está absolutamente prohibido el uso de contenido de este informe sin autorización previa de los autores y las entidades financiadoras del proyecto. Los datos contenidos en este informe no pueden ser empleados en ningún tipo de publicación científica y técnica sin autorización expresa de los autores.

Equipo de trabajo

Dirección y coordinación: Juan M. Ruiz, Centro Oceanográfico (CO) de Murcia

Eugenio Fraile, CO de Canarias

Patricia Pérez, CO de Murcia (contratada BELICH)

Virginia Sandoval, CO de Murcia (contratada BELICH)

Victor Orenes, CO de Murcia (contratado BELICH)

Pedro Martínez, CO de Murcia (contratado BELICH)

Roberto González, CO de Murcia (contratado BELICH)

Antonio Ortolano, CO de Murcia (contratado BELICH)

Ana Ramírez, CO de Murcia (contratada BELICH)

Marijn Oosterbaan, CO de Canarias (contratado BELICH)

Esperanza Moreno, CO de Murcia (contratada BELICH)

Pedro Portalés, CO de Canarias (contratado BELICH)

Rocío García, CO de Murcia

Jesús M. Mercado, CO de Málaga

Isabel Ferrera, CO de Málaga

Francisco G. Jakobsen, CO de Málaga

Lidia Yebra, CO de Málaga

Ana María Cabello, CO de Málaga (contratada BELICH)

Guillermo Domínguez, CO de Málaga (contratado BELICH)

ÍNDICE

| | |
|---|-----------|
| 1. Antecedentes y objeto del informe | 5 |
| 2. Marco de trabajo | 8 |
| 2.1 Variables de estudio..... | 9 |
| 2.2 Fuentes de datos..... | 12 |
| 2.2.1 Estaciones de monitorización <i>in situ</i> | 12 |
| 2.2.2 Datos satelitales | 14 |
| 3. Resultados | 15 |
| 3.1. Temperatura..... | 16 |
| 3.2. Salinidad..... | 25 |
| 3.3. Concentración de la clorofila-a..... | 29 |
| 3.4. Turbidez e irradiancia PAR | 36 |
| 3.5. Oxígeno | 43 |
| 3.6. pH..... | 48 |
| 3.7. Nutrientes inorgánicos disueltos..... | 52 |
| 3.8. Comunidades del fitoplancton | 53 |
| 3.9 Comunidad de mesozooplancton | 55 |
| 3.10 Balance hídrico entre el Mar Menor y el Mediterráneo | 59 |
| 4. Síntesis y conclusiones | 61 |
| 5. Bibliografía | 68 |
| 6. Listado de abreviaturas | 70 |
| 7. Anexos | 71 |
| 7.1. Anexo I: Estaciones de monitorización BELICH | 72 |
| 7.2. Anexo II: Metodología | 74 |
| 7.2.1. Temperatura..... | 74 |
| 7.2.2. Clorofila-a | 76 |
| 7.2.3. Turbidez..... | 77 |
| 7.2.4. Oxígeno disuelto..... | 78 |
| 7.2.5. pH..... | 79 |
| 7.2.6. Nutrientes..... | 80 |
| 7.2.7. Comunidades microbianas y de fitoplancton..... | 80 |
| 7.2.8. Comunidad de mesozooplancton..... | 81 |
| 7.2.9. Balance hídrico Mar Menor – Mediterráneo:..... | 81 |
| 7.3. Anexo III: Mapas satelitales | 82 |
| 7.3.1 Mapas clorofila-a | 82 |
| 7.3.2 Mapas turbidez..... | 94 |
| 7.3.2 Mapas %lo..... | 106 |

1. Antecedentes y objeto del informe



Fotografía J. Murcia

El presente informe es una compilación sintética de los resultados obtenidos por el sistema de monitorización oceanográfica implementado en enero de 2025, publicados a lo largo de dicho año en diferentes informes emitidos como parte del programa de seguimiento científico del IEO-CSIC para evaluar el estado y evolución del ecosistema marino del Mar Menor (<https://belich.ieo.csic.es/>).

Este programa se puso en marcha en el año 2016 para obtener conocimiento fiable y objetivo sobre el estado y la evolución del Mar Menor a partir del episodio de "sopa verde" ocurrido ese mismo año. Dicho programa de seguimiento se realizó en un principio como parte del proyecto DMMEM, financiado por el IEO-CSIC. Sin embargo, desde enero del año 2023 estas actividades de monitorización están integradas dentro del proyecto BELICH, que está financiado por el Marco de Actuaciones Prioritarias para la Recuperación del Mar Menor (MAPMM) del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITERD).

De manera complementaria a estos programas de seguimiento científico, en octubre de 2022 se instaló una boya piloto de monitorización oceanográfica (a partir de ahora "boya piloto" o SMLG) en el marco de una colaboración con el proyecto europeo SMARTLAGOON, liderado por la Universitat Politècnica de València (UPV), la Uppsala University y la empresa VIELCA Ingenieros, S.A. (Grant Agreement N° 101017861). En noviembre de 2024. Esta boya fue retirada tras la finalización del proyecto SMARTLAGOON. Esta boya ha servido de prueba y aprendizaje para el diseño e instalación del sistema de monitorización del proyecto BELICH (Sub-Actuación 8.1 del MAPMM), implementado a finales de enero de 2025. Este sistema permitirá disponer de un monitoreo continuo y en tiempo casi-real en seis estaciones, que se describirán en apartados posteriores de este informe.

Por otro lado, las tareas que el IEO-CSIC realiza en el ámbito del proyecto THINKING AZUL son complementarias a las realizadas en el proyecto BELICH. El proyecto THINKING AZUL está financiado por fondos PRTR (Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia) del programa de Planes complementarios de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia y el MITERD.

A partir de febrero de 2023 el programa de monitorización del proyecto BELICH empezó a reportar resultados en informes periódicos de carácter bimestral. Estos informes, y otros realizados ad hoc para evaluar el impacto en la laguna de eventos climáticos aislados, pueden consultarse en la página web del proyecto <https://belich.ieo.csic.es/publicaciones/>. El presente informe tiene como objetivo

recopilar de forma sintética estos informes a lo largo de 2025, coincidiendo con la puesta en funcionamiento del sistema de monitorización oceanográfica gracias al cual ya se dispone de una fuente de datos en continuo y en tiempo casi real, que es uno de los objetivos principales del proyecto BELICH.

2. Marco de trabajo



Fotografía OLAS

2.1 Variables de estudio

En este programa de seguimiento se monitorizan diversas variables hidrodinámicas y físico-químicas necesarias para evaluar el estado general de la columna de agua del Mar Menor. Los detalles completos sobre la metodología empleada para medir estas variables, así como otras fuentes de datos utilizadas se encuentran ampliamente descritos en el Anexo I. Cada una de estas variables nos aporta información complementaria sobre el estado ecológico del Mar Menor:

Variables hidrodinámicas:

Temperatura (°C): factor clave para la mayoría de los procesos físico-químicos y biológicos que rigen el funcionamiento del ecosistema lagunar. En su estado actual el ecosistema marino del Mar Menor es mucho más vulnerable, tanto a los efectos de los impactos antropogénicos locales, como a los relacionados con el cambio climático, entre ellos el calentamiento global. Por ello no sólo es importante la temperatura en términos absolutos, sino también la intensidad y frecuencia de las olas de calor (Olivier et al., 2021).

Salinidad: del mismo modo que la temperatura, la salinidad es una variable clave para entender la composición y dinámica del ecosistema lagunar, pero también es un indicador del balance hídrico resultante de tres procesos fundamentales: la evaporación, los aportes continentales y el intercambio de agua con el Mediterráneo. La salinidad definida como relación de conductividad no tiene unidades (UNESCO, 1985).

Turbidez: la turbidez (NTU) y el coeficiente de extinción de luz (K_d , m^{-1}) son indicadores de la extinción de la luz solar incidente entre la superficie del agua y el fondo (Kirk, 1985). La turbidez se encuentra íntimamente relacionada con la clorofila- α , ya que las células fitoplanctónicas absorben luz para la fotosíntesis, contribuyendo al aumento de la turbidez (disminución de la transparencia). No obstante, esta turbidez depende también de otras variables como las partículas en suspensión, tanto orgánicas como inorgánicas, zooplancton, bacterias, y las denominadas "sustancias amarillas" (compuestos orgánicos disueltos coloreados). En consecuencia, la turbidez del agua puede ser el resultado neto de uno o varios procesos que controlan dichas variables (exceso de nutrientes, resuspensión de sedimento por viento y oleaje, aportes terrígenos, procesos de descomposición de

la materia orgánica, etc.). Por ello, esta variable también puede ser empleada para controlar la calidad del agua mediante sensores remotos multispectrales e hiperespectrales (imágenes de satélite).

Oxígeno disuelto (mg/l): la concentración de oxígeno disuelto es un indicador clave del buen funcionamiento del ecosistema lagunar. Su concentración y variación en la columna de agua es el resultado de otras variables y procesos como la temperatura, la hidrodinámica, el intercambio con la atmósfera y, por supuesto, procesos biológicos como la fotosíntesis y la respiración.

pH: indica la acidez o alcalinidad del agua, en base a la actividad de los iones de hidrógeno (H⁺) e hidroxilo (OH⁻) que contiene. El agua marina es ligeramente alcalina (8,1 - 8,3). El pH es un factor crucial para evaluar la salud de los ecosistemas marinos, ya que influye en sus procesos químicos, utilizándose como indicador de la calidad del agua. La contaminación, ya sea atmosférica o por eutrofización del agua, tiende a aumentar la concentración de materia orgánica cuya mineralización produce CO₂, en especial en el fondo de la columna de agua. El exceso de CO₂ desplaza el equilibrio del sistema tampón de bicarbonato del agua hacia la producción de protones que tienden a disminuir el pH, proceso conocido como acidificación (Doney et al., 2009). Otros procesos biológicos, como la fotosíntesis pueden tener el efecto contrario al aumentar el pH, al igual que los aportes continentales ricos en carbonatos y calcio.

Potencial redox (mV): es una medida de la capacidad de una solución para oxidar o reducir sustancias químicas. Determinar si un ecosistema marino está en un estado oxidativo o reductor resulta crucial para comprender los complejos procesos biogeoquímicos que tienen lugar, sirviendo como un indicador del estado del ecosistema y facilitando la predicción de cambios ambientales. En ambientes típicamente oxidantes esta variable adopta valores positivos entre 0 y +200 mV y en ambientes reductores (hipóxicos o anóxicos) los valores son negativos pudiendo alcanzar valores entre -100 y -200 mV. Es un indicador temprano de procesos de agotamiento de oxígeno como los observados durante algunos episodios de hipoxia registrados en el Mar Menor (Ruiz et al 2020). No se muestran resultados de esta variable en este informe.

Nutrientes (µM): la concentración de nitrógeno y fósforo total (NT y PT), así como la concentración de nutrientes inorgánicos disueltos (nitrito, nitrato, fosfato, silicato,

amonio), son factores determinantes para la dinámica de los ecosistemas marinos, especialmente en aguas eutrofizadas como las del Mar Menor, ya que afecta de forma directa a la productividad fitoplanctónica (Ouaissa et al., 2023). El N y el P pueden estar en forma inorgánica y orgánica, disuelta o particulada. En este programa de seguimiento se miden las formas disueltas, tanto inorgánicas como orgánicas, así como las formas particuladas de forma puntual. En el presente informe se muestra la evolución temporal de la concentración de nutrientes inorgánicos disueltos.

Concentración de la clorofila-a (mg/m^3): indicador de la calidad del agua en ecosistemas marinos costeros, especialmente en aguas eutrofizadas como las del Mar Menor (Ouaissa et al., 2023), ya que es un estimador de la biomasa de fitoplancton y por tanto de su productividad. Además, esta variable es clave para explicar las propiedades ópticas de la columna de agua y puede ser empleada para evaluar la calidad del agua mediante sensores remotos multiespectrales e hiperespectrales (imágenes de satélite) (Jakobsen et al. 2025). Los valores de referencia para los niveles de clorofila- α en el Mar Menor, publicados en el Real Decreto 817/2015, de 11 de septiembre, establecen un umbral de $1,8 \text{ mg}/\text{m}^3$ para la clasificación entre los estados "bueno" y "moderado", y de $1,1 \text{ mg}/\text{m}^3$ para el límite entre los estados "muy bueno" y "bueno". No obstante, actualmente se está trabajando en la revisión y adaptación de estos umbrales utilizando los datos obtenidos del sistema de monitoreo descrito en este informe, junto con series históricas recopiladas en proyectos previos desarrollados por el Instituto Español de Oceanografía (IEO).

Comunidades microbianas y de fitoplancton: el análisis de las comunidades microbianas y de fitoplancton es fundamental para determinar el estado del ecosistema lagunar y su relación con las variables ambientales que gobiernan su funcionamiento (Ouaissa et al., 2023). El estudio de la composición del fitoplancton de mayor tamaño es también fundamental para el desarrollo de herramientas basadas en teledetección (satélites y drones).

Comunidad de mesozooplancton: la composición de la comunidad de mesozooplancton proporciona una visión de la dinámica temporal de la red trófica de la laguna a una escala temporal algo más amplia que el resto del plancton. La biomasa y producción del zooplancton tienen un papel clave en la transferencia de

energía, ya que consumen microplancton y son alimento para niveles tróficos superiores como peces o medusas.

Comunidades de macrófitos bentónicos: la distribución, abundancia y composición de las comunidades de macrófitos bentónicos del Mar Menor son indicadores excelentes y muy eficaces para detectar y cuantificar las respuestas tempranas y a largo plazo del ecosistema a los cambios ambientales, no solo en el sentido del deterioro, sino también de su recuperación.

Balance hídrico Mar Menor – Mediterráneo: El volumen de intercambio hídrico entre el Mediterráneo y el Mar Menor constituye una variable crítica para la determinación del balance hídrico de la laguna. Para cuantificar este flujo en los canales de El Estacio y Marchamalo, se ha realizado una estimación basada en la caracterización batimétrica de sus secciones y en el análisis de los perfiles de velocidad medidos en toda la columna de agua.

2.2 Fuentes de datos

El origen y el tratamiento de los datos para cada variable de estudio ha ido variando ligeramente a través del transcurso de la serie histórica documentada en función de las herramientas y recursos disponibles en cada momento. Las fuentes de datos empleadas para cada variable en cada periodo temporal se detallan en el Anexo I. No obstante, estas fuentes se dividen en tres categorías principales: muestreos y estaciones *in situ* y datos satelitales

2.2.1 Estaciones de monitorización *in situ*

Desde finales de enero de 2025, se ha implementado un sistema de monitorización continua en tiempo casi real. El sistema consta de 6 estaciones, tres de ellas están compuestas por una boya oceanográfica en superficie y un *lander* en el fondo – coincidentes con las ubicaciones del muestreo *in situ* A, B y C – dos *landers* en las golas de El Estacio y Marchamalo, y una última estación en la base militar de San Javier, que complementa el sistema de monitoreo con un mareógrafo y una estación meteorológica (Figura 1). El esquema de las boyas, *landers* y mareógrafo se puede ver en el Anexo I.

Además, se han instalado sensores de luz PAR cerca de los *landers* de las 3 boyas de monitorización. Los sensores PAR (*Photosynthetically Active Radiation*), también

conocidos como sensores de radiación fotosintéticamente activa D (medida en $\mu\text{moles fotonos m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), son dispositivos utilizados para medir la irradiancia en el espectro correspondiente a la luz visible, que es la utilizada para los procesos fotosintéticos en las plantas y otros organismos. Estos sensores permiten obtener una serie temporal de alta resolución del coeficiente de extinción de la luz (K_d) y compararla con la obtenida en los muestreos periódicos *in situ*.

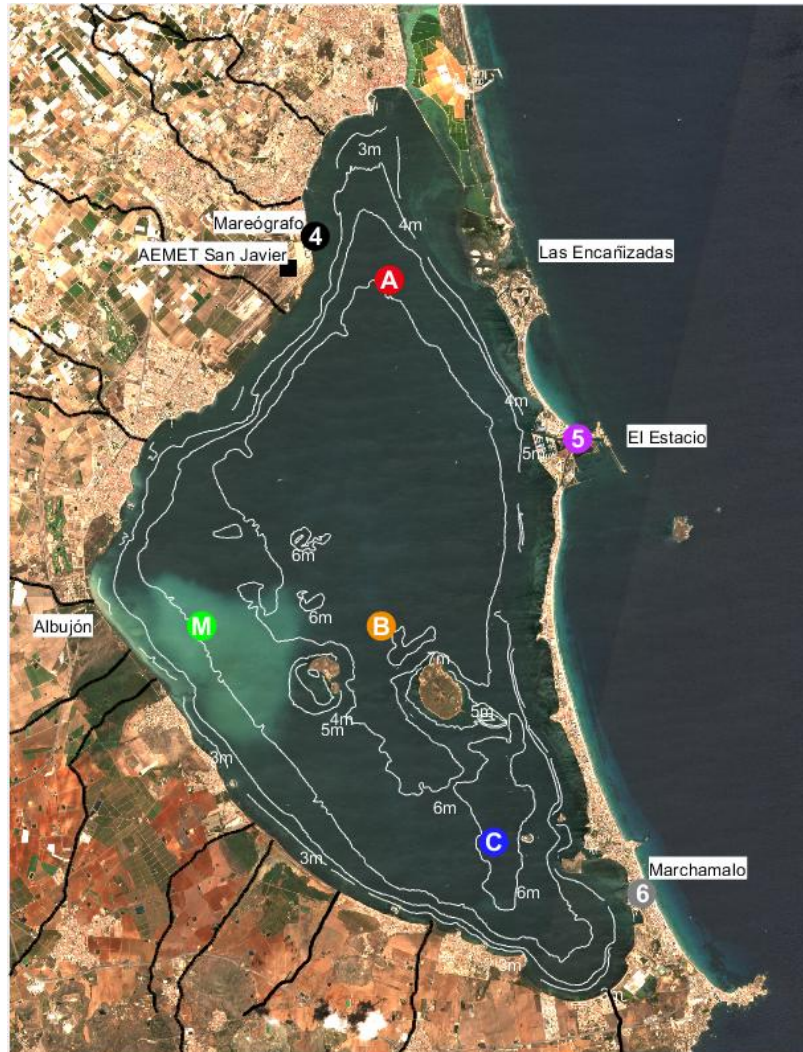


Figura 1: Ubicación de las estaciones de monitorización en tiempo real; A, B, C, Mareógrafo (est. 4), El Estacio (est. 5), y Marchamalo (est. 6); y de muestreo *in situ* (A, B, C y M). Se muestra sobre una imagen de satélite Sentinel2 obtenida el 03/08/2023.

Desde 2016 se realizan muestreos periódicos para evaluar el estado ecológico del Mar Menor. Originalmente, estos muestreos se realizaban con periodicidad mensual, pero desde la entrada en funcionamiento del proyecto BELICH, en enero de 2023, la frecuencia de muestreo se duplicó y actualmente es quincenal. Además,

inicialmente estos muestreos se realizaban en tres estaciones (A, B, C), pero en abril de 2023 se agregó una nueva estación situada en el interior de una zona de la laguna, localizada en el centro-oeste debido a que comenzó a ser visible una masa de agua turbia blanca, que presenta un aspecto blanquecino. Este fenómeno, conocido como "mancha blanca", corresponde a un evento de *whiting* caracterizado por la precipitación de carbonato cálcico, que genera una elevada turbidez en el agua. Estudios recientes sugieren que este fenómeno podría estar vinculado a descargas subterráneas con alto contenido en bicarbonatos, las cuales favorecen la sobresaturación y posterior precipitación de carbonatos. Esta estación se ha denominado "M" y desde entonces está incluida en todos los muestreos *in situ* junto al resto de estaciones (Figura 1).

2.2.2 Datos satelitales

Los datos satelitales nos brindan la capacidad de generar series temporales que abarcan años previos a la implementación de los programas de seguimiento. Esta información resulta fundamental para proporcionar un contexto completo de la evolución del estado ecológico del Mar Menor a lo largo del tiempo.

Las imágenes satelitales nos permiten analizar la temperatura y la clorofila- α . La temperatura se obtiene a través del producto "*Copernicus Mediterranean Sea – High Resolution L4 Sea Surface Temperature Reprocessed 0,05 deg resolution*" disponible desde el servicio de Copernicus (Nardelli et al., 2013).

Hasta la fecha, la concentración superficial de clorofila-a en la laguna se obtenía utilizando el producto "Mediterranean Sea Ocean Colour Plankton MY L4 daily gapfree observations and climatology and monthly observations" del portal marino de Copernicus (CMEMS). Sin embargo, desde febrero de 2024 se utiliza un algoritmo específico para el Mar Menor que ha sido diseñado a partir del análisis de datos de los satélites y sensores del color del océano y datos de clorofila-a procedentes de los muestreos *in situ* recopilados en el Mar Menor desde 2016 (Gómez-Jakobsen et al. 2025).

3. Resultados



Fotografía OLAS

El presente informe pretende reconstruir y valorar de forma sintética la evolución del estado del ecosistema lagunar, en base a las variables principales en que se sustenta el programa de seguimiento. En este apartado se realiza una descripción de cada variable, con especial atención a las respuestas de las mismas a los eventos climáticos que han marcado el estado y la dinámica de este ecosistema en 2025, contextualizado dichas respuestas en el marco de la serie temporal de las mismas variables obtenida por el equipo del IEO-CSIC desde 2016, es decir, el periodo que denominamos post-colapso. Los principales eventos climáticos registrados en 2025 son tres (por orden cronológico):

- (1) episodio de lluvias torrenciales en marzo (IEO-CSIC, 2025a);
- (2) una ola de calor durante los meses de junio y julio (IEO-CSIC, 2025b); y
- (3) episodio de lluvias torrenciales asociado a la DANA Alice en octubre (IEO-CSIC, 2025c; ver informes en <https://belich.ieo.csic.es/publicaciones/>).

3.1. Temperatura

La temperatura de la laguna mostró un patrón de variación estacional característico, sin apenas diferenciación entre la superficie y el fondo (Figura 2). En primavera se produjo un incremento acusado de la temperatura, alcanzándose medias de 23,3 °C en superficie y 23,2 °C en fondo, con una gran variabilidad en los registros (Desviación Estándar; DE = 3,7 °C) y máximos próximos a 29 °C (Figura 3; Tabla 1). Durante el verano se registraron las temperaturas máximas, con valores medios de 28,9 °C tanto en superficie como en fondo y con una baja variabilidad (DE = 1,4 °C); los máximos absolutos superaron los 30 °C (Figura 3; Tabla 1). En otoño, la temperatura media descendió hasta valores cercanos a 21,1 °C en ambos estratos, manteniendo una variabilidad moderada (DE = 3,5 °C). En invierno, las temperaturas medias se situaron en torno a 14,3 °C en superficie y 14,2 °C en fondo, con una variabilidad moderada (DE = 1,7 °C) y valores extremos comprendidos entre 12,1 y 16,4 °C (Figura 3; Tabla 1). Considerando el conjunto del año, la temperatura media anual fue de 22,5 °C en superficie y 22,4 °C en fondo, con una desviación estándar de 5,6 °C y un rango térmico anual comprendido entre mínimos de 12,1 °C y máximos próximos a 31 °C (Figura 3; Tabla 1). Se pone de manifiesto la ausencia de estratificación vertical en la columna

de agua, excepto en momentos puntuales asociados a determinados eventos climáticos extremos (ver más adelante).

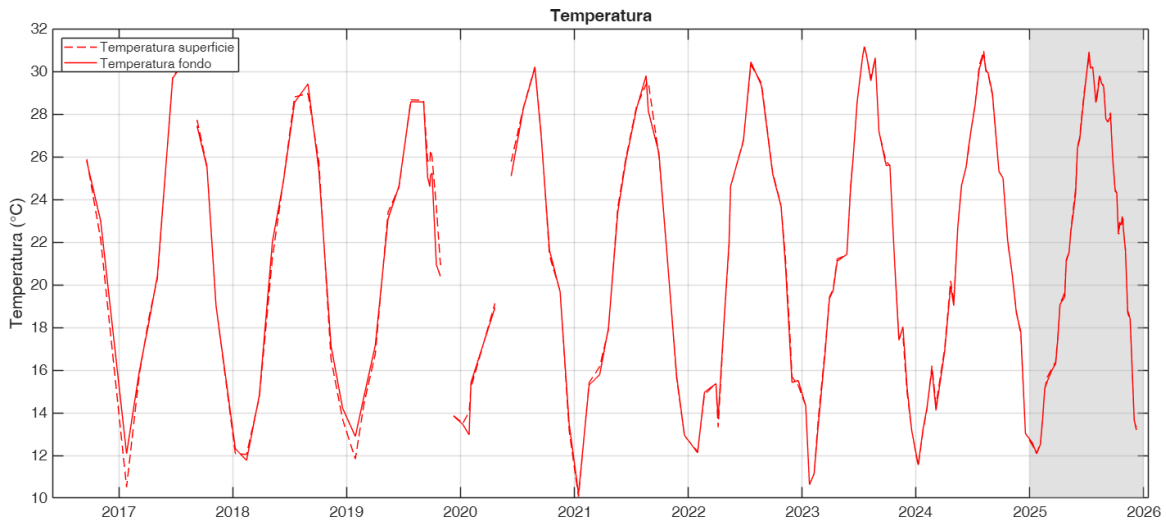


Figura 2: Temperatura media superficial (0,5 m; línea continua) y temperatura media del fondo (entre 4 y 6m dependiendo de la estación; línea discontinua) durante los muestreos in situ del proyecto DMMEM y BELICH en las estaciones A, B, C y M (ver Figura 1) desde 2016.

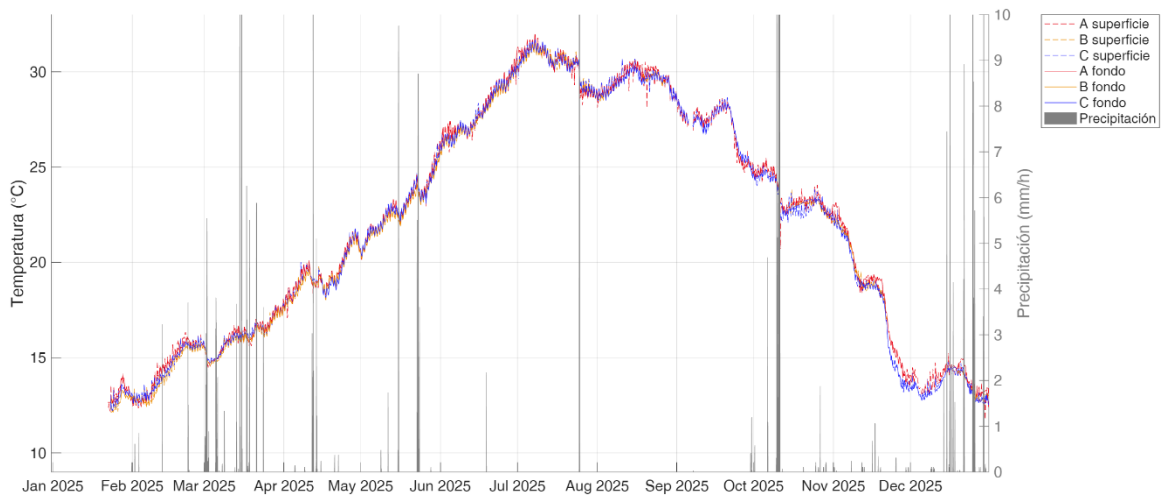


Figura 3: Series temporales de temperatura registradas por las boyas y landers de monitoreo continuo en las estaciones A (rojo), B (amarillo) y C (azul), distinguiendo superficie (línea continua) y fondo (línea discontinua) del año 2025. En gris se muestran las precipitaciones registradas por la estación meteorológica (Estación 4).

Tabla 1: Valores medios, mínimos (Min) y máximos (Max) de temperatura por año en superficie (0,5 m) y fondo (4-6m dependiendo de la estación. Figura 1), medidos durante los muestreos in situ DMMEM. Std: desviación estándar.

| Tª (°C) | | Superficie | | | | Fondo | | | |
|---------|-----------|------------|-----|------|------|-------|-----|------|------|
| Año | Estación | Media | Std | Min | Max | Media | Std | Min | Max |
| 2016 | Invierno | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| | Primavera | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| | Verano | 25,9 | 0,0 | 25,9 | 25,9 | 25,8 | 0,0 | 25,8 | 25,8 |
| | Otoño | 22,1 | 0,0 | 22,1 | 22,1 | 23,0 | 0,0 | 23,0 | 23,0 |
| | Anual | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 2017 | Invierno | 13,2 | 3,7 | 10,5 | 15,8 | 14,0 | 2,7 | 12,1 | 16,0 |
| | Primavera | 22,9 | 6,1 | 18,5 | 29,8 | 22,8 | 6,1 | 18,3 | 29,7 |
| | Verano | 29,1 | 1,9 | 27,7 | 30,4 | 29,0 | 2,1 | 27,5 | 30,5 |
| | Otoño | 22,3 | 4,6 | 19,0 | 25,5 | 22,3 | 4,6 | 19,0 | 25,5 |
| | Anual | 22,0 | 6,8 | 10,5 | 30,4 | 22,1 | 6,5 | 12,1 | 30,5 |
| 2018 | Invierno | 13,0 | 1,5 | 12,1 | 14,7 | 13,0 | 1,6 | 11,8 | 14,8 |
| | Primavera | 23,1 | 2,5 | 21,3 | 24,9 | 23,4 | 2,0 | 22,0 | 24,8 |
| | Verano | 28,9 | 0,1 | 28,8 | 29,0 | 29,0 | 0,6 | 28,5 | 29,4 |
| | Otoño | 18,7 | 6,3 | 13,7 | 25,8 | 18,9 | 5,8 | 14,2 | 25,4 |
| | Anual | 19,9 | 6,8 | 12,1 | 29,0 | 20,0 | 6,8 | 11,8 | 29,4 |
| 2019 | Invierno | 13,1 | 1,8 | 11,8 | 14,4 | 13,8 | 1,3 | 12,9 | 14,8 |
| | Primavera | 21,6 | 4,2 | 16,8 | 24,6 | 21,6 | 3,9 | 17,2 | 24,6 |
| | Verano | 27,0 | 1,5 | 25,7 | 28,7 | 26,4 | 2,0 | 24,6 | 28,6 |
| | Otoño | 21,1 | 4,5 | 13,9 | 26,0 | 20,1 | 4,7 | 13,8 | 25,2 |
| | Anual | 22,1 | 5,5 | 11,8 | 28,7 | 21,8 | 5,3 | 12,9 | 28,6 |
| 2020 | Invierno | 14,2 | 0,9 | 13,5 | 15,2 | 13,9 | 1,3 | 13,0 | 15,4 |
| | Primavera | 22,5 | 4,7 | 19,1 | 25,8 | 22,0 | 4,4 | 18,9 | 25,1 |
| | Verano | 28,5 | 1,6 | 27,1 | 30,2 | 28,5 | 1,6 | 27,0 | 30,2 |
| | Otoño | 18,1 | 4,3 | 13,2 | 21,4 | 18,3 | 4,2 | 13,5 | 21,6 |
| | Anual | 20,7 | 6,3 | 13,2 | 30,2 | 20,6 | 6,3 | 13,0 | 30,2 |
| 2021 | Invierno | 13,9 | 3,3 | 10,1 | 16,2 | 13,8 | 3,1 | 10,2 | 15,8 |
| | Primavera | 22,5 | 4,1 | 17,9 | 25,9 | 22,4 | 4,0 | 18,0 | 25,8 |
| | Verano | 28,3 | 1,6 | 26,0 | 29,5 | 28,1 | 1,5 | 26,2 | 29,8 |
| | Otoño | 16,7 | 4,4 | 12,9 | 21,4 | 16,7 | 4,3 | 12,9 | 21,4 |
| | Anual | 20,9 | 6,7 | 10,1 | 29,5 | 20,8 | 6,5 | 10,2 | 29,8 |
| 2022 | Invierno | 14,1 | 1,7 | 12,2 | 15,4 | 14,1 | 1,8 | 12,1 | 15,4 |
| | Primavera | 21,0 | 5,3 | 13,3 | 26,8 | 21,1 | 5,1 | 13,7 | 26,7 |
| | Verano | 28,3 | 2,7 | 25,3 | 30,3 | 28,3 | 2,8 | 25,2 | 30,4 |
| | Otoño | 18,7 | 3,7 | 15,3 | 23,7 | 18,5 | 3,7 | 15,3 | 23,7 |

| | | | | | | | | | |
|------|-----------|------|-----|------|------|------|-----|------|------|
| | Anual | 20,4 | 5,8 | 12,2 | 30,3 | 20,3 | 5,8 | 12,1 | 30,4 |
| 2023 | Invierno | 14,4 | 3,4 | 10,6 | 19,4 | 14,3 | 3,3 | 10,6 | 19,4 |
| | Primavera | 24,1 | 3,3 | 19,8 | 28,6 | 24,1 | 3,3 | 19,7 | 28,6 |
| | Verano | 29,4 | 2,1 | 25,8 | 31,2 | 29,4 | 2,2 | 25,6 | 31,2 |
| | Otoño | 18,3 | 4,5 | 13,2 | 25,6 | 18,5 | 4,4 | 13,2 | 25,6 |
| | Anual | 21,9 | 6,6 | 10,6 | 31,2 | 21,9 | 6,6 | 10,6 | 31,2 |
| 2024 | Invierno | 13,9 | 1,7 | 11,5 | 16,2 | 13,8 | 1,6 | 11,6 | 16,1 |
| | Primavera | 22,2 | 3,5 | 17,0 | 26,1 | 22,2 | 3,6 | 16,9 | 26,3 |
| | Verano | 29,1 | 1,9 | 25,3 | 31,0 | 29,1 | 1,8 | 25,4 | 30,8 |
| | Otoño | 19,5 | 4,1 | 13,0 | 25,0 | 19,5 | 4,1 | 13,0 | 25,0 |
| | Anual | 22,0 | 6,1 | 11,5 | 31,0 | 22,0 | 6,1 | 11,6 | 30,8 |
| 2025 | Invierno | 14,3 | 1,7 | 12,1 | 16,4 | 14,2 | 1,7 | 12,1 | 16,3 |
| | Primavera | 23,3 | 3,7 | 17,6 | 29,1 | 23,2 | 3,7 | 17,5 | 28,9 |
| | Verano | 28,9 | 1,4 | 25,9 | 30,7 | 28,9 | 1,4 | 25,9 | 30,9 |
| | Otoño | 21,1 | 3,5 | 13,3 | 24,4 | 21,1 | 3,5 | 13,2 | 24,4 |
| | Anual | 22,6 | 5,7 | 12,1 | 30,7 | 22,3 | 5,7 | 12,1 | 30,9 |

El análisis de la serie temporal de temperatura a largo plazo, puso en evidencia que el año 2025 se ha situado como el segundo año más cálido registrado en la historia reciente del Mar Menor desde el inicio de las series instrumentales en 1982. Este resultado se enmarca dentro de una tendencia sostenida de aumento de la temperatura en la laguna, que evidencia un proceso de calentamiento progresivo a largo plazo, repetidamente puesto de manifiesto en todos los informes publicados previamente, y que forma parte de un proceso global, generalizado de cambio climático que afecta no solo al Mar Menor sino también al Mediterráneo (Garrabou et al. 2022; Orenes-Salazar et al. 2023; Navarro-Martínez 2025). En el caso del ecosistema lagunar, el análisis confirma un incremento sostenido de la temperatura media del Mar Menor a un ritmo de +0,036 °C por año (Figura 4).

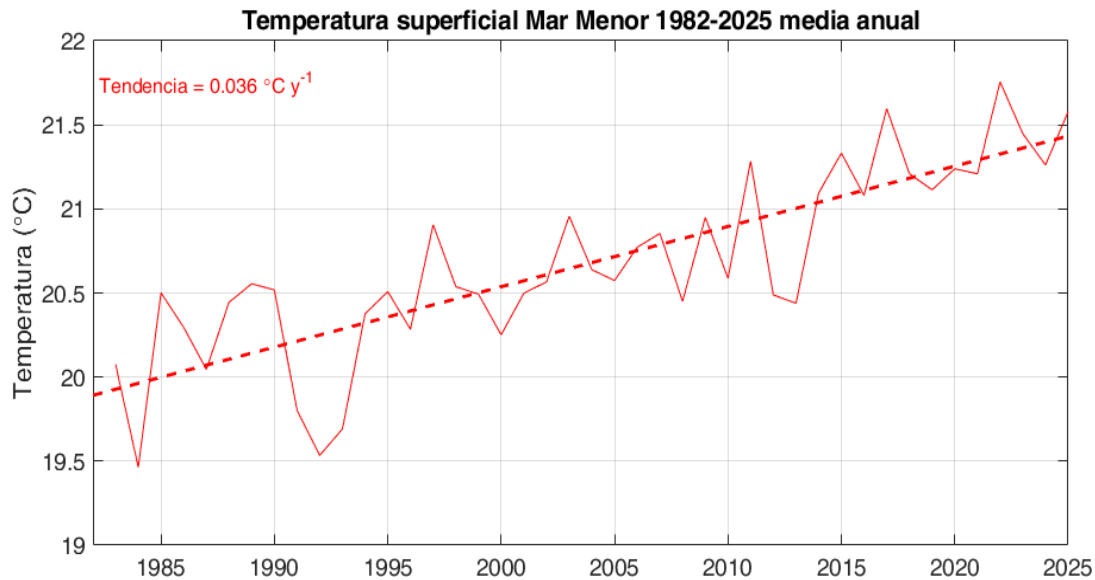


Figura 4: Serie temporal de temperatura superficial media anual desde 1982 hasta 2025 obtenida a partir de datos satelitales calibrados con sensores de temperatura HOBO in situ. La temperatura superficial mostró una tasa de cambio de $+0.036^{\circ}\text{C}$ por año en el periodo de estudio.

Olas de calor

El evento más relevante desde el punto de vista térmico fue la ola de calor que afectó al Mar Menor durante los meses de junio y julio de 2025. El 24 de abril se superó el umbral de los 20°C , un valor acorde con la estacionalidad habitual para esa época del año. No obstante, a partir del 25 de mayo se identificó un claro punto de inflexión en la evolución térmica, con un incremento muy acelerado de la temperatura del agua que llevó a alcanzar los 25°C en apenas unos días, concretamente el 30 de mayo. Este ascenso continuó de forma sostenida a lo largo de junio y culminó con un registro anómalo el 30 de junio, cuando se alcanzaron los 30°C (Figura 3; Figura 5). En conjunto, durante el mes de junio la temperatura del Mar Menor aumentó a un ritmo medio aproximado de $0,16^{\circ}\text{C}$ por día, lo que pone de manifiesto la intensidad y rapidez del evento térmico registrado.

De acuerdo con la definición de olas de calor marinas propuesta por Hobday et al. (2016), el Mar Menor experimentó un episodio térmico excepcional, en el que se identificaron dos olas de calor bien definidas, separadas por un breve intervalo (ver IEO-CSIC, 2025a). La primera se extendió del 31 de mayo al 10 de junio, con una duración de once días, mientras que la segunda tuvo lugar entre el 17 de junio y el 24 de julio, acumulando 38 días consecutivos (Figura 5). El intervalo entre ambos

episodios fue muy breve, por lo que desde el punto de vista ecológico pueden considerarse como un único proceso continuo de estrés térmico prolongado sobre la biota del Mar Menor.

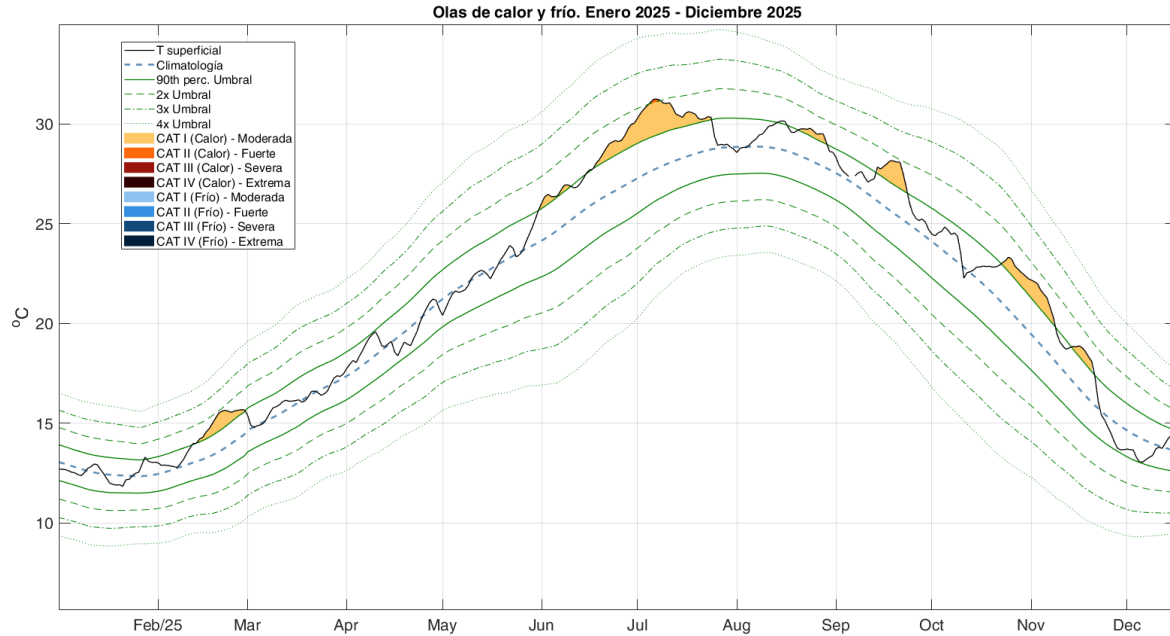


Figura 5: Serie temporal de temperatura desde enero de 2025 comparado con la climatología, mostrando las olas de calor y de frío en las categorías propuestas por Hobday et. al (2018).

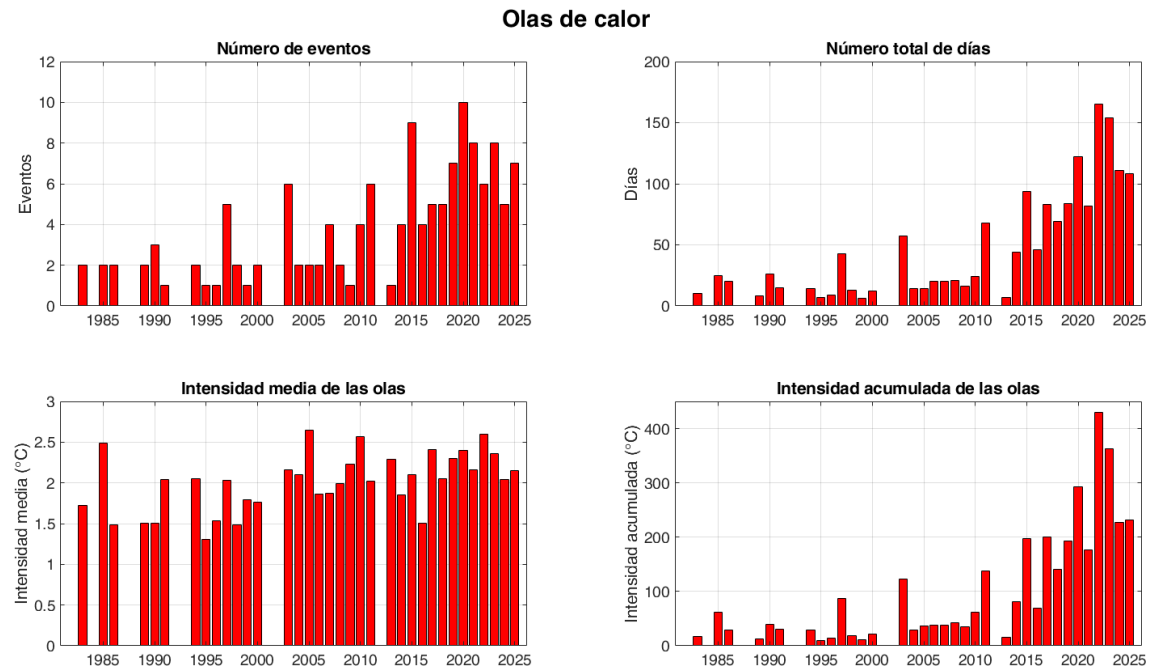


Figura 6: Estadísticas de olas de calor por año desde 1982.

