

# NUEVO EVENTO DE MORTALIDAD MASIVA DE ORGANISMOS MARINOS EN EL MAR MENOR: CONTEXTO Y FACTORES

Instituto Español de Oceanografía (IEO)

Septiembre 2021



Citar este documento como Ruiz, J.M.; Clemente-Navarro, P.; Mercado, J.M; Fraile-Nuez, E.; Albentosa, M.; Marín-Guirao, L.; Santos, J. (2021). Nuevo evento de mortalidad masiva de organismos marinos en el Mar Menor: contexto y factores. Informe de asesoramiento técnico del Instituto Español de Oceanografía (IEO). 24pp.

**Queda absolutamente prohibida la publicación de los datos contenidos en este informe sin el consentimiento previo de los autores.**

## INDICE

|  |    |
|--|----|
| Contexto del evento: eutrofización del ecosistema lagunar .....                    | 3  |
| Proliferaciones ( <i>blooms</i> ) fitoplanctónicas.....                            | 4  |
| Concentración de material particulado en la columna de agua .....                  | 8  |
| Reducción de la disponibilidad de luz y poblaciones de macrófitos bentónicos ..... | 8  |
| Evolución del oxígeno disuelto y potencial redox de la columna de agua .....       | 11 |
| Causas potenciales de la mortalidad masiva de fauna .....                          | 15 |
| Temperatura del agua.....  | 17 |
| Salinidad .....  | 20 |
| SÍNTESIS Y CONCLUSIONES .....  | 22 |
| Referencias bibliográficas .....   | 24 |

**El presente informe es complementario al realizado en julio de 2020, disponible en [http://www.ieo.es/es\\_ES/web/ieo/](http://www.ieo.es/es_ES/web/ieo/). El presente informe actualiza algunos de los aspectos clave tratados en el informe anterior por lo que algunos de los resultados, comentarios e interpretaciones se encuentran relacionados con análisis más amplios de los temas abordados realizados en dicho informe.**

## Contexto del evento: eutrofización del ecosistema lagunar

El nuevo evento de mortalidad masiva de fauna marina ocurrido en el Mar Menor se contextualiza en el **proceso de eutrofización** que la laguna costera viene experimentando a lo largo de las últimas décadas como consecuencia de los aportes masivos y casi continuos de nutrientes (Nitrógeno y Fósforo) procedentes de la actividad humana, que entran en la laguna a través de las siguientes vías principales, dependiendo de una serie de factores climáticos y antrópicos:

- a) Escorrentía superficial a través de ramblas (principalmente aguas de rechazo de desaladoras)
- b) Aguas subterráneas (acuífero)
- c) Entradas del nivel freático en superficie
- d) Arrastre de agua y materiales de la cuenca vertiente durante lluvias torrenciales
- e) Colectores de pluviales conectados al sistema de alcantarillado
- f) Intercambio con la atmósfera.

De acuerdo con el conocimiento existente sobre el tema, que es muy amplio y basado en numerosas evidencias en las costas del planeta, el exceso de nutrientes en un ecosistema promueve a medio y largo plazo una serie de procesos consistentes en:

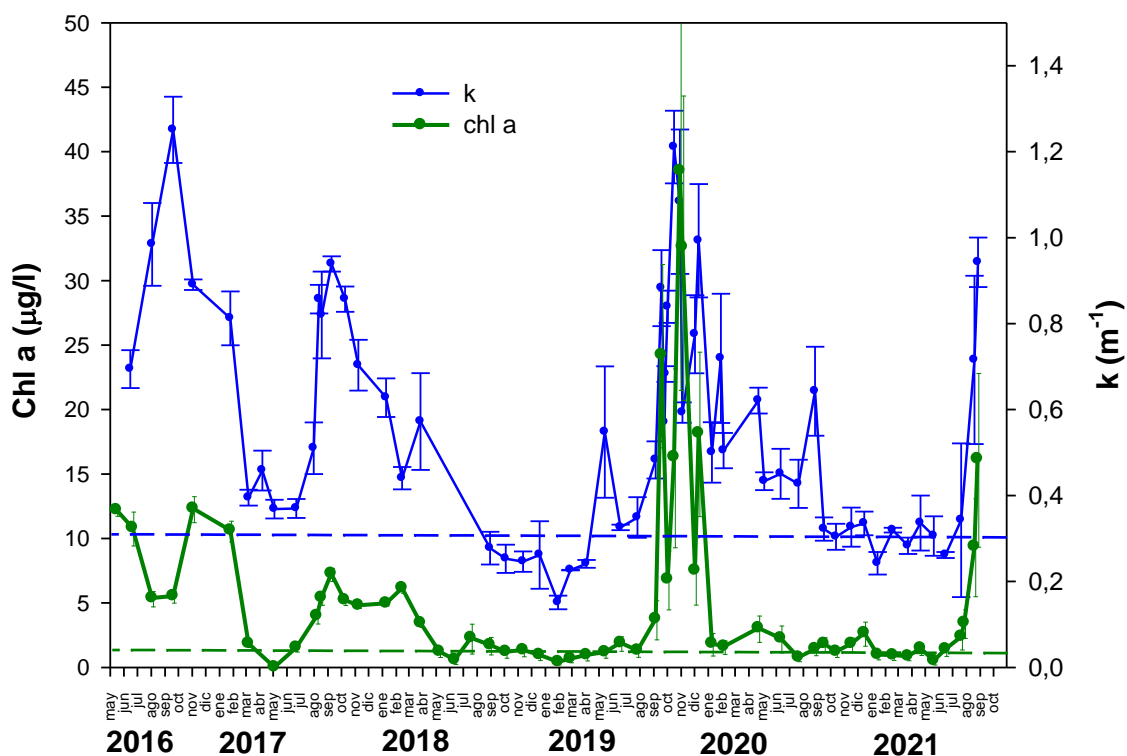
- 1.- Proliferación de algas oportunistas de crecimiento rápido (tanto macroscópicas como microscópicas), incluyendo especies de fitoplancton tóxico.
- 2.- Reducción de la luz que llega al fondo disponible para la fotosíntesis de los macrófitos y microorganismos bentónicos.
- 3.- Exceso de materia orgánica en la columna de agua y los sedimentos susceptible de ser descompuesta por la comunidad microbiana.
- 4.- Incremento de la respiración del sistema y reducción de las concentraciones de oxígeno disuelto hasta llegar a niveles próximos a la hipoxia, e incluso anoxia en fases muy severas.
- 5.- Intensificación del metabolismo anaerobio con la consiguiente producción de compuestos disueltos reducidos del carbono (Metano), nitrógeno (Amonio) y azufre (Sulfhídrico), con un elevado potencial tóxico sobre los organismos marinos.
- 6.- Migración a gran escala de organismos marinos, tanto vertebrados (peces) como invertebrados (crustáceos, moluscos, etc.) llevando en fases avanzadas a episodios de mortalidad masiva a consecuencia del déficit de oxígeno, las elevadas concentraciones de compuestos tóxicos y/o la proliferación de microorganismos tóxicos y disruptores del ecosistema.

Las evidencias disponibles por los equipos científicos del IEO para monitorizar el Mar Menor y evaluar su estado son consistentes con los puntos anteriores y, por tanto, todo indica que el nuevo episodio de mortalidad de organismos marinos observado en el Mar Menor es un

síntoma más de que la albufera se encuentra en una etapa muy avanzada y extrema del proceso de eutrofización. Algunas de estas evidencias se exponen en los siguientes puntos.

## Proliferaciones (*blooms*) fitoplanctónicas

En la figura 1 se muestra la evolución de la clorofila *a* (chl *a*) en el Mar Menor desde 2016. Esta variable es un indicador de cómo evoluciona la abundancia del fitoplancton en la columna de agua. En la Figura 2 se muestra la evolución a escala decenal de la clorofila desde principios de la década de los 80 del siglo pasado.