Olas de frío

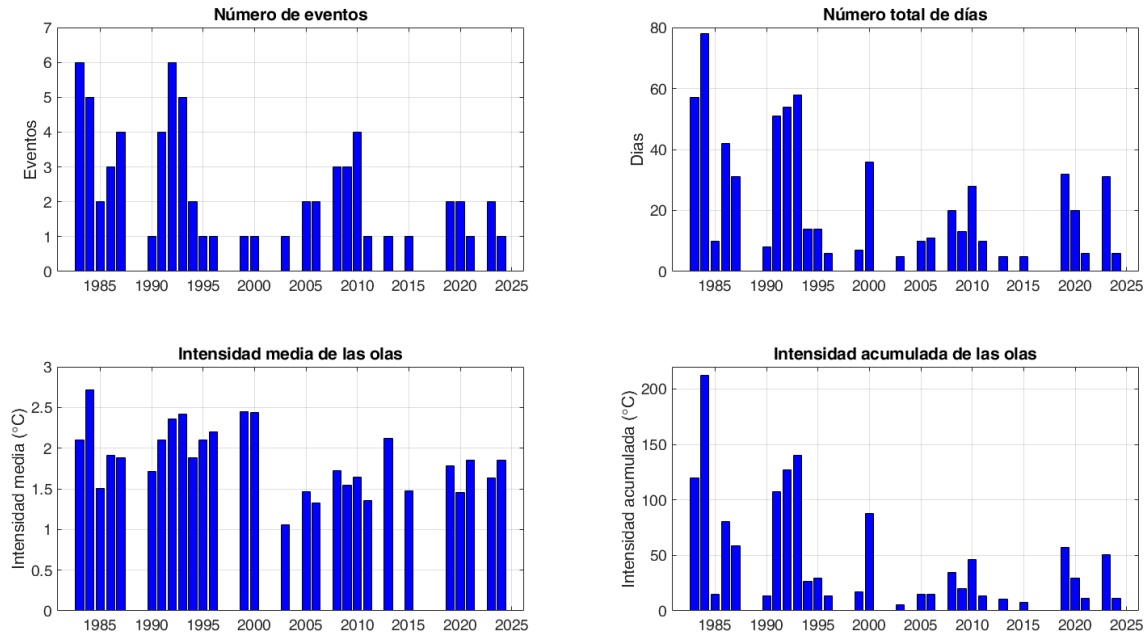


Figura 7: Estadísticas de olas de frío por año desde 1982.

El análisis de las olas de calor marinas registradas en el Mar Menor en los últimos años pone de manifiesto la elevada relevancia del año 2025 en el contexto de la serie histórica reciente (Figura 6; Tabla 2). Durante 2025 se detectaron un total de siete eventos de ola de calor, que acumularon 108 días bajo condiciones térmicas extremas, con una intensidad media de 2,15 °C día y una intensidad acumulada de 232,44 °C día. En términos comparativos, 2025 se sitúa como el cuarto año con mayor número de días totales de ola de calor desde el inicio de los registros analizados, solo por detrás de 2022, que destaca claramente como el año más extremo con 164 días y una intensidad acumulada de 427,15 °C día, y de otros años con episodios particularmente prolongados. Asimismo, la intensidad acumulada registrada en 2025 se encuentra entre las más elevadas de la serie, reflejando no solo la frecuencia de los eventos, sino también su persistencia e intensidad térmica. Estos resultados confirman que 2025 constituye uno de los años más relevantes en cuanto a estrés térmico para el Mar Menor, consolidando la tendencia hacia un aumento en la duración e impacto de las olas de calor marinas en el sistema lagunar.

De manera inversa, el número de eventos de olas de frío en el Mar Menor, así como su duración e intensidad acumulada, ha mostrado una tendencia decreciente en los últimos años (Tabla 2). En 2025 no se han registrado episodios de ola de frío, un patrón

similar al observado en otros años especialmente cálidos, como 2022 o el periodo 2016–2018, lo que refleja una disminución generalizada de este tipo de eventos en la laguna.

Tabla 2: Estadísticas de olas de calor desde 1982. Se presenta el número de olas de calor (Eventos), la suma total de días con olas de calor, la intensidad media de las olas (Int. media) e intensidad acumulada (Int. Acumulada) Se muestran los valores coloreados desde tonos blanco-amarillo (valores bajos) hasta naranja oscuro (valores altos).

| Año | Eventos | Días total | Int media | Int acumulada |
|------|---------|------------|-----------|---------------|
| 1982 | 0 | 0 | | 0.00 |
| 1983 | 2 | 10 | 1.67 | 16.68 |
| 1984 | 0 | 0 | | 0.00 |
| 1985 | 2 | 25 | 2.48 | 62.02 |
| 1986 | 2 | 18 | 1.50 | 26.96 |
| 1987 | 0 | 0 | | 0.00 |
| 1988 | 0 | 0 | | 0.00 |
| 1989 | 2 | 8 | 1.50 | 11.99 |
| 1990 | 3 | 26 | 1.51 | 39.34 |
| 1991 | 1 | 15 | 2.04 | 30.64 |
| 1992 | 0 | 0 | | 0.00 |
| 1993 | 0 | 0 | | 0.00 |
| 1994 | 2 | 14 | 2.05 | 28.76 |
| 1995 | 1 | 7 | 1.31 | 9.17 |
| 1996 | 1 | 9 | 1.53 | 13.78 |
| 1997 | 5 | 46 | 2.02 | 92.72 |
| 1998 | 2 | 13 | 1.49 | 19.31 |
| 1999 | 1 | 6 | 1.79 | 10.75 |
| 2000 | 2 | 12 | 1.77 | 21.18 |
| 2001 | 0 | 0 | | 0.00 |
| 2002 | 0 | 0 | | 0.00 |
| 2003 | 6 | 57 | 2.16 | 123.05 |
| 2004 | 2 | 14 | 2.11 | 29.57 |
| 2005 | 2 | 14 | 2.65 | 37.06 |
| 2006 | 2 | 20 | 1.90 | 37.91 |
| 2007 | 4 | 20 | 1.87 | 37.36 |
| 2008 | 2 | 21 | 1.99 | 41.89 |
| 2009 | 1 | 16 | 2.23 | 35.73 |
| 2010 | 4 | 24 | 2.57 | 61.60 |
| 2011 | 5 | 61 | 2.11 | 128.52 |
| 2012 | 0 | 0 | | 0.00 |
| 2013 | 1 | 7 | 2.29 | 16.06 |
| 2014 | 4 | 44 | 1.85 | 81.57 |



| | | | | |
|------|----|-----|------|--------|
| 2015 | 9 | 94 | 2.10 | 197.77 |
| 2016 | 4 | 46 | 1.51 | 69.33 |
| 2017 | 5 | 83 | 2.41 | 200.26 |
| 2018 | 5 | 69 | 2.05 | 141.37 |
| 2019 | 7 | 84 | 2.31 | 193.87 |
| 2020 | 10 | 122 | 2.40 | 293.04 |
| 2021 | 8 | 82 | 2.16 | 177.16 |
| 2022 | 6 | 164 | 2.60 | 427.15 |
| 2023 | 6 | 100 | 1.98 | 198.45 |
| 2024 | 1 | 11 | 1.37 | 15.07 |
| 2025 | 7 | 108 | 2.15 | 232.44 |

Tabla 3: Estadísticas de olas de frío desde 1982. Se presenta el número de olas de frío (Eventos), la suma total de días con olas de frío, la intensidad media de las olas (Int. media) e intensidad acumulada (Int. Acumulada) Se muestran los valores coloreados des desde tonos blanco-azul claro (valores bajos) hasta azul oscuro (valores altos).

| Año | Eventos | Días total | Int media | Int acumulada |
|------|---------|------------|-----------|---------------|
| 1982 | 0 | 0 | 0.00 | 0.00 |
| 1983 | 6 | 57 | 2.10 | 119.46 |
| 1984 | 5 | 78 | 2.72 | 211.94 |
| 1985 | 2 | 10 | 1.50 | 15.04 |
| 1986 | 3 | 42 | 1.91 | 80.14 |
| 1987 | 4 | 32 | 1.85 | 59.33 |
| 1988 | 0 | 0 | 0.00 | 0.00 |
| 1989 | 0 | 0 | 0.00 | 0.00 |
| 1990 | 1 | 8 | 1.67 | 13.39 |
| 1991 | 5 | 46 | 2.18 | 100.06 |
| 1992 | 7 | 58 | 2.30 | 133.22 |
| 1993 | 5 | 58 | 2.42 | 140.47 |
| 1994 | 2 | 14 | 1.88 | 26.36 |
| 1995 | 1 | 14 | 2.10 | 29.45 |
| 1996 | 1 | 6 | 2.20 | 13.22 |
| 1997 | 0 | 0 | 0.00 | 0.00 |
| 1998 | 0 | 0 | 0.00 | 0.00 |
| 1999 | 1 | 7 | 2.48 | 17.36 |
| 2000 | 1 | 36 | 2.43 | 87.40 |
| 2001 | 0 | 0 | 0.00 | 0.00 |
| 2002 | 0 | 0 | 0.00 | 0.00 |
| 2003 | 1 | 5 | 1.06 | 5.30 |
| 2004 | 0 | 0 | 0.00 | 0.00 |
| 2005 | 2 | 10 | 1.46 | 14.65 |
| 2006 | 2 | 11 | 1.33 | 14.60 |

| | | | | |
|------|---|----|------|-------|
| 2007 | 0 | 0 | 0.00 | 0.00 |
| 2008 | 3 | 20 | 1.75 | 35.03 |
| 2009 | 3 | 13 | 1.55 | 20.10 |
| 2010 | 4 | 28 | 1.67 | 46.81 |
| 2011 | 1 | 10 | 1.36 | 13.58 |
| 2012 | 0 | 0 | 0.00 | 0.00 |
| 2013 | 1 | 5 | 2.12 | 10.62 |
| 2014 | 0 | 0 | 0.00 | 0.00 |
| 2015 | 1 | 5 | 1.47 | 7.37 |
| 2016 | 0 | 0 | 0.00 | 0.00 |
| 2017 | 0 | 0 | 0.00 | 0.00 |
| 2018 | 0 | 0 | 0.00 | 0.00 |
| 2019 | 2 | 32 | 1.79 | 57.19 |
| 2020 | 2 | 20 | 1.48 | 29.54 |
| 2021 | 1 | 6 | 1.86 | 11.14 |
| 2022 | 0 | 0 | 0.00 | 0.00 |
| 2023 | 2 | 31 | 1.64 | 50.80 |
| 2024 | 1 | 6 | 1.85 | 11.11 |
| 2025 | 0 | 0 | 0.00 | 0.00 |

3.2. Salinidad

La Figura 8 muestra la serie temporal de la salinidad media en superficie (0,5 m de profundidad) y fondo (entre 4 y 6 m) en las estaciones A, B, C y M, a partir de los muestreos *in situ* de los proyectos DMMEM y BELICH desde 2016. Esta serie histórica evidencia un descenso acusado de la salinidad tras la sucesión de eventos de lluvias torrenciales, primero en 2016, y posteriormente en 2019–2020 (Ruiz *et al.*, 2020; Tabla 4). En los años que siguen a estos eventos se comprueba cómo la salinidad tiende a recuperarse, aunque más lentamente tras el segundo evento mencionado debido al episodio anómalo de precipitaciones ocurrido en marzo de 2022. En 2024 la salinidad alcanzó valores superiores a 45 PSU, dentro de los rangos considerados normales en la laguna antes del colapso de 2016 (Tabla 4), pero las precipitaciones de marzo de 2025 interrumpieron esta dinámica de recuperación disminuyendo la salinidad hasta 41 PSU (IEO-CSIC, 2025a).

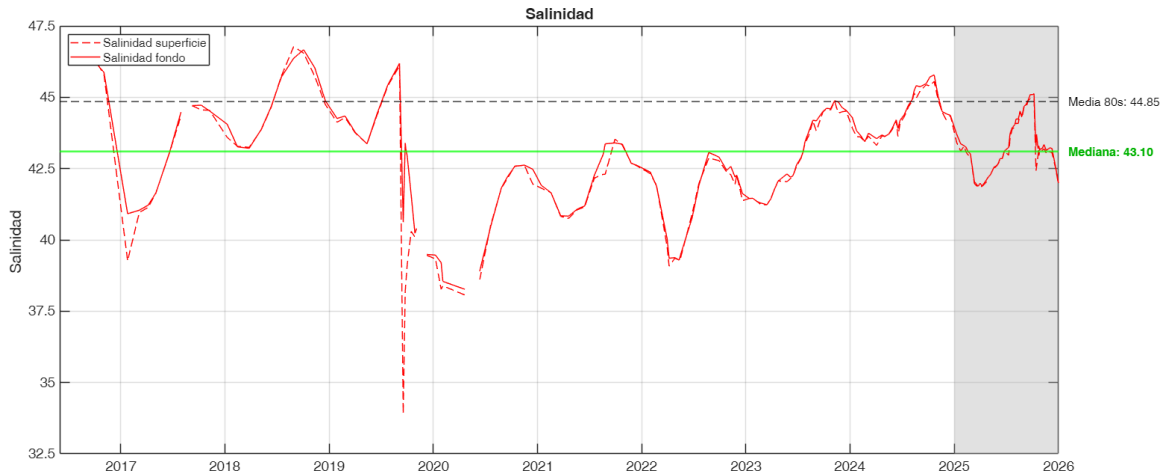


Figura 8: Datos de salinidad promedio en superficie (0,5m; rojo continuo) y fondo (entre 4 y 6m dependiendo de la estación, Figura 1; rojo discontinuo) en las estaciones A, B, C y M de los muestreos in situ del proyecto DMMEM y BELICH desde 2016. Se muestra la media de salinidad medida en la laguna en la década de 1980 (línea discontinua negra) y la mediana del periodo analizado (2016-2025) (línea verde)

Como se ve en la Figura 8 y con mucho más detalle en la Figura 9, tras las precipitaciones de marzo de 2025, la salinidad tendió a recuperarse siguiendo la variación estacional característica, pero la DANA Alice de otoño volvió a disminuir bruscamente los valores de esta variable a valores por debajo de los rangos normales para la laguna en el periodo pre- colapso.

En general, la comparación entre superficie y fondo (Figuras 8 y 9) indica la ausencia de una estratificación halina persistente, observándose diferencias únicamente puntuales y transitorias, asociadas a eventos muy intensos de lluvias torrenciales (>100 mm; p. ej., enero de 2017 y septiembre–octubre de 2019), tras los cuales la laguna tiende a homogeneizarse rápidamente.

Los datos proporcionados por los sensores de las boyas y landers tienen muy alta resolución temporal, como se muestra en la Figura 9. Esto permite, por primera vez, observar el comportamiento real y en continuo de la salinidad, lo que permite conocer con mucho más detalle el impacto de las precipitaciones en la laguna y la dinámica de recuperación. Así, por ejemplo, se comprueba que las lluvias del periodo febrero-marzo causaron una disminución de unos 2 PSU, pero sin causar apenas estratificación de la columna de agua (IEO-CSIC, 2025a), como es habitual en eventos de precipitación de intensidad leve o moderada (<100 mm). Durante el periodo febrero-

marzo 2025 se alcanzaron valores de 43 PSU, inferiores a los registrados en la misma época en 2024 (Tabla 4).

En contraposición, la DANA Alice de otoño de ese mismo año, no solo provocó un brusco descenso de la salinidad, sino que también causó cierta estratificación, sucedida por el agotamiento progresivo de oxígeno hasta valores de hipoxia y, finalmente, anoxia (ver más adelante). Otra fuente de variación de la salinidad es la influencia de la corriente de agua mediterránea entrante en la parte norte de la laguna, registrada en los sensores de superficie de la boya norte (boya A; Figura 9). Esto se refleja en la menor salinidad registrada en la cubeta norte la mayor parte del año, y su mayor variabilidad temporal, en comparación con los registros de las zonas central y sur de la laguna. Este gradiente espacial de salinidad N-S se invierte a partir de la DANA Alice, debido a la acumulación de agua dulce en la zona sur (boya C; Figura 9), situación que persiste hasta final del año 2025.

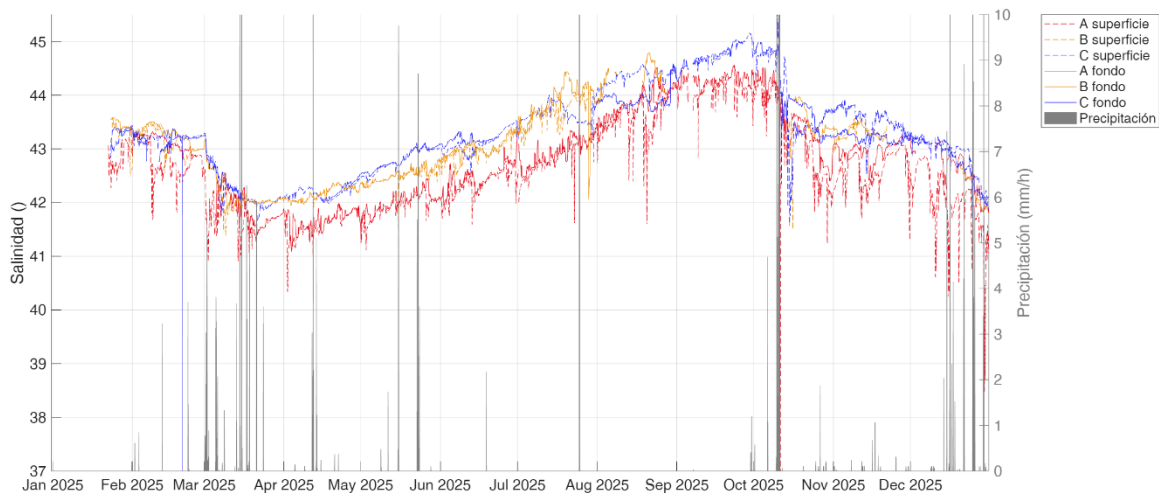


Figura 9: Series temporales de salinidad registradas por las boyas y landers de monitoreo continuo en las estaciones A (rojo), B (amarillo) y C (azul), distinguiendo superficie (línea continua) y fondo (línea discontinua). En gris se muestran las precipitaciones registradas por la estación meteorológica (Estación 4).

Tabla 4: Valores medios, mínimos (Min) y máximos (Max) de salinidad por año medidos en superficie (0,5 m) y fondo (4-6 m dependiendo de la estación. Figura 1), durante los muestreos. Std: desviación estándar.

| Salinidad (-) | | Superficie | | | | Fondo | | | |
|---------------|-----------|------------|-----|------|------|-------|-----|------|------|
| Año | Estación | Media | Std | Min | Max | Media | Std | Min | Max |
| 2016 | Invierno | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| | Primavera | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| | Verano | 43,6 | 0,0 | 43,6 | 43,6 | 43,6 | 0,0 | 43,6 | 43,6 |
| | Otoño | 46,5 | 0,0 | 46,5 | 46,5 | 46,4 | 0,0 | 46,4 | 46,4 |
| | Anual | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 2017 | Invierno | 45,3 | 1,5 | 43,6 | 46,5 | 45,3 | 1,5 | 43,6 | 46,4 |
| | Primavera | 40,1 | 1,2 | 39,3 | 41,0 | 41,0 | 0,1 | 40,9 | 41,0 |
| | Verano | 42,0 | 1,0 | 41,1 | 43,1 | 42,0 | 1,0 | 41,2 | 43,1 |
| | Otoño | 44,5 | 0,3 | 44,3 | 44,7 | 44,6 | 0,2 | 44,5 | 44,7 |
| | Anual | 44,6 | 0,0 | 44,5 | 44,6 | 44,6 | 0,1 | 44,5 | 44,7 |
| 2018 | Invierno | 42,7 | 2,0 | 39,3 | 44,7 | 42,9 | 1,7 | 40,9 | 44,7 |
| | Primavera | 43,4 | 0,2 | 43,2 | 43,6 | 43,5 | 0,5 | 43,2 | 44,1 |
| | Verano | 44,2 | 0,6 | 43,9 | 44,6 | 44,3 | 0,6 | 43,9 | 44,7 |
| | Otoño | 46,3 | 0,7 | 45,7 | 46,8 | 46,0 | 0,5 | 45,7 | 46,4 |
| | Anual | 45,7 | 0,9 | 44,7 | 46,5 | 45,9 | 0,9 | 44,9 | 46,7 |
| 2019 | Invierno | 44,8 | 1,3 | 43,2 | 46,8 | 44,9 | 1,3 | 43,2 | 46,7 |
| | Primavera | 44,2 | 0,1 | 44,1 | 44,3 | 44,3 | 0,1 | 44,3 | 44,3 |
| | Verano | 43,8 | 0,5 | 43,4 | 44,4 | 43,8 | 0,5 | 43,4 | 44,4 |
| | Otoño | 40,4 | 5,2 | 33,9 | 46,1 | 43,8 | 2,2 | 40,6 | 46,2 |
| | Anual | 39,8 | 0,5 | 39,1 | 40,3 | 40,9 | 1,3 | 39,5 | 42,9 |
| 2020 | Invierno | 41,4 | 3,4 | 33,9 | 46,1 | 42,9 | 2,0 | 39,5 | 46,2 |
| | Primavera | 38,7 | 0,6 | 38,3 | 39,3 | 39,1 | 0,5 | 38,5 | 39,5 |
| | Verano | 38,3 | 0,4 | 38,1 | 38,6 | 38,6 | 0,4 | 38,3 | 38,9 |
| | Otoño | 41,5 | 0,8 | 40,5 | 42,1 | 41,5 | 0,9 | 40,5 | 42,2 |
| | Anual | 42,4 | 0,4 | 42,0 | 42,6 | 42,6 | 0,1 | 42,5 | 42,6 |
| 2021 | Invierno | 40,4 | 1,9 | 38,1 | 42,6 | 40,6 | 1,8 | 38,3 | 42,6 |
| | Primavera | 41,4 | 0,5 | 40,8 | 41,8 | 41,5 | 0,6 | 40,8 | 41,9 |
| | Verano | 41,0 | 0,2 | 40,8 | 41,2 | 41,0 | 0,2 | 40,8 | 41,2 |
| | Otoño | 42,6 | 0,6 | 42,2 | 43,5 | 43,0 | 0,5 | 42,3 | 43,4 |
| | Anual | 42,9 | 0,4 | 42,6 | 43,3 | 42,9 | 0,4 | 42,6 | 43,4 |
| 2022 | Invierno | 42,0 | 0,9 | 40,8 | 43,5 | 42,2 | 1,0 | 40,8 | 43,4 |
| | Primavera | 41,3 | 1,4 | 39,8 | 42,3 | 41,4 | 1,2 | 40,0 | 42,4 |
| | Verano | 39,6 | 0,8 | 39,1 | 40,9 | 39,7 | 0,6 | 39,3 | 40,8 |
| | Otoño | 42,5 | 0,5 | 42,0 | 42,9 | 42,6 | 0,6 | 41,9 | 43,1 |
| | Anual | 42,1 | 0,4 | 41,4 | 42,4 | 42,2 | 0,4 | 41,6 | 42,6 |

| | | | | | | | | | |
|------|-----------|------|-----|-------|------|------|-----|------|------|
| 2023 | Invierno | 41,2 | 1,4 | 39,1 | 42,9 | 41,4 | 1,4 | 39,3 | 43,1 |
| | Primavera | 41,4 | 0,1 | 41,2 | 41,5 | 41,4 | 0,1 | 41,2 | 41,5 |
| | Verano | 42,2 | 0,3 | 41,8 | 42,6 | 42,3 | 0,3 | 41,8 | 42,6 |
| | Otoño | 43,6 | 0,6 | 42,9 | 44,5 | 43,7 | 0,6 | 42,9 | 44,5 |
| | Anual | 44,6 | 0,1 | 44,4 | 44,9 | 44,7 | 0,1 | 44,5 | 44,9 |
| 2024 | Invierno | 43,6 | 0,2 | 43,4 | 43,9 | 43,8 | 0,3 | 43,4 | 44,3 |
| | Primavera | 43,8 | 0,3 | 43,3 | 44,2 | 43,9 | 0,3 | 43,6 | 44,3 |
| | Verano | 44,9 | 0,4 | 44,3 | 45,4 | 45,1 | 0,4 | 44,4 | 45,6 |
| | Otoño | 44,8 | 0,6 | 44,2 | 45,6 | 45,0 | 0,7 | 44,4 | 45,8 |
| | Anual | 44,3 | 0,7 | 43,3 | 45,6 | 44,5 | 0,8 | 43,4 | 45,8 |
| 2025 | Invierno | 42,8 | 0,6 | 41,8 | 43,4 | 43,0 | 0,6 | 41,9 | 43,7 |
| | Primavera | 42,4 | 0,4 | 41,89 | 43,1 | 42,5 | 0,4 | 41,9 | 43,1 |
| | Verano | 44,2 | 0,6 | 43,0 | 45,0 | 44,3 | 0,5 | 43,2 | 45,1 |
| | Otoño | 43,2 | 0,7 | 42,4 | 45,0 | 43,5 | 0,6 | 43,1 | 45,1 |
| | Anual | 43,2 | 0,9 | 41,8 | 45,0 | 43,4 | 0,9 | 41,9 | 45,1 |

3.3. Concentración de la clorofila-a

Desde 2025 las variaciones espacio-temporales de la clorofila-a (chl-a) del Mar Menor se encuentran fielmente caracterizadas a partir de los muestreos *in situ* (Figura 10; Tabla 5), los sensores de las boyas y landers (Figura 11) y los mapas obtenidos a partir de datos satelitales (Anexo III). Es necesario recordar que todos los datos obtenidos a partir de los sensores y sondas *in situ* y remotas están intercalibrados entre sí y con medidas muy precisas obtenidas a partir de métodos espectrofotométricos. Por tanto, los datos de esta variable presentados en nuestros informes son altamente precisos y robustos metodológicamente. Por otro lado, desde enero de 2025, los datos de alta resolución temporal obtenidos en continuo por los sensores oceanográficos (boyas y landers), han permitido registrar patrones de variación temporal que anteriormente no se tenían en cuenta ni en este ni en ningún otro programa de seguimiento, como las variaciones asociadas a los ciclos nictemerales característicos de esta variable (Owens et al. 1980; Cloern 1996; Barbieux et al. 2019). La amplitud de estos ciclos diarios es variable, pero básicamente aumenta a lo largo del periodo diurno por la fotosíntesis y disminuyendo durante el periodo nocturno debido a la respiración (Figura 11). Los máximos se registran normalmente al final del periodo diurno, en horas vespertinas, lo que hace que las medidas puntuales de esta variable obtenidas *in situ* antes de mediodía sean siempre menores que las deducidas de los registros en continuo de los nuevos sensores oceanográficos. Esto pone en evidencia, la importancia de los

sistemas de medición en continuo para captar la variabilidad real de ésta y otras variables, especialmente en respuesta a episodios de aportes de nutrientes responsables de los *blooms* fitoplanctónicos.

En 2025, en base a los datos obtenidos en los muestreos puntuales *in situ* (Tabla 5), la concentración media anual de clorofila-a fue de $1,78 \text{ mg/m}^3$, con una desviación estándar de $1,4 \text{ mg/m}^3$ y un rango de variación comprendido entre $0,4$ y $6,5 \text{ mg/m}^3$. En base a los registros en continuo de los sensores de boyas y landers (Figura 11), se comprueba que realmente se alcanzaron puntualmente valores máximos de más de 13 mg/m^3 durante episodios de desarrollo fitoplanctónico asociado a eventos extremos, como la DANA Alice en otoño. A excepción de estos episodios, los niveles de chl-a en 2025 se encuentran por debajo de 3 mg/m^3 , similar a los niveles medios basales registrados en el periodo post-colapso (2016; Figura 10), en periodos de reposo entre eventos de *bloom* fitoplanctónico, y en línea con la tendencia general de relajación de los valores de esta variable observada a partir de 2022.

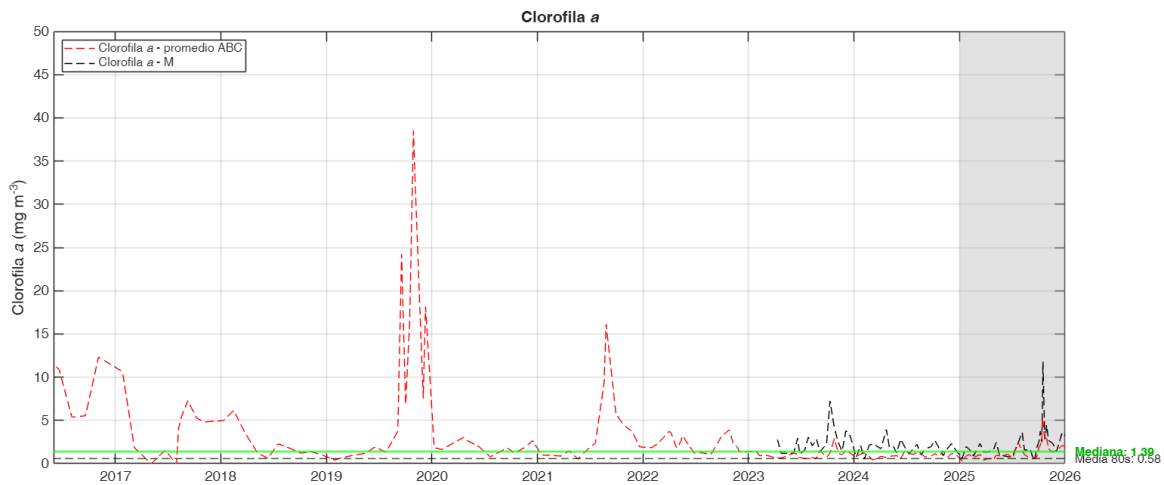


Figura 10: Datos de clorofila-a promedio en las estaciones A, B, C (rojo) y M (negro) de los muestreos *in situ* del proyecto DMMEM y BELICH desde 2016. Se muestra la media de clorofila-a medida en la laguna en la década de 1980 (línea discontinua negra) y la mediana del periodo analizado (2016-2025) (línea verde)

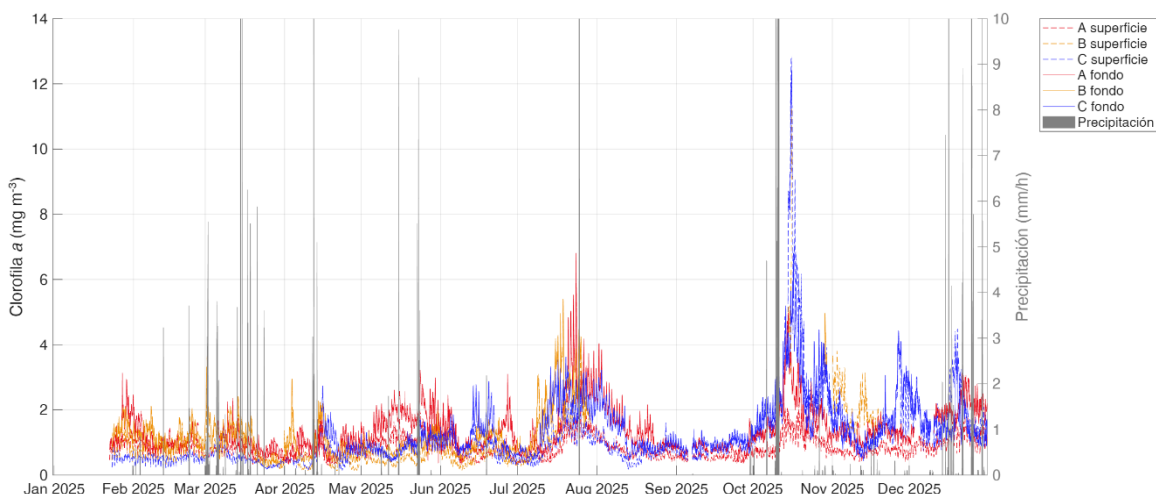


Figura 11: Series temporales de clorofila-a registradas por las boyas y landers de monitoreo continuo en las estaciones A (rojo), B (amarillo) y C (azul), distinguiendo superficie (línea continua) y fondo (línea discontinua) del año 2025. En gris se muestran las precipitaciones registradas por la estación meteorológica (Estación 4).

Tabla 5: Valores medios, mínimos (Min) y máximos (Max) de clorofila-a por año, medidos durante los muestreos in situ. Std: desviación estándar

| Clorofila-a (mg/m ³) | | 4 m profundidad | | | |
|----------------------------------|-----------|-----------------|-------|-------|-------|
| Año | Estación | Media | Std | Min | Max |
| 2016 | Invierno | --- | --- | --- | --- |
| | Primavera | --- | --- | --- | --- |
| | Verano | 5,46 | 0,11 | 5,38 | 5,54 |
| | Otoño | 12,33 | 0,00 | 12,33 | 12,33 |
| | Anual | --- | --- | --- | --- |
| 2017 | Invierno | 6,24 | 6,20 | 1,86 | 10,63 |
| | Primavera | 0,77 | 1,10 | 0,00 | 1,55 |
| | Verano | 4,15 | 3,13 | 0,00 | 7,27 |
| | Otoño | 5,02 | 0,28 | 4,83 | 5,22 |
| | Anual | 4,07 | 3,37 | 0,00 | 10,63 |
| 2018 | Invierno | 4,86 | 1,36 | 3,45 | 6,16 |
| | Primavera | 0,92 | 0,44 | 0,61 | 1,23 |
| | Verano | 2,01 | 0,39 | 1,74 | 2,29 |
| | Otoño | 1,18 | 0,19 | 0,98 | 1,35 |
| | Anual | 2,40 | 1,87 | 0,61 | 6,16 |
| 2019 | Invierno | 0,55 | 0,18 | 0,42 | 0,69 |
| | Primavera | 1,36 | 0,49 | 0,97 | 1,91 |
| | Verano | 9,77 | 12,59 | 1,31 | 24,24 |
| | Otoño | 20,00 | 13,02 | 6,84 | 38,52 |

| | | | | | |
|------|-----------|-------|-------|------|-------|
| | Anual | 11,03 | 12,87 | 0,42 | 38,52 |
| 2020 | Invierno | 1,74 | 0,16 | 1,62 | 1,86 |
| | Primavera | 2,56 | 0,54 | 1,99 | 3,06 |
| | Verano | 1,35 | 0,54 | 0,78 | 1,85 |
| | Otoño | 1,91 | 0,72 | 1,24 | 2,67 |
| | Anual | 1,91 | 0,67 | 0,78 | 3,06 |
| 2021 | Invierno | 0,94 | 0,06 | 0,87 | 1,00 |
| | Primavera | 1,15 | 0,53 | 0,53 | 1,49 |
| | Verano | 8,43 | 5,89 | 2,39 | 16,16 |
| | Otoño | 3,37 | 1,30 | 1,93 | 4,48 |
| | Anual | 3,85 | 4,47 | 0,53 | 16,16 |
| 2022 | Invierno | 2,64 | 0,96 | 1,86 | 3,71 |
| | Primavera | 2,49 | 0,99 | 1,22 | 3,61 |
| | Verano | 1,82 | 1,13 | 1,07 | 3,12 |
| | Otoño | 2,17 | 1,05 | 1,34 | 3,91 |
| | Anual | 2,29 | 0,97 | 1,07 | 3,91 |
| 2023 | Invierno | 1,00 | 0,30 | 0,71 | 1,50 |
| | Primavera | 1,11 | 0,33 | 0,78 | 1,57 |
| | Verano | 1,14 | 0,21 | 0,83 | 1,48 |
| | Otoño | 2,06 | 0,78 | 1,14 | 3,19 |
| | Anual | 1,35 | 0,63 | 0,71 | 3,19 |
| 2024 | Invierno | 1,04 | 0,25 | 0,73 | 1,37 |
| | Primavera | 1,24 | 0,22 | 1,00 | 1,57 |
| | Verano | 1,19 | 0,17 | 1,01 | 1,51 |
| | Otoño | 1,26 | 0,22 | 0,96 | 1,54 |
| | Anual | 1,19 | 0,22 | 0,73 | 1,57 |
| 2025 | Invierno | 1,04 | 0,25 | 0,73 | 1,37 |
| | Primavera | 1,24 | 0,22 | 1,00 | 1,57 |
| | Verano | 1,19 | 0,17 | 1,01 | 1,51 |
| | Otoño | 1,26 | 0,22 | 0,96 | 1,54 |
| | Anual' | 1,19 | 0,22 | 0,73 | 1,57 |

La Figura 11 muestra la evolución temporal de la clorofila-a registrada durante 2025 en las diferentes estaciones de monitorización continua, diferenciando entre superficie y fondo, junto con las precipitaciones registradas por la estación meteorológica.

Los valores más bajos y estables del año 2025 se registraron en los meses invernales (enero-abril), con concentraciones medias en torno a 0,8–1,0 mg/m³ (Tabla 5). Estos valores son inferiores a los registrados por las boyas, pero por lo general se mantienen por debajo de 2 mg/m³. Esto indica que los aportes de aguas continentales asociados



a los eventos de precipitaciones ocurridos entre febrero y abril, no sólo no fueron suficientemente intensos para causar estratificación termohalina, sino que tampoco fueron suficientes para estimular el desarrollo fitoplanctónico.

Entre marzo y junio, los valores medios fueron superiores a los de meses anteriores ($1,0\text{--}1,2\text{ mg/m}^3$) a consecuencia de un incremento progresivo de esta variable hasta valores máximos de hasta 3 mg/m^3 , probablemente en respuesta al aumento de la temperatura y la radiación solar característicos de esta época del año. Estos valores, sin ser demasiado elevados ni críticos para el ecosistema (respecto a los rangos habituales en esta época del año), solo han sido sobrepasados en eventos previos de desarrollo fitoplanctónico, por lo que la tendencia ascendente mantenida este periodo motivó cierta preocupación y la activación de un estado de alerta temprana por el equipo del IEO. A finales de julio, esta progresión de la chl-a se interrumpió bruscamente, cayendo a valores basales del orden de 1 mg/m^3 . Pero a los pocos días la chl-a experimentó un rápido incremento hasta alcanzar valores superiores a 7 mg/m^3 a mitad del mes de julio. A partir de este momento la variable experimentó una tendencia progresiva de disminución hasta alcanzar valores basales normales a mitad de agosto. La respuesta de la chl-a en este evento estival se observa mayormente en la capa superficial. Esta dinámica de la chl-a coincide con la variación de la temperatura durante la ola de calor (Figura 5), lo que muestra la elevada vulnerabilidad de la laguna a este factor ambiental y el importante papel de la temperatura y la interacción entre el calentamiento y la eutrofización como mecanismo potenciador del deterioro del estado del ecosistema.

En otoño tuvo lugar un segundo evento de *bloom* fitoplanctónico mucho más intenso y asociado a los efectos de la DANA Alice. De hecho, durante los meses de septiembre y octubre se registraron los valores más elevados de chl-a del año, con una media próxima a $3,1\text{ mg/m}^3$ y una variabilidad elevada ($DE = 1,6\text{ mg/m}^3$), alcanzándose máximos de cerca de 14 mg/m^3 en las Boyas B y C, en esta ocasión en las capas profundas próximas al fondo (Tabla 5 y Figura 11). Este segundo evento está relacionado con la entrada de grandes cantidades de agua continental a la laguna durante intensas precipitaciones, tal y como recogen los informes de seguimiento específicos de este evento (IEO-CSIC, 2025c). Estos aportes masivos de agua continental contienen enormes cantidades de sedimentos, nutrientes (fósforo en

particular) y materia orgánica que, como se ha descrito en eventos anteriores en la laguna, son capaces de detonar súbitos desarrollos fitoplanctónicos como los observados en este evento de 2025. Estas observaciones ponen en evidencia también el potencial de estos eventos de lluvias torrenciales de inducir *blooms* fitoplanctónicos de cierta intensidad.

Tras este segundo evento los valores de chl-a se relajaron a lo largo de los meses de noviembre y diciembre, de acuerdo con la reducción de precipitaciones en este periodo del año. Los valores de chl-a se estabilizaron entonces hacia valores basales en la zona norte, pero permanecieron más inestables en las zonas centro y sur de la laguna, donde todavía se observaron importantes fluctuaciones hacia valores máximos algo más elevados, de hasta 4-5 mg/m³.

3.3.1. Variación espacial

Los mapas de chl-a obtenidos a partir de datos satelitales (Anexo III) corroboran los patrones de variación espacial observados en los puntos en los que se ubican las boyas, descritos en el apartado anterior, pero también ponen en evidencia patrones de variación que no han sido reflejados en los datos procedentes de las boyas y landers. Por ejemplo, entre enero y mayo, si bien las concentraciones de chl-a se mantienen bajas en la mayor parte de la laguna (a pesar de los episodios de precipitaciones de este periodo), aparece con cierta frecuencia un gradiente espacial de esta variable en las zonas más someras de la costa oeste de la laguna, entre Lo Pagán y la desembocadura de la rambla del Albujión. Este patrón espacial se encuentra probablemente relacionado con un frente de descarga de aguas continentales subterráneas ricas en nutrientes (principalmente nitratos) identificadas en esta parte de la laguna a partir de evidencias empíricas obtenidas por los equipos especializados que trabajan a nivel de cuenca vertiente y el acuífero para la Dirección General del Agua (ver *Informe de avances del Marco de Actuaciones Prioritarias para la recuperación del Mar Menor. Informe de Avances. Mayo 2025*). Igualmente se tiene constancia de la presencia en esta misma zona de diversos aportes puntuales de pluviales que probablemente contribuirán también a explicar este incremento local de la chl-a. Como se deduce de los mapas de chl-a, estos patrones espaciales locales no son permanentes, sino que aparecen de forma intermitente, probablemente en



relación a la dinámica de carga-descarga del acuífero a corto y medio plazo asociada a eventos de precipitaciones.

Un segundo patrón de variación de la chl-a que se pone en evidencia en estos mapas es el relacionado con la mancha blanca ubicada en la parte central de la costa oeste, al sur de Los Alcázares y hasta la isla Perdiguera. Como ya se ha descrito en publicaciones e informes previos (Oosterbaan et al. 2025), y como muestran las mediciones *in situ* (Figura 10), las concentraciones de chl-a en la mancha blanca son significativamente más elevadas que en el resto de la laguna, y lo puede atribuirse a aportes difusos de nutrientes desde el fondo de la laguna en esta misma zona (Oosterbaan et al. 2025).

Los mapas de chl-a muestran también claramente el *bloom* de chl-a del mes de julio asociado al episodio de ola de calor (Figuras 5 y 11), pero indican que, si bien esta variable incrementa en toda la laguna, las concentraciones máximas se producen en las zonas someras de la costa oeste y en la zona de la mancha blanca. Como se ha sugerido anteriormente, estos patrones espaciales podrían estar evidenciando las zonas de descargas continentales ricas en nutrientes a la laguna. El segundo evento de *bloom* fitoplanctónico asociado a la DANA Alice de octubre también queda muy bien captado en los mapas de chl-a y es totalmente coherente con los patrones espaciales descritos a partir de las observaciones de las boyas, que reflejan un incremento de esta variable en las zonas centro y sur, de acuerdo con la distribución de las precipitaciones y las entradas de agua a la laguna. Los mapas también reflejan la inestabilidad de la variable en las semanas posteriores a este evento, descrito a partir de los datos de las boyas (Figura 11), pero ponen en evidencia las mayores concentraciones en la zona costera oeste.

Es bastante relevante que estos productos satelitales obtienen patrones coherentes con los observados a partir de los muestreos *in situ* y de los registros del sistema de monitorización oceanográfica continua, reproduciendo bastante bien los efectos en la laguna de los diferentes eventos climáticos sobre el fitoplancton. La consistencia y complementariedad entre la resolución espacial de los datos satelitales y la alta resolución temporal de los datos obtenidos a partir de mediciones *in situ* refuerza la robustez del sistema de monitorización oceanográfica del proyecto BELICH.

3.4. Turbidez e irradiancia PAR

En la Figura 12 se muestran las variaciones temporales de la turbidez de la columna de agua en unidades FTU obtenidas a partir de los datos emitidos por las boyas y landers del sistema de monitorización. Las series temporales de esta variable, y variables relacionadas (coeficiente de atenuación de la luz, K_d , y el % de radiación PAR superficial que alcanza el fondo, % I_0), muestran claramente los efectos de los principales eventos climáticos que han actuado en 2025 sobre la laguna:

- 1) Los eventos de precipitaciones de marzo causaron intensos y frecuentes pulsos de turbidez del agua, con máximos superiores a 8 FTU, pero que no causaron una elevación de los valores basales de turbidez, que permanecieron similares a los registrados en el periodo enero-febrero (< 1 FTU), en el que no se registraron eventos de precipitaciones destacables. Estos pulsos se observaron principalmente en las zonas norte (boya A) y centro (boya B) de la laguna, y parecen estar más relacionados con resuspensión y/o aportes continentales, que con el desarrollo fitoplanctónico, dada la escasa respuesta de la chl-a a este evento en estas localidades (Figura 12). Sin embargo, los mapas satelitales pusieron en evidencia que en algunos días de este periodo (p. ej. 21 y 25 de marzo; Anexo III) se produce un incremento de la turbidez localizado en la zona más somera de la costa noroccidental, que sí se encuentra relacionado con un aumento de la chl-a esos mismos días, siguiendo el mismo patrón de variación espacial (Anexo III, 7.3.2). Como se ha comentado en el apartado anterior, se desconoce el origen de esta alteración local de la masa de agua.
- 2) A partir de mayo, y hasta mitad de agosto se produjo una tendencia suave de incremento de la turbidez hasta valores que varían entre 2 y 3 FTU, que es coherente con la tendencia igualmente creciente de la chl-a en el mismo periodo (Figura 11).
- 3) En octubre, a consecuencia de la DANA Alice, tuvo lugar un nuevo episodio de aumento de la turbidez en la laguna, de mayor intensidad que el episodio estival anterior. Los valores variaron principalmente entre 2 y 4 FTU, pero se registraron valores muy extremos, hasta 9 FTU, principalmente localizados en la zona sur, que es dónde se desplazó y concentró la entrada masiva de agua continental cargada de sedimentos durante el episodio de la DANA (IEO-CSIC,

- 2025c). La combinación de una elevada carga de sedimentos y la proliferación de fitoplancton (ver apartado anterior) explica la mayor intensidad de este episodio de turbidez.
- 4) Tras la DANA, la turbidez del agua tendió a disminuir, pero mantuvo una elevada variabilidad hasta final del año 2025, sobre todo en la zona sur (Figura 12). Esta variabilidad es similar a las fluctuaciones de la chl-a observadas en este mismo periodo (Figura 11).

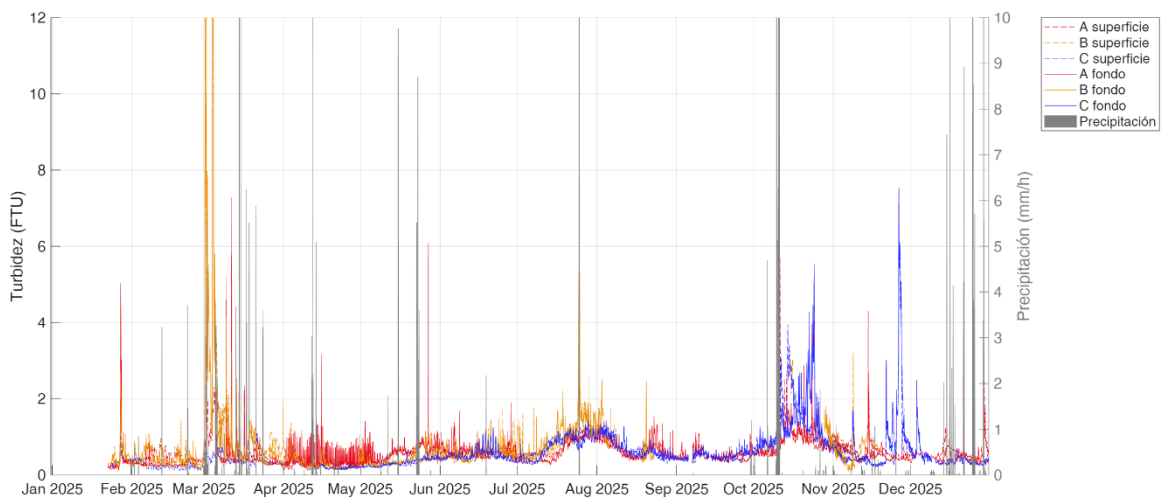


Figura 12: Series temporales de turbidez registradas por las boyas y landers de monitoreo continuo en las estaciones A (rojo), B (amarillo) y C (azul), distinguiendo superficie (línea continua) y fondo (línea discontinua) del año 2025. En gris se muestran las precipitaciones registradas por la estación meteorológica (Estación 4).

Como muestran las series temporales del coeficiente de atenuación de la luz (K_d) y el % de radiación PAR en fondo (%I₀), la sucesión de los eventos a lo largo de 2025, descritos en éste y anteriores apartados, se traduce en una tendencia de disminución de la transparencia del agua con importantes repercusiones en la disponibilidad de luz en el fondo (Figuras 13 y 14). El K_d pasa de valores medios de $0,3 \text{ m}^{-1}$ los primeros meses del año pasó a más de 5 m^{-1} en el último trimestre, lo que representa un cambio gradual de aguas transparentes a aguas típicamente turbias. Esto a su vez se refleja en una tendencia de disminución del porcentaje de irradiancia superficial en el fondo, llegando a alcanzar valores limitantes para el crecimiento de los productores primarios bentónicos (5-10 %I₀), especialmente en las zonas centro y sur (boyas B y C). Particularmente críticos son los periodos que coinciden con los eventos de la ola de



calor (finales de julio) y la DANA Alice, con valores de %lo por debajo de 5%. En el caso de la DANA Alice, estos valores tan críticos se mantuvieron durante casi tres semanas en las zonas centro y sur de la laguna, lo que implica condiciones de estrés lumínico que pueden llegar a ser adversas para el desarrollo de los macrófitos bentónicos. Este tipo situaciones, solo se han producido en la laguna desde 2016 en eventos extremos como la sopa verde (2016-2017), la DANA de 2019 y el *bloom* fitoplanctónico de 2021, a partir del momento en que el K_d superó el valor de 5 m^{-1} (Figuras 13 y 15).

Si se compara con años anteriores, el patrón de variación temporal descrito para la turbidez del agua y la disponibilidad de irradiancia PAR a lo largo de 2025 se observa igualmente a partir de 2022, justo el año que aparece la mancha blanca (Figuras 13 y 15). En general, en el periodo 2023-2025 se observa un patrón general de aumento de la turbidez de invierno a otoño, disminuyendo a medida que nos acercamos de nuevo a los meses invernales. Pero además de este patrón estacional general, se observa también una variación interanual con tendencia a intensificarse, tanto la turbidez como la disminución de irradiancia PAR en el fondo. Por tanto, en estos tres últimos años las condiciones de la laguna se han vuelto progresivamente más limitantes para los macrófitos bentónicos que tapizan el fondo de la laguna, indicando un empeoramiento de las condiciones ambientales y del estado del ecosistema lagunar.

Los mapas satelitales (Anexo III), muestran cómo en la zona de la mancha blanca persiste un área de turbidez extrema la mayor parte del año. Es esta área la que presenta las condiciones de mayor limitación de irradiancia en el fondo, lo que explica la desaparición de la vegetación bentónica en esta zona (Oosterbaan et al. 2025). Durante la ola de calor de julio los efectos más intensos sobre la limitación de luz siguen siendo más intensos en la zona ocupada por la mancha blanca (Anexo III), pero se extiende hacia el resto de la laguna, principalmente en la zona central, lo que es coherente con la información recibida de las boyas oceanográficas (Figuras 12 y 14). Durante el evento de la DANA Alice en octubre, los mapas muestran una amplia área con limitación de luz severa, especialmente en la zona centro y sur, lo que también es coherente con la información proporcionada por los sensores de las boyas oceanográficas. Como se aprecia en los mapas esta situación fue bastante frecuente en los meses de octubre y noviembre, como muestra la elevada variabilidad de los datos de chl-a y turbidez obtenidos por las boyas en esos meses (Figuras 11 y 12). Estos



resultados demuestran que las observaciones realizadas a partir de los datos proporcionados por las boyas oceanográficas en tres puntos concretos de la laguna (A, B y C) son totalmente representativos de lo que está ocurriendo en el resto de la laguna, al menos en respuesta a eventos climáticos más significativos y relevantes para el ecosistema. Esto no significa que no haya fenómenos y procesos más locales que no son registrados por los sensores de las boyas, pero éstos tienen escasa repercusión a escala lagunar. En cualquier caso, la información de alta resolución temporal procedente de las localizaciones de las boyas y la que proporcionan los mapas de alta resolución espacial de chl-a y turbidez son totalmente complementarias y nos dan una idea muy completa del impacto de cualquier tipo de cambio o perturbación en el ecosistema lagunar.

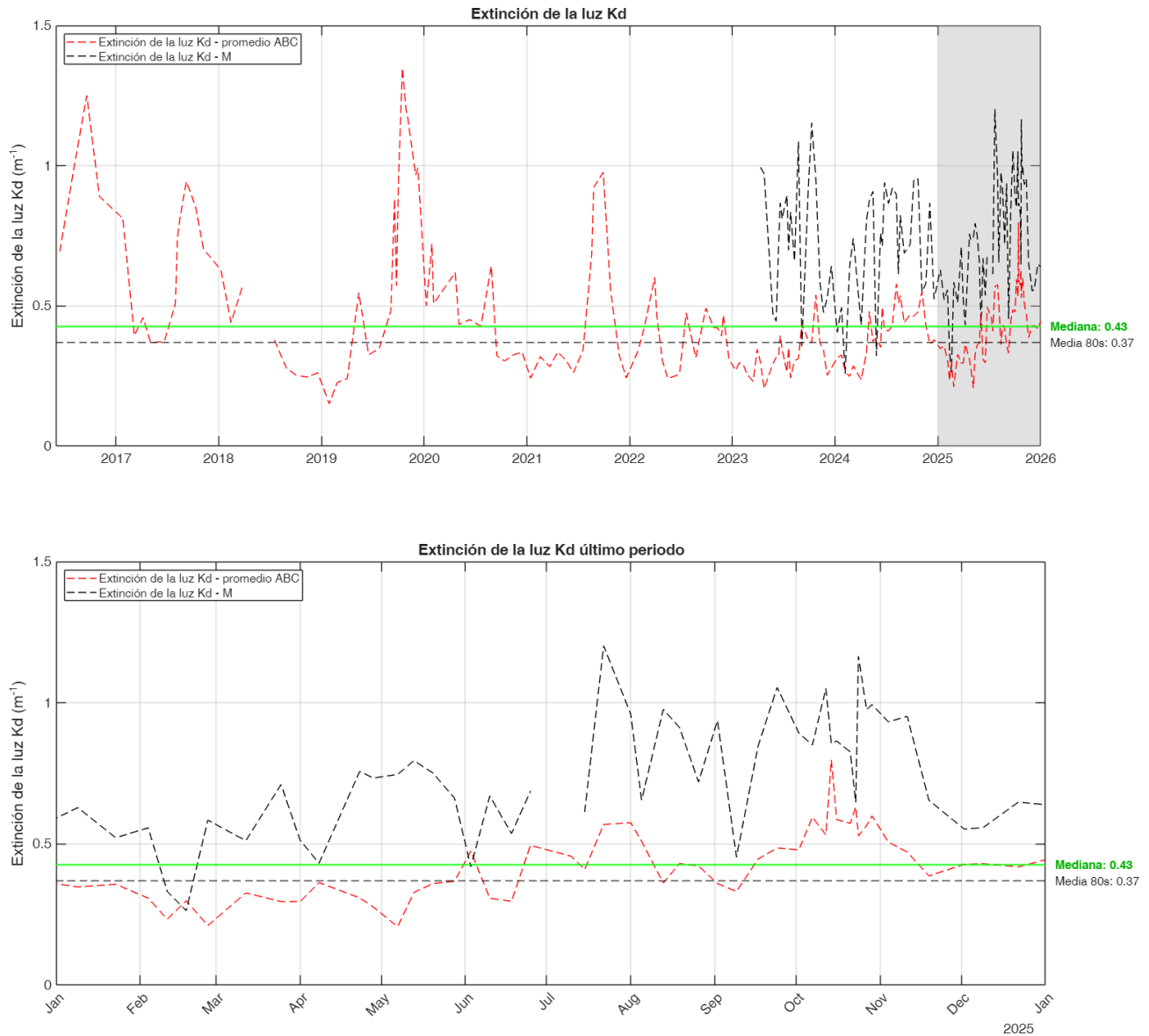


Figura 13: Coeficiente de extinción de la luz a partir de los datos obtenidos en los muestreos del proyecto DMMEM y BELICH en las estaciones de muestreo A, B, C y M. En la parte superior se muestra la serie desde 2016 y en la parte inferior el último año. Se muestra la media del coeficiente de extinción de la luz medida en la laguna en la década de 1980 (línea discontinua negra) y la mediana del periodo analizado (2016-2025) (línea verde)

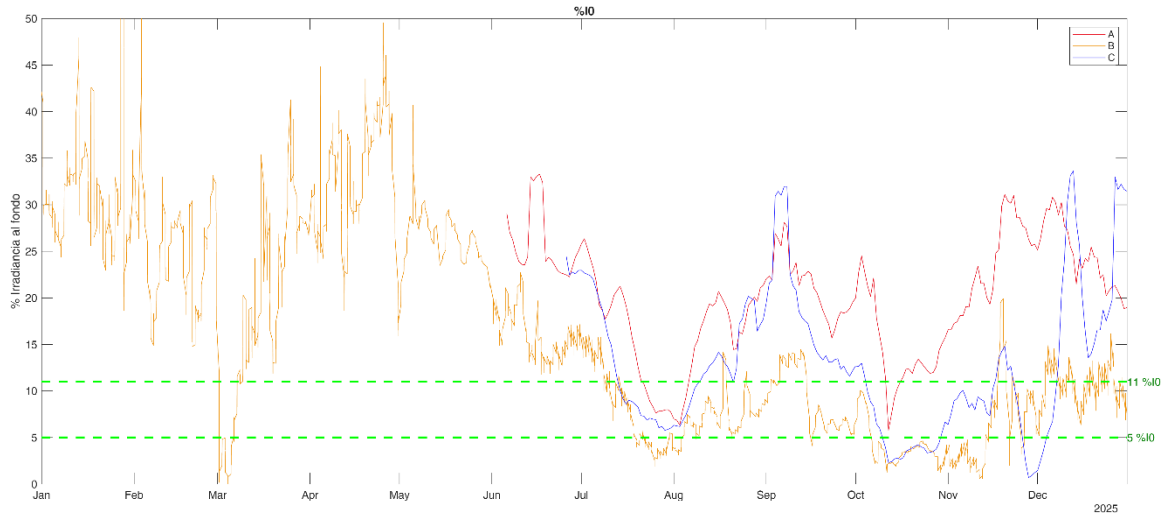


Figura 14: Datos de porcentaje de irradiancia que llega al fondo registrado por las estaciones de monitoreo continuo en las estaciones A (rojo), B (amarillo) y C (azul). En líneas discontinuas verdes se muestran los límites del 5% y 11% de porcentaje de irradiancia.

Tabla 6: Valores mínimos y máximos de extinción de la luz por año medidos durante los muestreos in situ.

| Extinción de luz K_d (m^{-1}) | | 4 m profundidad | | | |
|-------------------------------------|-----------|-----------------|------|------|------|
| Año | Estación | Media | Std | Min | Max |
| 2016 | Invierno | --- | --- | --- | --- |
| | Primavera | --- | --- | --- | --- |
| | Verano | 1,12 | 0,19 | 0,98 | 1,25 |
| | Otoño | 0,89 | 0,00 | 0,89 | 0,89 |
| | Anual | 0,95 | 0,23 | 0,69 | 1,25 |
| 2017 | Invierno | 0,60 | 0,30 | 0,39 | 0,81 |
| | Primavera | 0,40 | 0,05 | 0,37 | 0,46 |
| | Verano | 0,75 | 0,18 | 0,51 | 0,94 |
| | Otoño | 0,78 | 0,11 | 0,70 | 0,86 |
| | Anual | 0,63 | 0,22 | 0,37 | 0,94 |
| 2018 | Invierno | 0,55 | 0,10 | 0,44 | 0,63 |
| | Primavera | | | | |
| | Verano | 0,33 | 0,07 | 0,28 | 0,38 |
| | Otoño | 0,25 | 0,01 | 0,25 | 0,26 |
| | Anual | 0,38 | 0,15 | 0,25 | 0,63 |
| 2019 | Invierno | 0,19 | 0,05 | 0,15 | 0,23 |
| | Primavera | 0,37 | 0,16 | 0,24 | 0,55 |
| | Verano | 0,59 | 0,20 | 0,35 | 0,88 |
| | Otoño | 1,10 | 0,16 | 0,95 | 1,35 |
| | Anual | 0,69 | 0,39 | 0,15 | 1,35 |
| 2020 | Invierno | 0,58 | 0,13 | 0,50 | 0,72 |
| | Primavera | 0,50 | 0,10 | 0,43 | 0,62 |



| | | | | | |
|------|-----------|------|------|------|------|
| | Verano | 0,46 | 0,16 | 0,32 | 0,64 |
| | Otoño | 0,32 | 0,02 | 0,30 | 0,33 |
| | Anual | 0,47 | 0,14 | 0,30 | 0,72 |
| 2021 | Invierno | 0,28 | 0,04 | 0,24 | 0,32 |
| | Primavera | 0,30 | 0,04 | 0,26 | 0,34 |
| | Verano | 0,73 | 0,29 | 0,34 | 0,98 |
| | Otoño | 0,37 | 0,16 | 0,24 | 0,56 |
| | Anual | 0,45 | 0,26 | 0,24 | 0,98 |
| 2022 | Invierno | 0,46 | 0,13 | 0,34 | 0,60 |
| | Primavera | 0,31 | 0,09 | 0,24 | 0,47 |
| | Verano | 0,43 | 0,10 | 0,32 | 0,49 |
| | Otoño | 0,40 | 0,06 | 0,31 | 0,47 |
| | Anual | 0,39 | 0,10 | 0,24 | 0,60 |
| 2023 | Invierno | 0,28 | 0,04 | 0,23 | 0,35 |
| | Primavera | 0,42 | 0,07 | 0,34 | 0,51 |
| | Verano | 0,44 | 0,05 | 0,39 | 0,51 |
| | Otoño | 0,45 | 0,13 | 0,32 | 0,64 |
| | Anual | 0,40 | 0,10 | 0,23 | 0,64 |
| 2024 | Invierno | 0,34 | 0,04 | 0,26 | 0,38 |
| | Primavera | 0,47 | 0,10 | 0,29 | 0,58 |
| | Verano | 0,56 | 0,05 | 0,50 | 0,66 |
| | Otoño | 0,52 | 0,07 | 0,42 | 0,60 |
| | Anual | 0,48 | 0,10 | 0,26 | 0,66 |
| 2025 | Invierno | 0,35 | 0,06 | 0,26 | 0,42 |
| | Primavera | 0,42 | 0,05 | 0,26 | 0,54 |
| | Verano | 0,54 | 0,09 | 0,36 | 0,73 |
| | Otoño | 0,61 | 0,10 | 0,45 | 0,81 |
| | Anual | 0,50 | 0,13 | 0,26 | 0,81 |

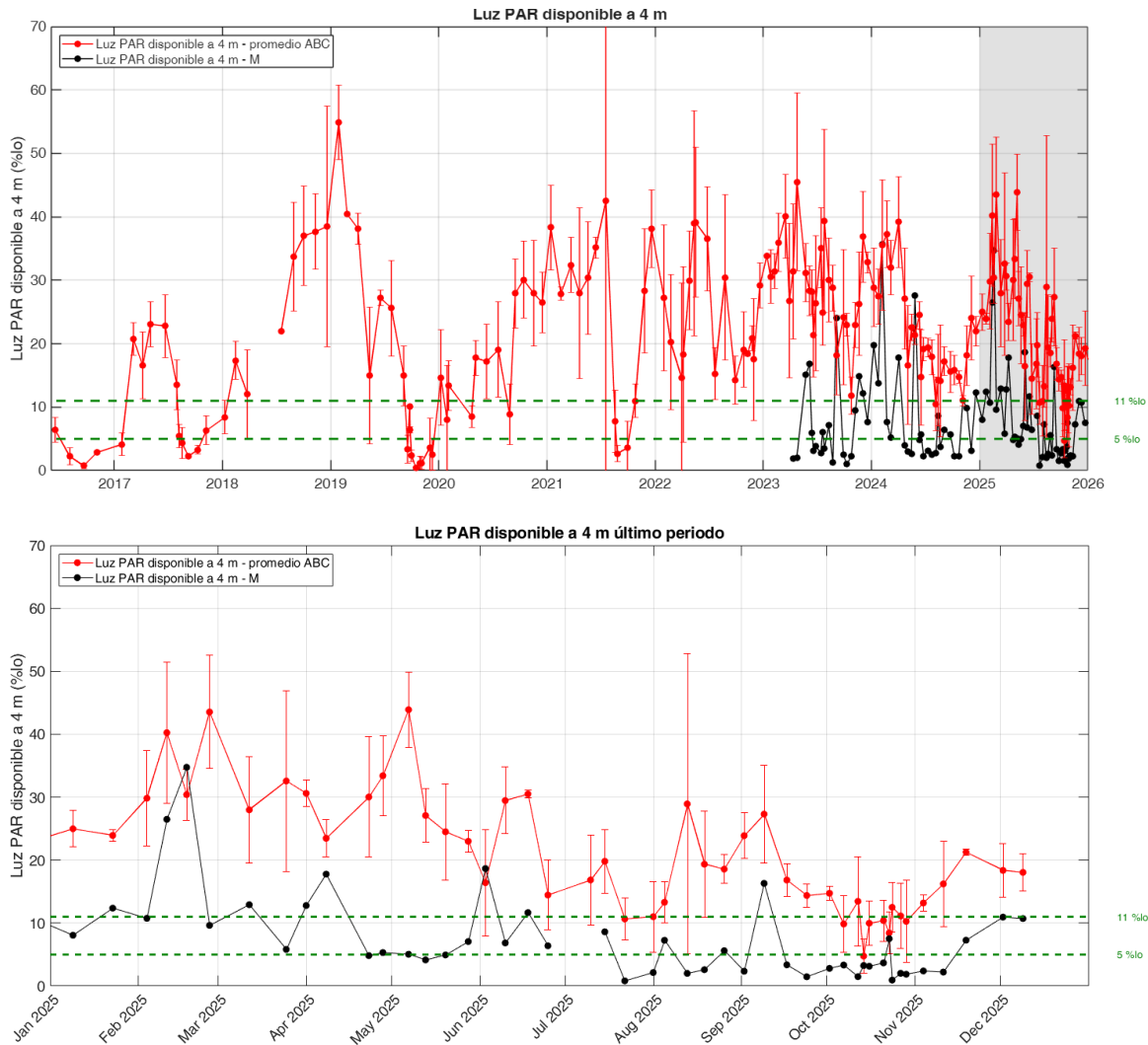


Figura 15: Evolución del porcentaje de radiación PAR que atraviesa la superficie del agua y que alcanza la profundidad de 4 metros. La línea roja muestra la media de la luz PAR que alcanza los 4 m en los puntos de muestreos A, B y C. La línea negra representa la luz PAR disponible a 4 m en la estación M. Las líneas verdes discontinuas representan los niveles de 11% y 5%, críticos para el crecimiento fotosintético de la vegetación bentónica. En la parte superior se muestra la serie desde 2016 y en la parte inferior el último año.

3.5. Oxígeno

Las series temporales del oxígeno disuelto en el Mar Menor muestran un patrón de variación estacional característico, con concentraciones máximas durante el invierno y valores mínimos en el periodo estival, dinámica estrechamente relacionada con la temperatura del agua. Como muestran los datos de esta variable registrada en 2025 y

años anteriores, los eventos climáticos extremos y los *blooms* fitoplanctónicos son las principales causas de alteración de este patrón de variación natural (Figura 16).

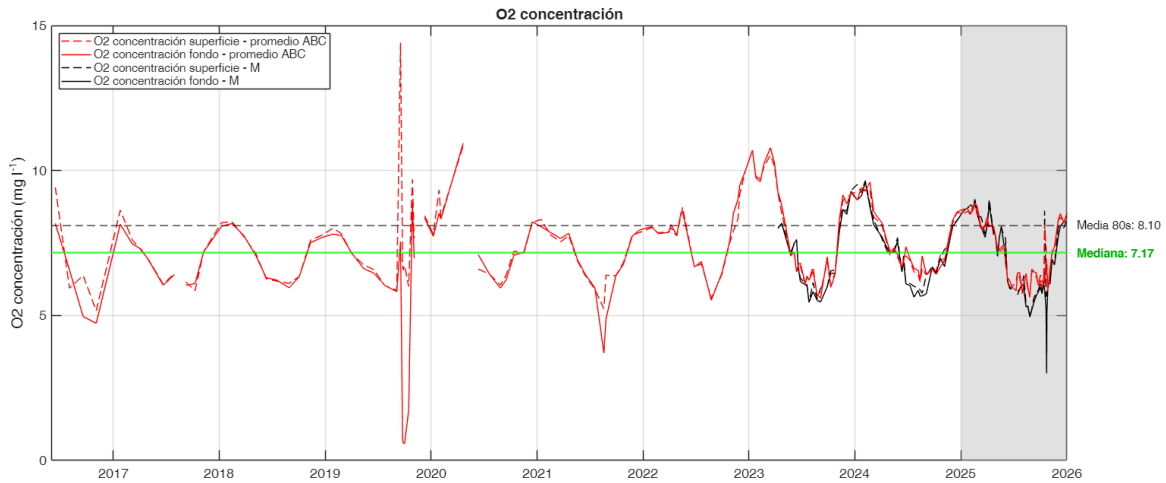


Figura 16: Series temporales promedio de oxígeno disuelto para las capas superficiales (0,5 m; línea continua) y de fondo (entre 4 y 6m dependiendo de la estación, véase Figura 1; línea discontinua) de los muestreos del proyecto DMMEM y BELICH para las estaciones de mu muestreo A, B y C (rojo) y M (negro) de la laguna del Mar Menor.

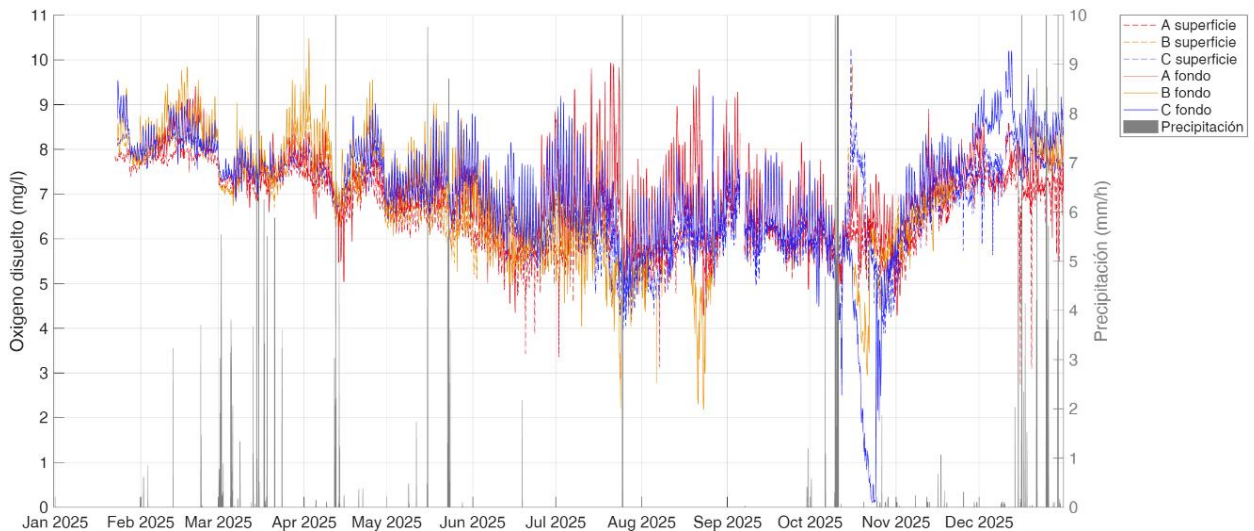


Figura 17: Series temporales de oxígeno disuelto registradas por las boyas y landers de monitoreo continuo en las estaciones A (rojo), B (amarillo) y C (azul), distinguiendo superficie (línea continua) y fondo (línea discontinua) del año 2025. En azul se muestran las precipitaciones registradas por la estación meteorológica (Estación 4).



Al igual que se ha descrito para otras variables analizadas (salinidad, chl-a, turbidez), los eventos de precipitaciones de marzo no fueron suficientemente intensos como para causar alteración alguna de los niveles de oxígeno propios de esta época del año (Figura 17). Las concentraciones de oxígeno disuelto se mantuvieron elevadas y estables, con valores característicos del periodo invernal. Los promedios se situaron en torno a 8,5 mg/l (Tabla 7.), sin diferencia entre superficie y fondo.

Por el contrario, la ola de calor de julio y la DANA Alice, si fueron perturbaciones suficientemente intensas como para causar desviaciones sustanciales del patrón de variación estacional característico del oxígeno disuelto. Respecto a la primera, el exceso de temperatura hizo que las concentraciones medias estivales se situasen por debajo de la mediana de la serie histórica, especialmente en superficie, alcanzando valores inferiores al percentil 25 (5,41 frente a 6,48 mg/l). Pero las mayores desviaciones se produjeron en la zona central de la laguna, donde se localiza la boya B, donde se registraron, con muy elevada frecuencia, variaciones diarias de oxígeno por debajo de 4 mg/l durante casi todo el mes de julio (Figura 17), coincidiendo con el *bloom* fitoplanctónico registrado en esta misma época (Figura 11). Puntualmente en algunos días se alcanzaron valores inferiores a 1 mg/l (Figura 17). Las temperaturas extremas favorecen los procesos de eutrofización al acelerar el crecimiento del fitoplancton, lo que incrementa la producción de materia orgánica en el sistema. Cuando esta materia orgánica muere o se degrada, las bacterias la descomponen mediante procesos de remineralización que consumen grandes cantidades de oxígeno disuelto. Este consumo se ve además intensificado por el aumento de la actividad metabólica bacteriana asociado a las altas temperaturas. Paralelamente, el incremento de la temperatura reduce la solubilidad del oxígeno en el agua, limitando aún más su disponibilidad. Como consecuencia, los niveles de oxígeno pueden descender hasta condiciones próximas a la hipoxia, generando una situación altamente estresante para los organismos marinos.

Pero sin duda, la perturbación más significativa de los niveles de oxígeno en la laguna fue la que se registró en la zona sur a consecuencia de la DANA Alice, a partir de los sensores de la boya C. Este evento ocurrido los días 9-11 de octubre (Agencia Estatal de Meteorología, 2025) supuso la entrada a la laguna de agua continental cargada de sedimentos y nutrientes. Como se ha explicado en el apartado de la salinidad de este



informe, este aporte masivo de agua dulce causó cierto grado de estratificación de la columna de agua que fue más persistente en la zona sur de la laguna. Los días posteriores, la elevada carga de materia orgánica y nutrientes de los aportes continentales y el desarrollo fitoplanctónico causaron el agotamiento progresivo y lineal de la concentración de oxígeno hasta niveles de anoxia (0 mg/l; Figura 17). Esta alteración no se limitaba a la localización de la boya, sino que se extendía sobre una amplia superficie del fondo de la cubeta sur, tal y como se pudo comprobar diariamente mediante la realización de perfiles de CTD en una red de puntos (IEO-CSIC, 2025c), demostrando una vez más que las medidas puntuales obtenidas por los sensores de la boya son representativas de lo que ocurre en el resto de la laguna.

Este episodio fue finalmente localizado y transitorio, tuvo una duración aproximada de 7 días y fue interrumpido por la acción de vientos de componente oeste que rompieron la estratificación y favoreciendo la mezcla vertical y reoxigenación de la columna de agua. Como sabemos de episodios de años anteriores, este fue un episodio potencialmente crítico para la biota del ecosistema lagunar, lo que motivó que el equipo del IEO-CSIC declarase un estado de alarma temprana y se estableciese un gabinete de crisis con las autoridades responsables para el seguimiento en tiempo real de la evolución del fenómeno. Durante este evento se realizaron diversas observaciones de migraciones de especies de peces bentónicos a las capas superficiales de la columna de agua, tal y como se observó en las etapas previas a los eventos de mortalidad de 2019 y 2021, lo que indicaba el elevado riesgo de que se desencadenase un nuevo episodio de mortalidad masiva, en caso de que la situación de anoxia en el fondo hubiera continuado. Se puso en evidencia el potencial del sistema de monitorización en tiempo real para la detección temprana de posibles episodios disruptivos para el ecosistema lagunar.

Tabla 7: Valores medios, mínimos (Min) y máximos (Max) de oxígeno disuelto por año medidos en superficie (0,5 m) y fondo (4-6 m dependiendo de la estación. Figura 1), durante los muestreos. Std: desviación estándar.

| Oxígeno disuelto (mg/l) | | Superficie | | | | Fondo | | | |
|-------------------------|-----------|------------|-----|-----|------|-------|-----|-----|------|
| Año | Estación | Media | Std | Min | Max | Media | Std | Min | Max |
| 2016 | Invierno | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| | Primavera | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| | Verano | 6,2 | 0,3 | 5,9 | 6,4 | 5,8 | 1,1 | 5,0 | 6,6 |
| | Otoño | 5,2 | 0,0 | 5,2 | 5,2 | 4,7 | 0,0 | 4,7 | 4,7 |
| | Anual | 6,7 | 1,9 | 5,2 | 9,4 | 6,1 | 1,6 | 4,7 | 8,2 |
| 2017 | Invierno | 8,1 | 0,7 | 7,6 | 8,6 | 7,8 | 0,5 | 7,5 | 8,1 |
| | Primavera | 6,7 | 0,6 | 6,1 | 7,2 | 6,7 | 0,6 | 6,0 | 7,3 |
| | Verano | 6,3 | 0,2 | 6,2 | 6,5 | 6,2 | 0,3 | 6,0 | 6,4 |
| | Otoño | 6,5 | 0,9 | 5,9 | 7,2 | 6,6 | 0,8 | 6,1 | 7,2 |
| | Anual | 6,9 | 0,9 | 5,9 | 8,6 | 6,8 | 0,7 | 6,0 | 8,1 |
| 2018 | Invierno | 8,1 | 0,3 | 7,7 | 8,2 | 8,0 | 0,2 | 7,8 | 8,2 |
| | Primavera | 6,7 | 0,6 | 6,3 | 7,1 | 6,7 | 0,5 | 6,3 | 7,1 |
| | Verano | 6,1 | 0,1 | 6,1 | 6,2 | 6,1 | 0,2 | 6,0 | 6,2 |
| | Otoño | 7,2 | 0,8 | 6,3 | 7,8 | 7,2 | 0,7 | 6,3 | 7,7 |
| | Anual | 7,2 | 0,9 | 6,1 | 8,2 | 7,1 | 0,8 | 6,0 | 8,2 |
| 2019 | Invierno | 7,9 | 0,1 | 7,8 | 8,0 | 7,8 | 0,0 | 7,8 | 7,8 |
| | Primavera | 6,8 | 0,3 | 6,6 | 7,1 | 6,7 | 0,4 | 6,5 | 7,1 |
| | Verano | 7,9 | 3,6 | 5,9 | 14,4 | 4,2 | 3,2 | 0,6 | 7,5 |
| | Otoño | 7,7 | 1,4 | 6,0 | 9,7 | 5,3 | 3,9 | 0,6 | 8,9 |
| | Anual | 7,6 | 2,1 | 5,9 | 14,4 | 5,5 | 3,0 | 0,6 | 8,9 |
| 2020 | Invierno | 8,5 | 0,8 | 7,8 | 9,3 | 8,2 | 0,4 | 7,7 | 8,5 |
| | Primavera | 8,7 | 3,0 | 6,6 | 10,9 | 9,0 | 2,7 | 7,1 | 10,9 |
| | Verano | 6,3 | 0,2 | 6,0 | 6,4 | 6,2 | 0,2 | 5,9 | 6,4 |
| | Otoño | 7,5 | 0,6 | 7,1 | 8,2 | 7,5 | 0,6 | 7,1 | 8,2 |
| | Anual | 7,7 | 1,5 | 6,0 | 10,9 | 7,6 | 1,4 | 5,9 | 10,9 |
| 2021 | Invierno | 7,9 | 0,4 | 7,5 | 8,3 | 7,9 | 0,2 | 7,7 | 8,1 |
| | Primavera | 7,0 | 0,7 | 6,4 | 7,8 | 7,1 | 0,7 | 6,4 | 7,8 |
| | Verano | 6,0 | 0,5 | 5,2 | 6,4 | 5,2 | 1,2 | 3,7 | 6,4 |
| | Otoño | 7,5 | 0,6 | 6,8 | 7,9 | 7,5 | 0,6 | 6,8 | 8,0 |
| | Anual | 7,0 | 0,9 | 5,2 | 8,3 | 6,8 | 1,3 | 3,7 | 8,1 |
| 2022 | Invierno | 7,9 | 0,1 | 7,8 | 8,0 | 7,9 | 0,1 | 7,8 | 8,1 |
| | Primavera | 7,9 | 0,8 | 6,7 | 8,7 | 7,9 | 0,8 | 6,7 | 8,6 |
| | Verano | 6,3 | 0,6 | 5,6 | 6,8 | 6,3 | 0,7 | 5,5 | 6,9 |
| | Otoño | 8,6 | 1,0 | 7,5 | 10,0 | 8,9 | 0,9 | 7,6 | 10,0 |
| | Anual | 7,8 | 1,1 | 5,6 | 10,0 | 7,9 | 1,1 | 5,5 | 10,0 |
| 2023 | Invierno | 10,2 | 0,4 | 9,7 | 10,7 | 10,2 | 0,5 | 9,6 | 10,8 |
| | Primavera | 7,4 | 0,9 | 6,6 | 8,9 | 7,3 | 0,9 | 6,6 | 8,7 |
| | Verano | 6,2 | 0,4 | 5,7 | 6,6 | 6,1 | 0,5 | 5,2 | 6,8 |
| | Otoño | 8,0 | 1,3 | 6,1 | 9,2 | 8,0 | 1,4 | 6,1 | 9,3 |



| | | | | | | | | | |
|------|-----------|-----|-----|------|------|-----|-----|-----|------|
| | Anual | 7,8 | 1,7 | 5,7 | 10,7 | 7,8 | 1,7 | 5,2 | 10,8 |
| 2024 | Invierno | 9,4 | 0,2 | 9,2 | 9,7 | 9,3 | 0,4 | 8,8 | 9,8 |
| | Primavera | 7,2 | 0,4 | 6,6 | 8,0 | 7,2 | 0,5 | 6,6 | 8,1 |
| | Verano | 6,4 | 0,2 | 6,1 | 6,7 | 6,5 | 0,3 | 6,0 | 6,8 |
| | Otoño | 7,4 | 0,8 | 6,5 | 8,5 | 7,4 | 0,9 | 6,3 | 8,5 |
| | Anual | 7,4 | 1,0 | 6,1 | 9,4 | 7,4 | 1,0 | 6,0 | 9,4 |
| 2025 | Invierno | 8,5 | 0,3 | 8,0 | 8,8 | 8,5 | 0,3 | 8,0 | 8,9 |
| | Primavera | 7,2 | 0,9 | 6,0 | 8,3 | 7,3 | 0,8 | 6,0 | 8,3 |
| | Verano | 6,1 | 0,2 | 5,45 | 6,3 | 6,0 | 0,3 | 5,5 | 6,3 |
| | Otoño | 6,8 | 0,8 | 5,9 | 8,3 | 6,6 | 0,8 | 5,7 | 8,4 |
| | Anual | 7,0 | 1,0 | 5,5 | 8,8 | 6,9 | 1,1 | 5,5 | 8,9 |

3.6. pH

El pH del agua del Mar Menor mostró durante 2025 un patrón de variación anual condicionado por los cambios estacionales y por episodios puntuales de perturbación ambiental, principalmente el aumento de temperatura y eventos de precipitaciones.