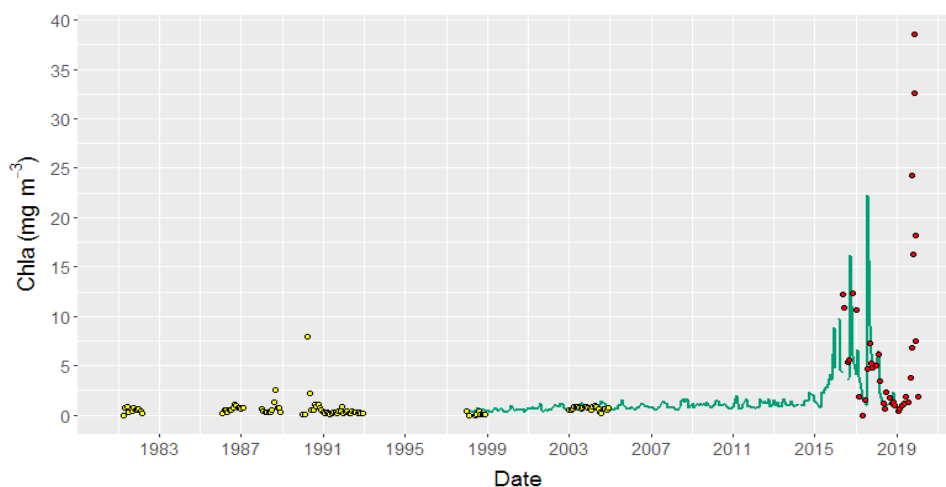


**Figura 1.** Evolución de la clorofila (chl *a*) y de la turbidez (como coeficiente de extinción de la luz,  $k$ ,  $m^{-1}$ ) en la columna de agua del Mar Menor desde 2016. La línea discontinua verde es el promedio de la chl *a* en las décadas anteriores a 2015; igualmente, la línea discontinua azul es promedio de la turbidez de la columna de agua en las décadas previas. **Fuente:** datos propios del programa DMMEM desarrollado y financiado por el IEO-CSIC. (DMMEM: Directiva marco estrategias marinas y Mar Menor Eutrophication Monitoring).

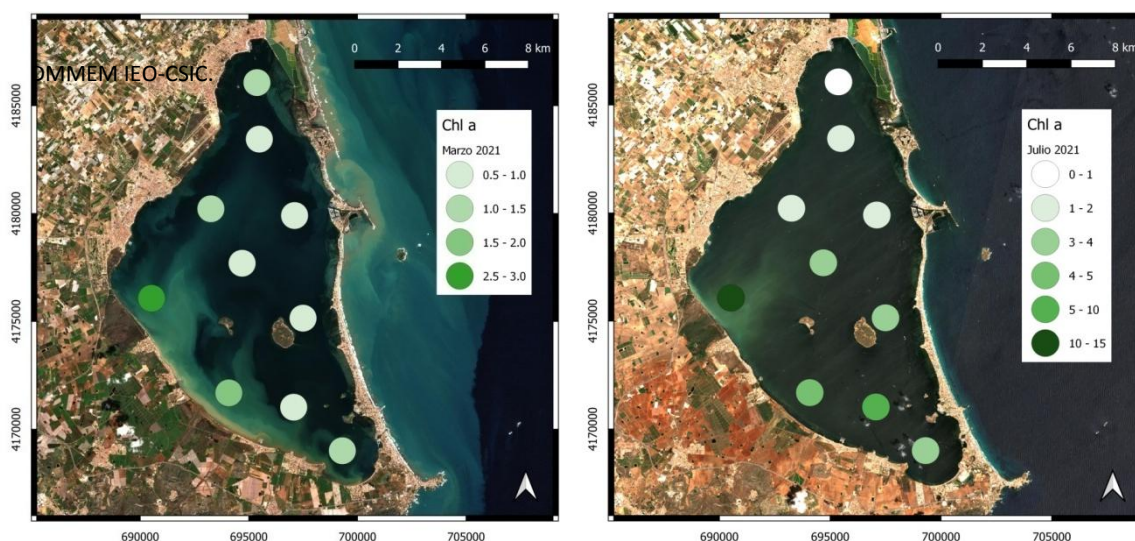
Durante la crisis distrófica del Mar Menor que tiene su inicio en 2015 (Mercado et al. 2021) se han producido 4 grandes episodios de proliferación fitoplanctónica, bien diferenciados en la gráfica de la Figura 1, separados entre sí por periodos de duración variable de aguas más transparentes, y que son los siguientes:

- 1.- Episodio “sopa verde” en 2016
- 2.- Segundo episodio de “sopa verde” entre 2017 y 2018
- 3.- Tercer episodio asociado a las DANAS de 2019-2020

#### 4.- Cuarto y último episodio iniciado en el mes de julio de 2021



**Figura 2.** Evolución decenal de la chl  $a$ . La línea verde continua son valores obtenidos a partir de imágenes de satélite; los puntos amarillos son datos de chl  $a$  de diferentes programas y proyectos del IEO; los puntos rojos son datos de obtenidos en el muestreo mensual del proyecto DMMEM del IEO. **Fuente:** datos propios del programa DMMEM desarrollado y financiado por el IEO-CSIC.



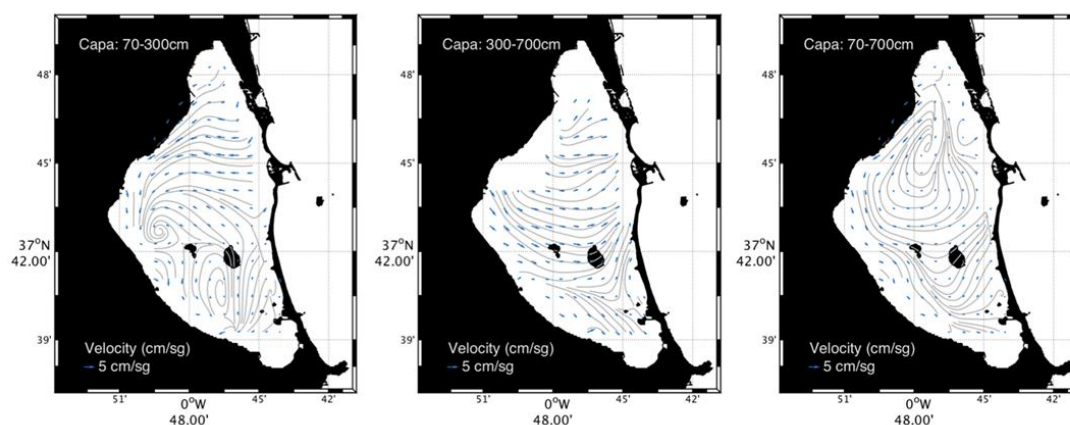
**Figura 3.** Variación espacial de la chl  $a$  en el Mar Menor en marzo (izda) y julio (dcha) de 2021. **Fuente:** Proyecto SEE ME, Plan Nacional I+D+i Ref.: PID2019 109355RA-100.MCIU/AEI/FEDER UE). Las imágenes de fondo proceden de la misión Sentinel 2 y muestran las variaciones espaciales de la turbidez del agua.

Las concentraciones de chl  $a$  de estos episodios son similares y alcanzan valores medios que son hasta 1 orden de magnitud superior a la media general registrada en décadas anteriores (Figura 1), aunque en el tercero se alcanzaron niveles mucho mayores, probablemente por la entrada de enormes cantidades de materia orgánica (con alto contenido no solo en nitrógeno sino también en fósforo) asociadas a los sedimentos terrestres arrastrados por las lluvias a la laguna, la mayoría procedentes de terrenos agrícolas. En cualquier caso, las concentraciones de chl  $a$  alcanzadas durante estos episodios (e incluso en parte de los episodios intermedios de

aguas más claras) son muy superiores a las registradas históricamente en el Mar Menor (Figura 2).