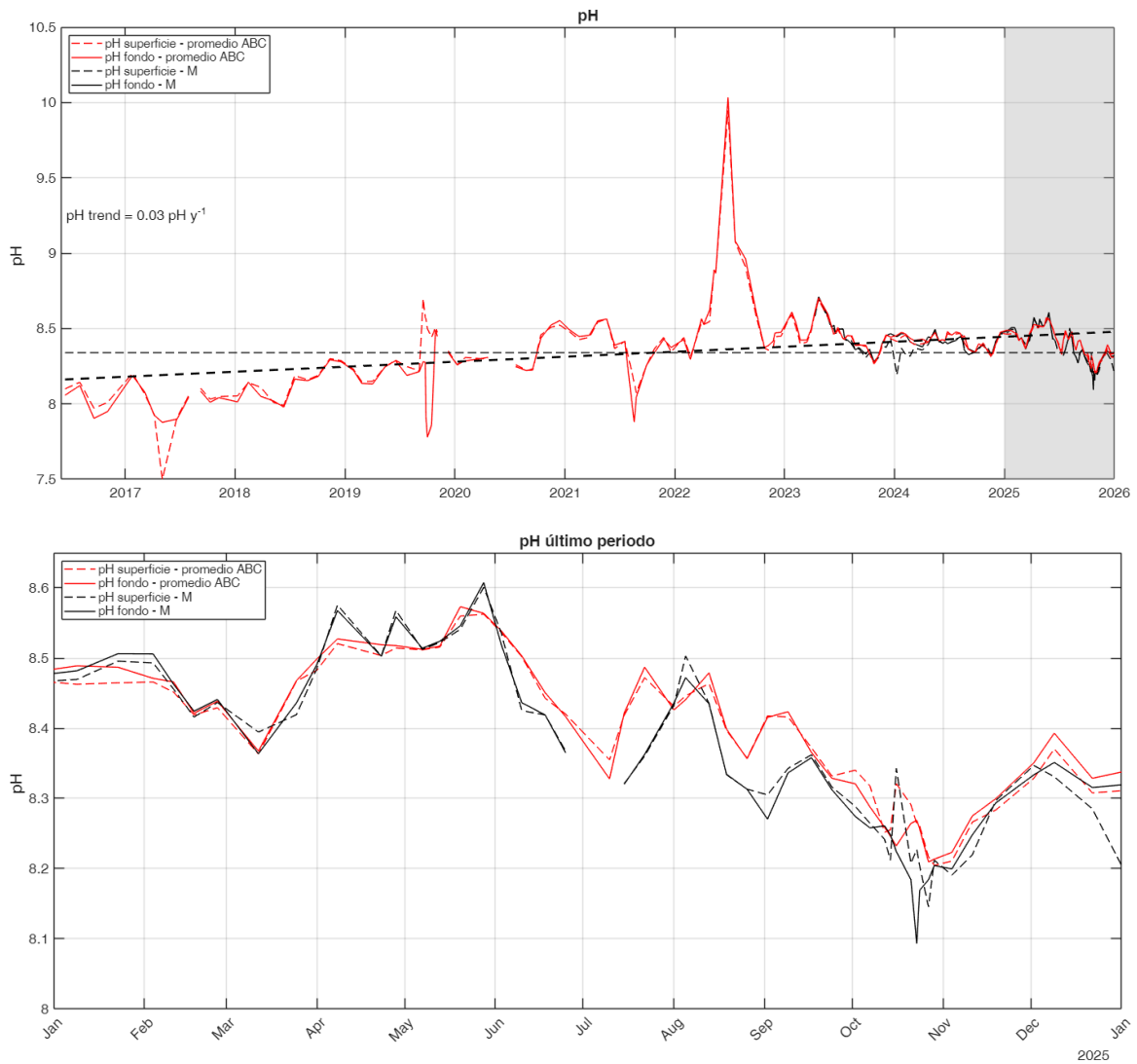


Figura 18: Valores de pH superficial (0,5 m; línea continua) y pH del fondo (entre 4 y 6m dependiendo de la estación; línea discontinua) durante los muestreos in situ del proyecto DMMEM y BELICH en las estaciones A, B, C y M (ver Figura 1). En la parte superior se muestra la serie desde 2016 y en la parte inferior el último año.

Tabla 8: Valores medios, mínimos (Min) y máximos (Max) de pH por año medidos en superficie (0,5 m) y fondo (4-6m dependiendo de la estación. Figura 1), durante los muestreos. Std: desviación estándar.

| pH | | Superficie | | | | Fondo | | | |
|------|-----------|------------|------|------|------|-------|------|------|-------|
| Año | Estación | Media | Std | Min | Max | Media | Std | Min | Max |
| 2016 | Invierno | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| | Primavera | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| | Verano | 8,06 | 0,12 | 7,97 | 8,14 | 8,01 | 0,15 | 7,90 | 8,12 |
| | Otoño | 8,01 | 0,00 | 8,01 | 8,01 | 7,95 | 0,00 | 7,95 | 7,95 |
| | Anual | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 2017 | Invierno | 8,13 | 0,10 | 8,06 | 8,20 | 8,13 | 0,08 | 8,08 | 8,19 |
| | Primavera | 7,78 | 0,24 | 7,50 | 7,93 | 7,90 | 0,02 | 7,88 | 7,93 |
| | Verano | 8,08 | 0,03 | 8,06 | 8,10 | 8,07 | 0,03 | 8,05 | 8,09 |
| | Otoño | 8,04 | 0,01 | 8,03 | 8,05 | 8,03 | 0,02 | 8,01 | 8,04 |
| | Anual | 7,98 | 0,20 | 7,50 | 8,20 | 8,02 | 0,10 | 7,88 | 8,19 |
| 2018 | Invierno | 8,10 | 0,04 | 8,05 | 8,14 | 8,07 | 0,07 | 8,01 | 8,14 |
| | Primavera | 8,00 | 0,01 | 7,99 | 8,01 | 8,00 | 0,03 | 7,98 | 8,02 |
| | Verano | 8,17 | 0,02 | 8,16 | 8,19 | 8,16 | 0,01 | 8,15 | 8,16 |
| | Otoño | 8,26 | 0,06 | 8,19 | 8,30 | 8,25 | 0,06 | 8,18 | 8,29 |
| | Anual | 8,14 | 0,11 | 7,99 | 8,30 | 8,13 | 0,11 | 7,98 | 8,29 |
| 2019 | Invierno | 8,19 | 0,06 | 8,15 | 8,23 | 8,18 | 0,06 | 8,14 | 8,22 |
| | Primavera | 8,23 | 0,07 | 8,15 | 8,29 | 8,22 | 0,08 | 8,13 | 8,29 |
| | Verano | 8,46 | 0,21 | 8,22 | 8,70 | 8,18 | 0,15 | 7,92 | 8,28 |
| | Otoño | 8,45 | 0,06 | 8,35 | 8,51 | 8,18 | 0,34 | 7,78 | 8,49 |
| | Anual | 8,38 | 0,17 | 8,15 | 8,70 | 8,19 | 0,20 | 7,78 | 8,49 |
| 2020 | Invierno | 8,29 | 0,02 | 8,26 | 8,31 | 8,28 | 0,01 | 8,26 | 8,28 |
| | Primavera | 8,30 | 0,00 | 8,30 | 8,30 | 8,31 | 0,00 | 8,31 | 8,31 |
| | Verano | 8,24 | 0,02 | 8,22 | 8,26 | 8,23 | 0,01 | 8,22 | 8,25 |
| | Otoño | 8,50 | 0,03 | 8,46 | 8,52 | 8,50 | 0,06 | 8,44 | 8,55 |
| | Anual | 8,34 | 0,12 | 8,22 | 8,52 | 8,33 | 0,12 | 8,22 | 8,55 |
| 2021 | Invierno | 8,45 | 0,03 | 8,43 | 8,48 | 8,47 | 0,03 | 8,45 | 8,49 |
| | Primavera | 8,49 | 0,11 | 8,37 | 8,56 | 8,50 | 0,10 | 8,39 | 8,56 |
| | Verano | 8,22 | 0,15 | 8,07 | 8,42 | 8,15 | 0,23 | 7,88 | 8,41 |
| | Otoño | 8,38 | 0,05 | 8,35 | 8,44 | 8,38 | 0,05 | 8,34 | 8,43 |
| | Anual | 8,37 | 0,14 | 8,07 | 8,56 | 8,36 | 0,20 | 7,88 | 8,56 |
| 2022 | Invierno | 8,43 | 0,11 | 8,31 | 8,54 | 8,43 | 0,14 | 8,30 | 8,57 |
| | Primavera | 8,96 | 0,58 | 8,53 | 9,95 | 8,99 | 0,60 | 8,53 | 10,03 |
| | Verano | 8,85 | 0,25 | 8,58 | 9,07 | 8,88 | 0,25 | 8,61 | 9,08 |
| | Otoño | 8,40 | 0,04 | 8,36 | 8,45 | 8,43 | 0,04 | 8,38 | 8,48 |
| | Anual | 8,66 | 0,41 | 8,31 | 9,95 | 8,69 | 0,43 | 8,30 | 10,03 |
| 2023 | Invierno | 8,49 | 0,08 | 8,40 | 8,59 | 8,51 | 0,08 | 8,41 | 8,62 |
| | Primavera | 8,54 | 0,08 | 8,47 | 8,69 | 8,55 | 0,09 | 8,47 | 8,71 |
| | Verano | 8,42 | 0,04 | 8,36 | 8,45 | 8,42 | 0,04 | 8,37 | 8,45 |

| | | | | | | | | | |
|------|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | Otoño | 8,36 | 0,07 | 8,27 | 8,44 | 8,37 | 0,07 | 8,28 | 8,46 |
| | Anual | 8,45 | 0,10 | 8,27 | 8,69 | 8,46 | 0,10 | 8,28 | 8,71 |
| 2024 | Invierno | 8,39 | 0,03 | 8,36 | 8,43 | 8,44 | 0,03 | 8,40 | 8,47 |
| | Primavera | 8,43 | 0,03 | 8,39 | 8,48 | 8,43 | 0,02 | 8,42 | 8,48 |
| | Verano | 8,42 | 0,05 | 8,34 | 8,46 | 8,42 | 0,05 | 8,34 | 8,48 |
| | Otoño | 8,38 | 0,05 | 8,31 | 8,47 | 8,39 | 0,05 | 8,33 | 8,48 |
| | Anual | 8,41 | 0,04 | 8,31 | 8,48 | 8,42 | 0,04 | 8,33 | 8,48 |
| 2025 | Invierno | 8,44 | 0,03 | 8,37 | 8,47 | 8,45 | 0,04 | 8,37 | 8,49 |
| | Primavera | 8,51 | 0,05 | 8,41 | 8,57 | 8,51 | 0,05 | 8,40 | 8,57 |
| | Verano | 8,40 | 0,04 | 8,33 | 8,46 | 8,39 | 0,05 | 8,32 | 8,47 |
| | Otoño | 8,27 | 0,05 | 8,20 | 8,36 | 8,26 | 0,05 | 8,20 | 8,38 |
| | Anual | 8,39 | 0,10 | 8,20 | 8,57 | 8,39 | 0,11 | 8,20 | 8,57 |

Durante la primera mitad de 2025, el pH presentó valores medios en torno a 8,5, coherentes con la tendencia lineal de aumento que experimenta esta variable desde el inicio de la serie temporal en 2016.

A partir de junio se interrumpe la tendencia de aumento del pH y se inicia una tendencia descendente hasta alcanzar valores medios mínimos de 8,2 a finales de octubre (Figura 18). A partir de este punto, el pH vuelve a experimentar una tendencia ascendente hasta alcanzar valores medios de 8,4 en diciembre. Este patrón de variación anual es en cierta medida similar al observado en los años anteriores 2023 y 2024, pero la tendencia de disminución estival registrada en 2025 es mucho más marcada y alcanza valores mínimos de pH considerablemente más bajos que en dichos años previos. Este patrón de descenso del pH en época estival es coherente con el incremento de la temperatura y sus efectos en el desarrollo fitoplanctónico y las tasas de remineralización. Es bien conocido el efecto de acidificación asociado a los procesos de eutrofia, debido al incremento de la productividad y la descomposición de la materia orgánica. Este efecto parece ser más intenso en 2025, lo cual es consistente con la mayor intensidad y persistencia de los eventos de *bloom* fitoplanctónico que se suceden a lo largo del periodo entre mayo y noviembre. Igualmente, consistente es la observación de los valores medios de pH más bajos (8,1) en el fondo de la zona ocupada por la mancha blanca, que es donde se registraron los valores medios de chl-a más elevados de los últimos años (10-15 mg/m³; Figura 10).

3.7. Nutrientes inorgánicos disueltos

Las concentraciones de nitrato en la laguna se han mantenido relativamente estables desde 2023 (Figura 19), con concentraciones que no han excedido en promedio los 2 μM , muy alejadas de los picos de concentración obtenidos en los periodos previos que precedieron o sucedieron a los blooms fitoplanctónicos que derivaron en la sopa verde y los eventos de hipoxia. Sin embargo, durante el mes de octubre de 2025 se obtuvieron concentraciones de nitrato por encima de 5 μM , sin duda asociados a los aportes de agua continental debidos a la DANA. No se encontraron incrementos sustanciales de amonio, fosfato ni silicato durante este episodio. Estos resultados sugieren que la DANA aportó fundamentalmente nitrato, pero también que el fósforo pasa a estar rápidamente incorporado y/o inmovilizado en determinados compartimentos del sistema (partículas, productores primarios, sedimentos), dado su elevado contenido en los aportes terrígenos característico de este tipo de eventos (Ruiz et al. 2020). Previamente, en 2025 se obtuvieron concentraciones algo más elevadas de amonio; estos picos de amonio durante la primera parte del año son habituales y en todo caso menores a los producidos antes de 2023. La concentración de fosfato en 2025 fue en promedio inferior a 0.4 μM , que es el valor normalmente encontrado desde 2018 salvo los picos puntuales comentados.

En promedio, la concentración de nitrato y fosfato en 2025 fue algo mayor en la estación M (mancha blanca) que en el resto, algo que no se encontró tan claramente en 2023 y 2024. El silicato es el único de los nutrientes disueltos en la laguna que muestra un marcado ciclo estacional desde el comienzo de los muestreos in situ, con máximos acusados en verano y mínimos en invierno. En 2025 se obtuvo un patrón de variabilidad anual similar aunque, como ocurrió en 2024, el máximo anual de silicato fue el menor obtenido en toda la serie. Este ciclo estacional parece estar relacionado con los cambios anuales en temperatura y salinidad, e indicaría que la concentración de silicato tiende a aumentar al aumentar la salinidad y la temperatura, probablemente debido a la mayor evaporación y menor aporte de agua continental. Sin embargo, el descenso en el pico de silicato producido en 2025 no puede ser explicado por este mecanismo, ya que el máximo anual de salinidad fue mayor que en años precedentes (2020-2023). Por tanto, estas diferencias en el máximo de silicato podrían atribuirse a cambios en el ciclo biogeoquímico de la sílice (por cambios en la

actividad de las comunidades microbianas) o a diferencias en su concentración en los aportes continentales.

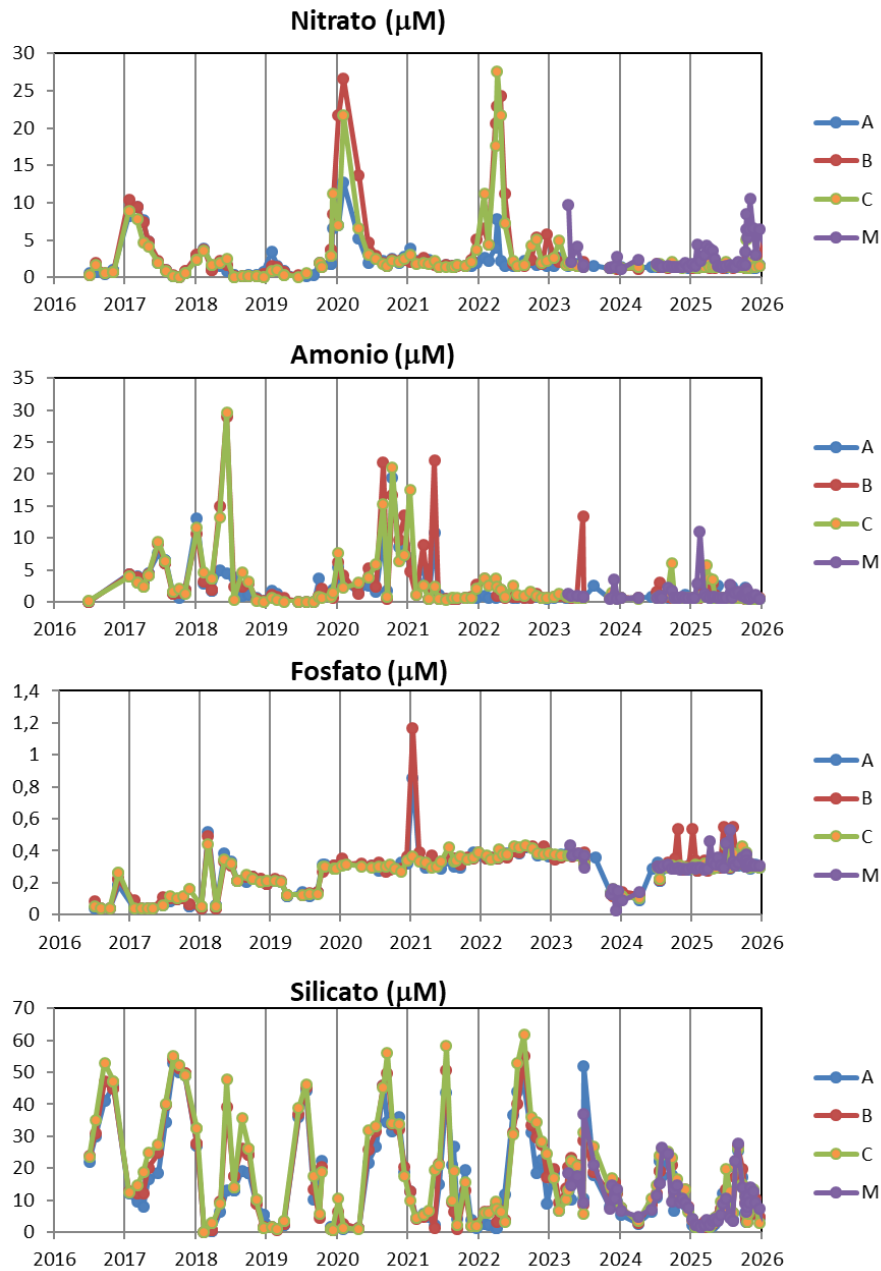


Figura 19: Concentración de nutrientes inorgánicos disueltos en las estaciones de muestreo del Mar Menor.

3.8. Comunidades del fitoplancton



El año 2025 se ha caracterizado por presentar unas abundancias medias de fitoplancton (considerando sólo el plancton mayor a 5 micras que es el analizado al microscopio) relativamente elevadas ($2,24 \cdot 10^6$ cél L^{-1}), bastante mayores a las obtenidas en años precedentes ($1,03 \cdot 10^6$ cél L^{-1} en 2024 y $2,30 \cdot 10^6$ cél L^{-1} en 2023) y sólo algo menores a las obtenidas en los periodos anuales de mayor productividad ($2,94 \cdot 10^6$ cél L^{-1} en 2016). Esta alta abundancia no se debió tanto a elevadas abundancias de diatomeas (que fue el grupo de fitoplancton más abundante durante los episodios previos que derivaron en hipoxia) sino principalmente a que las abundancias de dinoflagelados y sobre todo de flagelados fueron mayores en promedio a las registradas en años anteriores (Figura 20). Este aumento de dinoflagelados y flagelados fue especialmente notorio durante el pico de abundancia de fitoplancton que se produjo en julio y agosto, así como tras el episodio de la DANA Alice en octubre. Por tanto, la composición del fitoplancton durante los periodos de alta concentración de clorofila en 2025 cambió sustancialmente respecto a la composición obtenida durante los picos de fitoplancton de 2016, 2019 y 2021. Este hecho indica que la comunidad de fitoplancton podría estar cambiando en la laguna, algo que no obstante debe ser contrastado con un análisis más completo de la serie temporal.

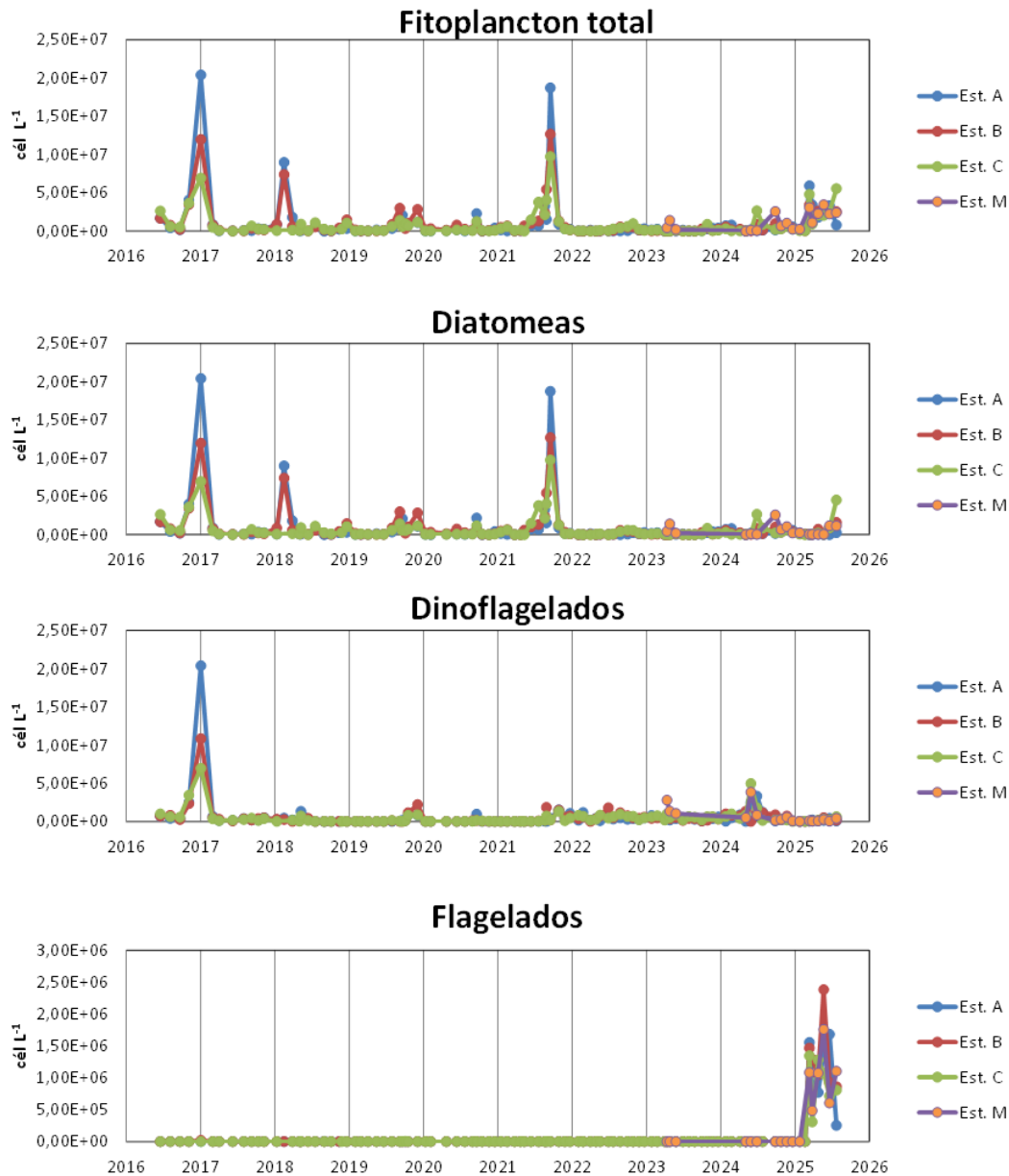


Figura 20: Abundancias de fitoplancton total y de los principales grupos taxonómicos analizados al microscopio óptico (n° células $^{-1}$) en las estaciones de muestreo del Mar Menor.

3.9 Comunidad de mesozooplancton

Se ha actualizado la serie temporal de datos de abundancia de mesozooplancton (fracción del zooplancton que mide entre 0.2 y 20 mm) hasta julio de 2025 (incluyendo los datos históricos, desde 2016).

En general, la comunidad de mesozooplancton está compuesta principalmente por copépodos, que presentaron máximos de abundancia durante el verano de 2018 (116.176 individuos·m⁻³) y una relativa disminución y estabilización de la misma a partir de 2019. Sin embargo, recientemente, en julio de 2023 y 2024, se observaron drásticas disminuciones de su abundancia (<10 individuos·m⁻³), posiblemente asociadas a la presión predatoria ejercida por la gran proliferación de medusas de la especie *Cotylorhiza tuberculata* durante la época estival (Fernández Alías y Pérez-Rufaza, 2024). El resto de grupos característicos de la laguna (huevos de pez, gasterópodos y larvas de decápodo) presentaron valores menores a 1.000 individuos·m⁻³ en todos los muestreos.

En la estación A (Figura 21), los copépodos fueron el grupo dominante, representando entre el 70-100% de la abundancia relativa en la mayoría de las muestras. Los nauplios de copépodo fueron también relativamente abundantes, especialmente hasta el verano de 2017. Otros grupos como las larvas de decápodo, huevos y larvas de peces, y poliquetos se presentaron esporádicamente, alcanzando valores más notorios en abril-mayo 2017 y en julio y septiembre de 2019. La abundancia total osciló entre valores de ~20 a 62.000 individuos·m⁻³. Se observaron picos importantes en noviembre de 2017, julio de 2018 y abril de 2019, coincidiendo con el predominio casi exclusivo de copépodos. En contraste, se registraron mínimos en abril-mayo 2017 y julio y septiembre de 2019.

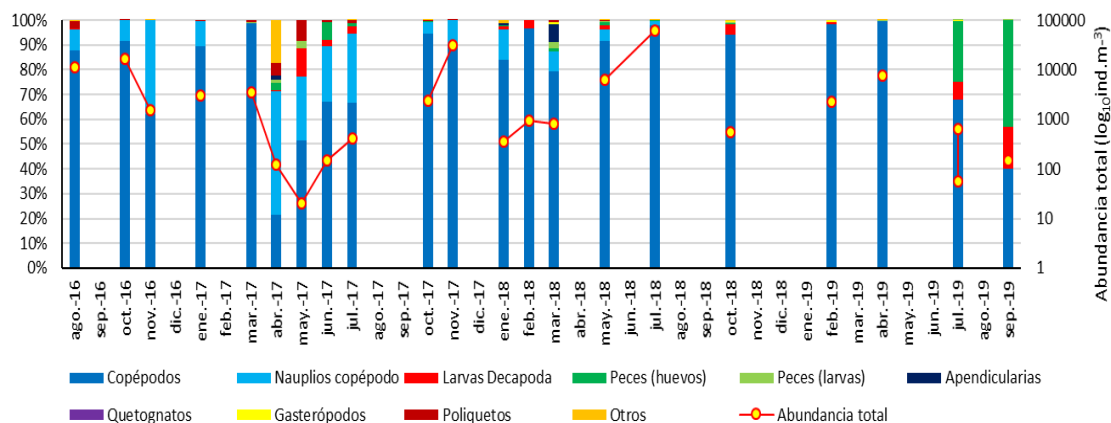


Figura 21. Abundancia total (\log_{10} individuos·m⁻³, línea roja, eje derecho) y relativa (% , eje izquierdo) de los taxones identificados en la estación A del Mar Menor.

En la estación B (Figura 22), al igual que en la estación A, los copépodos dominaron la comunidad en casi todos los muestreos, con valores generalmente superiores al 70 % y los nauplios fueron asimismo relativamente abundantes hasta principios de 2018. Sin embargo, en B se observó una mayor diversidad relativa, con registros de picos de abundancia de larvas de decápodo, larvas y huevos de peces y gasterópodos, sobre todo en los veranos de 2019-2021 y nuevamente en 2024-2025. En algunos meses (julio de 2019, junio y julio de 2024), la contribución de estos grupos llegó a reducir la proporción relativa de copépodos hasta valores inferiores al 40%, lo que evidencia fluctuaciones comunitarias notorias. La abundancia total presentó amplias variaciones, oscilando entre ~ 8 y 120.000 individuos·m⁻³. Los máximos se registraron a mediados de 2016, 2017 y 2018, coincidiendo con una marcada dominancia de copépodos. Los mínimos (valores <8 individuos·m⁻³) aparecieron en los meses de verano de 2023 y 2024, aumentando la contribución relativa de otros taxones: decápodos, huevos de peces y gasterópodos.

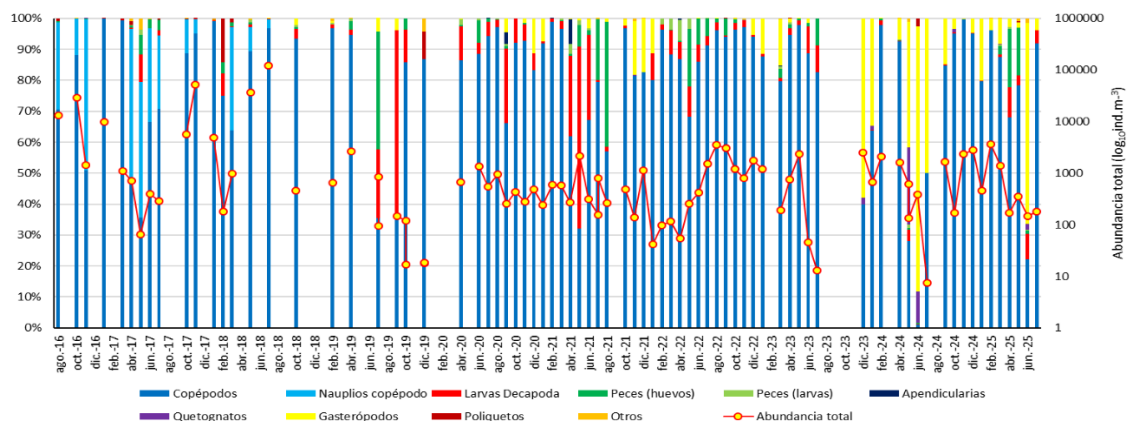


Figura 22. Abundancia total (\log_{10} individuos·m⁻³, línea roja, eje derecho) y relativa (% , eje izquierdo) de los taxones identificados en la estación B del Mar Menor.

En la estación C (Figura 23), la comunidad estuvo fuertemente dominada por copépodos y sus larvas (nauplios), representando en conjunto más del 90% de la abundancia relativa, en la mayoría de los muestreos. El resto de grupos tuvieron una representación más discreta, aunque algunos de ellos incrementaron notablemente su abundancia relativa de manera puntual, destacando especialmente las larvas de decápodo, huevos de peces y gasterópodos en julio y septiembre de 2019. La abundancia total varió entre valores de ~ 77 y 134.000 individuos·m⁻³. Los máximos de

abundancia se detectaron en noviembre 2017 y julio de 2019, coincidiendo con una mayor dominancia de copépodos. Los mínimos ocurrieron en mayo de 2017 y julio-septiembre de 2019, periodos que también mostraron mayor contribución de grupos secundarios.

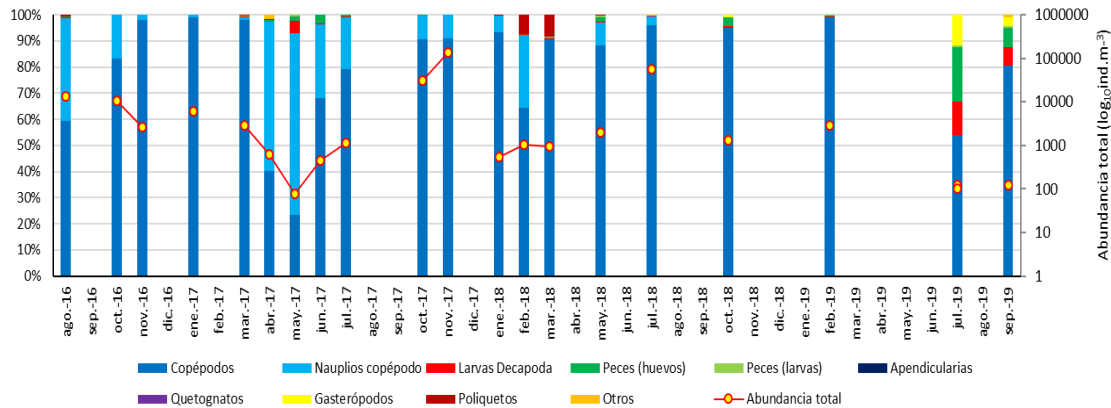


Figura 23 . Abundancia total (\log_{10} individuos m^{-3} , línea roja, eje derecho) y relativa (% , eje izquierdo) de los taxones identificados en la estación C del Mar Menor.

En la estación M (Figura 24), los copépodos dominaron la comunidad (>70 %) en la mayoría de los muestreos. Sin embargo, al igual que en la estación B, en julio 2024 la abundancia de copépodos fue muy baja y su contribución cayó abruptamente (<10 %), dando paso a una mayor representación de gasterópodos, quetognatos, larvas de decápodo y huevos de peces, que en conjunto superaron el 90% de la abundancia relativa. Asimismo, en mayo y junio de 2025, las larvas de decápodo alcanzaron proporciones notables (>40%) coincidiendo con una disminución de la abundancia de copépodos. La abundancia total varió entre ~3 y 4.400 individuos m^{-3} . Los picos más altos se registraron en abril y diciembre de 2024, y el mínimo absoluto ocurrió en julio 2024, coincidiendo con valores mínimos de copépodos.

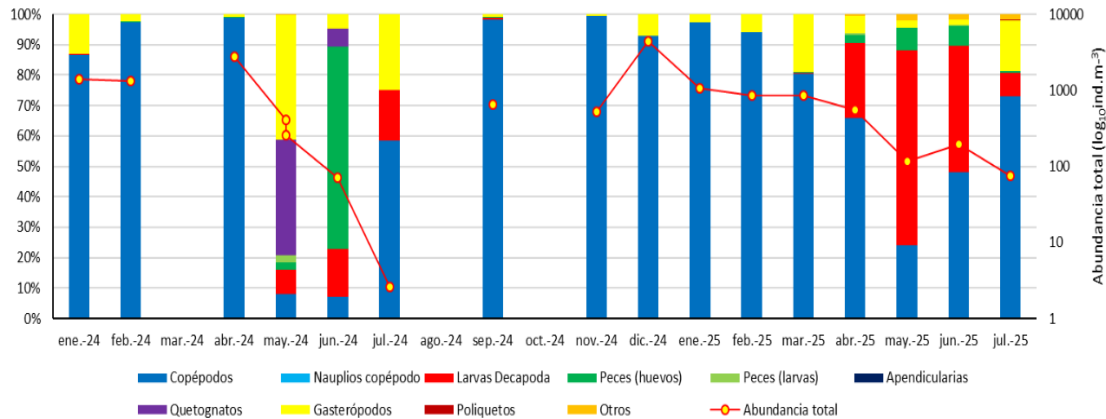


Figura 24. Abundancia total (\log_{10} individuos·m⁻³, línea roja, eje derecho) y relativa (% , eje izquierdo) de los taxones identificados en la estación M del Mar Menor.

3.10 Balance hídrico entre el Mar Menor y el Mediterráneo

Gracias a la instalación del sistema de monitorización oceanográfica, que consta entre sus componentes de dos landers situados en las golas de El Estacio y Marchamalo (Figura 1), podemos hacer un primer balance anual del caudal de agua intercambiado entre el Mar Menor y el Mediterráneo adyacente. Esta información resulta crucial para interpretar holísticamente la respuesta del Mar Menor a fenómenos extremos dada la potencial influencia de este proceso en las corrientes y dinámica de las diferentes variables ambientales de la laguna.

El intercambio de agua entre el Mar Menor y el Mar Mediterráneo mostró durante 2025 una marcada periodicidad, con ciclos horarios más o menos regulares de entrada y salida, con alteraciones puntuales coincidentes con episodios meteorológicos más o menos extremos, por ejemplo en el caso de la DANA Alice (véase IEO-CSIC, 2025c).

En promedio, en 2025, en la gola de Marchamalo (Figura 25) se registró una salida de $136,7 \times 10^6$ m³ y una entrada de $217,8 \times 10^6$ m³ de agua, lo que supone un balance neto de $+81,1 \times 10^6$ m³, es decir, una entrada de agua desde el Mediterráneo hacia la laguna. Por el contrario, en la gola de El Estacio (Figura 26) se registró una salida de $963,8 \times 10^6$ m³ y una entrada de $730,9 \times 10^6$ m³, con un balance neto de $-232,9 \times 10^6$ m³, equivalente a una notable salida de agua desde el Mar Menor hacia el Mediterráneo. En conjunto, el volumen total combinado intercambiado a través de ambas golas fue de $2049,2 \times 10^6$ m³, siendo un 82,7% intercambiado por El Estacio, y el restante 17,3%

por la gola de Marchamalo, confirmando que esta primera gola actúa como el principal punto de conexión hidrodinámica entre ambos sistemas.

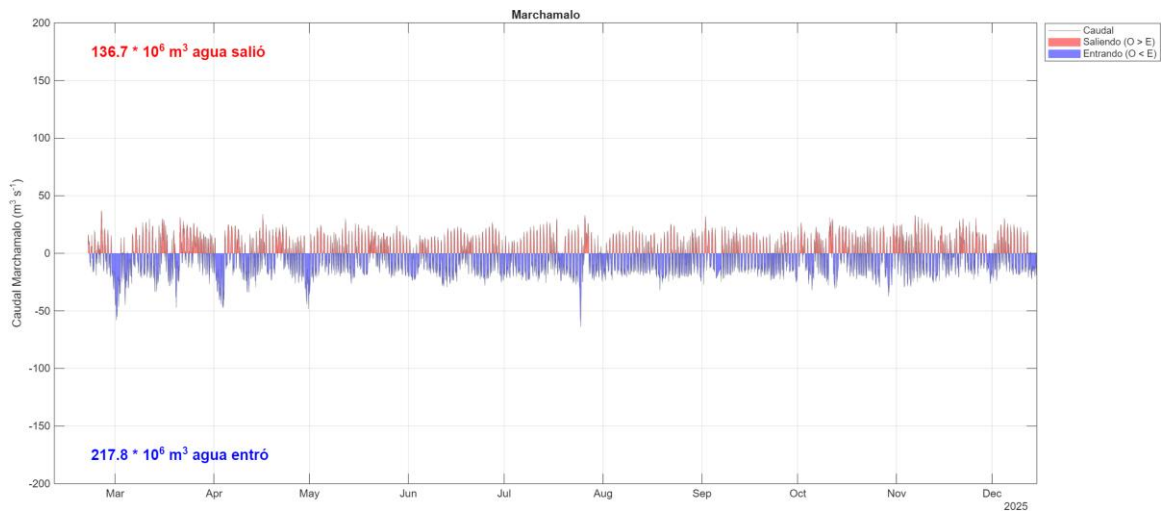


Figura 25 . Entradas (azul) y salidas (rojo) de agua a través de la gola de Marchamalo.

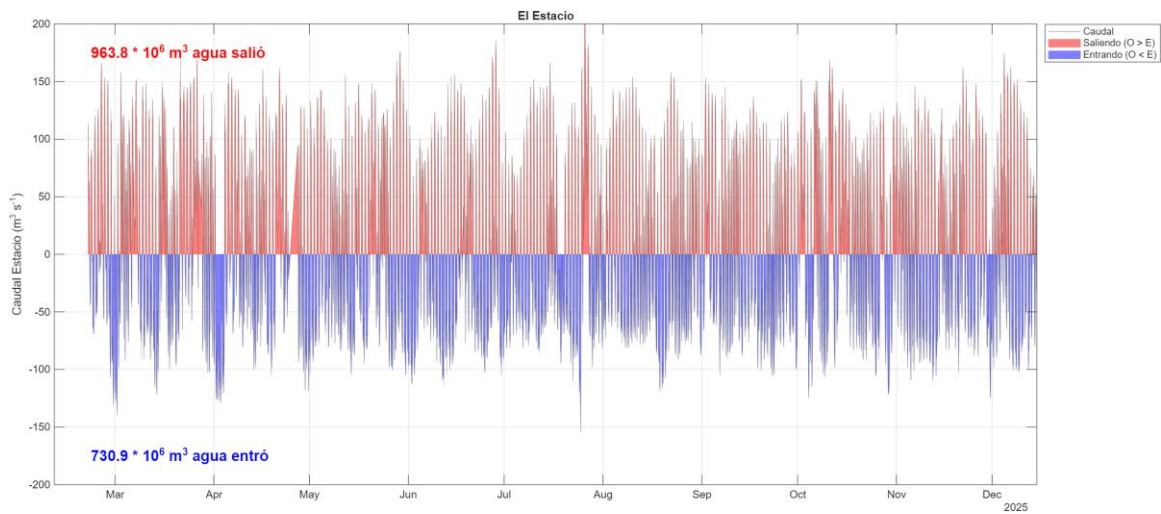


Figura 26. Entradas (azul) y salidas (rojo) de agua a través de la gola de El Estacio.



4. Síntesis y conclusiones



Fotografía OLAS



El estado y dinámica del ecosistema lagunar en el año 2025 estuvo determinado por la sucesión de tres eventos climáticos, que, por orden cronológico, fueron los siguientes:

- (I) episodio de lluvias torrenciales en marzo (IEO-CSIC, 2025a)
- (II) una ola de calor durante los meses de junio y julio (IEO-CSIC, 2025b)
- (III) episodio de la DANA Alice en octubre (IEO-CSIC, 2025c)

Evento I: precipitaciones de marzo

Los datos disponibles muestran que el episodio de precipitaciones de marzo de 2025 tuvo un escaso impacto en las condiciones del Mar Menor, sin apenas alteración de la dinámica y trayectoria de la laguna tras el periodo invernal. Lo más destacable fue la caída de 1,5 unidades de salinidad en toda la laguna hasta valores en torno a 42, con valores más bajos y fluctuantes en la zona norte debido a la influencia de las corrientes con agua Mediterránea entrante propias de esta zona. Esta perturbación no tuvo implicaciones en otras variables clave (clorofila, oxígeno) y los valores de salinidad empezaron a mostrar una tendencia ascendente y constante a principios de abril, inmediatamente tras finalizar el periodo de precipitaciones.

Evento II: ola de calor

El análisis de la serie temporal de temperatura a largo plazo, puso en evidencia que el año 2025 se ha situado como el segundo año más cálido registrado en la historia reciente del Mar Menor desde el inicio de las series instrumentales en 1982. Este resultado se enmarca dentro de una tendencia sostenida de aumento de la temperatura en la laguna, que evidencia un proceso de calentamiento progresivo a largo plazo. Este fenómeno, documentado repetidamente en todos los informes publicados, forma parte de un proceso global de cambio climático que afecta no solo al Mar menor sino también al Mediterráneo (Garrabou et al 2022; Orenes-Salazar et al. 2023; Navarro-Martínez 2025). En el caso del ecosistema lagunar, el análisis confirma un incremento sostenido de la temperatura media del Mar Menor a un ritmo de +0,036 °C por año.



En relación al punto anterior, en el periodo estival se produce el segundo evento climático del año, consistente en una importante anomalía térmica positiva que alcanzó la categoría de ola de calor de categoría I (moderada), y que duró un total de 49 días entre el 31 de mayo y el 24 de julio. En términos de días totales e intensidad acumulada, se confirma que 2025 constituye uno de los años más relevantes en cuanto a estrés térmico para el Mar Menor, consolidando así la tendencia de aumento en la duración e impacto de las olas de calor marinas en el sistema lagunar, de acuerdo con los escenarios de cambio climático contemplados para esta región Mediterránea. Asociado a este evento de calentamiento tuvo lugar un incremento de la clorofila en la laguna hasta valores de 7 mg/m³. Estos son valores anormalmente elevados, bastante por encima de la mediana de la serie temporal post-colapso (1,3 mg/m³), únicamente alcanzados durante eventos de desarrollo fitoplanctónico excepcional, como los registrados durante esta última década. Estos valores anómalos se observaron en las partes de la columna de agua más próximas al fondo y llegaron a causar variaciones anómalas del oxígeno en algunas zonas de la laguna (zona central especialmente). Lo anterior justificó la declaración de un estado de alarma temprana ante la posibilidad de evolucionar a una nueva crisis del ecosistema lagunar, situación que no llegó a producirse al interrumpirse el proceso inmediatamente al finalizar la ola de calor. Este evento estival ilustra el potencial del incremento de la temperatura como factor detonante de procesos disruptivos en ausencia de aportes de nutrientes asociados a eventos de precipitación, probablemente mediado por la aceleración de los procesos de remineralización de la materia orgánica dentro de la laguna.