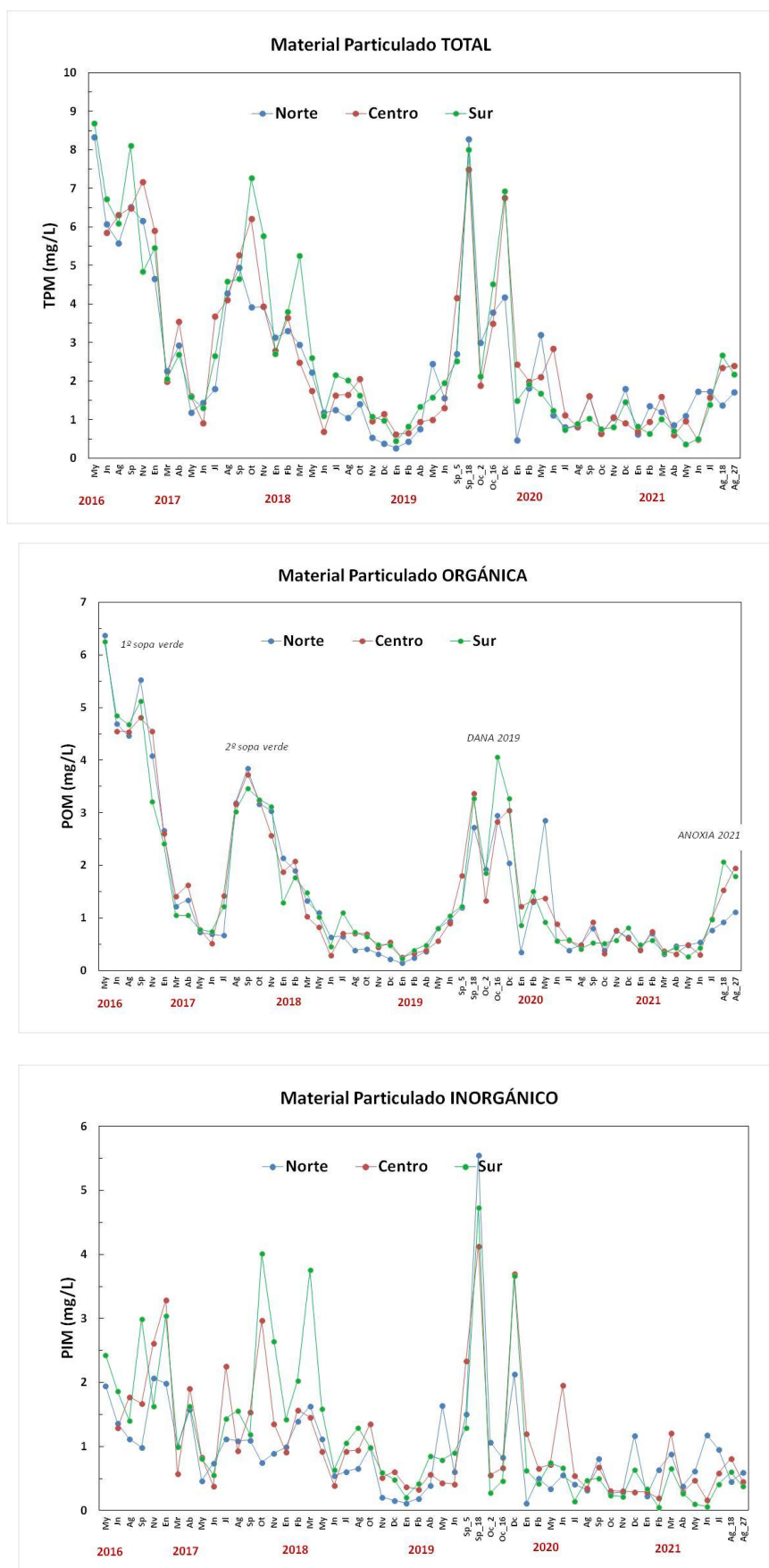
Muestreos adicionales realizados en marzo y julio de 2021 (Figura 3) corroboran que en marzo las concentraciones de clorofila ya empezaban a ser algo elevadas, en particular en la costa oeste. El 27 de julio las concentraciones ya alcanzaban valores medios de 12-13  $\mu\text{g/l}$ , muy similares a los alcanzados en anteriores *blooms* fitoplanctónicas en la laguna (Figura 1), observándose los valores máximos frente a la rambla del Albujión. Los valores medios más elevados se observan en la parte central y sur, mientras que en el norte los valores se mantienen todavía bajos y normales (0-1  $\mu\text{g/l}$ ).

Este patrón de variación espacial guarda estrecha relación con los aportes continuos de aguas cargadas en nutrientes y materia orgánica a través de la rambla del Albujión, apreciables a simple vista en las imágenes del Sentinel 2 (Figura 3). Además, es consistente con el patrón espacial descrito con el modelo de corrientes aplicado por Fraile-Nuez et al (2018) (Figura 4) basado en datos obtenidos con alta resolución espacial en toda la columna de agua y en diferentes épocas del año (Ruiz et al. 2020). De acuerdo con este modelo, los aportes de agua que entran en la laguna a través de la rambla del Albujión serían transportados hacia el sur en sentido anti-horario, donde además la tasa de renovación del agua es menor lo que favorece la mayor permanencia de nutrientes y material particulado en el sistema (Fraile Nuez et al 2018).



**Figura 4.** Mapas de distribución del campo de velocidad anual promedio a partir de 4 campañas oceanográficas llevadas a cabo en Nov-2016, Feb-2017, Jun-2017 y Sep-2017. La figura de la izquierda representa el campo de velocidades superficial (70-300 cm), figura central la capa intermedia (300-700 cm) y la figura de la derecha la velocidad integral en toda la columna de agua (70-700 cm). **Fuente:** Fraile-Nuez et al., 2018.

El estado actual de este nuevo episodio de desarrollo fitoplanctónico es que continúa en aumento siguiendo una dinámica de tipo exponencial a partir de mitad de julio hasta el 26 de agosto, fecha del último muestreo realizado antes de redactar este informe. En consecuencia, los valores medios de clorofila han sobrepasado los 20  $\text{mg/l}$  en las zonas centro y sur de la laguna.



**Figura 5.** Evolución del material particulado total (MPT, arriba), orgánico (MPO, centro) e inorgánico (MPI, abajo) en el Mar Menor desde 2016 hasta el momento actual (28 de agosto de 2021) obtenidos mediante el análisis de muestras de agua a profundidades intermedias (3-4 m) y filtrado posterior en laboratorio, siguiendo la metodología descrita en Ruiz et al. 2020. **Fuente:** datos propios del programa DMMEM desarrollado y financiado por el IEO-CSIC.

## Concentración de material particulado en la columna de agua

En la figura 5 se muestra la evolución del material particulado total (MPT) en el Mar Menor desde 2016 hasta el momento actual (28 de agosto de 2021). Se observa claramente que los niveles medios de esta variable alcanzados en este episodio (1-2,4 mg/l) no son tal elevados como los observados en episodios anteriores: hasta 8-8,5 mg/l en 2016, 7,3 mg/l en 2017 y hasta 7 mg/l tras las DANAs de 2019.

Las razones de estas bajas concentraciones de MPT no están claras, pero entre otras se podría mencionar la naturaleza del material particulado en este evento particular o la dinámica de sedimentación hacia el fondo. Las variaciones de la MPT parecen estar principalmente gobernadas por la fracción orgánica (Figura 5), excepto en el evento de 2019-2020 en el que la fracción inorgánica tiene más peso, de acuerdo con las enormes cantidades de sedimentos terrígenos arrastrados por las lluvias a la laguna. En el evento de 2016, la descomposición de las praderas de macrófitos bentónicos probablemente contribuyó a los niveles de MPT y su persistencia en el tiempo. En contraste, este último evento parece estar únicamente relacionado con el *bloom* fitoplanctónico. En estudios anteriores se ha observado la existencia de un gradiente vertical de clorofila cuyo máximo se encuentra en las zonas más profundas (Farile-Nuez et al. 2018), lo que podría explicarse por la rápida sedimentación de las partículas fitoplanctónicas. Si las muestras son obtenidas a 3-4 m de profundidad en nuestro programa de monitorización, es posible que la sedimentación contribuya a explicar los bajos valores de MPT observados en este último evento. Está por determinar cómo pueden influir otros factores como las especies dominantes que componen la comunidad fitoplanctónica y su tamaño.