Evento III: DANA Alice

El tercer evento climático significativo fue la DANA Alice de octubre, cuya intensidad y efectos sobre el medio fueron de intensidad notablemente superior a la de los dos eventos anteriores. Estos efectos fueron un rápido y abundante desarrollo fitoplanctónico, como se deduce de los elevados valores de clorofila (> 14 mg/m³), seguido de un agotamiento progresivo de oxígeno hasta valores de anoxia. En esta ocasión el detonante fueron los aportes superficiales masivos de agua continental cargada de sedimentos, nutrientes y materia orgánica, arrastrados desde los terrenos afectados. Los efectos más intensos se localizaron en la costa oeste y sur, de acuerdo



con la distribución de los aportes durante las lluvias y, como demuestran los modelos hidrodinámicos desarrollados por el proyecto BELICH, con los patrones de corrientes de la laguna. En base a los datos disponibles, consideramos que los aportes de aguas subterráneas no tuvieron un papel relevante para explicar los efectos observados y su desarrollo posterior. Se encontraron altas concentraciones de nitrato probablemente debidas atribuibles a estos aportes, que sin embargo no afectaron sustancialmente a las concentraciones de amonio, fosfato ni silicato.

Comparativamente, la intensidad y duración de los efectos de la DANA Alice fueron considerablemente menores a los de eventos extremos similares ocurridos en años anteriores (p.e., riadas de 2017 o la DANA de 2019), pero han puesto en evidencia la importancia de los aportes asociados a estos fenómenos como principal vector de entrada de materiales y nutrientes disueltos en la laguna, que son la causa primaria del proceso de eutrofización que ha llevado a la disrupción y deterioro del ecosistema lagunar.

Alteración de la turbidez y limitación de la disponibilidad de luz

Asociado a los eventos climáticos descritos se producen importantes fluctuaciones y alteraciones de la turbidez de la columna de agua, como muestran tanto los registros en continuo de los sensores oceanográficos como las imágenes de satélite (Figura 12, Anexo 7.3.2). A esto contribuye tanto la resuspensión de sedimentos como la proliferación de fitoplancton, dependiendo de las características específicas de cada evento, y tiene como consecuencia una reducción de la luz disponible en el fondo (Figura 13). La sucesión de los eventos descritos en 2025 causó, de hecho, unas variaciones del coeficiente de extinción de la luz con tendencia claramente creciente desde primavera hasta finales de otoño, que tuvieron como consecuencia un descenso de la disponibilidad de luz en el fondo hacia valores limitantes para el crecimiento de las praderas marinas que colonizan el fondo de la laguna, especialmente acusado en las zonas central y sur. Este patrón se observa también en los dos años anteriores (2023-2024), pero con menor intensidad y duración (Figuras 13 y 14). Estas condiciones podrían suponer un obstáculo para la recuperación de las praderas marinas de *Cymodocea nodosa* en la laguna, pieza clave para la recuperación del ecosistema lagunar (GEAM IEO-CSIC 2025; <https://belich.ieo.csic.es/publicaciones/>).



Comunidades planctónicas

De acuerdo con lo anterior, las comunidades fitoplanctónicas muestran una importante alteración respecto a los dos años anteriores, en los que las abundancias eran visiblemente menores y relativamente más estables. Desde el punto de vista de su composición, se produce una desviación no solo respecto a los años inmediatamente anteriores, sino también respecto a toda la serie histórica, como indica el notable incremento de flagelados.

La biomasa y la abundancia del mesozooplancton han sufrido una gran variabilidad estacional e interanual durante la última década; con valores máximos durante los periodos de "sopa verde" en 2016-2018. Respecto a la composición de las comunidades, el grupo mayoritario durante toda la serie son los copépodos, siendo el componente principal en la dieta de muchas especies comerciales de peces. Sin embargo, a partir de 2023, coincidiendo con la aparición de concentraciones muy elevadas de medusas durante los meses más cálidos, la composición relativa de la comunidad de mesozooplancton se ve alterada, dominando temporalmente los gasterópodos. Un aumento en la frecuencia y/o duración de las olas de calor podría alterar la dinámica del mesozooplancton y los servicios ecosistémicos que proporciona en la laguna.

Mancha blanca

A todo lo anterior hay que destacar el fenómeno de la "mancha blanca", cuya presencia y efectos, no solo persisten en la laguna, sino que, hacia finales de año, su superficie mostró una tendencia creciente. Esta dinámica de expansión arranca tras el paso de la DANA Alice, lo cual es coherente con el hipotético vínculo del fenómeno con la dinámica del nivel freático, aunque este es un tema que alberga enorme complejidad y requiere nuevos estudios específicos que ayuden a comprender el mecanismo (o mecanismos) que lo regula. Obtener este conocimiento es crucial pues, por un lado, será clave para poner el foco en las medidas adecuadas y, por otro lado, en caso de que esta dinámica expansiva se mantenga podría tener consecuencias nefastas para el ecosistema lagunar.

Funcionamiento del sistema de monitorización



Los datos obtenidos ponen en evidencia la capacidad del sistema de monitorización oceanográfica instalado y puesto en marcha en enero de 2025 para registrar de forma continua y en tiempo casi real el impacto de cada uno de los eventos sobre la laguna y su evolución posterior. Esto nos está permitiendo por primera vez una monitorización y caracterización de las respuestas del ecosistema con un nivel de resolución y precisión que hasta la fecha ningún sistema de monitorización nos había permitido contemplar. Esto supone un salto cualitativo y cuantitativo muy significativo, con gran impacto en el conocimiento científico de los procesos que regulan el ecosistema lagunar, así como la posibilidad de detectar los efectos adversos incluso en etapas tempranas, lo que nos permite anticiparnos y actuar en situaciones con alto riesgo de desembocar en nuevas crisis del ya alterado ecosistema lagunar. En este sentido, el nuevo sistema de monitorización cumple con los objetivos establecidos en el proyecto BELICH, y demuestra un gran potencial como herramienta real y eficaz de apoyo a la gestión, a la vez de altas capacidades para mejorar el conocimiento científico, lo que tendrá especial repercusión en la calidad de los modelos ecosistémicos, los sistemas de alarma temprana y la capacidad de predicción.

Conclusiones

- Los datos obtenidos por el sistema de monitorización integral del proyecto BELICH instalado en enero de 2025 han permitido por primera vez registrar con gran precisión y fiabilidad los efectos de la sucesión de eventos climáticos a diferentes niveles del ecosistema lagunar.
- Los resultados indican que 2025 ha sido un año anómalo para el ecosistema lagunar respecto a la aparente estabilidad de estos últimos años. Si bien no se alcanzaron consecuencias para el ecosistema tan graves como las causadas por eventos más extremos de años anteriores, si se han experimentado desviaciones de su estado de considerable estrés ambiental que, de persistir podrían haber desembocado en una nueva crisis ambiental.
- Del conocimiento adquirido en 2025 hay que destacar el papel de las olas de calor y los episodios de precipitaciones extremas como mecanismos disruptores del ecosistema, especialmente en el escenario actual de cambio climático acelerado y, en particular, por su demostrada



interacción con los procesos de eutrofización que adolece el ecosistema lagunar desde hace décadas.

- Es muy urgente la aplicación de medidas que reduzcan la vulnerabilidad de la cuenca vertiente a estos eventos y reduzcan su impacto en la laguna, que es lo que hace al ecosistema más vulnerable y reactivo a los efectos del cambio climático.
- Es igualmente urgente profundizar en el conocimiento de los mecanismos implicados en la aparición de la mancha blanca, cuya expansión podría desembocar en un nuevo colapso del ecosistema lagunar.



5. Bibliografía

Belando, M. D., Bernardeau-Esteller, J., Paradinas, I., Ramos-Segura, A., García-Muñoz, R., García-Moreno, P., Marín-Guirao, L., & Ruiz, J. M. (2021). Long-term coexistence between the macroalga *Caulerpa prolifera* and the seagrass *Cymodocea nodosa* in a Mediterranean lagoon. *Aquatic Botany*, 173, 103415.

Doney, S. C., Fabry, V. J., Feely, R. A., & Kleypas, J. A. (2009). Ocean acidification: the other CO₂ problem. *Annual Review of Marine Science*, 1, 169-192.

Fernández Alias, A. & Pérez-Rufaza, A. (2024). Actualización del estado de las poblaciones de escifozoos en el Mar Menor (22 de agosto de 2024). Disponible en: <https://canalmarmenor.carm.es/monitorizacion/seguimiento-de-medusas/>

Hobday, A. J., Alexander, L. V., Perkins, S. E., Smale, D. A., Straub, S. C., Oliver, E. C. J., Benthuisen, J. A., Burrows, M. T., Donat, M. G., Feng, M., Holbrook, N. J., Moore, P. J., Scannell, H. A., Sen Gupta, A., & Wernberg, T. (2016). A hierarchical approach to defining marine heatwaves. *Progress in Oceanography*, 141, 227-238.

IEO-CSIC (2025a). Informe sobre los efectos del episodio de lluvias de marzo de 2025 en el Mar Menor. Proyecto BELICH: Monitorización, Estudio y Modelización del Mar Menor (MAPMM-MITECO). IEO-CSIC.

IEO-CSIC (2025b). Informe sobre episodios de olas de calor marinas en el Mar Menor (mayo-julio de 2025). Proyecto BELICH: Monitorización, Estudio y Modelización del Mar Menor (MAPMM-MITECO). IEO-CSIC.

Kirk, J. T. (1985). Effects of suspensoids (turbidity) on penetration of solar radiation in aquatic ecosystems. *Hydrobiologia*, 125, 195-208.

Kirk, J. T. (1994). *Light and photosynthesis in aquatic ecosystems*. Cambridge University Press

Long, J. S., Hu, C., Robbins, L. L., Byrne, R. H., Paul, J. H., & Wolny, J. L. (2007). Optical and biochemical properties of a southwest Florida whiting event. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 196, 258-268.

Marín-Guirao, L., Bernardeau-Esteller, J., Belando, M. D., García Muñoz, R., Ramos Segura, A., Alcoverro, T., Minguito Frutos, M., & Ruiz, J. M. (2022). Photo-acclimatory thresholds anticipate sudden shifts in seagrass ecosystem state under reduced light conditions. *Marine Environmental Research*, 177, 105636.

Nardelli, B. B., Tronconi, C., Pisano, A., & Santoleri, R. (2013). High and ultra-high resolution processing of satellite Sea Surface Temperature data over Southern European Seas in the framework of MyOcean project. *Remote Sensing of Environment*, 129, 1-16.

Oliver, E. C., Benthuisen, J. A., Damaraki, S., Donat, M. G., Hobday, A. J., Holbrook, N. J., Schlegel, R. W., & Sen Gupta, A. (2021). Marine heatwaves. *Annual Review of Marine Science*, 13, 313-342.

Ruiz, J.M.; Albentosa, M.; Aldeguez, B.; Álvarez- Rogel, J.; Antón, J.; Belando, M.D.; Bernardeau, J.; Campillo, J.A.; Domínguez, J.F.; Ferrera, I.; Fraile-Nuez, E.; García, R.; Gómez-Ballesteros,



M.; Gómez, F.; González- Barberá, G.; Gómez-Jakobsen, F.; León, V.M.; López-Pascual, C.; Marín- Guirao, L.; Martínez-Gómez, C.; Mercado, J.M.; Nebot, E.; Ramos, A.; Rubio, E.; Santos, J.; Santos, F.; Vázquez-Luis, M.; Yebra, L. (2020). Informe de evolución y estado actual del Mar Menor en relación al proceso de eutrofización y sus causas. Informe de asesoramiento técnico del Instituto Español de Oceanografía (IEO). 165pp.

UNESCO. (1985). The international system of units (SI) in oceanography. UNESCO Technical Papers No. 45, IAPSO Pub. Sci. No. 32, Paris, France.



6. Listado de abreviaturas

ADN: Ácido Desoxirribonucleico.

ARNr: Ácido Ribonucleico ribosómico.

BELA: Algoritmo de teledetección de la clorofila específico para el Mar Menor.

BELICH: Seguimiento, Estudio y Modelización del ecosistema marino del Mar Menor.

CTD: Conductividad, Temperatura, Profundidad (Conductivity, Temperature, Depth).

DANA: Depresión Aislada en Niveles Altos.

DMMEM: Mar Menor Eutrophication Monitoring programme

IEO-CSIC: Instituto Español de Oceanografía. Centro Superior de Investigaciones Científicas.

IMIDA: Instituto Murciano de Investigación de Desarrollo Agrario.

Kd: Coeficiente de extinción de la luz.

MAPMM: Marco de Actuaciones Prioritarias para la recuperación del Mar Menor.

MITECO: Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.

NID: Nitrógeno Inorgánico Disuelto.

NT: Nitrógeno total.

NTU: Unidad Nefelométrica de Turbidez (Nephelometric Turbidity Unit).

P90: Percentil climatológico 90.

PAR: Radiación Fotosintéticamente Activa (Photosynthetically Active Radiation).

PCR: Reacción en cadena de la polimerasa

pH: Potencial de Hidrógeno.

PT: Fósforo total.

SMLG: Boya piloto SMARTLAGOON.

SST: Temperatura Superficial del Mar (Sea Surface Temperature).

Std: Desviación Estándar (Standard Deviation).



7. Anexos



Fotografía J. Murcia

7.1. Anexo I: Estaciones de monitorización BELICH

Configuración boya con lander

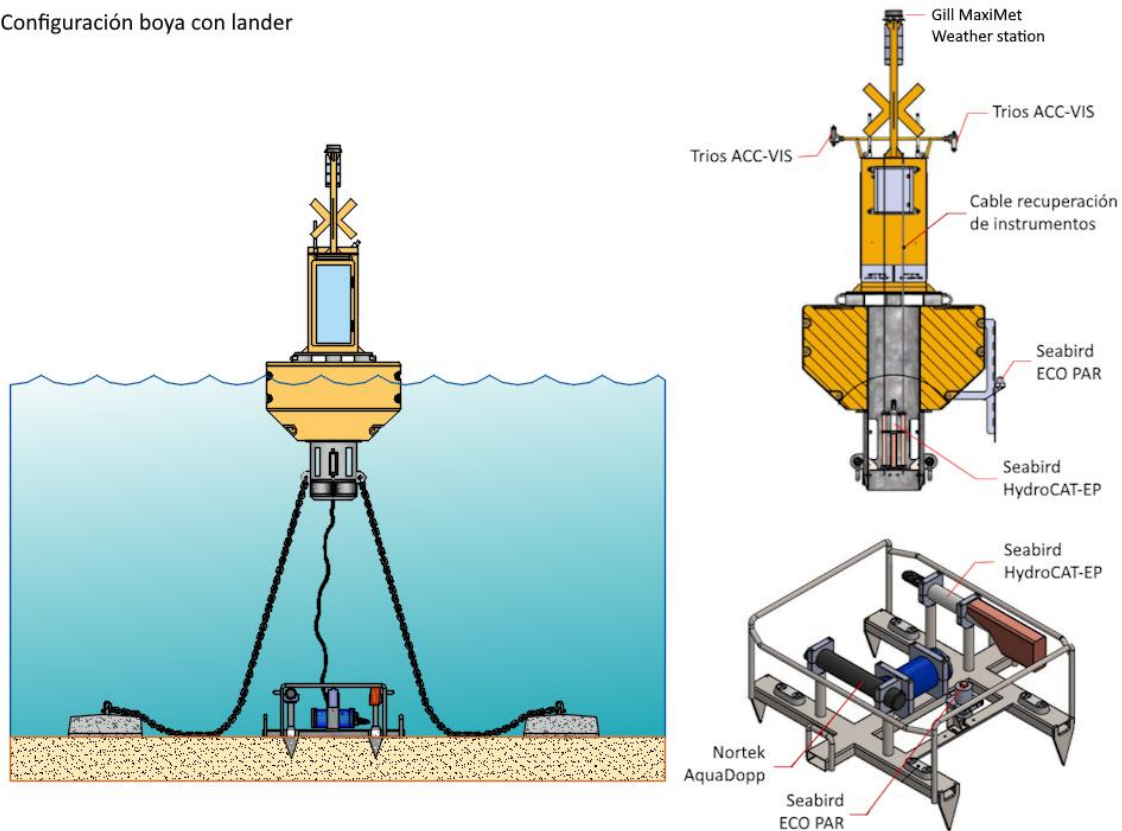


Figura 27: Esquema boya y lander (fondeo) de las estaciones de monitorización A, B, y C. Las estaciones de Estacion y Marchamalo (5 y 6) solo tienen la parte profunda (lander).

La Figura 27 muestra el esquema de los sensores instalados en las estaciones de monitorización BELICH (Figura 1). Las estaciones de El Estacio y Marchamalo (5 y 6) están equipadas con landers (fondeos), debido a la presencia de tráfico marítimo en estos canales, mientras que las estaciones A, B y C tienen sendas boyas oceanográficas en la superficie.

Las estaciones han sido diseñadas para obtener datos de alta resolución temporal, tanto de aguas superficiales como profundas, con el objetivo de identificar episodios de estratificación en la columna de agua. La boya incorpora una unidad central de procesamiento (data logger) CR100x de Campbell Scientific, que se encarga de registrar y transmitir datos de los diferentes tipos de sensores en tiempo real.

Tanto la boya como el lander están equipados con un sensor Seabird HydroCAT-EP, capaz de medir oxígeno disuelto, temperatura, salinidad, concentración de clorofila,

ph y turbidez. Además, la boya cuenta con una estación meteorológica (Gill MaxiMet Weather Station), que proporciona información sobre la dirección y velocidad del viento, temperatura del aire, humedad e irradiancia solar. Por su parte, el lander incorpora también un sensor AquaDopp, que mide la velocidad y dirección de la corriente a diferentes profundidades.

Finalmente, la boya de la Estación B incluye además dos sensores Seabird ECO-PAR (en superficie y fondo) y 3 Trios (dos tipos ARC y uno tipo ACC). Los sensores PAR permiten medir la radiación fotosintéticamente activa (PAR) tanto sub-superficial como en el fondo, mientras que los sensores Trios proporcionan mediciones de radiancia e irradiancia solar.

La Figura 28 muestra el esquema de los sensores instalados en la estación de monitorización 4, en el puerto de San Pedro del Pinatar. La estación mide con alta resolución el nivel del mar con un mareógrafo, y también la radiación y factores meteorológicos como el viento, la temperatura y las precipitaciones.

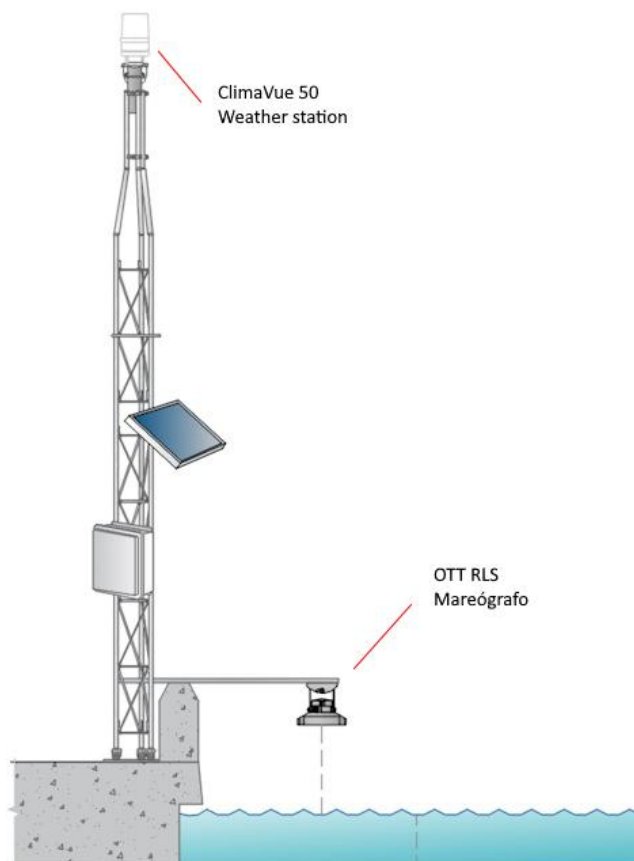


Figura 28: Esquema de los sensores instalados en la estación 4 en la base militar de San Javier.

7.2. Anexo II: Metodología

7.2.1. Temperatura

La obtención de la temperatura se ha llevado a cabo con diferentes y complementarias fuentes de datos, lo que ha posibilitado la adquisición de una resolución espacio-temporal considerable para la variable en cuestión. Las fuentes de datos empleadas se detallan a continuación:

- 2012 – actualidad: Sensor HOBO Water Temp Pro v2 sumergido a una profundidad de 1,5 metros. Hasta junio de 2023 se ubicó en el Puerto de Lo Pagán y, a partir de ese momento, se trasladó a la boya piloto SMLG.
- 2016 – actualidad: Muestreos con sondas multiparamétricas a través del proyecto DMMEM. Desde octubre de 2022 se realiza un perfil vertical con el CTD modelo JFE AAQ176, como parte del proyecto BELICH. Estos muestreos se realizan aproximadamente cada dos semanas (según las condiciones meteorológicas).
- Enero de 2025 – actualidad: Empleo de sensores en las boyas oceanográficas del proyecto BELICH (Sensores de temperatura de la sonda multiparamétrica Seabird HydroCAT-EP). Estos sensores proporcionan datos de temperatura a 2 profundidades (superficie y fondo) en continuo (cada 10 minutos) y en tiempo casi real.
- 1982 – actualidad: Datos del satélite Copernicus Mediterranean Sea – High Resolution L4 Sea Surface Temperature Reprocessed 0,05 deg resolution (Nardelli et al., 2013).

Todas estas fuentes de datos son de suma importancia para llevar a cabo un análisis espacial y temporal de la temperatura del agua de la laguna. La presencia del sensor HOBO y los sensores de la boya piloto SMLG han permitido mantener una serie continua de Temperatura Superficial del Mar (SST) desde el año 2012, así como datos a diferentes profundidades, permitiendo obtener series del perfil vertical de la columna de agua. Además, ambas fuentes de datos son complementarias, ya que han posibilitado la realización de una intercalibración entre los sensores. Los muestreos con sondas multiparamétricas nos han permitido, a su vez, realizar un análisis espacial de la SST en las cuatro estaciones de muestreo. Por último, los datos satelitales del



satélite Copernicus Mediterranean Sea – High Resolution L4 Sea Surface Temperature Reprocessed, con una resolución de 0,05 grados (disponible en <https://doi.org/10.48670/moi-00173>), han ampliado la disponibilidad de datos SST en el Mar Menor más allá del año 2012. Estos datos también han sido sometidos a un proceso de intercalibración con el sensor HOBO y los sensores de la boya piloto SMLG.

Olas de calor

Se ha realizado un análisis de olas de calor con la clasificación propuesta por Hobday et al. 2018. Una ola de calor marina es un período de temperaturas marinas anormalmente altas en relación con la temperatura estacional promedio en una región marina en particular, el Mar Menor en este caso. Un período de temperaturas altas se considera ola de calor si dura cinco o más días, con temperaturas superiores al percentil climatológico 90 (P_{90}) según un período de referencia histórico de 30 años. La serie temporal de temperatura media obtenida en este período de referencia es lo que, de aquí en adelante, denominamos Climatología. De esta forma se establecen 4 categorías de olas de calor dependiendo de cuánto multiplique la temperatura media diaria el percentil climatológico 90: moderado ($1-2 \times P_{90}$, categoría I), fuerte ($2-3 \times P_{90}$, categoría II), severo ($3-4 \times P_{90}$, categoría III), extremo ($1->4 \times P_{90}$, categoría IV). La Figura 29 muestra, por meses, la serie temporal de temperatura superficial del periodo 1982-2012 (31 años total) empleada como referencia para determinar la climatología.

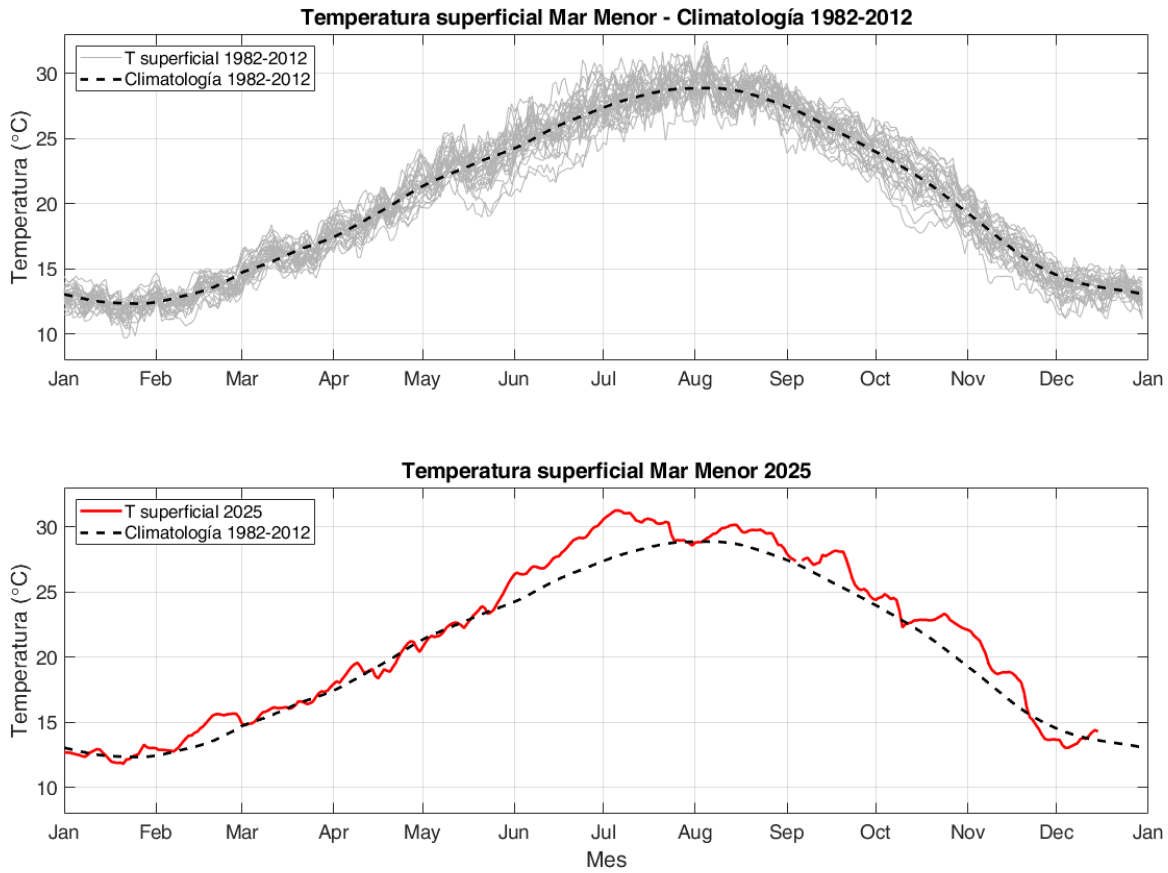


Figura 29: Parte superior, serie climatológica utilizada como referencia para el análisis de olas de calor (1982-2012). Parte inferior, serie de temperatura del año 2025 comparada con la serie climatológica de referencia.

7.2.2. Clorofila-a

La medida de clorofila-a se lleva a cabo mediante dos métodos distintos: espectrofotométricos y fluorescencia. La espectrofotometría es una técnica analítica que permite la cuantificación de compuestos en solución, basándose en la relación directa que existe entre la absorción de luz y la concentración del compuesto en cuestión. Para realizar esta medición, se emplea una muestra del medio acuático que se filtra por un filtro Whatman GF/F de 47 mm de diámetro, seguido de la extracción de la clorofila-a con acetona al 90%. La concentración de clorofila-a se determina luego en el espectrofotómetro.

Por otro lado, el método basado en fluorescencia se centra en la medición de la energía emitida por organismos fotosintéticos, en forma de fluorescencia de la clorofila-a. Esta medición se realiza in situ y proporciona datos instantáneos.

- Mayo 2016 – actualidad: Se recopila a partir de muestreos in situ en todas las estaciones de muestreo (Figura 1). Estos se realizan de forma quincenal según las condiciones meteorológicas. La clorofila-a se determina a partir de espectrofotometría. Además, desde octubre de 2022, se realizan perfiles verticales de CTD que obtienen datos de clorofila-a (por fluorescencia).
- Enero de 2025 – actualidad: Empleo de sensores en las boyas oceanográficas del proyecto BELICH (Sensores de clorofila de la sonda multiparamétrica Seabird HydroCAT-EP). Estos sensores proporcionan datos de temperatura a 2 profundidades (superficie y fondo) en continuo (cada 10 minutos) y en tiempo casi real. Estos sensores miden la clorofila-a a través de fluorescencia.

Obtener medidas a partir de diferentes fuentes es esencial para mantener una serie temporal precisa y de calidad. El sensor en la boya piloto SMLG proporciona una serie continua de datos de la laguna a diversas profundidades, mientras que los muestreos in situ permiten calibrar los sensores de monitoreo continuo y obtener mediciones altamente precisas de la clorofila-a mediante espectrofotometría.

7.2.3. Turbidez

La turbidez se evalúa de dos formas: mediante irradiancia PAR, y como proporción de luz dispersada (backscatter). La irradiancia PAR mide la cantidad de radiación integrada en el rango de longitudes de onda que son capaces de producir actividad fotosintética activa (400-700 nm). A partir de esta medición, se estima la transparencia como coeficiente de extinción de la luz (K_d , m^{-1}). La turbidez también se puede calcular midiendo la proporción de luz dispersada cuando un rayo de luz atraviesa la muestra de agua, expresándose en valores de NTU (unidad nefelométrica de turbidez). Por último, a partir del coeficiente de extinción de la luz, se ha determinado la proporción de luz que queda disponible para los organismos fotosintéticos del fondo (% I_0) (Kirk, 1994). Los datos de turbidez se obtienen de las siguientes fuentes:

- Mayo 2016 – actualidad: Los valores de turbidez se recopilan a partir de muestreos in situ en las estaciones de muestreo (Figura 1). Estos se realizan de forma quincenal según las condiciones meteorológicas. La turbidez se evalúa a partir de irradiancia PAR utilizando un sensor LiCor plano (2π). Además, desde octubre de

2022, se realizan perfiles verticales de CTD que obtienen datos de turbidez (tanto NTU como por irradiancia PAR).

- Enero de 2025 – actualidad: Empleo de sensores en las boyas oceanográficas del proyecto BELICH (Sensores de turbidez de la sonda multiparamétrica Seabird HydroCAT-EP). Estos sensores proporcionan datos de temperatura a 2 profundidades (superficie y fondo) en continuo (cada 10 minutos) y en tiempo casi real. Adicionalmente, se han desplegado dos sensores PAR fondeados de forma permanente en dos ubicaciones diferentes: uno a 6 metros de profundidad aprovechando la estructura sumergida de la boya, y otro en superficie. Estos sensores miden la turbidez tanto en unidades de NTU como mediante la irradiancia PAR.

Estas múltiples mediciones son esenciales para mantener una serie temporal precisa y de calidad. El sensor en la boya piloto SMLG y los sensores PAR proporcionan una serie continua de datos de la laguna a diversas profundidades, mientras que los muestreos in situ permiten calibrar los sensores de monitoreo continuo y obtener mediciones altamente precisas de la turbidez.

7.2.4. Oxígeno disuelto

La medición del oxígeno disuelto se basa en el fenómeno de la extinción dinámica de la luminiscencia. Este principio se sustenta en la disminución de la energía del luminóforo provocada por la presencia del oxígeno en la muestra. De esta forma, el sensor logra determinar la concentración de oxígeno en función de la pérdida de emisión de luz del luminóforo. Este método ostenta diversas ventajas, entre las que destacan su sensibilidad y su inmediata respuesta, lo que permite realizar mediciones con una alta precisión en tiempo real.

Los datos de oxígeno disuelto se obtienen de las siguientes fuentes:

- Mayo 2016 – actualidad: Se mide a partir de muestreos in situ en todas las estaciones de muestreo (Figura 1). Estos se realizan con frecuencia mensual, y en ocasiones semanal, dependiendo de las circunstancias de la laguna en cada momento. Desde octubre de 2022, estos muestreos se están realizando a través



de perfiles verticales con el CTD modelo JFE AAQ176 (este dispositivo tiene incorporado un sensor de oxígeno disuelto).

- Enero de 2025 – actualidad: Empleo de sensores en las boyas oceanográficas del proyecto BELICH (Sensores de oxígeno disuelto de la sonda multiparamétrica Seabird HydroCAT-EP). Estos sensores proporcionan datos de temperatura a 2 profundidades (superficie y fondo) en continuo (cada 10 minutos) y en tiempo casi real.

La obtención de datos a partir de muestreos in situ nos permite obtener una serie temporal de calidad desde 2016 del oxígeno disuelto en la laguna. Adicionalmente, el sensor de oxígeno en la boya piloto SMLG, nos permite obtener medidas de continuo, que posibilitan la determinación de fenómenos de anoxia en periodos de tiempo muy cortos. Actualmente, ambas medidas son complementarias, ya que los muestreos in situ nos permiten calibrar los sensores de la boya piloto SMLG.

7.2.5. pH

El pH se obtiene a partir de un electrodo de vidrio (glass electrode), este sensor aprovecha la propiedad de un vidrio sensible al pH, que responde a los cambios de concentración de iones de hidrógeno (H⁺) en la muestra. Estas medidas se obtienen en escala NBS. Este tipo de sensores nos permiten tomar mediciones de pH precisas y en tiempo real.

Los datos de pH se obtienen de las siguientes fuentes:

- Mayo 2016 – actualidad: Los valores de pH se obtienen a partir de muestreos in situ en todas las estaciones de muestreo (Figura 1). Estos se realizan con frecuencia mensual, y en ocasiones semanal, dependiendo de las circunstancias de la laguna en cada momento. Desde octubre de 2022, estos muestreos se están realizando a través de perfiles verticales con el CTD modelo JFE AAQ176, este dispositivo tiene incorporado un sensor de pH.

La obtención de datos a partir de estos muestreos nos permite obtener una serie temporal de calidad desde 2016 de pH.



7.2.6. Nutrientes

Desde 2019 se viene analizando la concentración de nitrógeno y fósforo total (NT y PT) en las muestras recogidas mensualmente, con el fin de caracterizar el pool completo de ambos nutrientes. Estos análisis se realizan a partir de muestras prefiltradas por filtros de 0,7 μm , por tanto, incluyen sólo la fracción disuelta, tanto orgánica como inorgánica. Las concentraciones de nutrientes inorgánicos disueltos en este periodo (que serán presentadas en el siguiente informe) son aproximadamente un orden de magnitud menor que las concentraciones promediadas de NT y PT, por lo que estas corresponden principalmente a formas orgánicas que pueden tener su origen en la actividad de las comunidades de la laguna (excreción, depredación o lisis celular) o proceder de fuentes externas (aportes a través de los cursos de agua). Estas formas de N y P pueden corresponder a materia orgánica lábil o recalcitrante, según sea más o menos fácilmente metabolizable por las comunidades microbianas. Es decir, el N y P soluble constituyen un almacén de nutrientes que, dependiendo de su naturaleza y de la actividad de las comunidades bacterianas, podría ser más o menos movilizado.

7.2.7. Comunidades microbianas y de fitoplancton

Para enumerar la abundancia de distintos grupos de pico-, nano- y microplancton se realizan muestreos con botella Niskin en las distintas estaciones. Para el análisis del picoplancton, las muestras se fijan con glutaraldehído (1% concentración final) y se congelan a -80 C hasta su procesado. La abundancia de picoplancton se analiza mediante citometría de flujo, mediante la que se puede identificar la abundancia de la cianobacteria *Synechococcus*, de picoplancton eucariota y de bacterias heterótrofas. El análisis de la abundancia y composición de nano- y microplancton se realiza mediante microscopía. Para ello, se fijan muestras en botellas de vidrio oscuro con solución de Lugol (2% concentración final).

Además, la biomasa de pico-, nano- y microplancton se recoge en filtros de policarbonato para el análisis exhaustivo de su diversidad, tanto procariota como eucariota, mediante herramientas genéticas. El ADN se extrae de los filtros y se usa para amplificar mediante PCR los marcadores genéticos 16S y 18S ARNr, para procariotas y eucariotas, respectivamente.



7.2.8. Comunidad de mesozooplankton

Desde agosto de 2016 se realizan muestreos mensuales para evaluar el estado de las comunidades de zooplankton del Mar Menor. Los muestreos consisten en pescas de arrastre con una red de plancton (50 cm diámetro) equipada con una malla de 200 micras (0,2 mm) de paso de luz. Inicialmente, estos muestreos se realizaban en tres estaciones (A, B y C, Figura 1), no obstante, una vez analizados los datos del periodo inicial se optimizó el muestreo, reduciéndolo a la estación B desde septiembre de 2019, al considerarse esta estación representativa del resto de la laguna. Desde enero de 2024, se toman muestras también en la estación M.

Las muestras obtenidas se dividen en dos alícuotas mediante un subdivisor Folsom. Una alícuota se preserva en etanol para análisis taxonómico y otra alícuota se fracciona por tamaño en tres fracciones (<200, 200-500 y >1000 micras) y se ultracongela en nitrógeno líquido para análisis de biomasa y metabolismo. Las muestras congeladas se mantienen a -80°C hasta su análisis en el CO Málaga.

7.2.9. Balance hídrico Mar Menor – Mediterráneo:

Para cuantificar el flujo de agua en los canales de El Estacio y Marchamalo, se ha realizado una estimación basada en la caracterización batimétrica de sus secciones y en el análisis de los perfiles de velocidad medidos en toda la columna de agua. Estas mediciones se obtuvieron mediante el correntímetro Aquadopp Profiler 2 MHz G2 de Nortek, configurando una resolución de celda vertical de 0,2 m para la obtención de los perfiles.

7.3. Anexo III: Mapas satelitales

7.3.1 Mapas clorofila-a

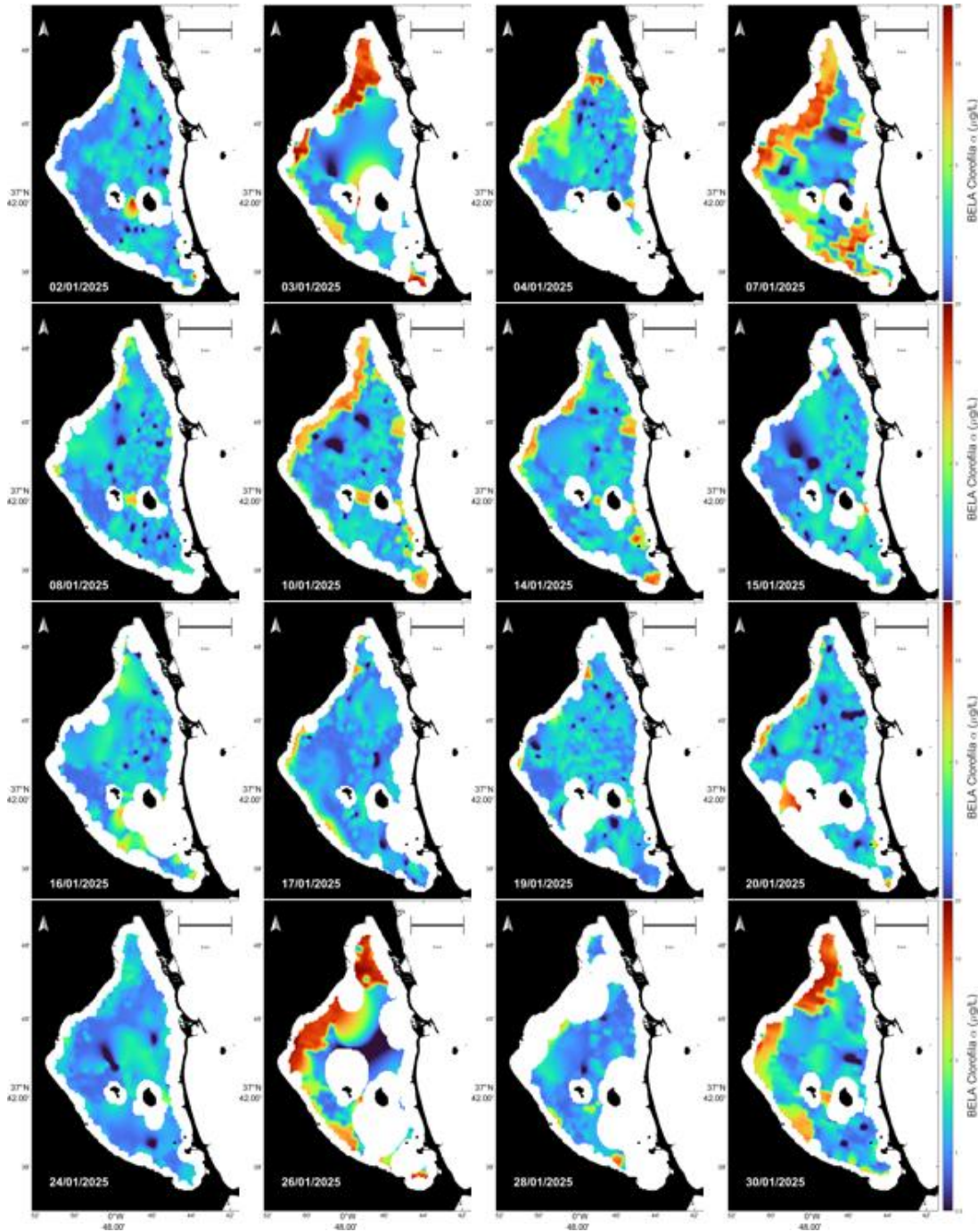


Figura 30: Mapas satelitales Sentinel-3 de clorofila aplicando el algoritmo BELA. Enero 2025

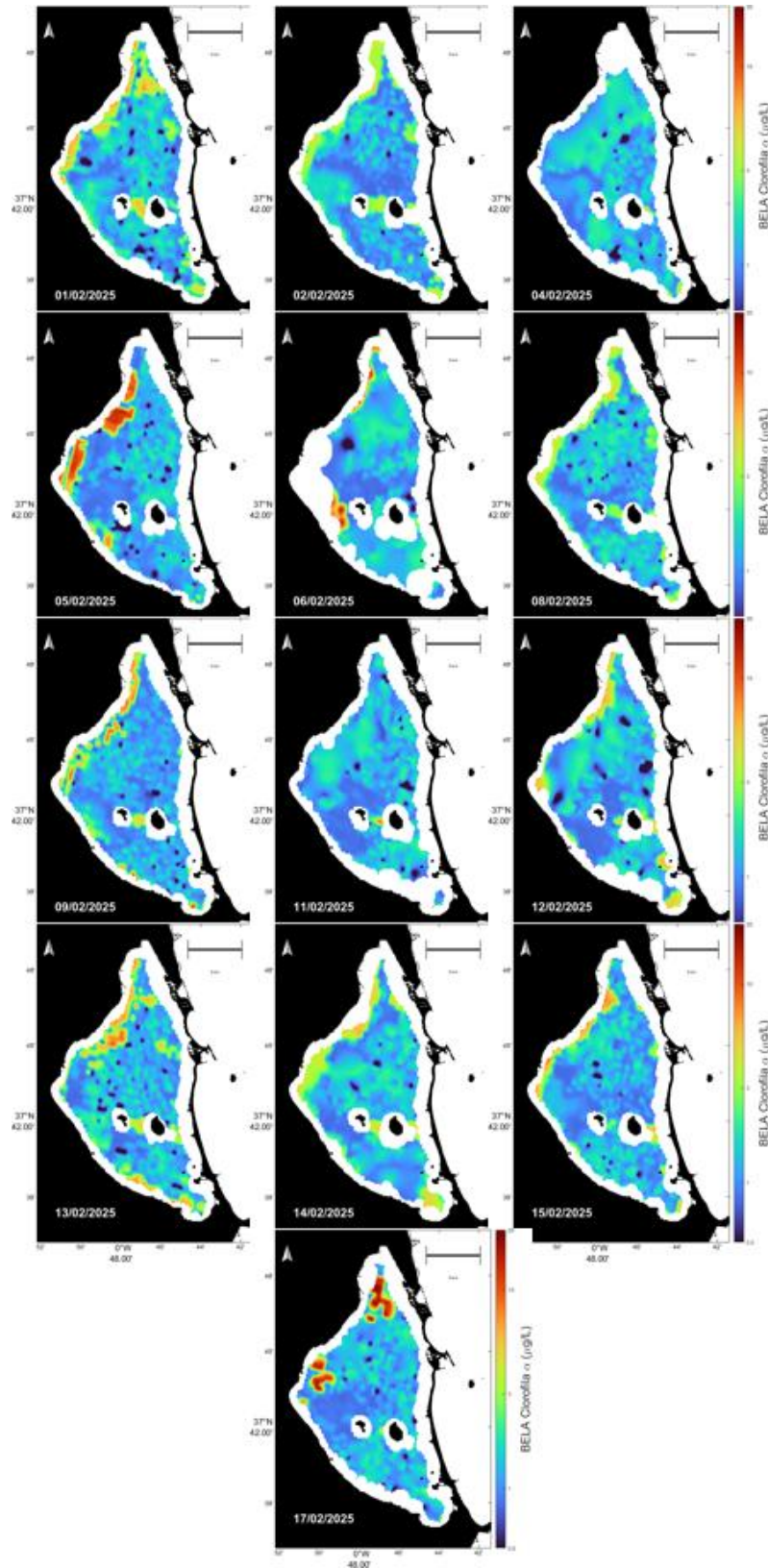


Figura 31: Mapas satelitales Sentinel-3 de clorofila aplicando el algoritmo BELA. Febrero 2025

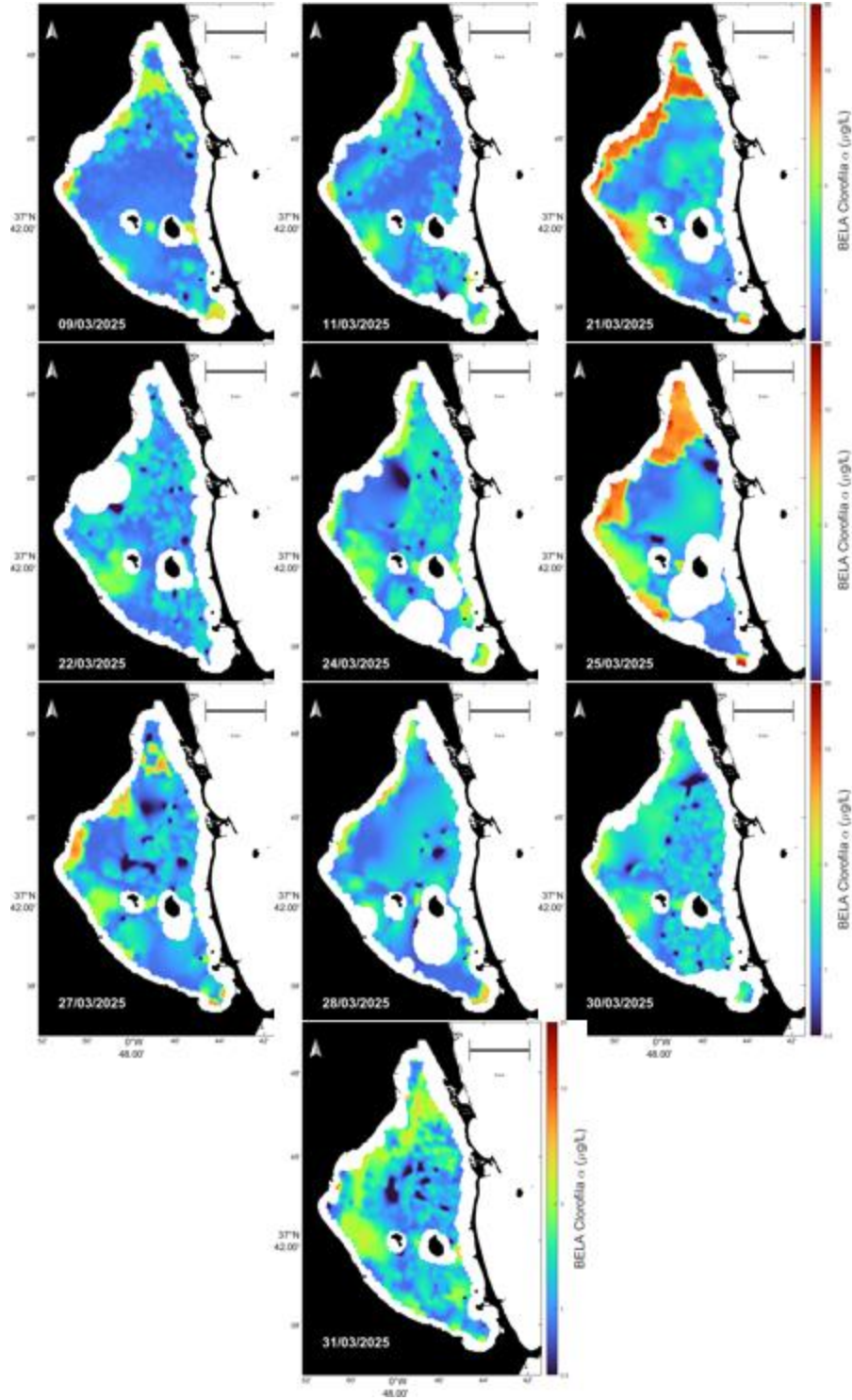


Figura 32: Mapas satelitales Sentinel-3 de clorofila aplicando el algoritmo BELA. Marzo 2025

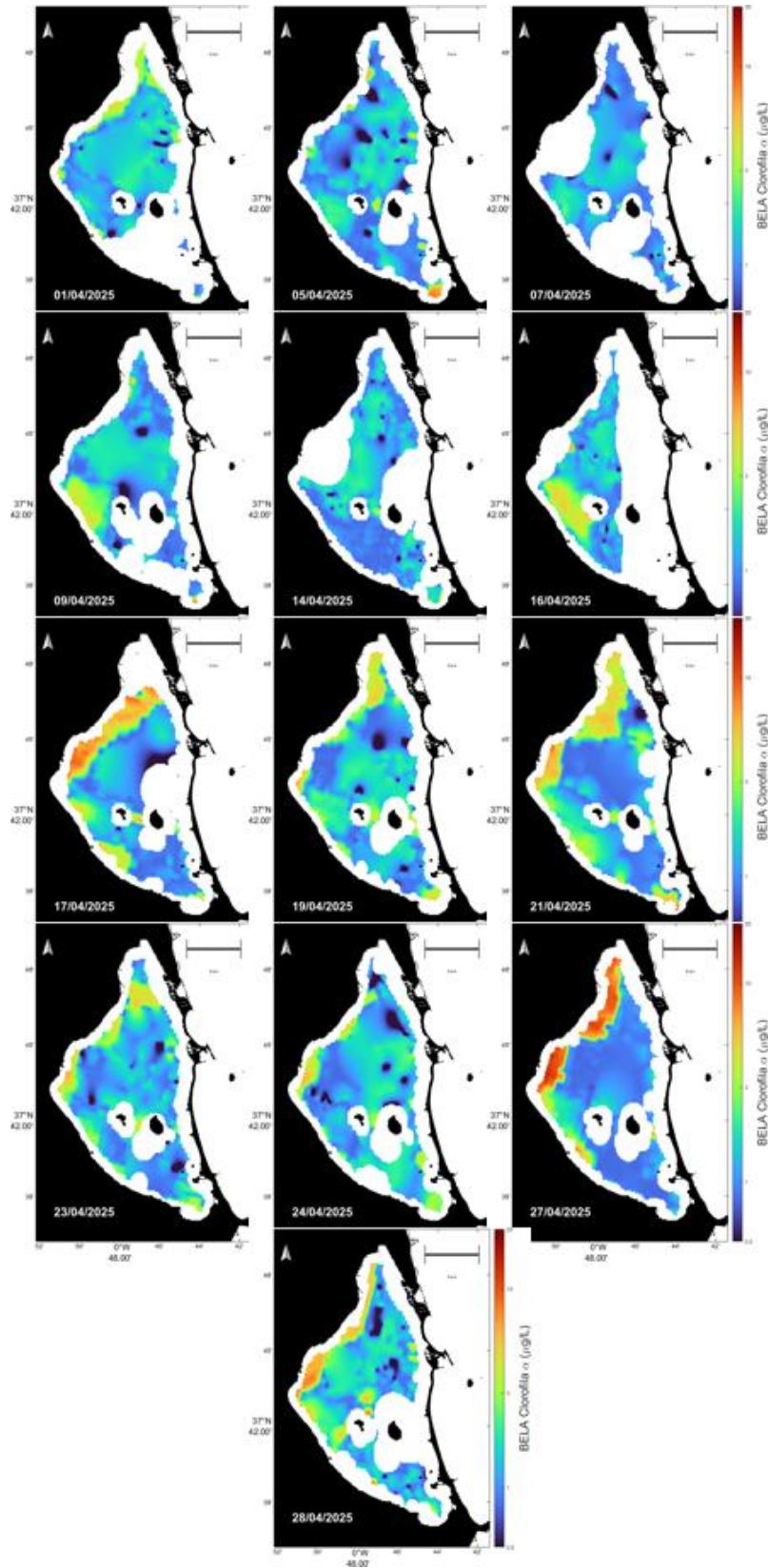


Figura 33: Mapas satelitales Sentinel-3 de clorofila aplicando el algoritmo BELA. Abril 2025

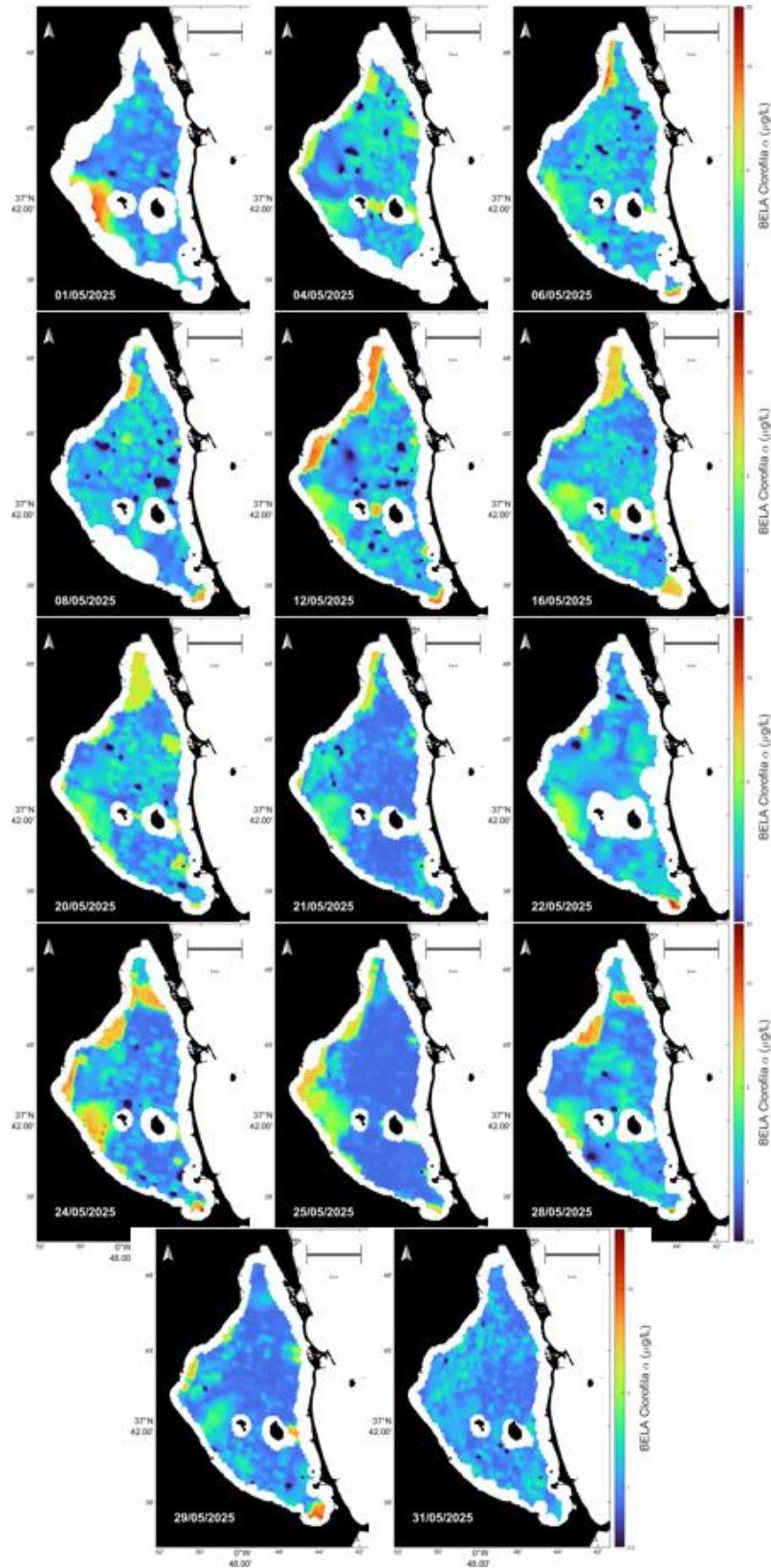


Figura 34: Mapas satelitales Sentinel-3 de clorofila aplicando el algoritmo BELA. Mayo 2025

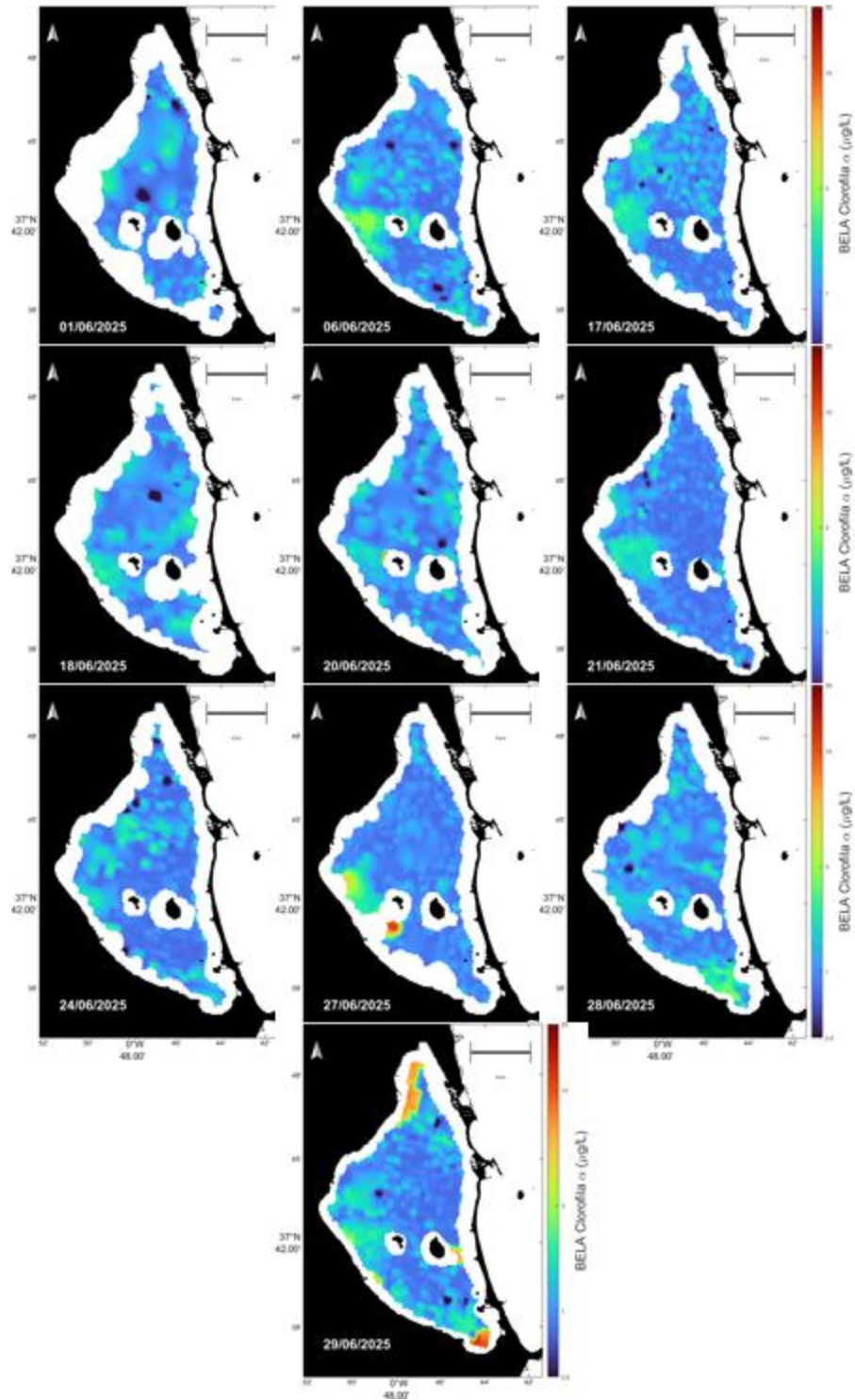


Figura 35: Mapas satelitales Sentinel-3 de clorofila aplicando el algoritmo BELA. Junio 2025

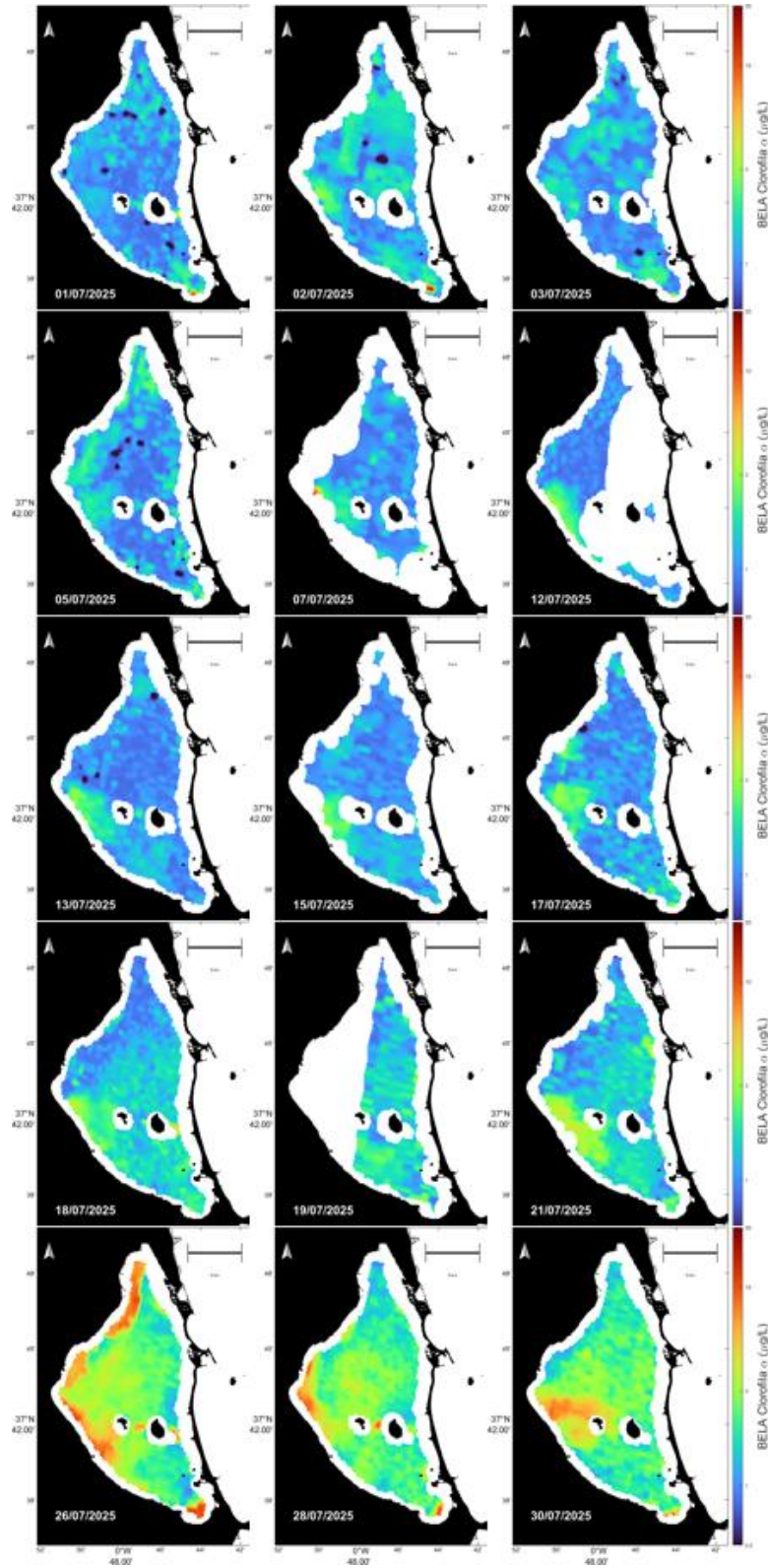


Figura 36: Mapas satelitales Sentinel-3 de clorofila aplicando el algoritmo BELA. Julio 2025

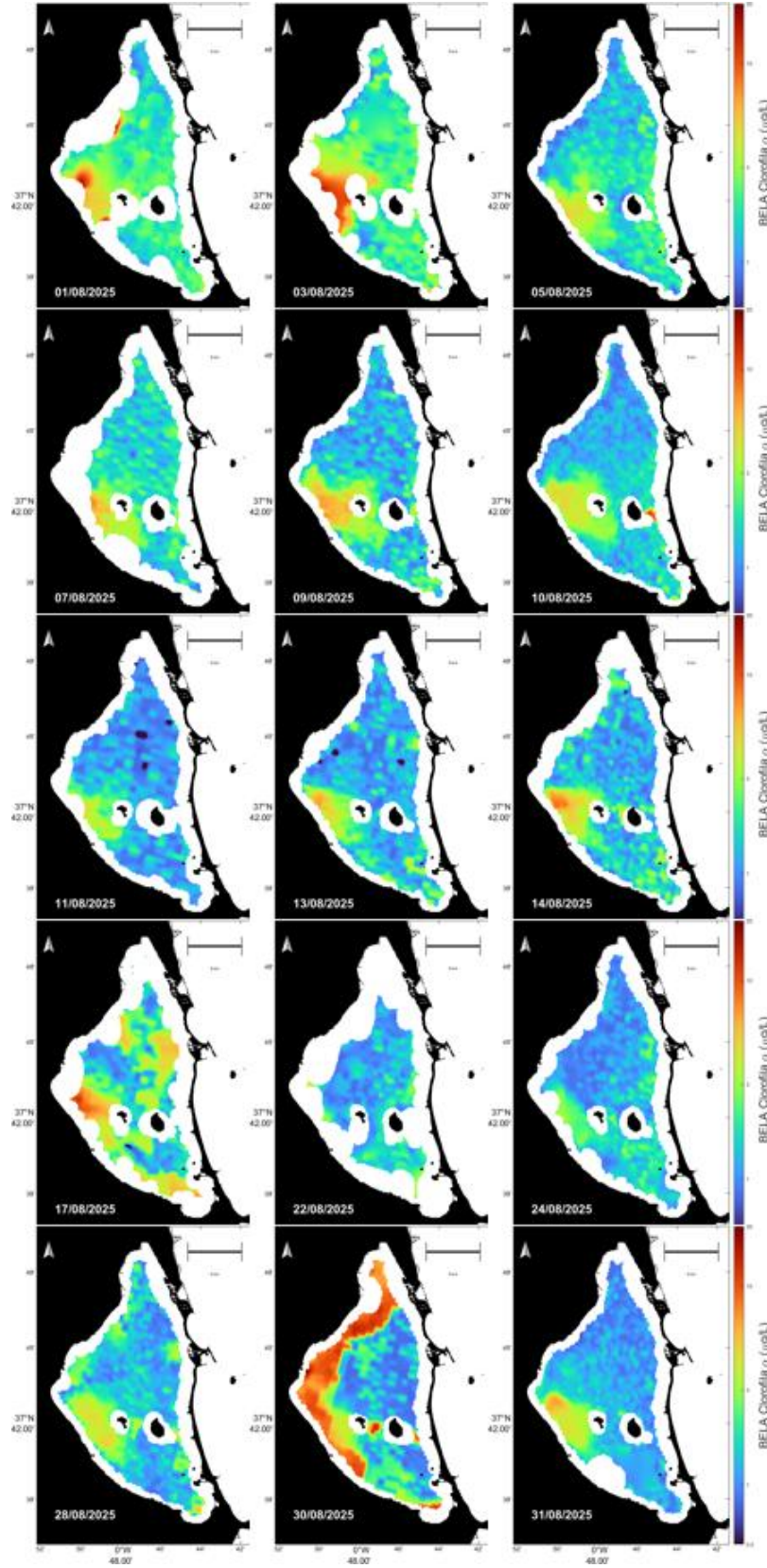


Figura 37: Mapas satelitales Sentinel-3 de clorofila aplicando el algoritmo BELA. Agosto 2025

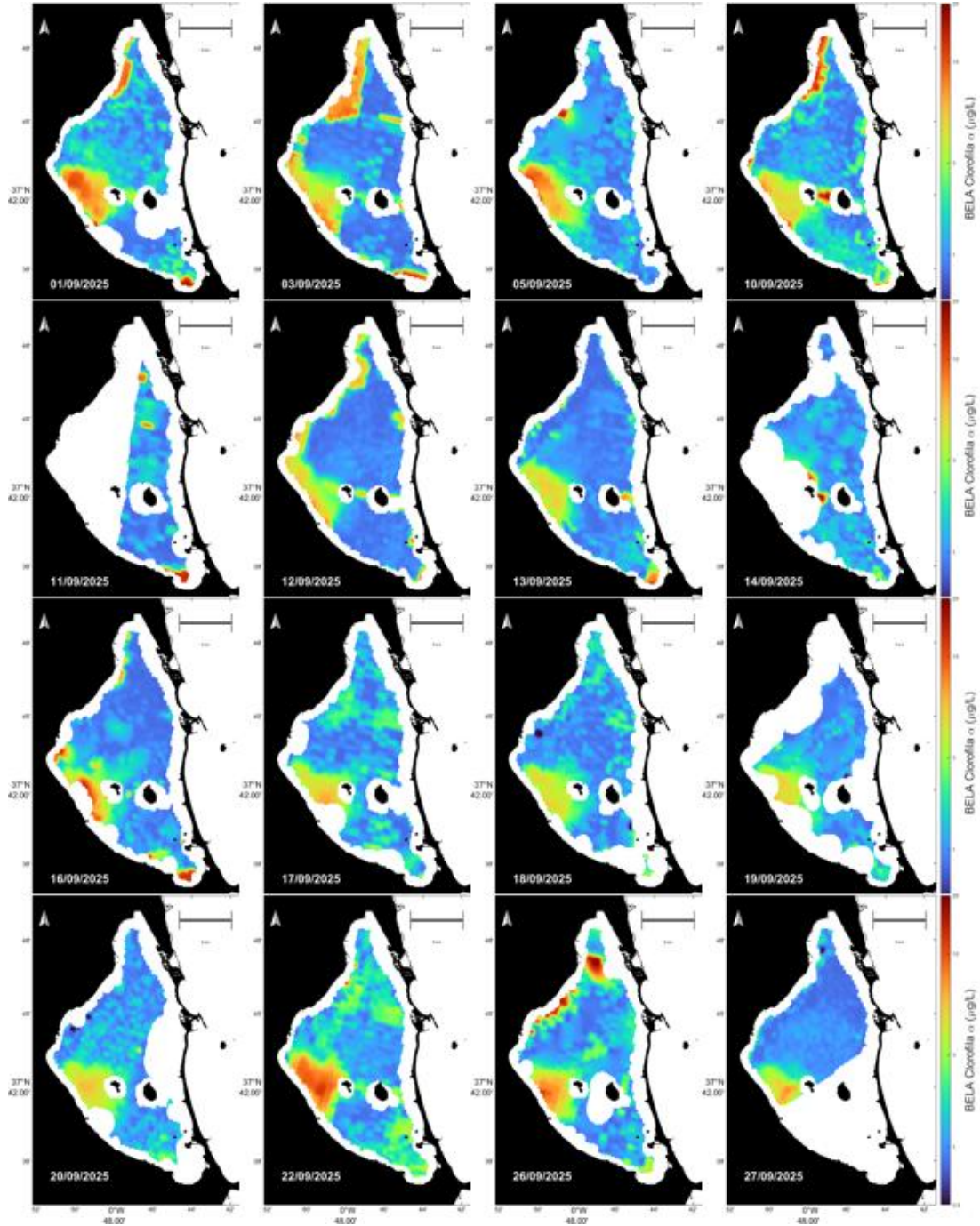


Figura 38: Mapas satelitales Sentinel-3 de clorofila aplicando el algoritmo BELA. Septiembre 2025

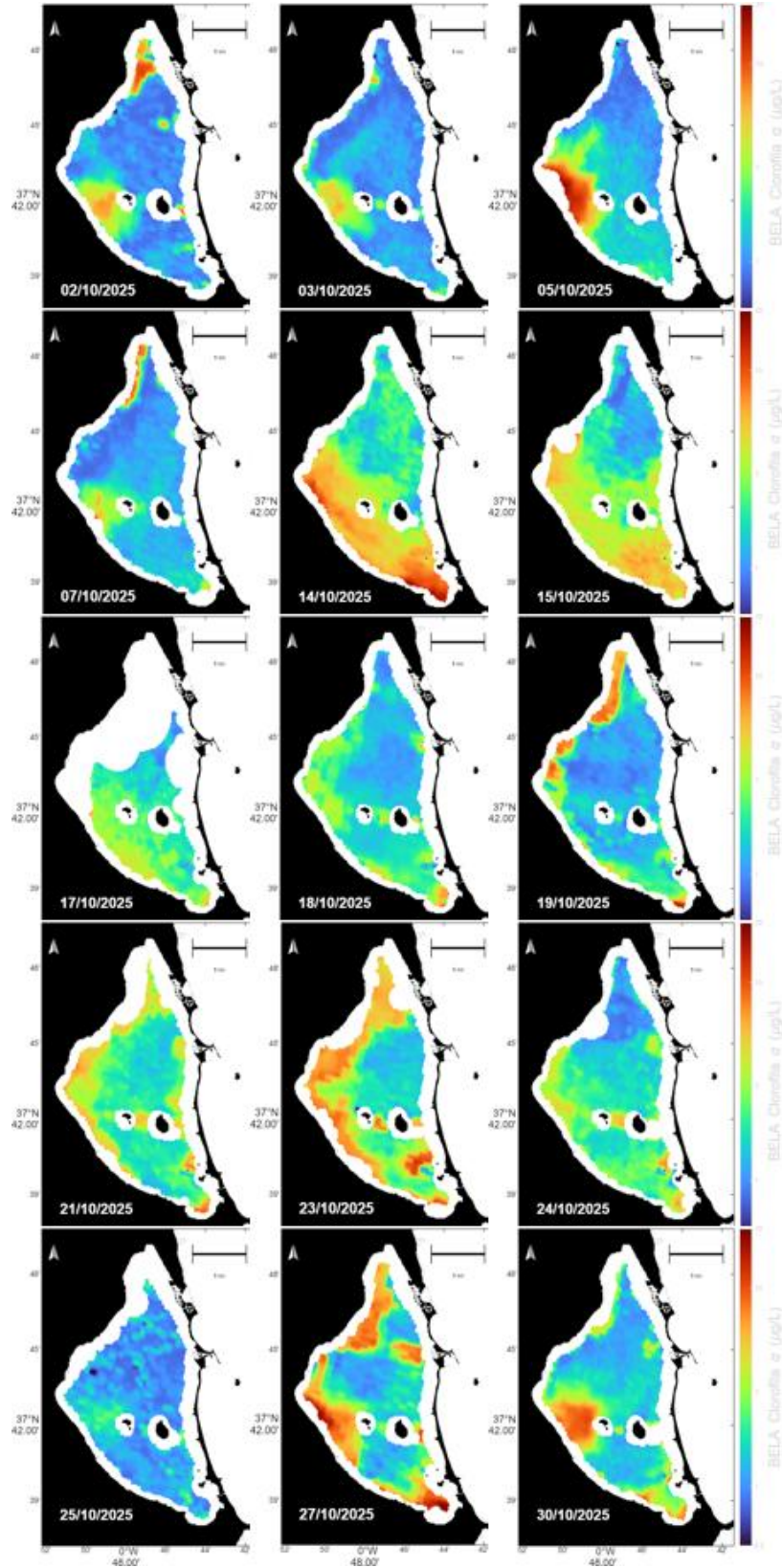


Figura 39: Mapas satelitales Sentinel-3 de clorofila aplicando el algoritmo BELA. Octubre 2025

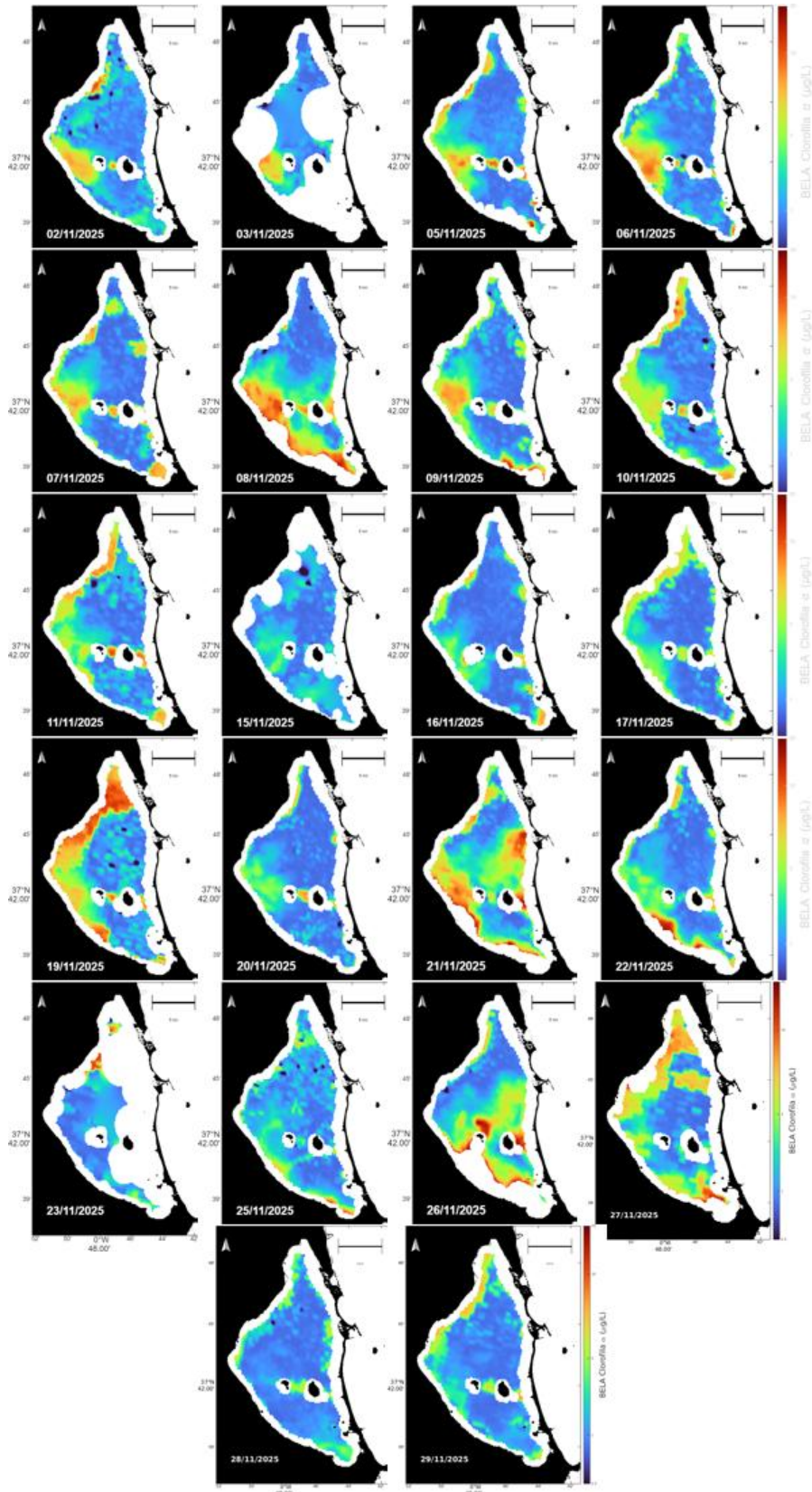


Figura 40: Mapas satelitales Sentinel-3 de clorofila aplicando el algoritmo BELA. Noviembre 2025

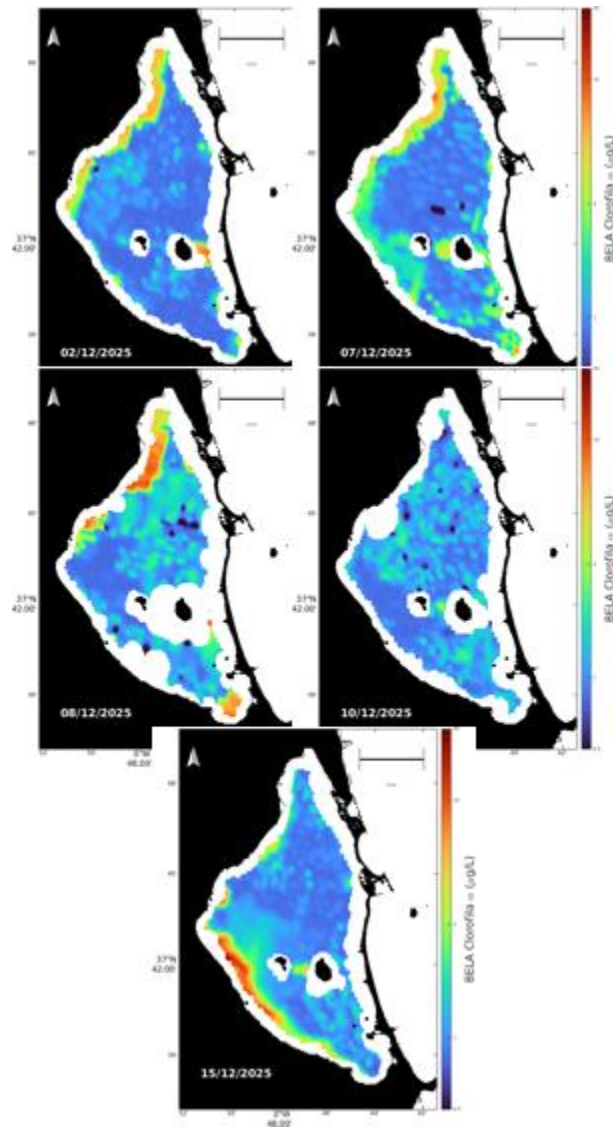


Figura 41: Mapas satelitales Sentinel-3 de clorofila aplicando el algoritmo BELA. Diciembre 2025

7.3.2 Mapas turbidez

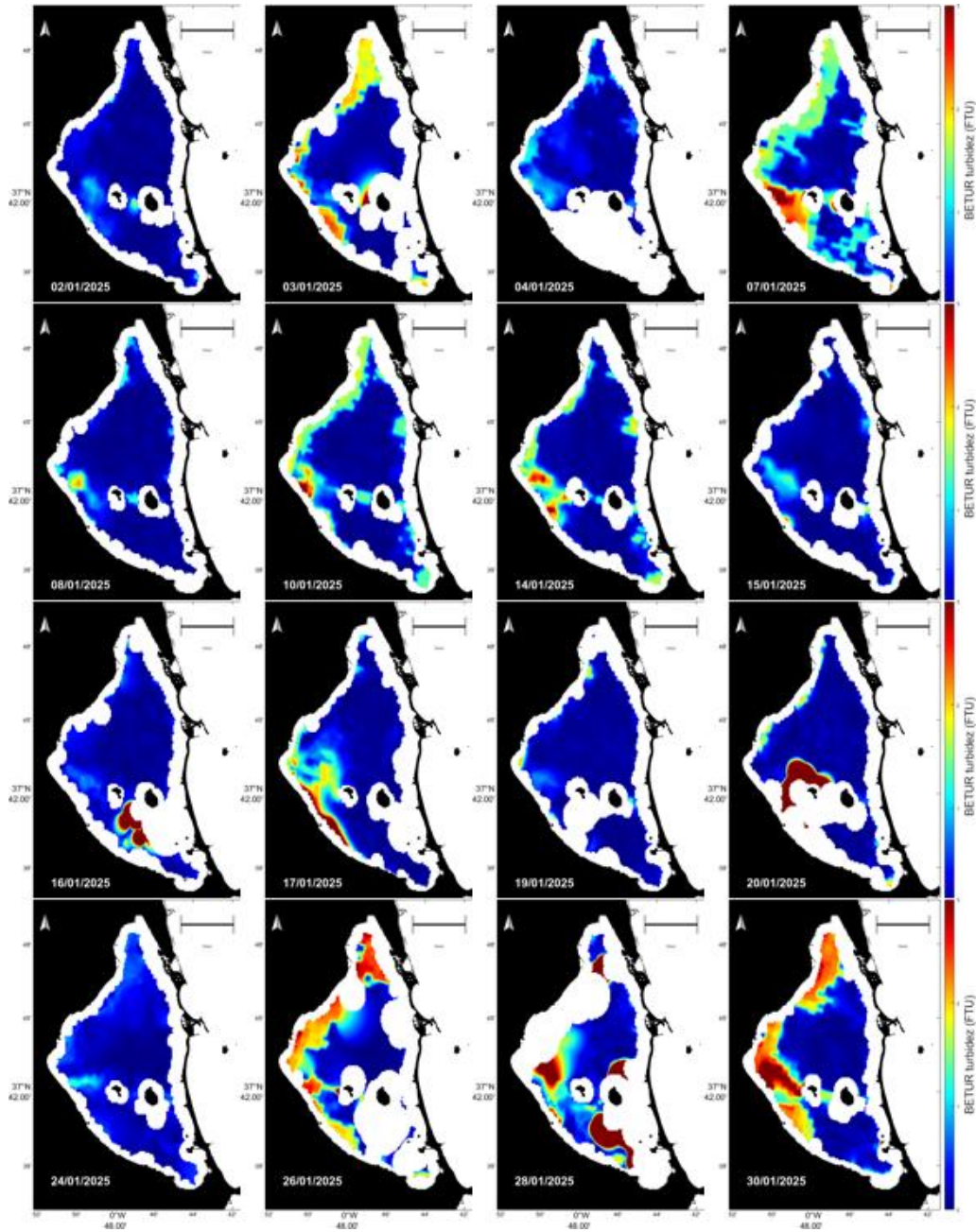


Figura 42: Mapas satelitales Sentinel-3 de turbidez aplicando el algoritmo Nechard. Enero 2025