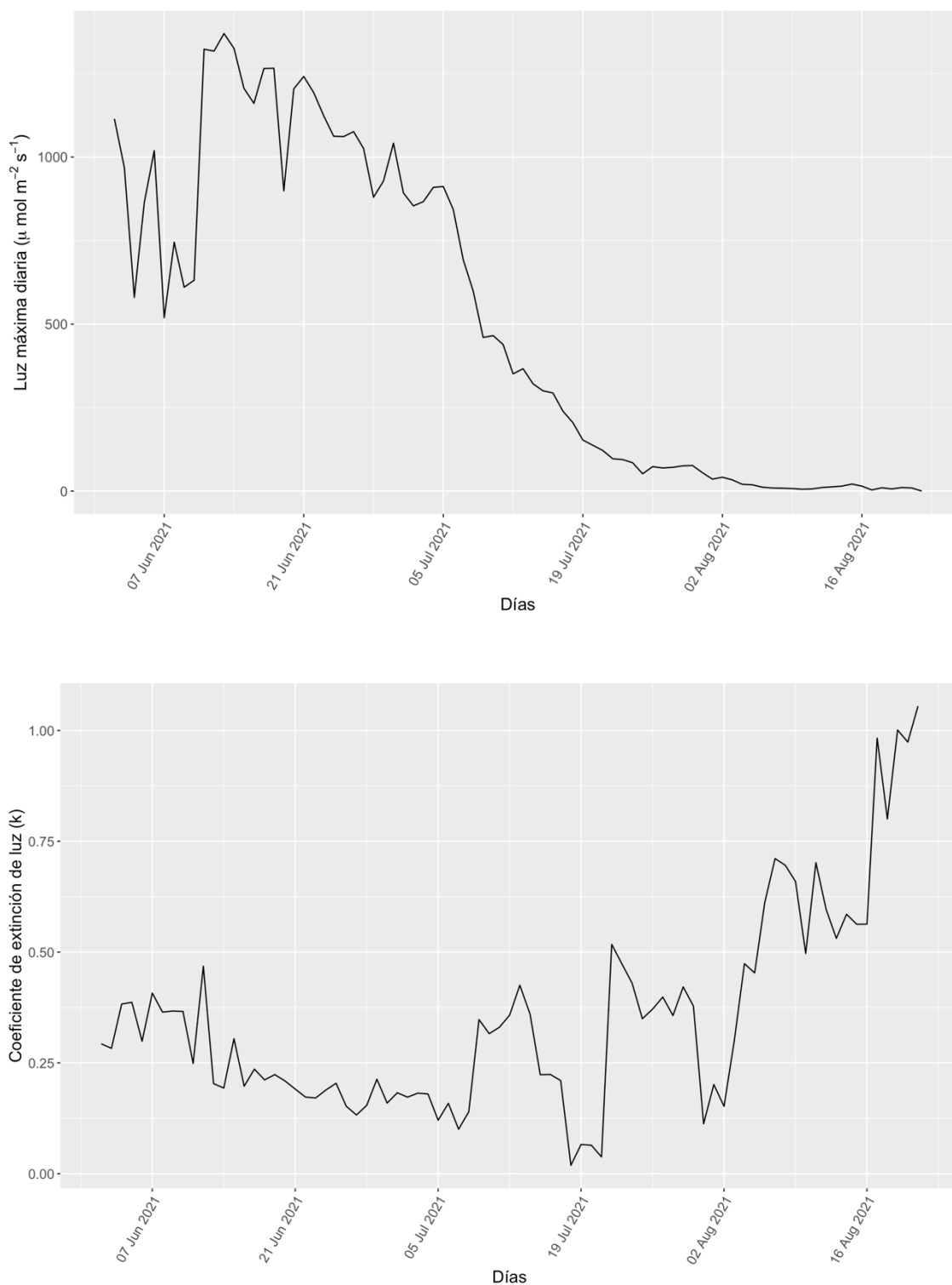
## Reducción de la disponibilidad de luz y poblaciones de macrófitos bentónicos

Uno de los efectos más inmediatos de la proliferación masiva de fitoplancton, y el incremento de la MPT, es la reducción de la disponibilidad de luz en la columna de agua. En la figura 6 (gráfica superior) se muestra la evolución de la irradiancia submarina PAR (radiación fotosintéticamente activa) a 5 metros de profundidad en la zona central de la laguna, medida en continuo mediante un sensor sumergible instalado el 31 de mayo y recogido el 24 de agosto de 2021. Se aprecia muy claramente cómo, a partir de principios del mes de julio, los valores máximos diarios de esta variable experimentan una reducción paulatina y constante hasta alcanzar valores muy próximos a cero (casi oscuridad) a principios de agosto y manteniéndose así durante todo el mes. Durante todo este periodo, la producción de oxígeno asociada a la actividad fotosintética de los macrofitos bentónicos tiene que haber sido prácticamente nula, propiciando un empobrecimiento progresivo de este gas en las capas de la columna de agua más profundas y alejadas de la superficie del mar donde el oxígeno difunde desde la atmósfera.

Como se ilustra en la Figura 6 (gráfica inferior), esta extinción de la luz se refleja en la turbidez de la columna de agua ( $k$ ), poniendo en evidencia el momento en el que esta variable muestra



un cambio claro y significativo de tendencia ascendente hasta alcanzar valores muy extremos. Dicho punto de inflexión se produce a partir del 19 de julio de 2020.



**Figura 6.** Variación temporal del valor máximo diario de la irradiancia PAR (gráfico superior) a 5,5m de profundidad en la zona central del Mar Menor obtenida por un sensor sumergible. Los picos son los máximos diarios en las horas centrales del día. **En el gráfico inferior** se muestra la evolución de la turbidez del agua ( $k, \text{m}^{-1}$ ) obtenida a partir de la diferencia entre el sensor superficial y el más profundo a 5,5 m de profundidad y la ley de Lambert Beer. **Fuente:** datos propios del programa DMMEM IEO-CSIC

Los valores de luz en el fondo obtenidos a lo largo del mes de agosto (al menos hasta el 26/08/2021) equivalen al **2% de la irradiancia** que alcanza la superficie del mar. Los valores mínimos para la vida vegetal bentónica en fondos infralitorales someros oscilan entre 5 y 15% para macroalgas y angiospermas marinas. Los valores de irradiancia PAR desde principios de agosto son, por tanto, absolutamente limitantes para la vida vegetal en el fondo de la laguna, hasta ahora densamente colonizada por la macroalga *Caulerpa prolifera*.

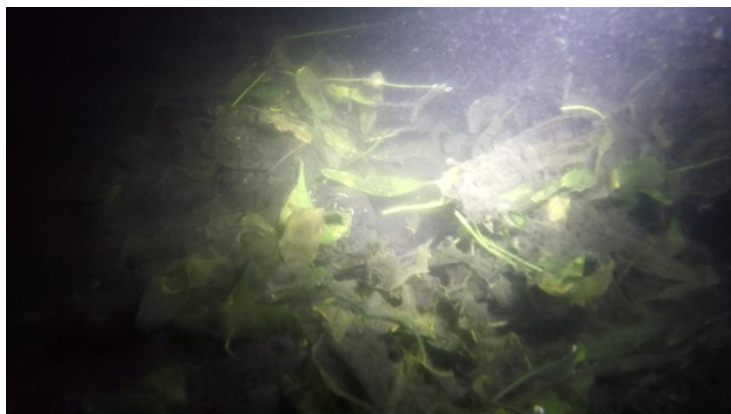
En 2016 el mantenimiento durante varios meses de estos niveles tan bajos de luz llevó probablemente a la desaparición total de las praderas de esa macroalga y de la angiosperma *Cymodocea nodosa* a partir de la isobata de 3 m (Ruiz et al. 2020). **De continuar durante más tiempo estas condiciones en que se encuentra el Mar Menor, podría repetirse la mortalidad masiva de las algas que colonizan el fondo, retroalimentando el evento actual de turbidez por más tiempo y agravando aún más la situación de anoxia. Las altas temperaturas estivales pueden contribuir a precipitar este acontecimiento ya que reducen la capacidad del alga de tolerar una disminución tan drástica de la luz. De hecho, las últimas observaciones realizadas (3/9/2021) apoyan esta hipótesis ya que el macrófito *Caulerpa prolifera* ha desaparecido por completo en los fondos de la estación C (sur), a 5-6 m de profundidad, se encuentra en estado regresivo en la estación B (centro) y todavía permanece sin aparente deterioro en A (norte) (ver imágenes a continuación).**



Estación A (norte): pradera de *Caulerpa prolifera* viva en aparente buen estado el 3/09/2021. Visibilidad muy reducida.



Estación B (centro): pradera de *Caulerpa prolifera* muy deteriorada observada el 3/09/2021. Visibilidad muy reducida y capa de materia orgánica particulada en el fondo.



Estación C (sur): pradera de *Caulerpa prolifera* muy deteriorada observada el 19/08/2021. Visibilidad muy reducida y capa de materia orgánica particulada en el fondo.



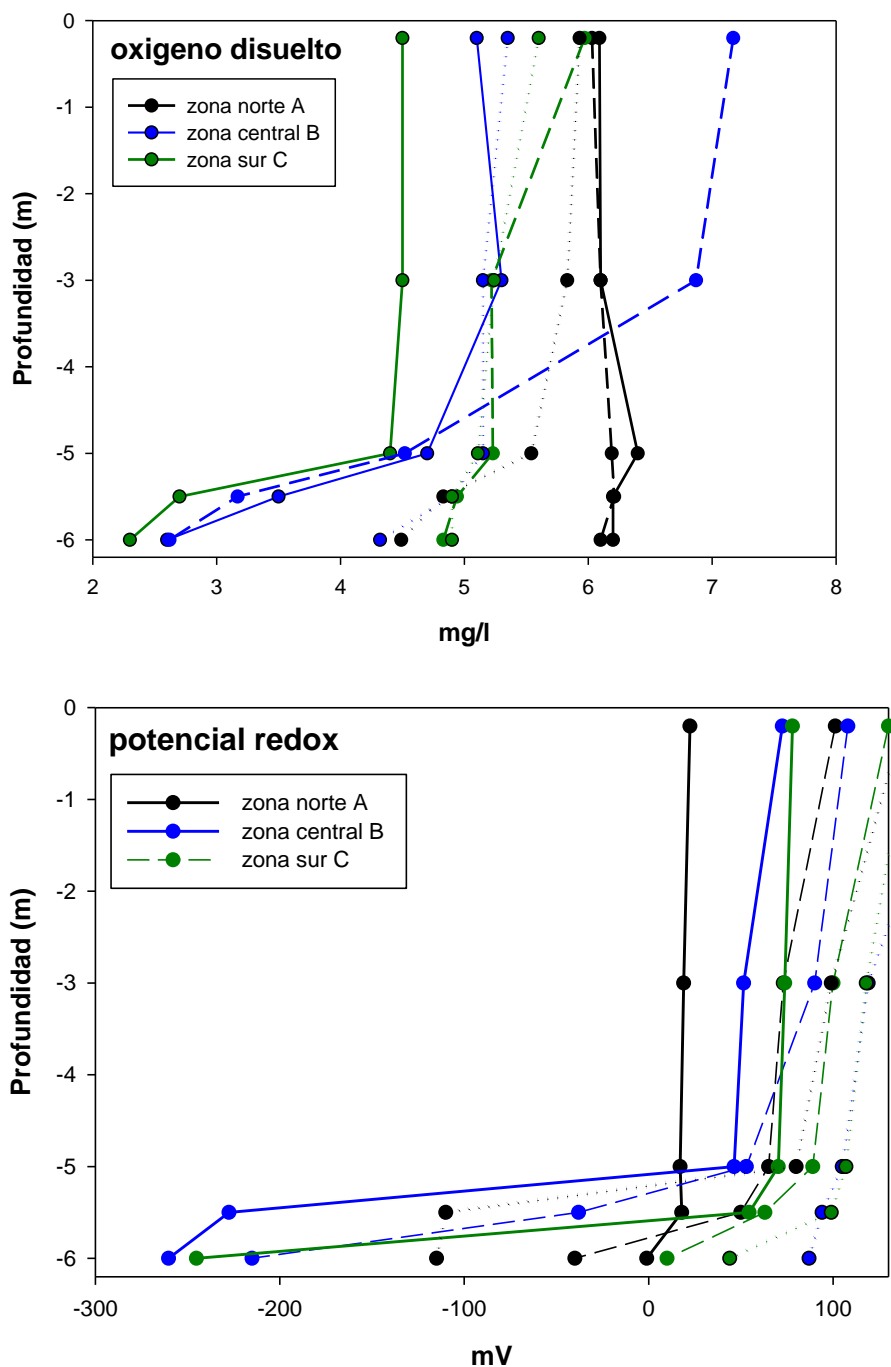
Estación C (sur): *Caulerpa prolifera* ha desaparecido casi totalmente el 3/09/2021 respecto a la observación anterior (19/08/2021). Visibilidad muy reducida y capa de materia orgánica particulada en el fondo con películas bacterianas de color blanco.

## Evolución del oxígeno disuelto y potencial redox de la columna de agua

A raíz de la clara tendencia de aumento de la clorofila y la turbidez durante el mes de julio de 2021, se empezaron a realizar mediciones más en detalle del oxígeno disuelto a lo largo del perfil batimétrico en las diferentes partes de la laguna (norte, centro y sur). A principios de agosto (1/08/21) los valores de oxígeno en la columna de agua eran todavía adecuados para la época estival, aunque en la parte baja del rango descrito en numerosos estudios de décadas anteriores (4-5 mg/l; Ruiz et al., 2020), tal y como corresponde a la elevada temperatura típica de esta estación.

El 19 de agosto, en las zonas más superficiales, las concentraciones de oxígeno disuelto eran igualmente normales y variaban entre 4 y 7 mg/l (Figura 7). Los valores más bajos se observaron hacia el sur, en coherencia con lo descrito para la chl *a* en el apartado anterior. Esto sugiere que el *bloom* fitoplanctónico que se desarrolla en la zona centro-sur podría estar

teniendo un efecto sobre las concentraciones de oxígeno en toda la laguna. En consistencia con lo anterior, en la zona norte los valores de oxígeno medidos en superficie se mantenían



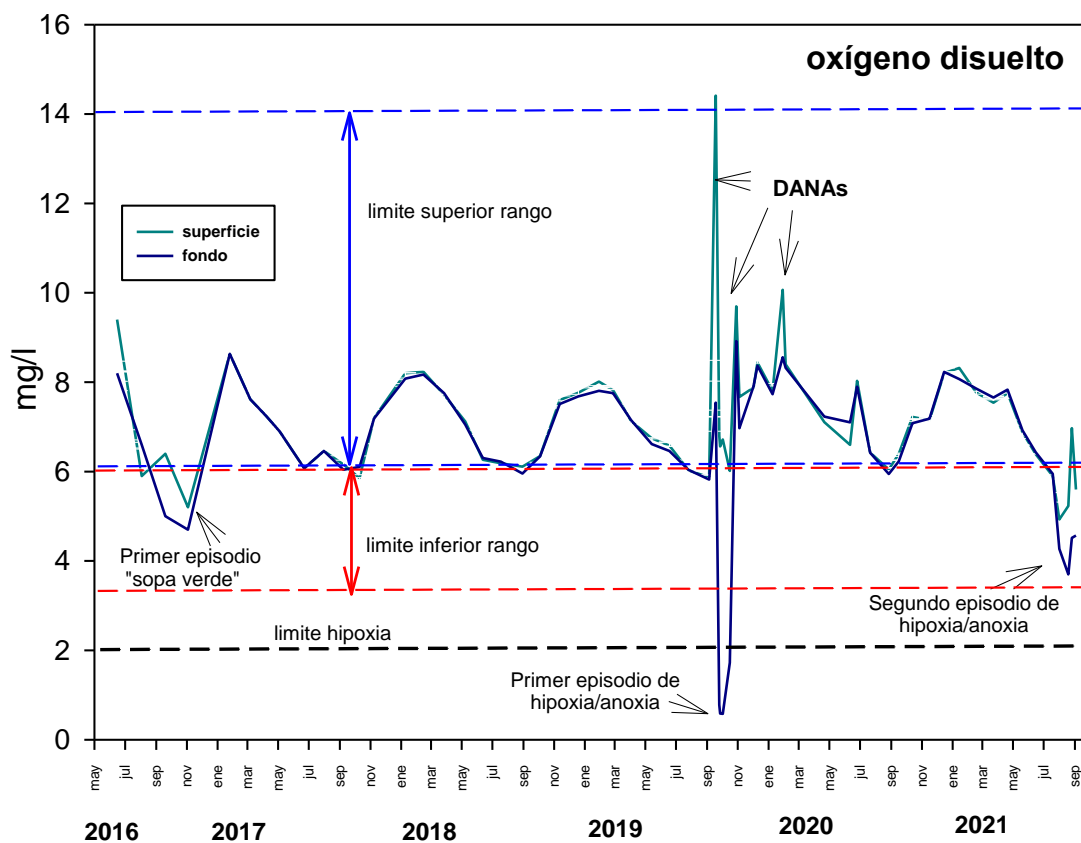
**Figura 7.** Variación del oxígeno disuelto (gráfico superior) y del potencial redox (gráfico inferior) en la columna de agua en las zonas norte (A), centro (B) y sur (C) del Mar Menor obtenidas los días 19 (líneas continuas) , 26 (líneas discontinuas) de agosto de 2021 y el 3 de septiembre de 2021 (líneas discontinuas) entre las 10 y las 12 am. **Fuente:** datos propios del programa DMMEM IEO-CSIC.