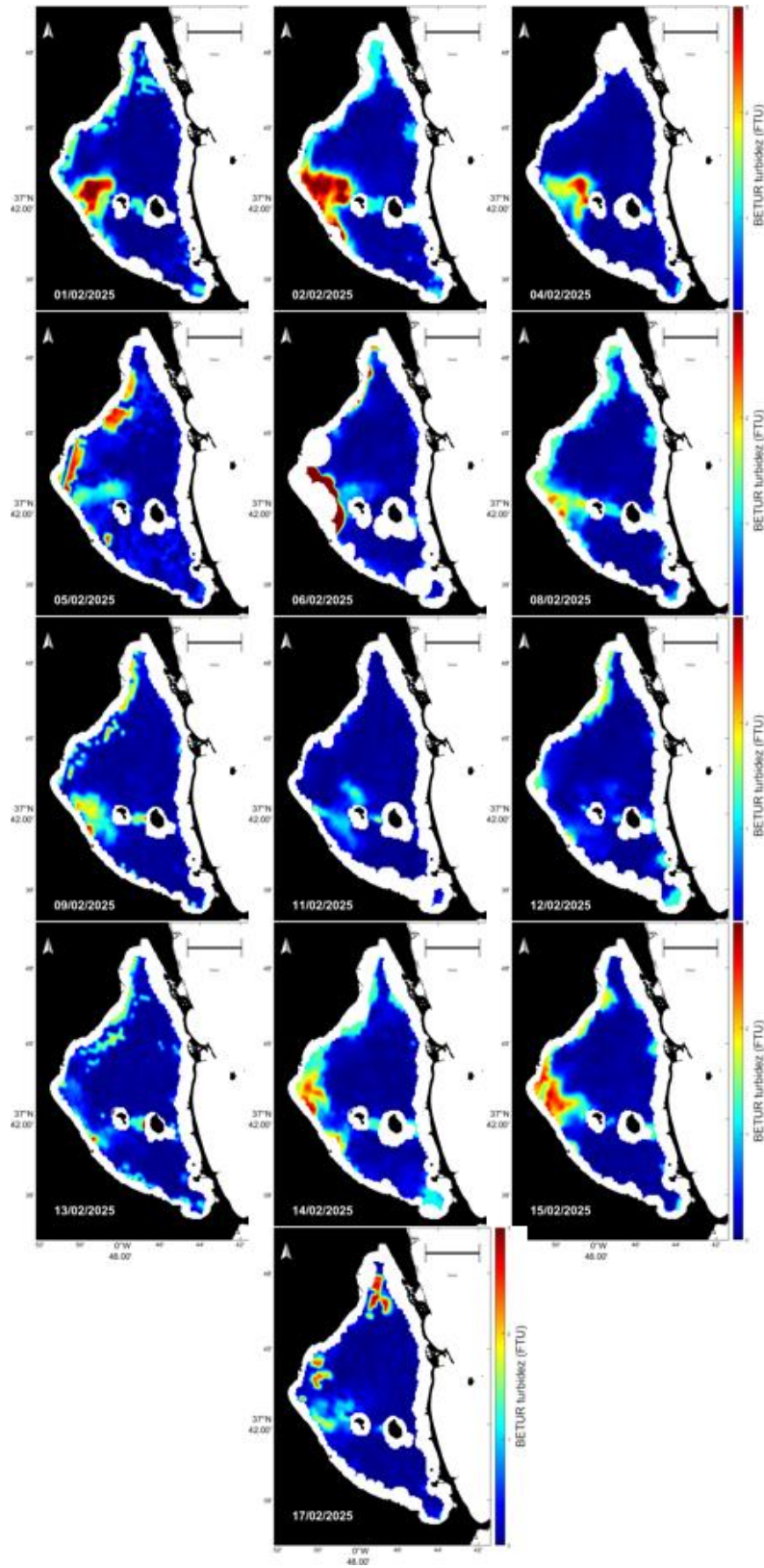


Figura 43: Mapas satelitales Sentinel-3 de turbidez aplicando el algoritmo Nechard. Febrero 2025

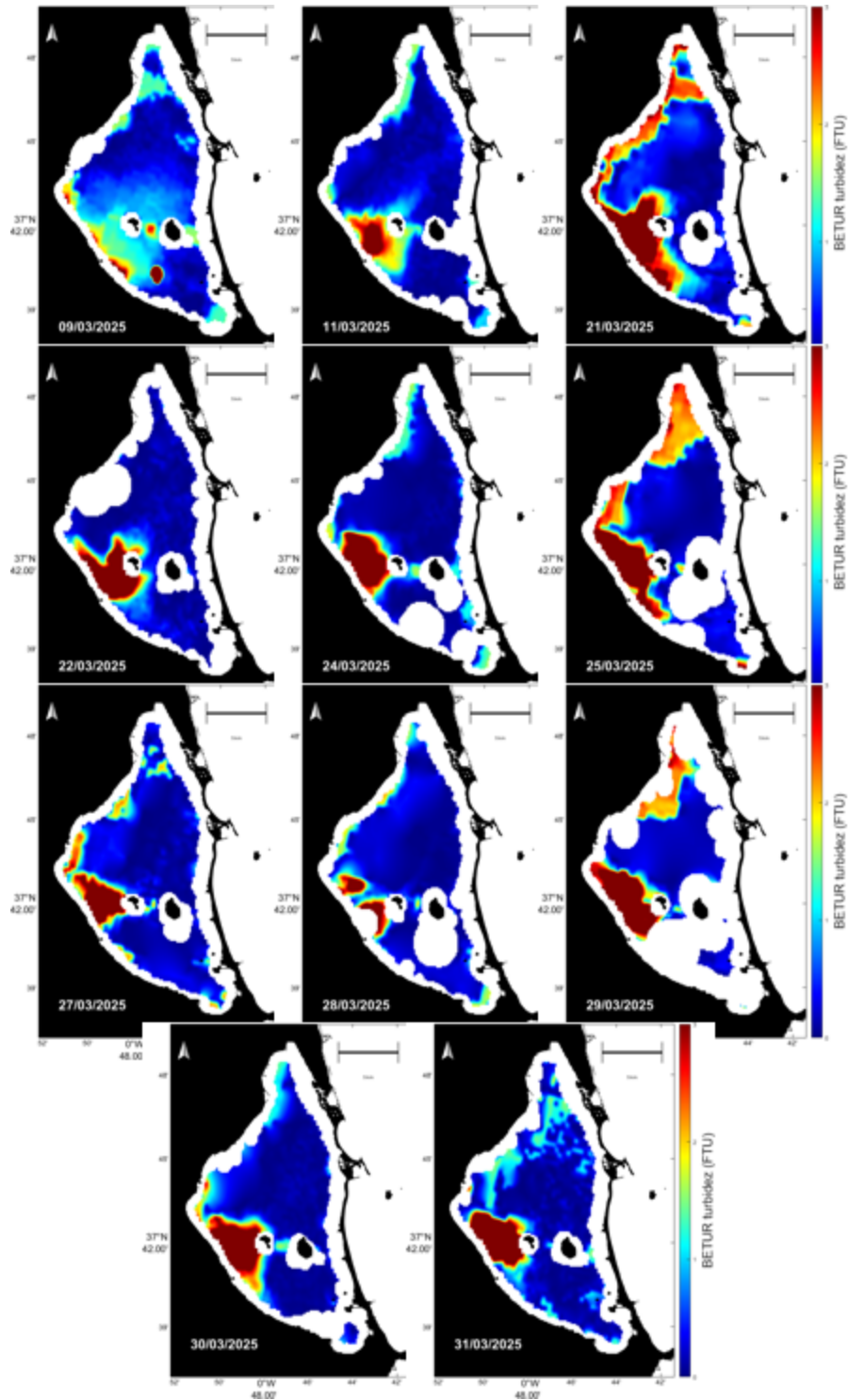


Figura 44: Mapas satelitales Sentinel-3 de turbidez aplicando el algoritmo Nechard. Marzo 2025

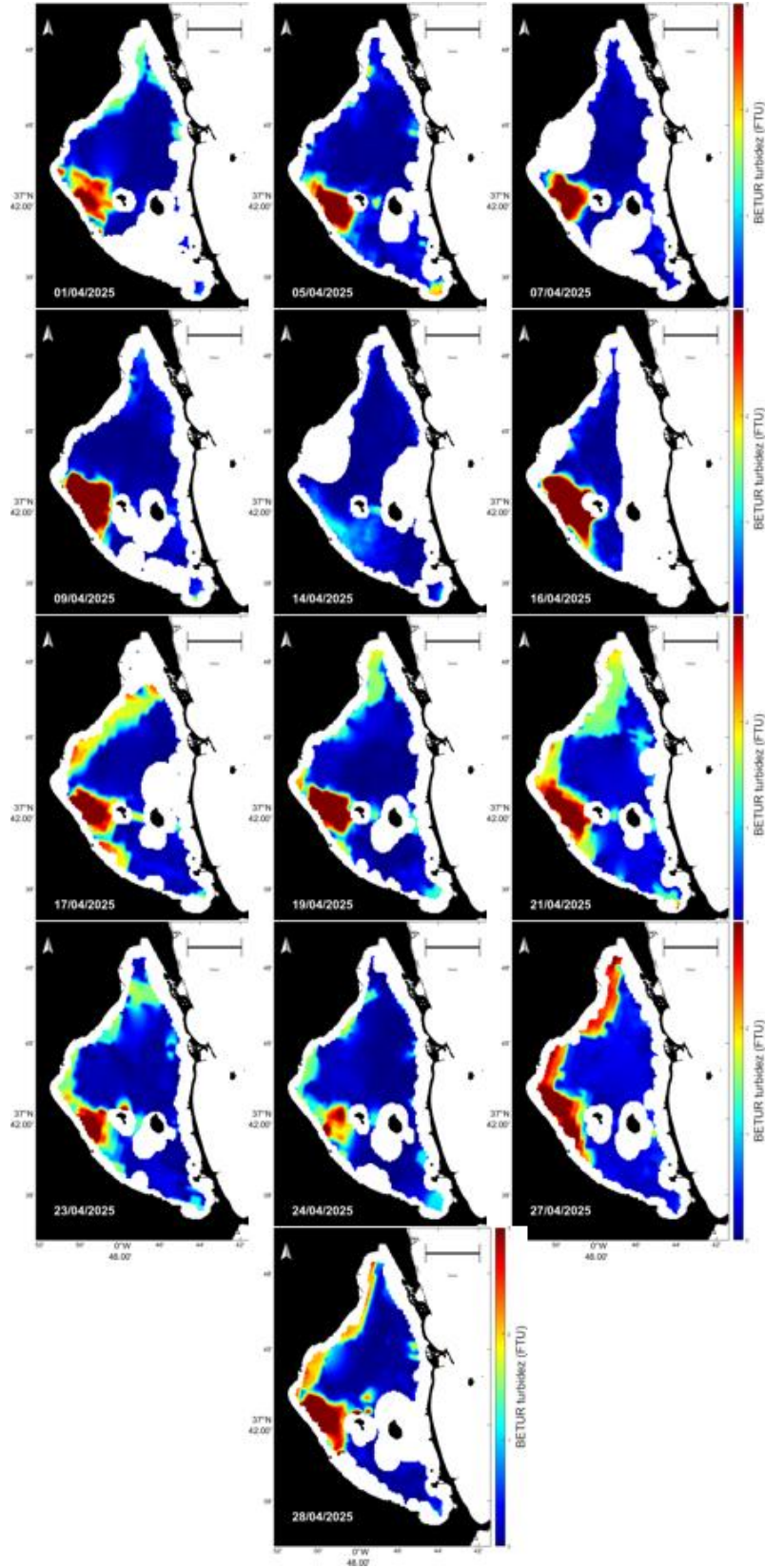


Figura 45: Mapas satelitales Sentinel-3 de turbidez aplicando el algoritmo Nechard. Abril 2025

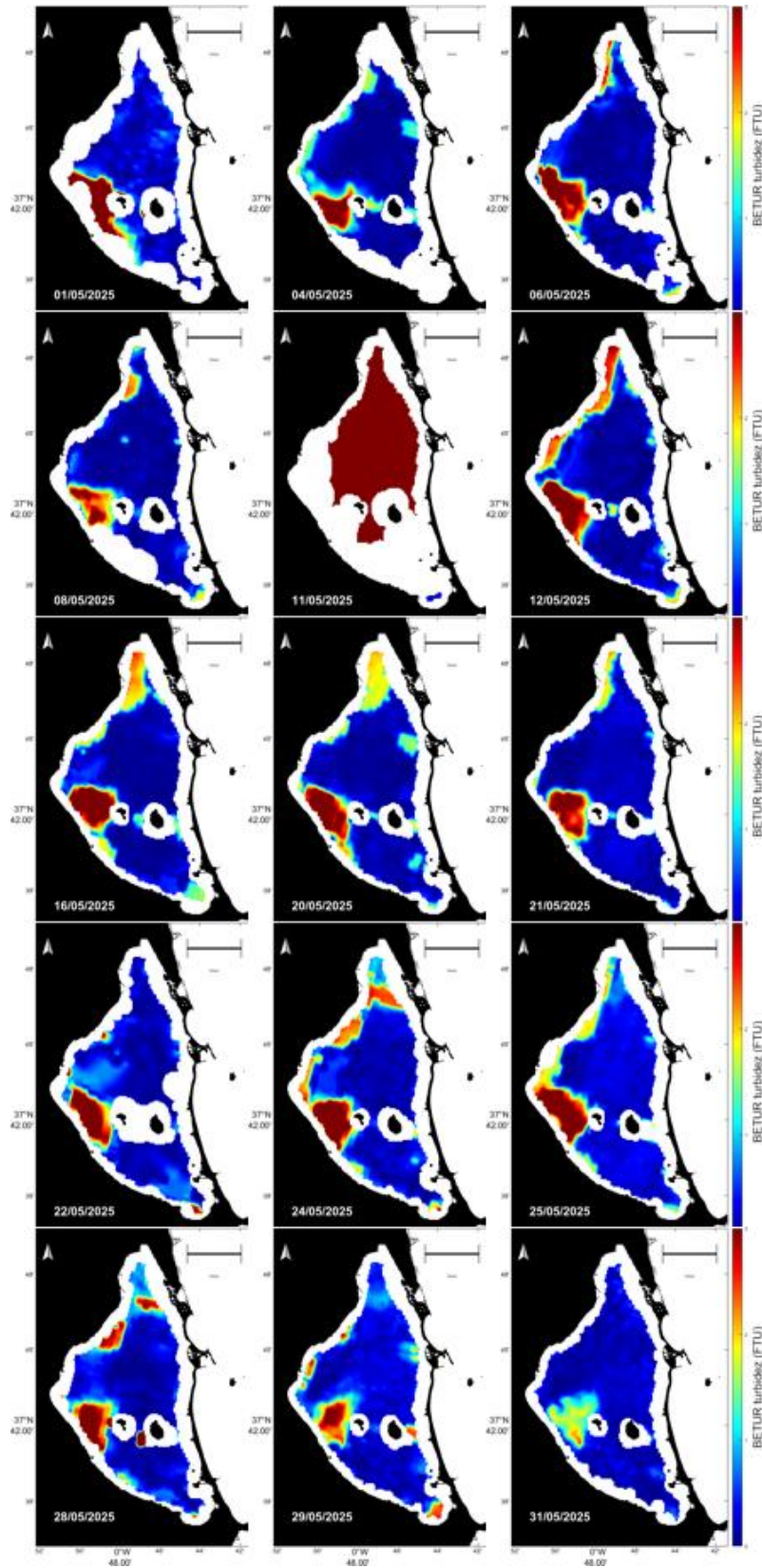


Figura 46: Mapas satelitales Sentinel-3 de turbidez aplicando el algoritmo Nechard. Mayo 2025

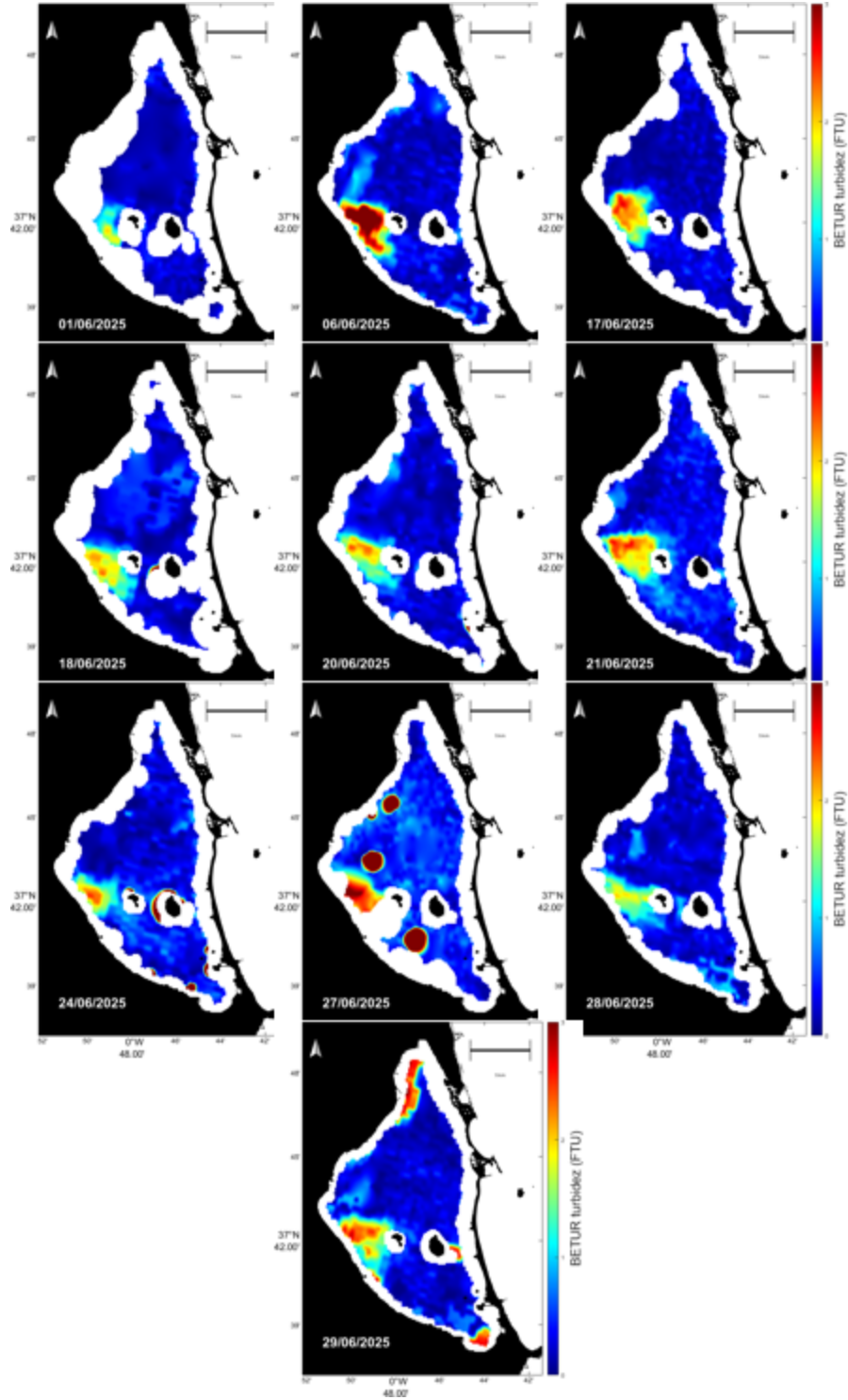


Figura 47: Mapas satelitales Sentinel-3 de turbidez aplicando el algoritmo Nechard. Junio 2025

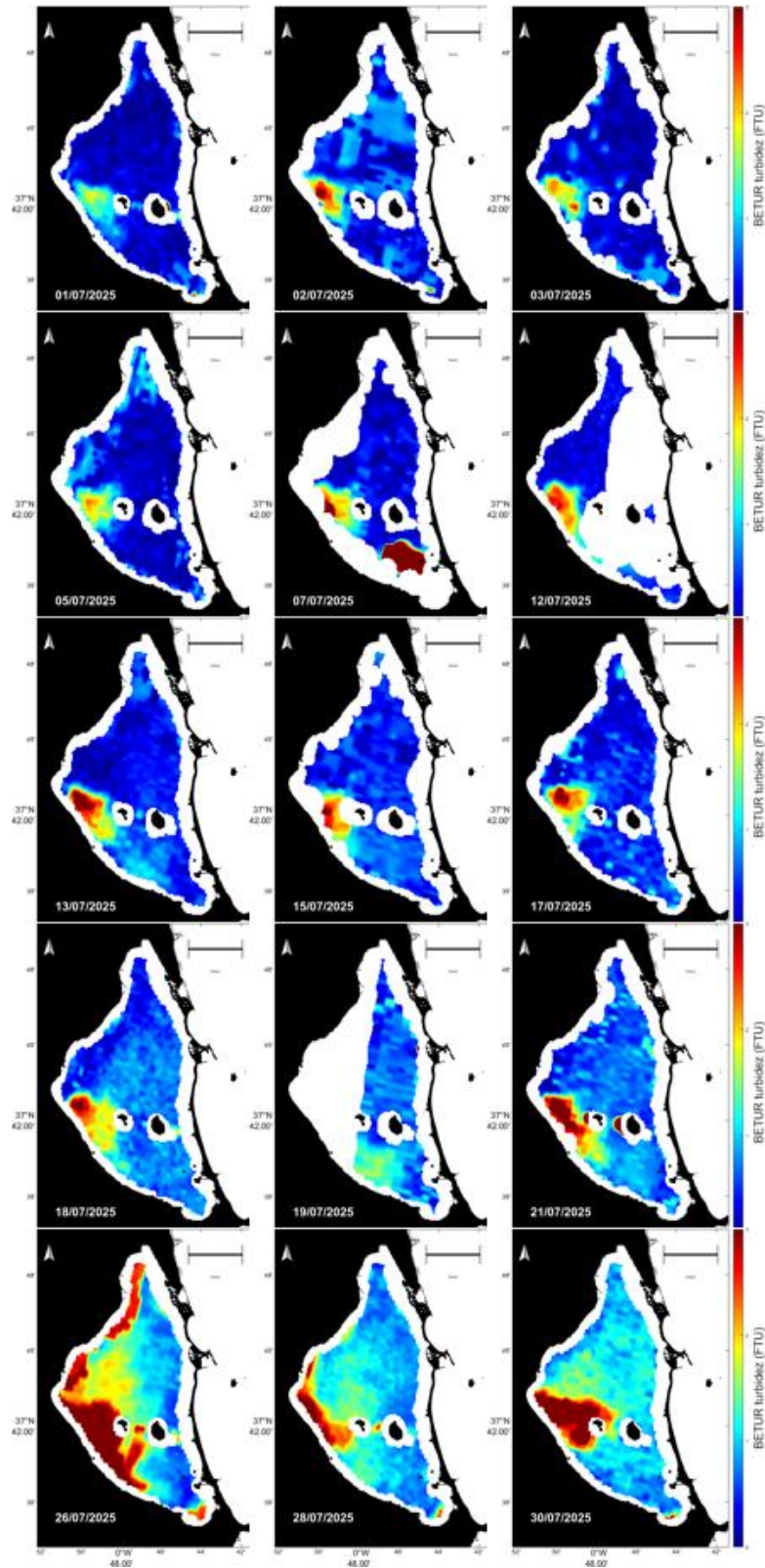


Figura 48: Mapas satelitales Sentinel-3 de turbidez aplicando el algoritmo Nechard. Julio 2025

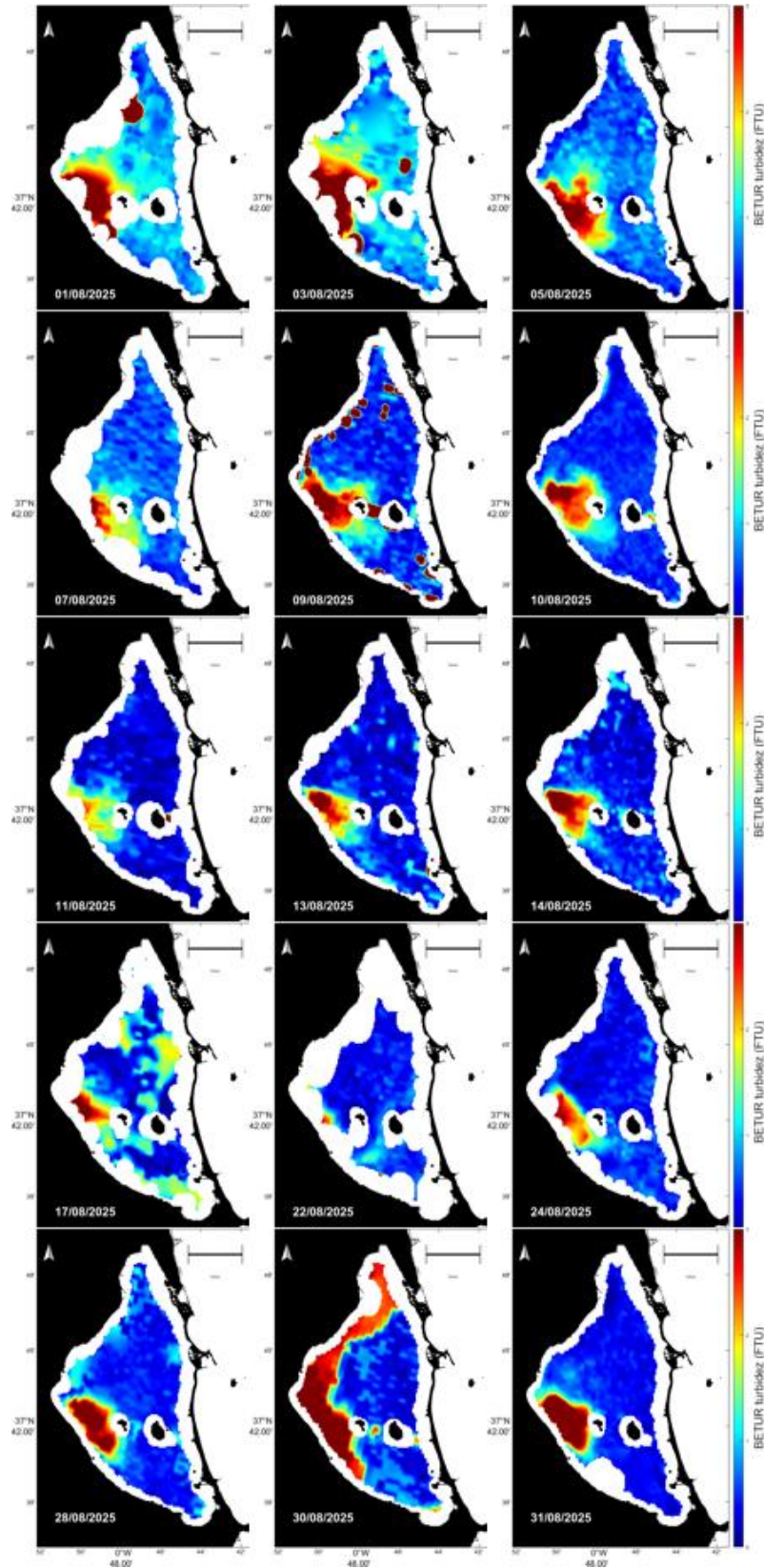


Figura 49: Mapas satelitales Sentinel-3 de turbidez aplicando el algoritmo Nechard. Agosto 2025

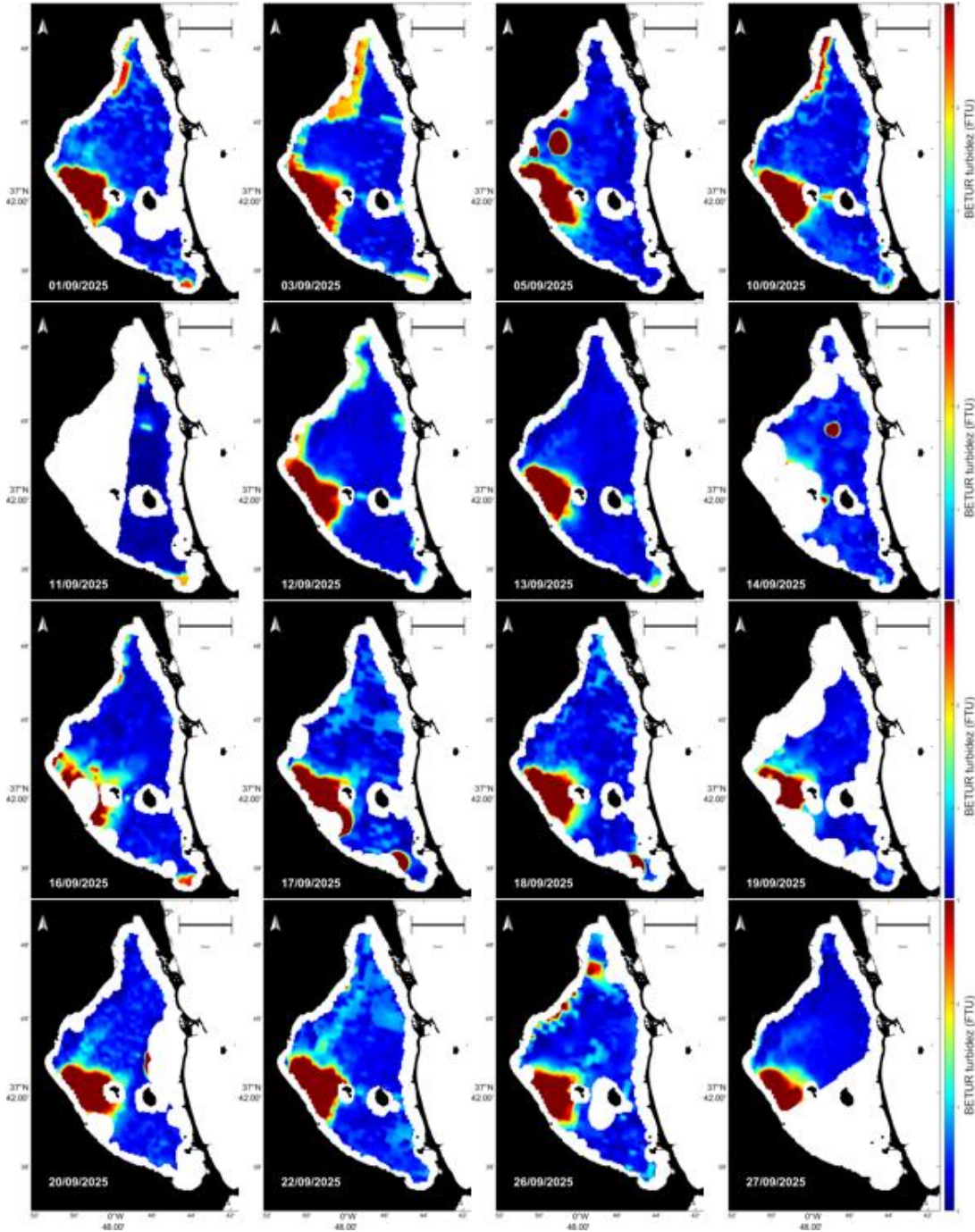


Figura 50: Mapas satelitales Sentinel-3 de turbidez aplicando el algoritmo Nechard. Septiembre 2025

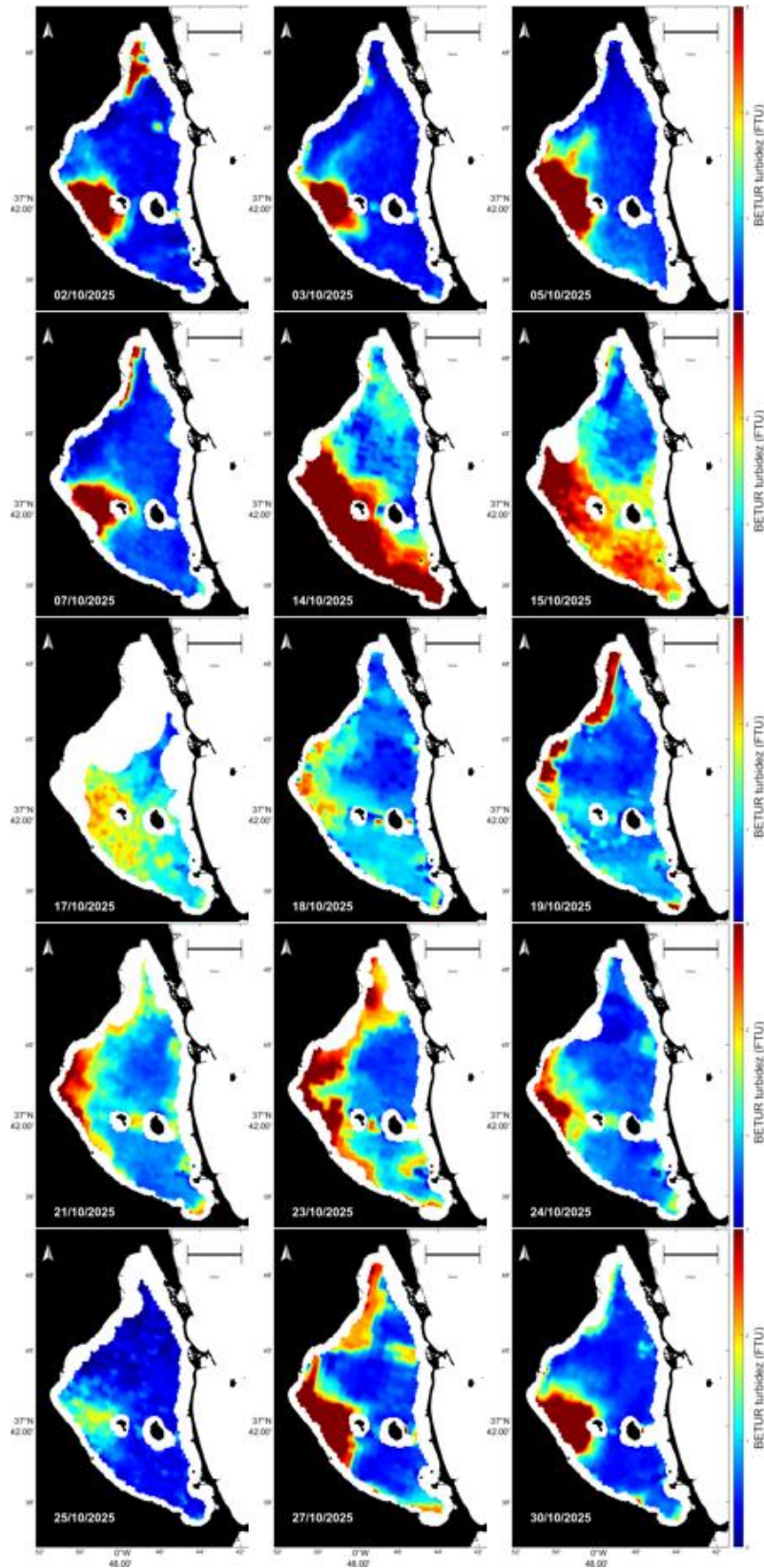


Figura 51: Mapas satelitales Sentinel-3 de turbidez aplicando el algoritmo Nechard. Octubre 2025

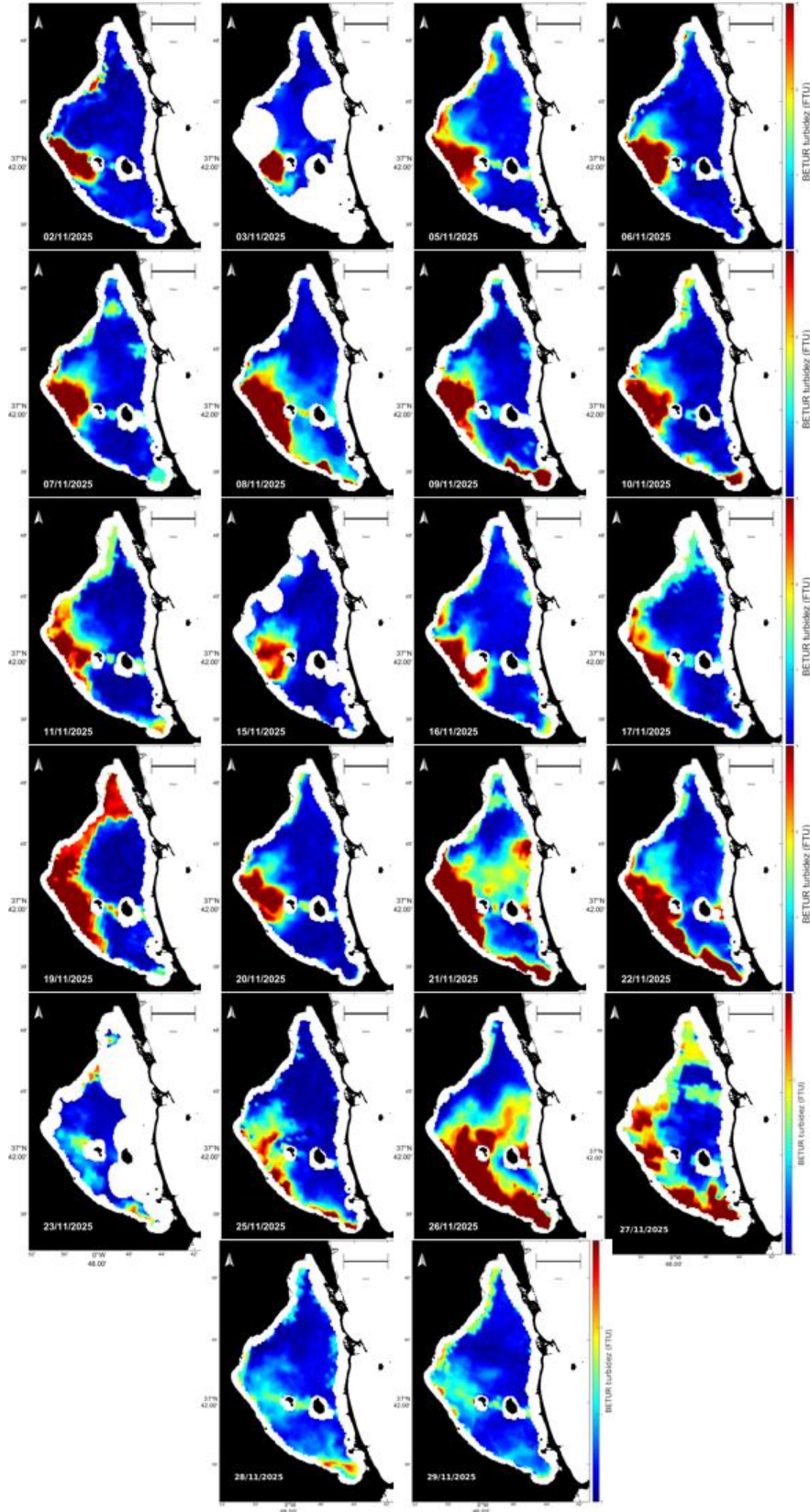


Figura 52: Mapas satelitales Sentinel-3 de turbidez aplicando el algoritmo Nechard. Noviembre 2025

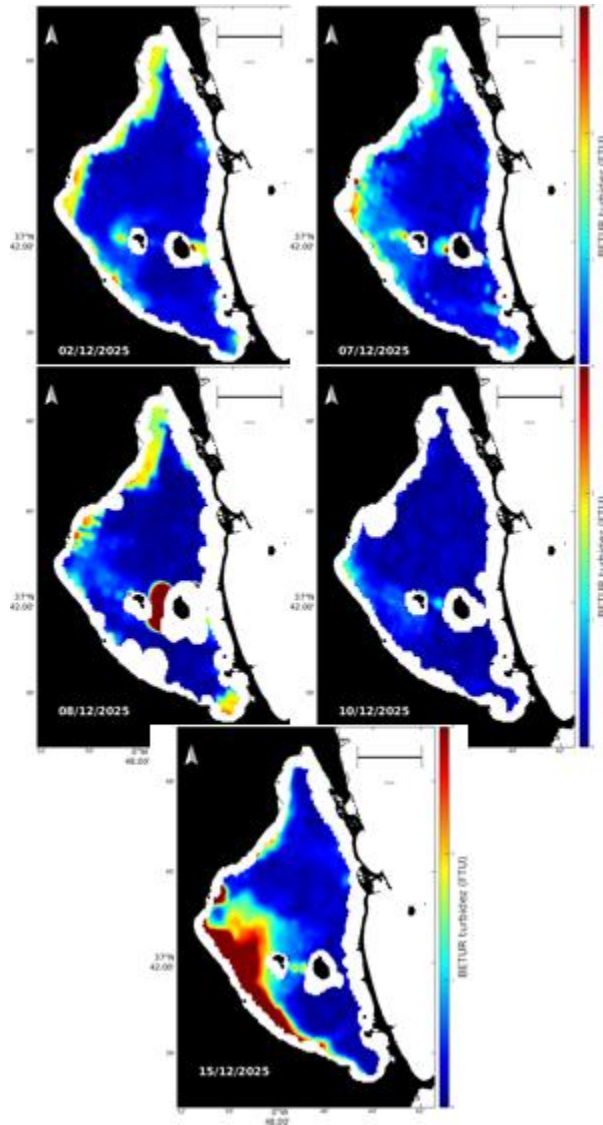


Figura 53: Mapas satelitales Sentinel-3 de turbidez aplicando el algoritmo Nechard. Diciembre 2025