constantes en toda la columna de agua (zona A de la Figura 7); pero en las zonas centro y sur, los valores de oxígeno caían drásticamente hasta valores próximos al límite de la hipoxia (2 mg/l, CERN 2000) dentro de una capa de aproximadamente 0,5 m sobre el fondo (Figura 7).

Al contrario que lo ocurrido en los episodios de la Dana de 2019 (Figura 8), en esta ocasión no se ha detectado estratificación termohalina en nuestras estaciones de muestreo. En estas condiciones, estas bajas concentraciones de oxígeno se atribuyen a dos efectos principales: a) la limitación total de la producción de oxígeno por los macrofitos bentónicos que no reciben luz solar al ser absorbida por las elevadas concentraciones de fitoplancton en la columna de agua (como se ha comentado anteriormente); b) la descomposición de la materia orgánica del fondo procedente de la muerte y sedimentación del fitoplancton en capas profundas que no reciben luz.

Durante la época estival, las elevadas temperaturas favorecen la respiración de los organismos, así como los procesos de descomposición de la materia orgánica y además disminuyen la solubilidad del oxígeno en el agua de mar. En condiciones normales, o en un ecosistema sano en condiciones naturales, estos procesos no tienen por qué producir situaciones de anoxia en las aguas lagunares y, ni mucho menos, en eventos de mortalidad masiva como los observados. Contrariamente, sí es frecuente observar este tipo de procesos extremos en ecosistemas acuáticos deteriorados, con una elevada carga de materia orgánica relacionada con las presiones de la actividad humana. En 2016, coincidiendo con el primer evento de “sopa verde”, a pesar de existir una mayor concentración de material particulado orgánico (MOP Figura 5), los niveles de oxígeno también se redujeron hacia valores bajos del rango (Figura 8), pero en este último episodio los valores observados han alcanzado niveles medios muy próximos a la hipoxia (Figura 7 y 8). De acuerdo con los datos disponibles, en ningún registro se han alcanzado los bajos valores de oxígeno registrados durante el episodio de la DANA de 2019, que sobrepasaron claramente los límites de la hipoxia, alcanzando incluso la anoxia.

En cualquier caso, los valores de oxígeno alcanzados en el fondo de la laguna (por lo general 2-3 mg/l, Figura 7) no son tan bajos como los observados en el episodio de anoxia de 2019 (Figura 8), pero fueron inferiores a los menores valores habitualmente registrado en el Mar Menor en décadas anteriores (Figura 8), de forma que si bien no alcanzan el nivel de hipoxia sí representan una condición de estrés severo y letal para muchos organismos marinos, especialmente para los asociados al fondo con escasa capacidad de desplazamiento y escape. Valores medios por debajo de 4 mg/l ya se consideran fuertemente estresantes para las especies marinas e incluso letales para muchas especies. Valores entre 1-2 mg/l son letales para la vida marina, incluso si la exposición es muy corta (1-2 horas). Por otro lado, además de estos bajos valores de oxígeno, el potencial redox alcanza valores negativos totalmente anómalos para la columna de agua (-100 a -300 mV), más propios del sedimento que del agua. Estos valores tan negativos son similares a los observados en el episodio de anoxia de 2019 causado por las DANAs y sugieren la activación de procesos anaerobios de la descomposición de la materia orgánica, que tiene como consecuencia la producción y acumulación de compuestos reducidos del carbono (metano), nitrógeno (amonio) y azufre (sulfhídrico) (Ruiz et al. 2020), cuyo potencial tóxico para animales y plantas marinas es bastante bien conocido (p.e. Bagariano, 1993). La formación de cuerpos de agua auxínicos (con presencia de sulfhídrico) fue también apuntada como una de las probables causas de la mortalidad masiva de 2019 (Ruiz et al. 2020).



**Figura 8.** Evolución de la concentración media de oxígeno disuelto en las capas superior (línea azul ciano) y profunda (línea azul marino) del Mar Menor desde 2016. Se indica la parte inferior (líneas discontinuas rojas) y superior (líneas discontinuas azules) del rango de variación de oxígeno obtenido en numerosos estudios en décadas anteriores (Ruiz et al 2020), así como el límite de la hipoxia establecido de forma convencional para guas marinas costeras. **Fuente:** datos propios del programa DMMEM IEO-CSIC.

A finales de agosto (27/08/2021), los muestreos realizados por el equipo del IEO revelan que se ha producido una tendencia de mejora de los niveles de oxígeno tanto en las capas profundas como superficiales de la columna de agua (Figura 8). No obstante, la realización de mediciones más detalladas pone en evidencia que este proceso de recuperación no se produce por igual en todas las zonas de la laguna, manteniéndose los niveles de oxígeno bajos en las zonas más profundas de la parte central (zona B, Figura 7). Por otro lado, incluso en estas zonas en las que las concentraciones de oxígeno muestran cierta recuperación, el potencial redox tiende a mantenerse en valores muy bajos y próximos a sedimentos anóxicos (Figura 7). Por tanto, si bien los valores de oxígeno muestran algún síntoma de recuperación en esas fechas, el potencial redox se mantiene en valores que sugieren unas condiciones anómalas en el fondo de la laguna y con alto potencial de afectar negativamente a la fauna y flora del fondo.

Un muestreo mucho más reciente (03/09/2021) confirma el incremento de los valores de oxígeno disuelto no solo en la parte sur (zona C), sino también en la parte central de la laguna

(zona B), mostrando en ambos casos valores de 4-5 mg/ en el fondo y algo mayores (5-6 mg/l) en superficie (Figura 7). Curiosamente, en la zona norte (zona A), los niveles de oxígeno siguen una tendencia opuesta, disminuyendo de valores medios de 6-6,5 mg/l a valores de 4,5 mg/l. Igualmente, el potencial redox aumenta de forma muy significativa a valores muy positivos (> 50mV) en el fondo de las estaciones B (zona central) y C (zona sur), pero se vuelve mucho más negativo (< -100 mV) en la estación de la zona norte (A; Figura 7).

Estos datos parecen indicar una tendencia general a la mejora del grado de oxigenación del agua en la laguna, que parece estar muy estrechamente relacionado con un cambio del régimen de vientos de Levante (primer cuadrante) a Lebeche (tercer cuadrante). Este cambio, y considerando que el campo de corrientes del Mar Menor depende mayoritariamente del forzamiento por viento, parece haber desplazado la masa de agua más anóxica del sur hacia el norte dando lugar a cierta homogeneización de los niveles de oxígeno disuelto en la laguna. Sin embargo, esta masa de agua desplazada hacia el norte contiene una mayor concentración de partículas (Figura 5) y es mucho más turbia. La reducción de la luz y el aumento de la concentración de MPO, podría explicar el drástico cambio del potencial redox en la zona A (norte) de la laguna descrito en la Figura 7.

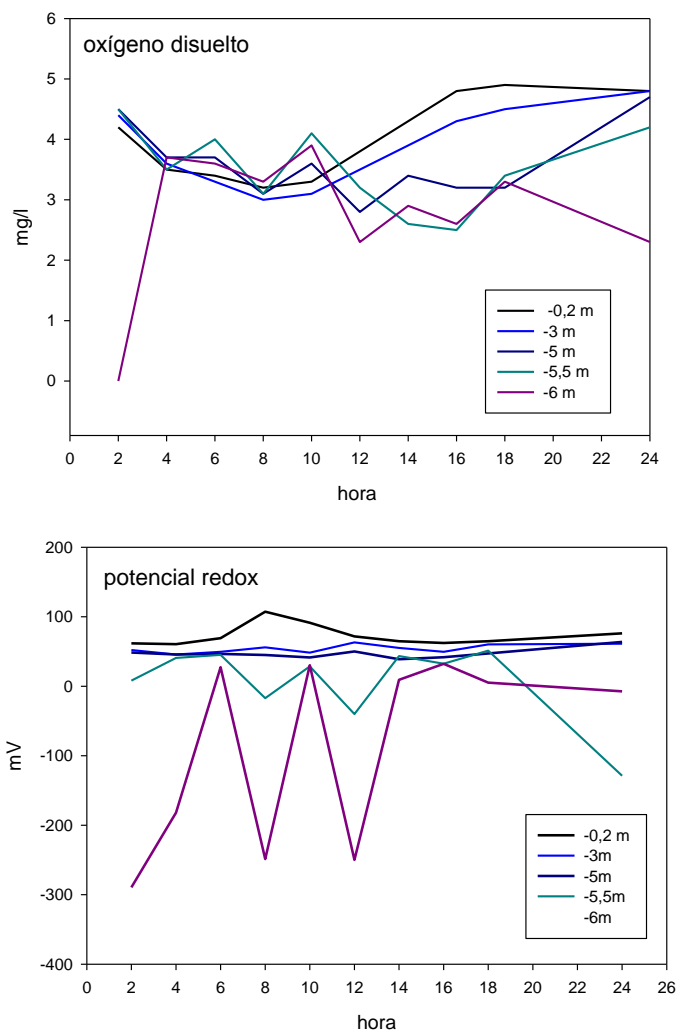
Estos resultados y observaciones podrían interpretarse como una tendencia a la mejora, pero hay que ser muy cautos porque la situación podría volver a revertir si, por ejemplo, vuelve a cambiar el régimen de vientos. Por otro lado, son bastante parciales, puesto que implica un empeoramiento de la zona norte, que previamente se había mantenido con valores más normales de las diferentes variables observadas. Pero además, al menos hasta finales de agosto (unos pocos días atrás), la tendencia de la chl a era de crecimiento casi exponencial (casi se duplica respecto al muestreo de 19/08/2021), y la turbidez del agua es todavía muy elevada, por lo que no se puede descartar que la situación vuelva a evolucionar a un empeoramiento del nivel de oxigenación del agua. Esto podría además verse agravado por un efecto de retroalimentación negativa que podría causar la muerte y descomposición de las praderas de *Caulerpa prolifera*, hecho ya confirmado en la parte sur y centro de la laguna (ver apartados anteriores).

## Causas potenciales de la mortalidad masiva de fauna

Tanto el déficit de oxígeno registrado, como los efectos derivados de la disminución del potencial redox (concentraciones de compuestos reducidos), son factores potencialmente muy estresantes y tóxicos para los organismos marinos, tanto vegetales (macroalgas, angiospermas marinas) como animales, y en consecuencia son los factores candidatos más probables para explicar el episodio de mortalidad masiva de peces y crustáceos observados en el Mar Menor a partir del 15 de agosto. A esto hay que añadir la ausencia casi total de luz en el fondo desde mitad de julio.

Por otro lado, las observaciones y especulaciones realizadas se basan en mediciones puntuales a determinadas horas del día. Sin embargo, hay que tener en cuenta que la concentración de oxígeno sigue variaciones diarias cuyo máximo valor se alcanza en las horas centrales del día, cuando la actividad fotosintética es máxima, y su valor mínimo se alcanza de noche, cuando la

fotosíntesis es nula y predomina la respiración. Estas variaciones nictemerales fueron claramente observadas en agosto de 2017 gracias a la instalación de un sensor de oxígeno a 5 m de profundidad en la parte central del Mar Menor (Ruiz et al 2020). Si bien había noches en que no se alcanzaban valores inferiores a los 4 mg/l, otros días se apreciaba claramente como en las horas de madrugada más próximas al amanecer, los valores de oxígeno alcanzaban la anoxia (0 mg/l). Esto implica que las condiciones de déficit de oxígeno y potencial redox negativo pueden ser más severas incluso de noche, y contribuiría a explicar la mortalidad de las especies marinas incluso si esas condiciones se dan en unas pocas horas.



**Figura 9.** Evolución de las concentraciones de oxígeno disuelto y potencial redox medidas cada dos horas entre las 02 y las 24 h del día 20 de agosto en la parte central del Mar Menor a diferentes profundidades. **Fuente:** datos propios del programa DMMEM IEO-CSIC

Para comprobarlo, entre los días 19 y 20 de agosto se realizó un muestreo para analizar la variación de estas variables a lo largo de un ciclo de 24h (Figura 9). Se pudo comprobar que los bajos valores de oxígeno medidos en el fondo durante el día, si bien no experimentaban una reducción adicional substancial, si parecían extenderse a toda la columna de agua durante la noche y madrugada (incluidas las capas más superficiales). El potencial redox muestra una dinámica diferente, con una clara intensificación hacia valores negativos durante la noche,

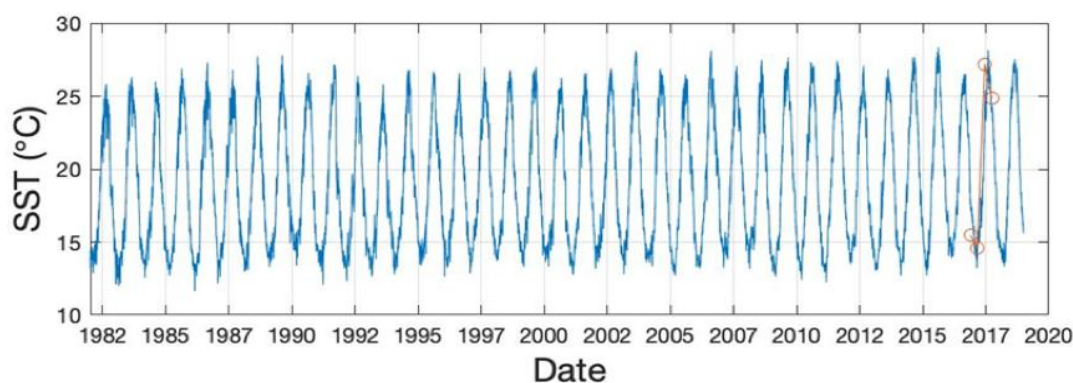


pero solo en las capas más profundas (0,5 m sobre el fondo). Esto contribuiría a explicar que las migraciones de peces y otros organismos hacia las playas y su acumulación en las orillas, tuvieran lugar de madrugada y fueran fácilmente observables al amanecer.

Durante los primeros días de septiembre, la mortalidad de fauna y sus acúmulos en las playas parece haber remitido, lo cual es consistente con los síntomas de mejora del grado de oxigenación de las aguas y su potencial redox descritos en apartados anteriores y mostrados en la Figura 7. No obstante, como también se ha comentado, hay que ser muy cauto para considerar estas observaciones como una tendencia positiva, que podría cambiar en cualquier momento a consecuencia de un nuevo cambio del régimen de vientos u otros evento meteorológico (p.e. DANAs), dada la elevada cantidad de materia orgánica en el sistema introducido por la alta productividad fitoplanctónica.