7.3.2 Mapas %lo

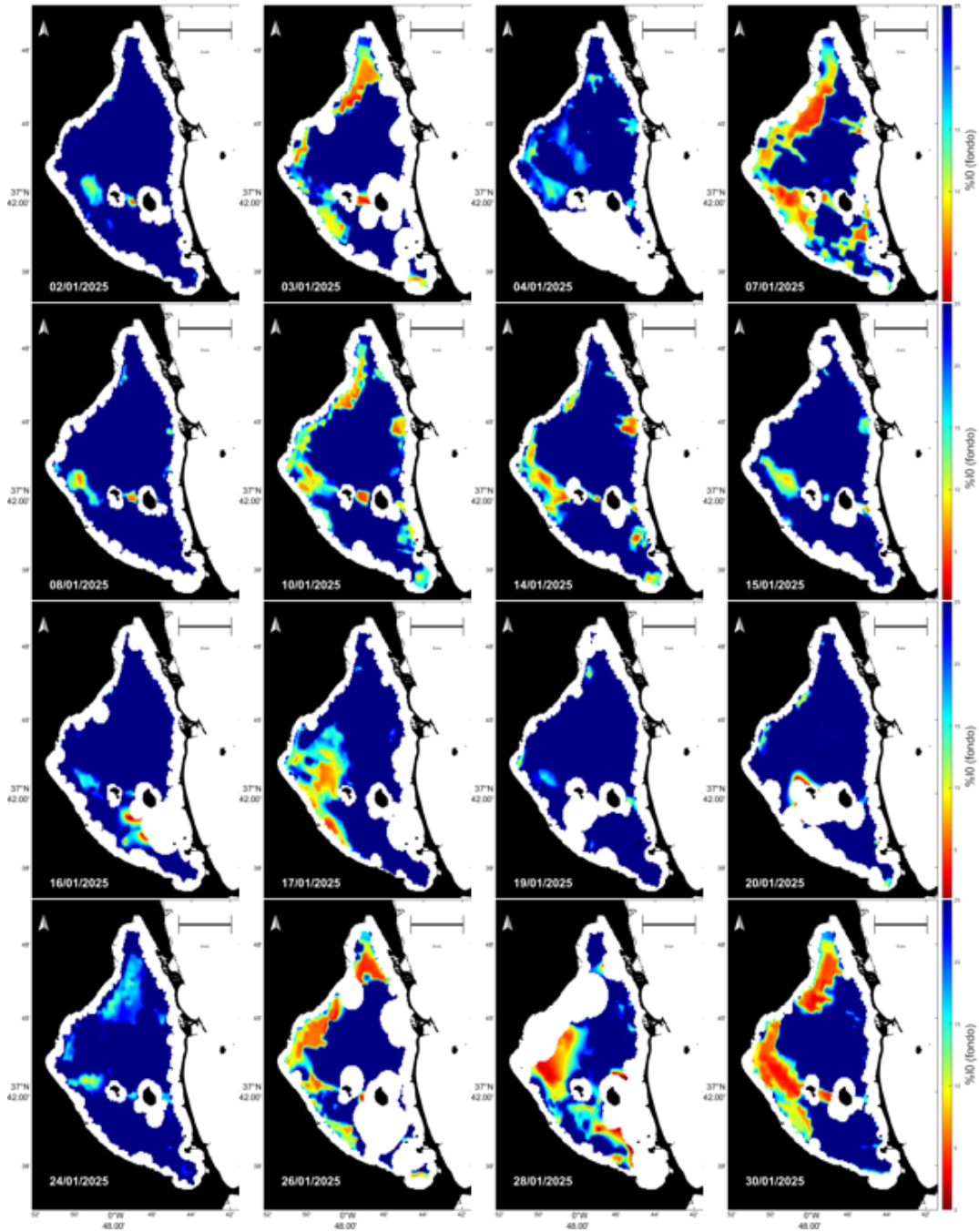


Figura 54: Mapas satelitales Sentinel-3 de %lo. Enero 2025

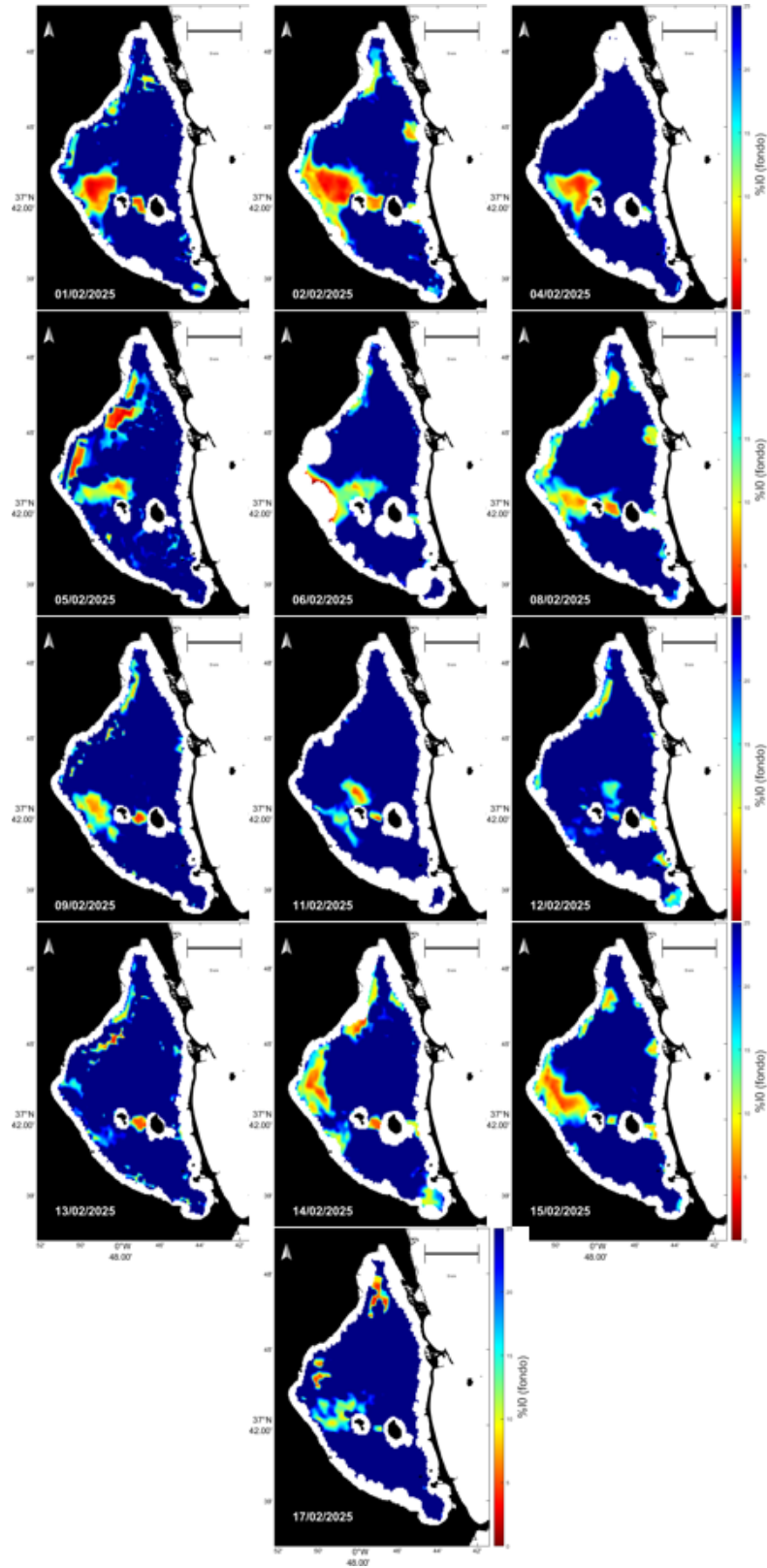


Figura 55: Mapas satelitales Sentinel-3 de %lo. Febrero 2025

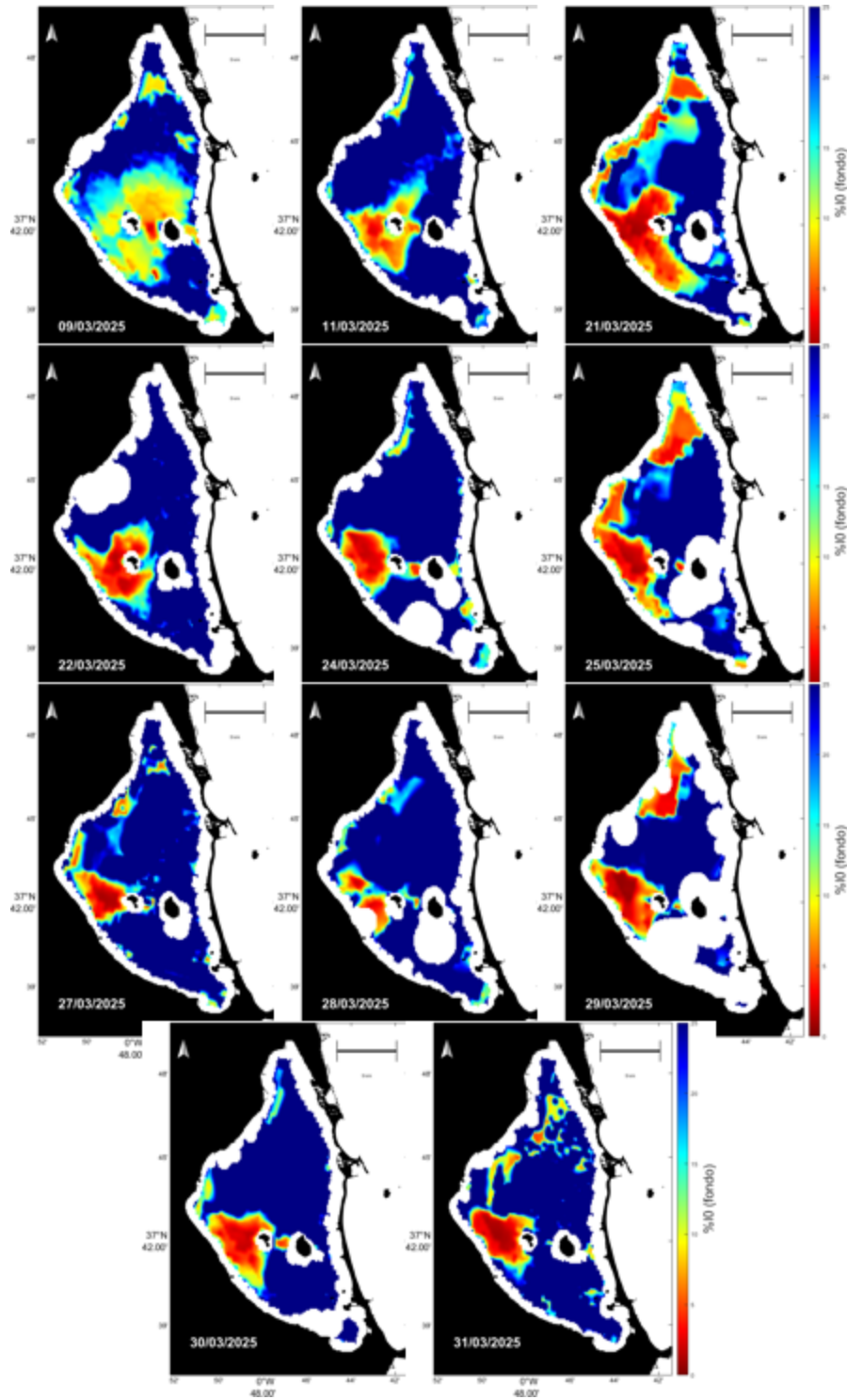


Figura 56: Mapas satelitales Sentinel-3 de %lo. Marzo 2025

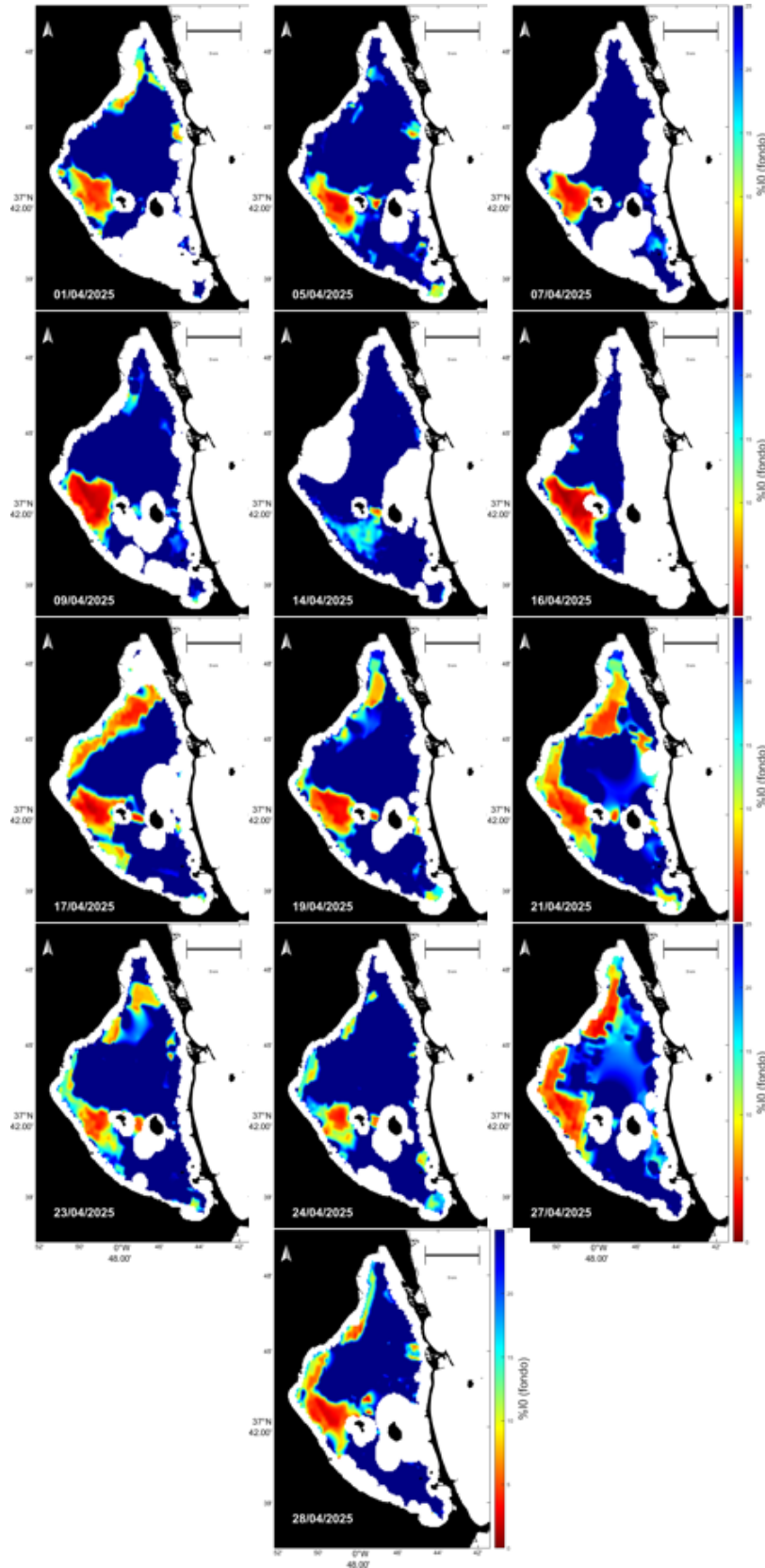


Figura 57: Mapas satelitales Sentinel-3 de %lo. Abril 2025

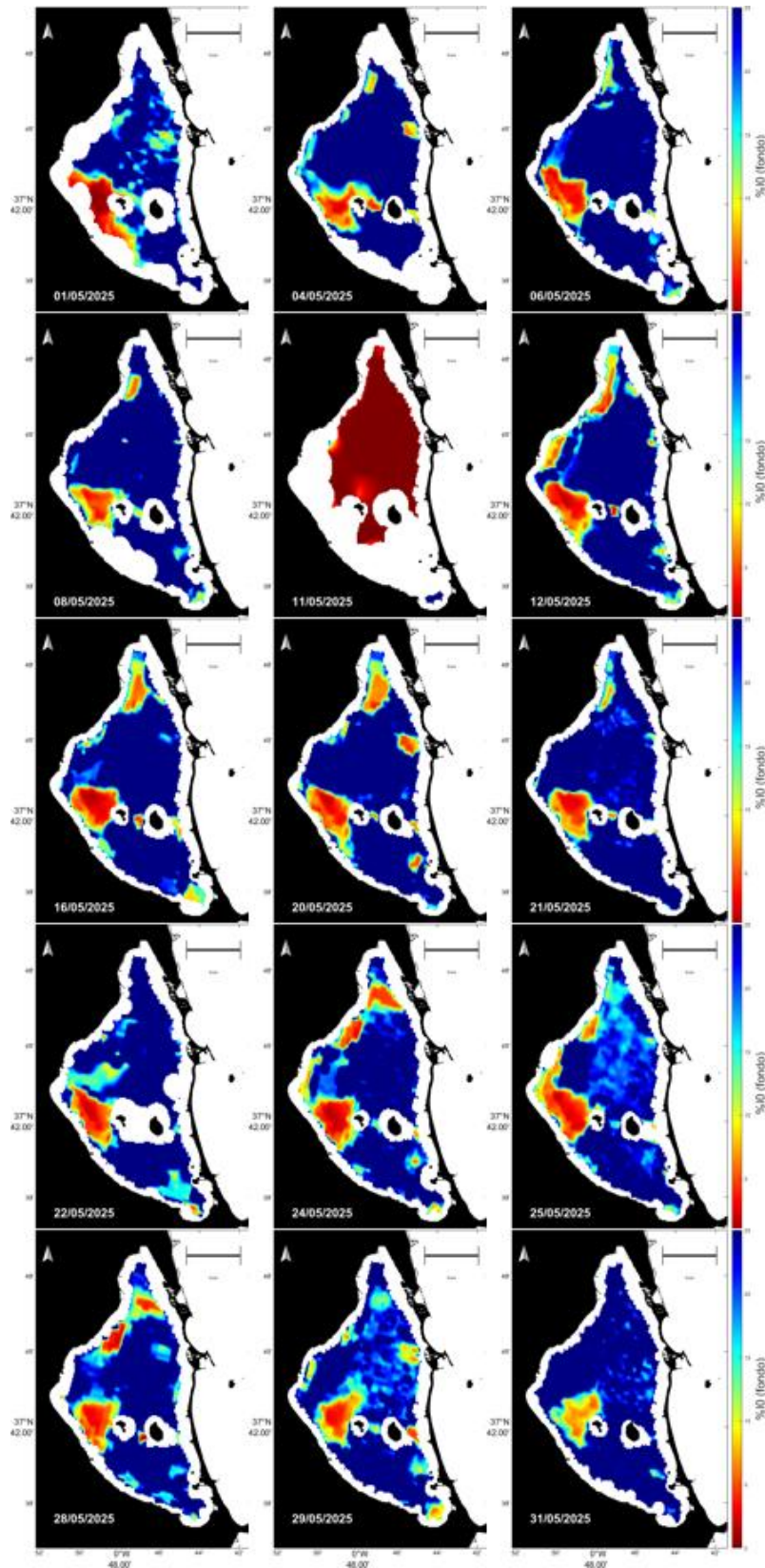


Figura 58: Mapas satelitales Sentinel-3 de %10. Mayo 2025

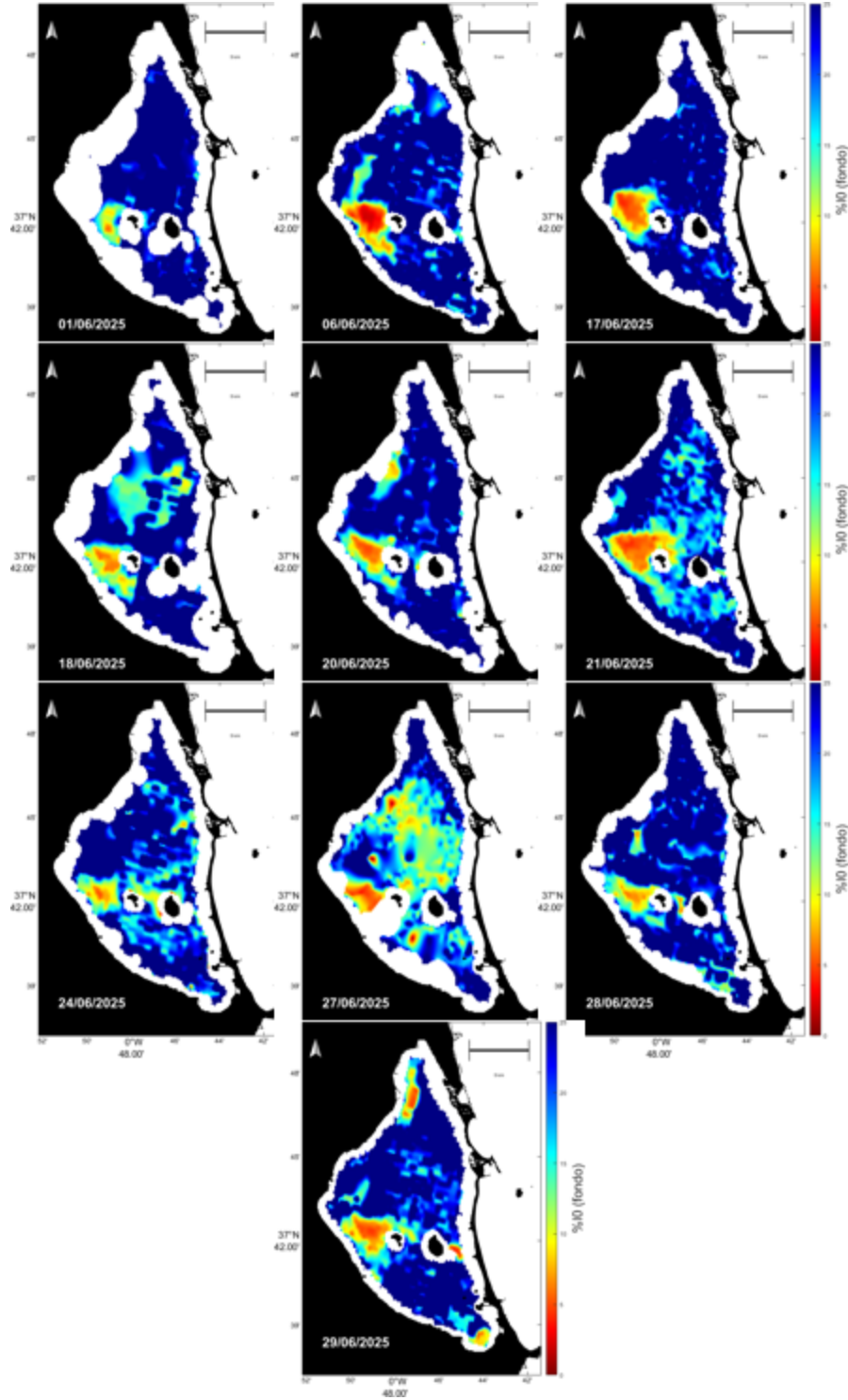


Figura 59: Mapas satelitales Sentinel-3 de %l_o. Junio 2025

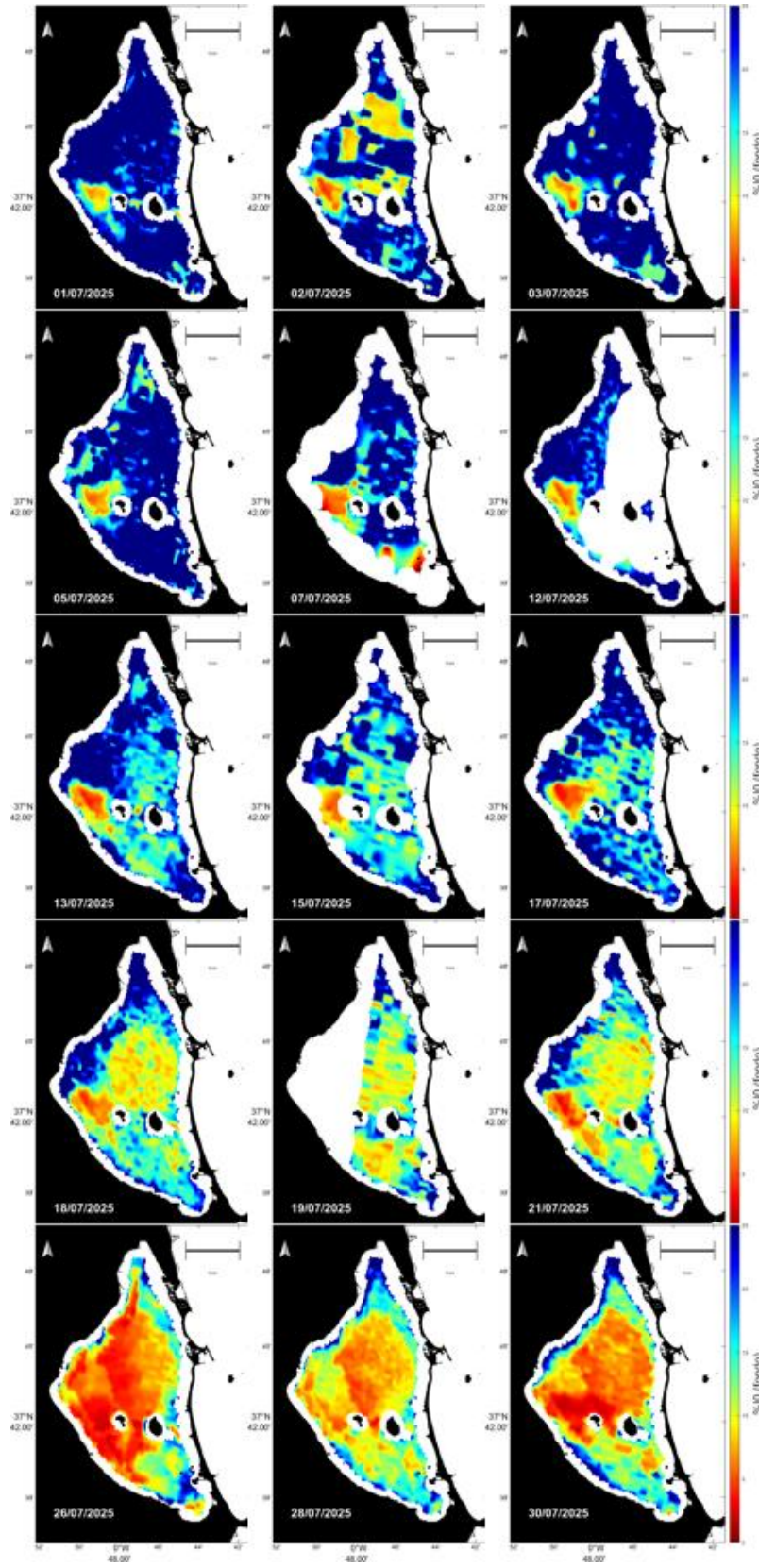


Figura 60: Mapas satelitales Sentinel-3 de %10. Julio 2025

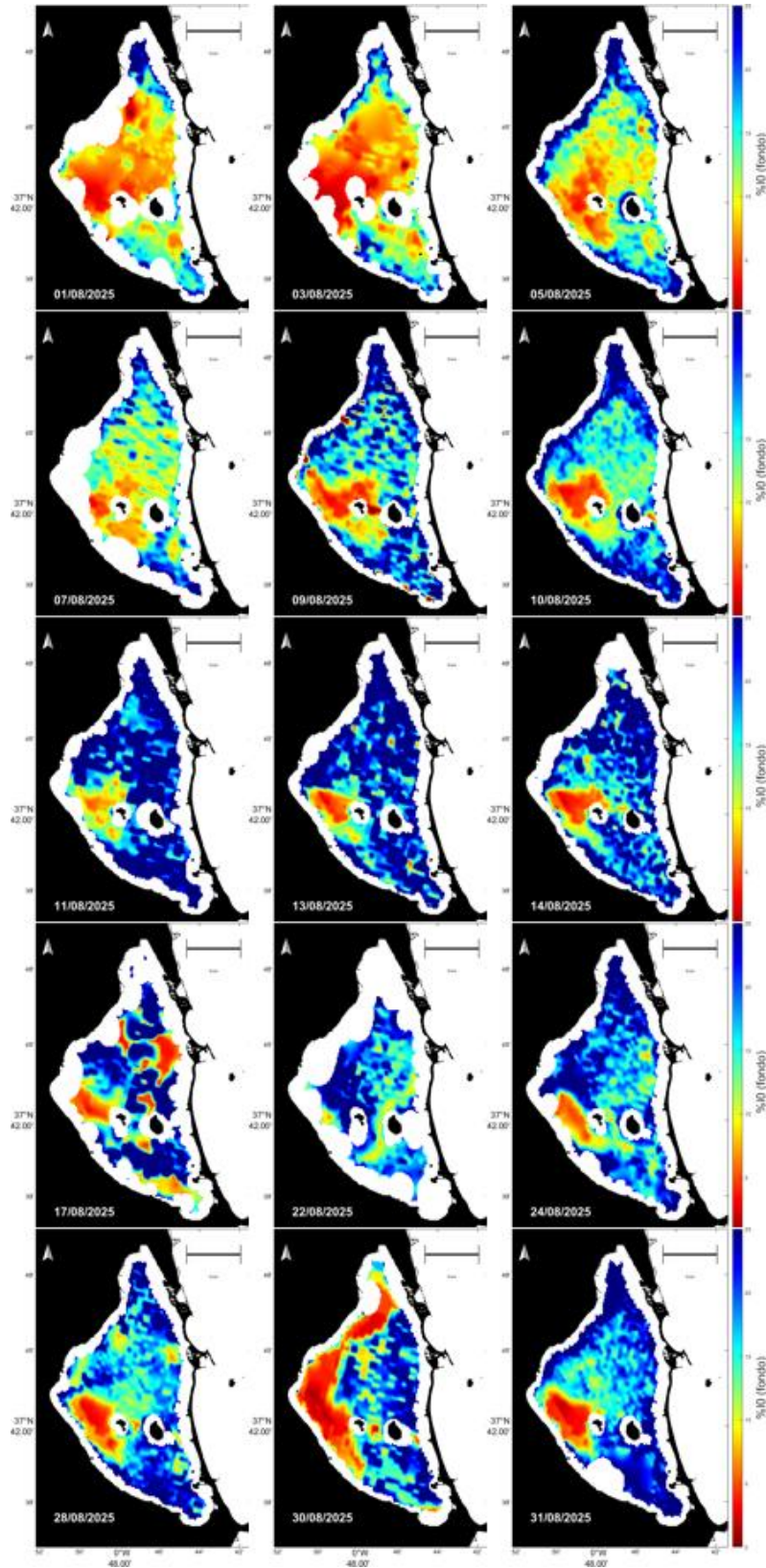


Figura 61: Mapas satelitales Sentinel-3 de %I0. Agosto 2025

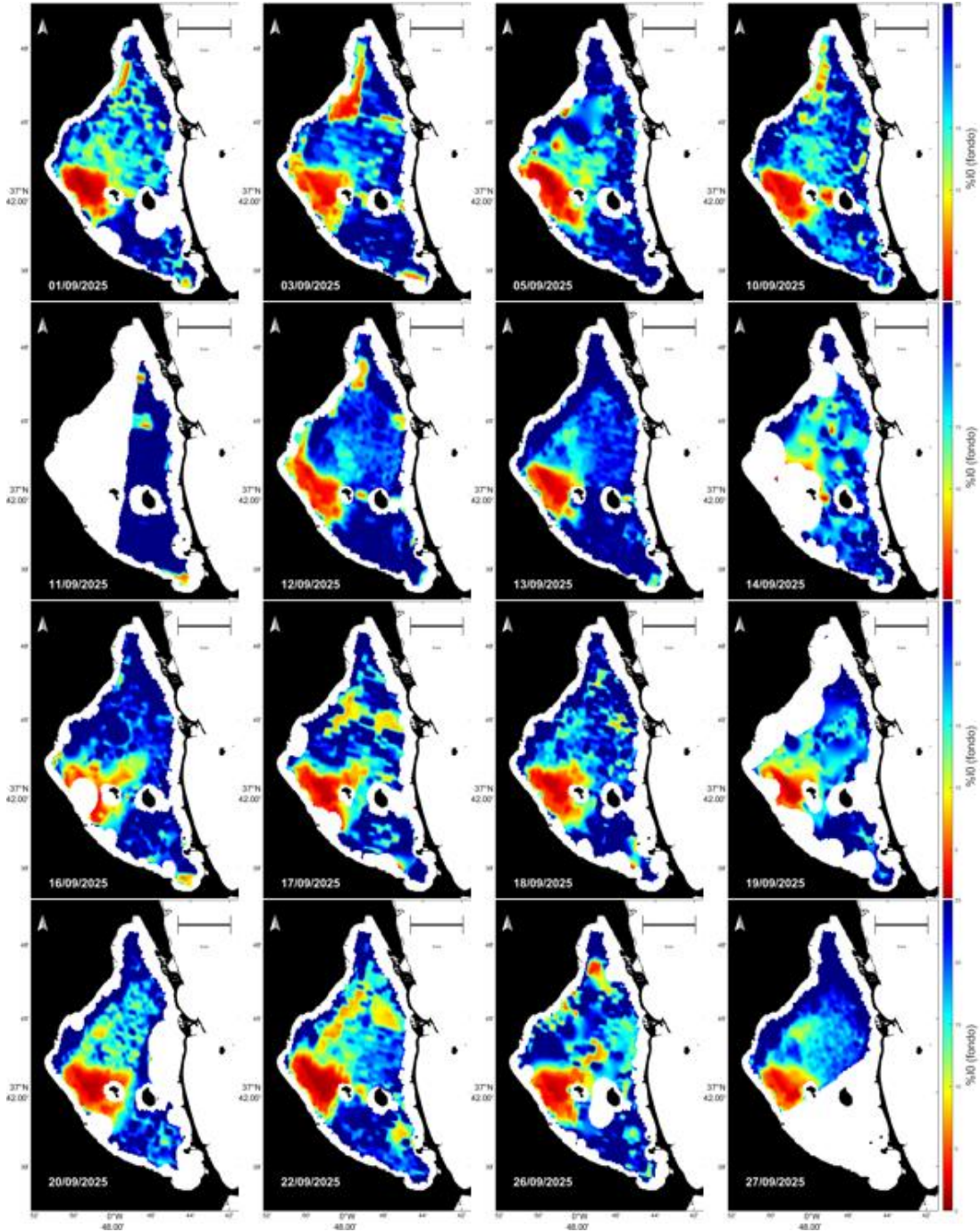


Figura 62: Mapas satelitales Sentinel-3 de %lo. Septiembre 2025

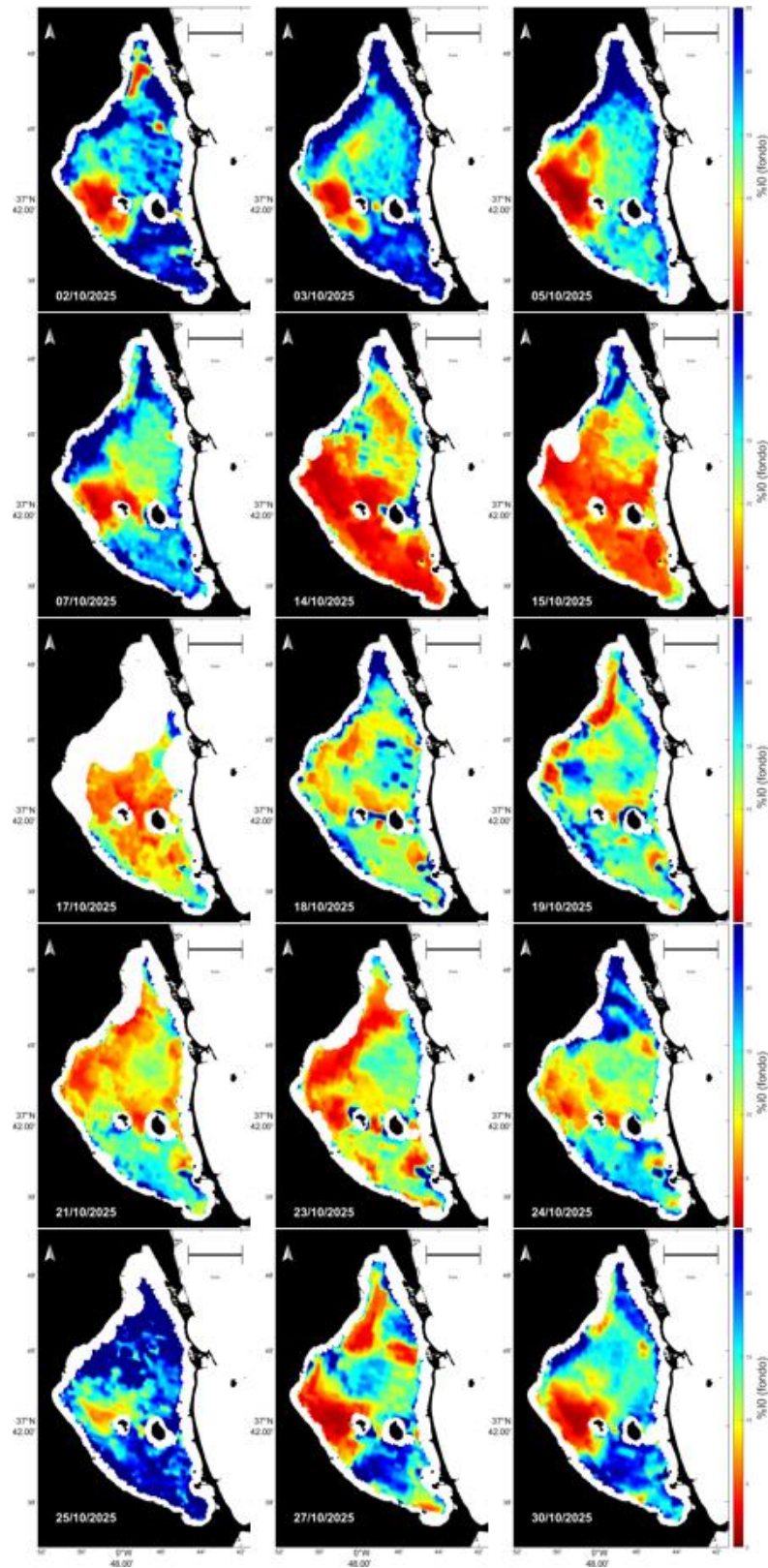


Figura 63: Mapas satelitales Sentinel-3 de %lo. Octubre 2025

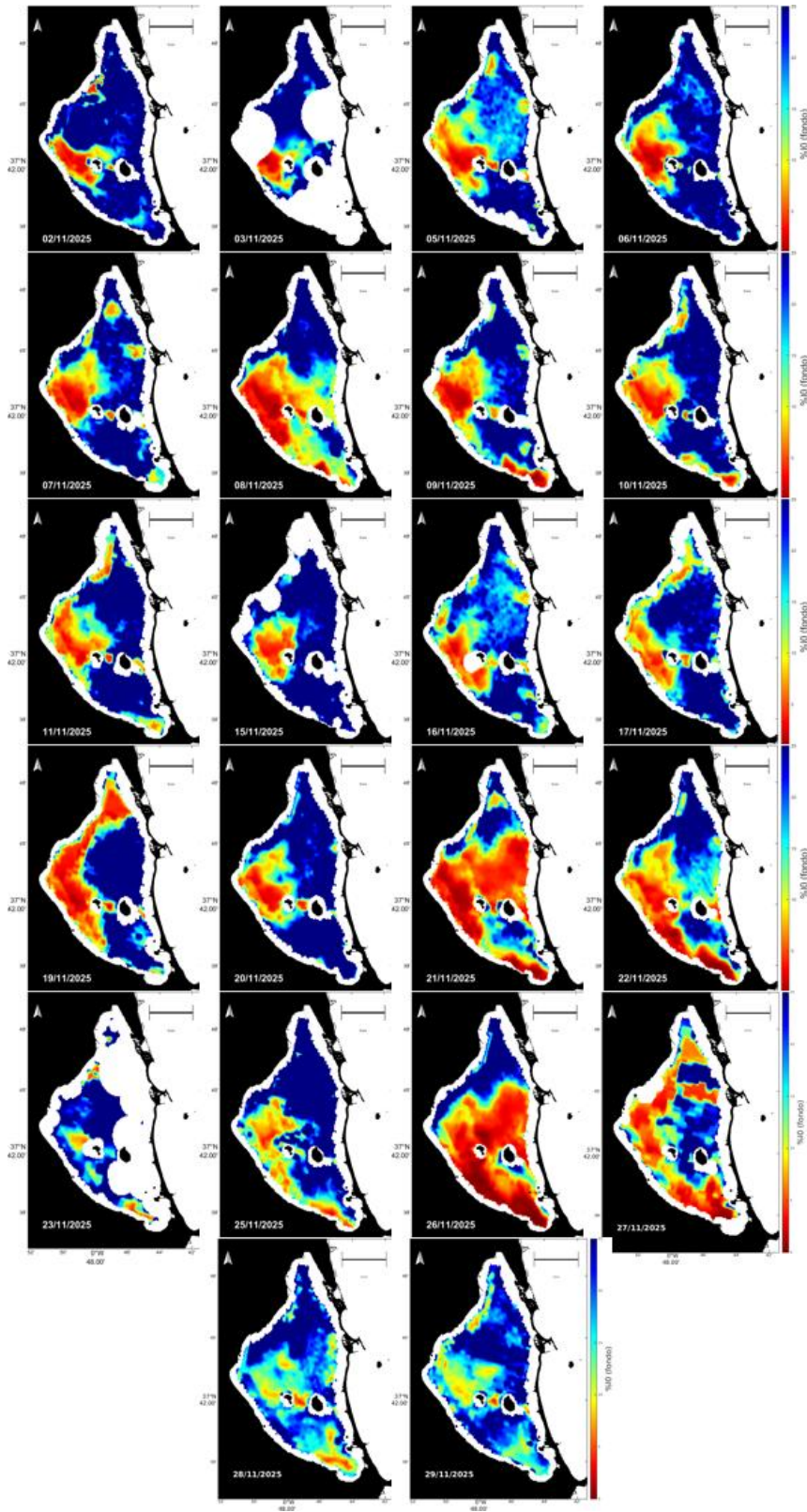


Figura 64: Mapas satelitales Sentinel-3 de %lo. Noviembre 2025

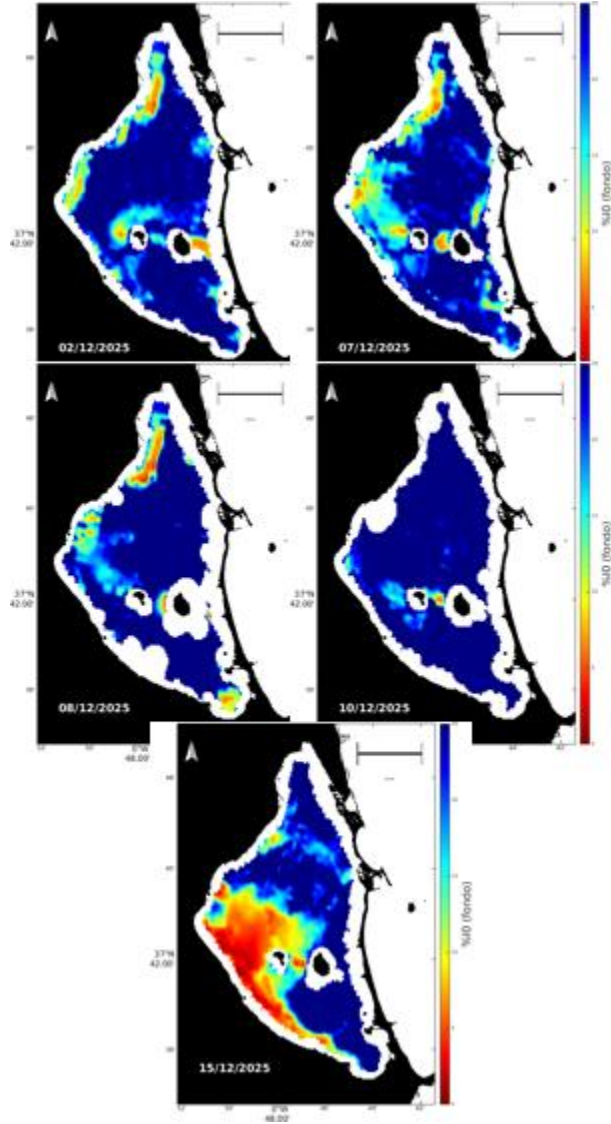


Figura 65: Mapas satelitales Sentinel-3 de %lo. Diciembre 2025