## Temperatura del agua

Se ha realizado un análisis estadístico de la serie temporal de temperatura del Mar Menor a escala decenal obtenida por el IEO (Ruiz et al., 2020) y actualizada hasta agosto de 2021 (incluido). Esta serie temporal ha sido obtenida mediante intercalibración de datos de satélite con datos obtenidos *in situ* por un sensor sumergible fondeado en el Mar Menor a 1 m de profundidad (Figura 10).

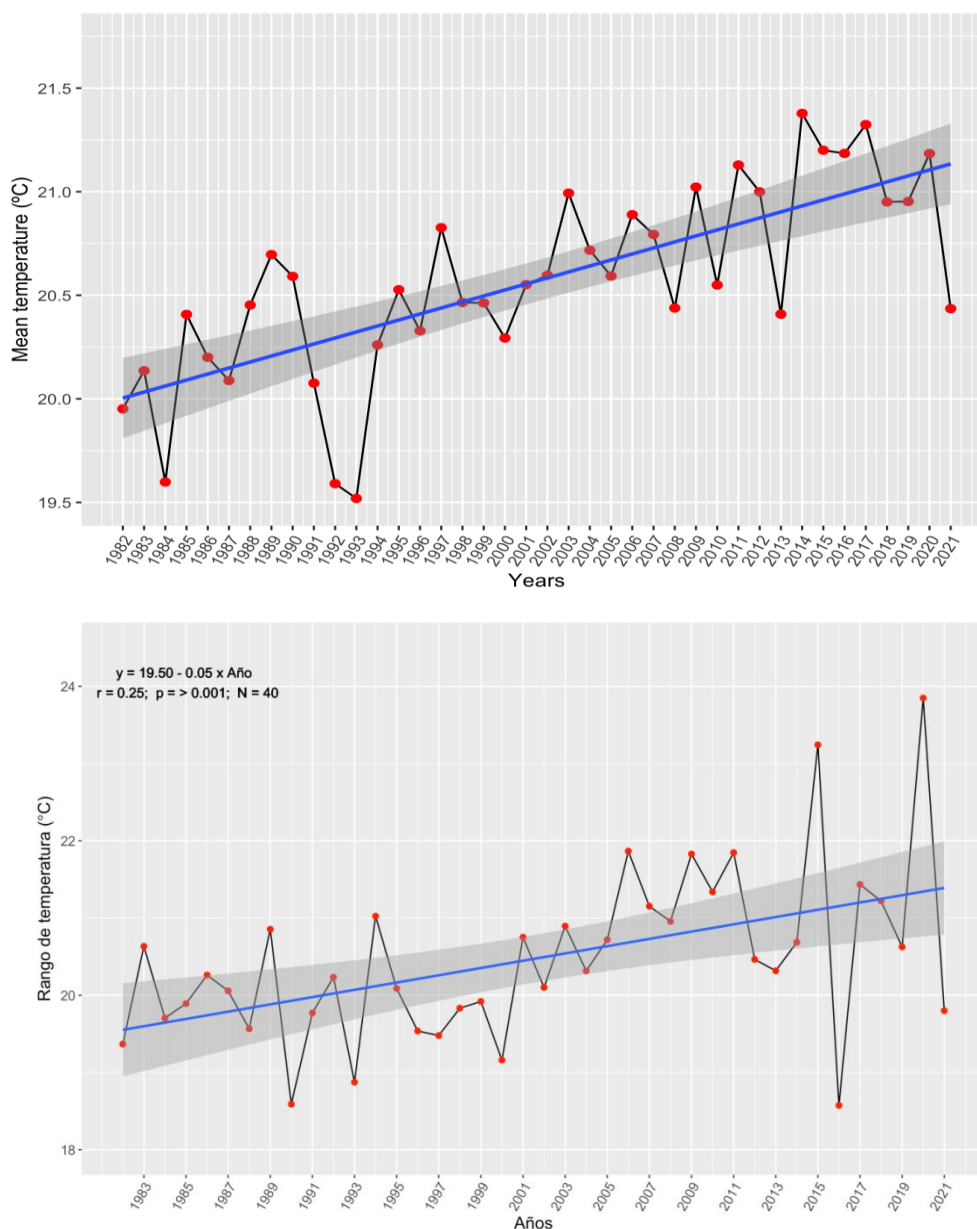


**Figura 10.** Serie temporal de temperatura obtenida entre 1982-2019 para el Mar Menor a partir de datos de satélite y obtenidos *in situ* mediante datos de CTD. Fuente: Datos satelitales de temperatura superficial del océano (SST) de la “Mediterranean Sea – High Resolution L4 Sea Surface Temperature Reprocessed 0,04 deg. Resolution” de Copernicus entre los años 1982-2019 (37 años), datos *in situ* del programa DMMEM IEO-CSIC. Fuente: datos propios del programa DMMEM IEO-CSIC.

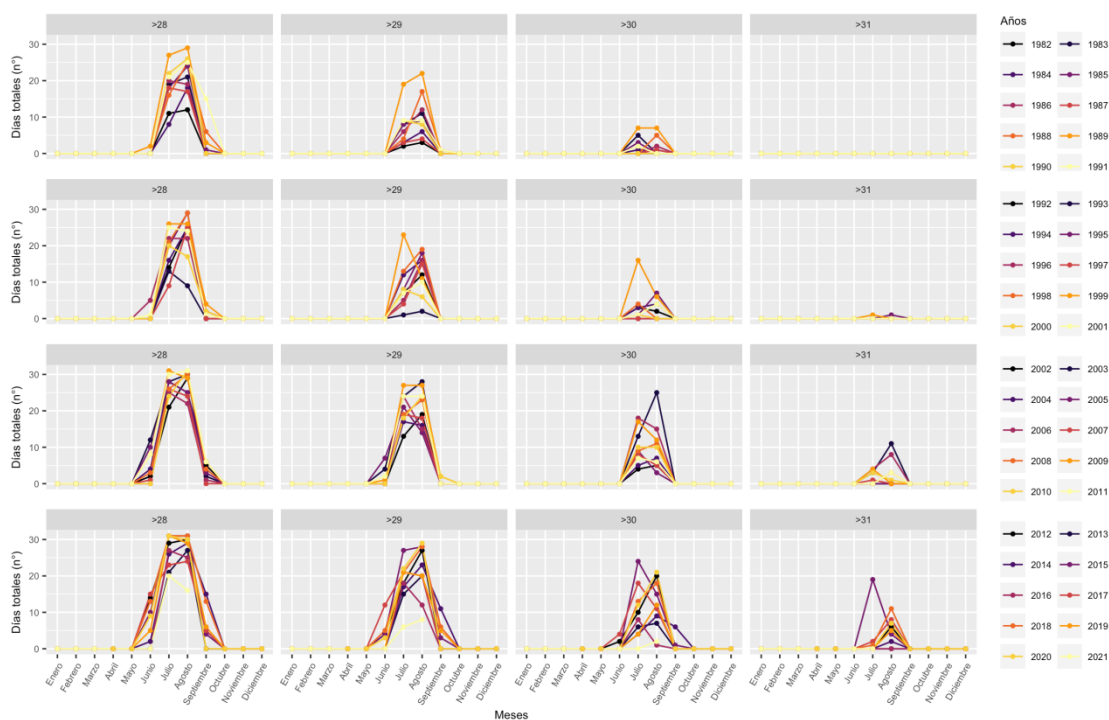
Del análisis de esta serie temporal se infiere que la media anual de temperatura muestra una tendencia muy clara y significativa de ascenso (Figuras 11 y 12), de acuerdo con las tendencias de cambio global registrado en la zona marina adyacente a la laguna y en muchas otras zonas geográficas del Mediterráneo y del planeta. Estos datos ponen en evidencia que la tasa de calentamiento del Mar Menor asociada al calentamiento global es muy elevada, resultando en un incremento de más de 1 grado en las últimas cuatro décadas.

Por otro lado, se comprueba que en el año 2021 la temperatura media anual es de las más bajas de las últimas dos décadas. Para las condiciones actuales se considera un año “frío”,

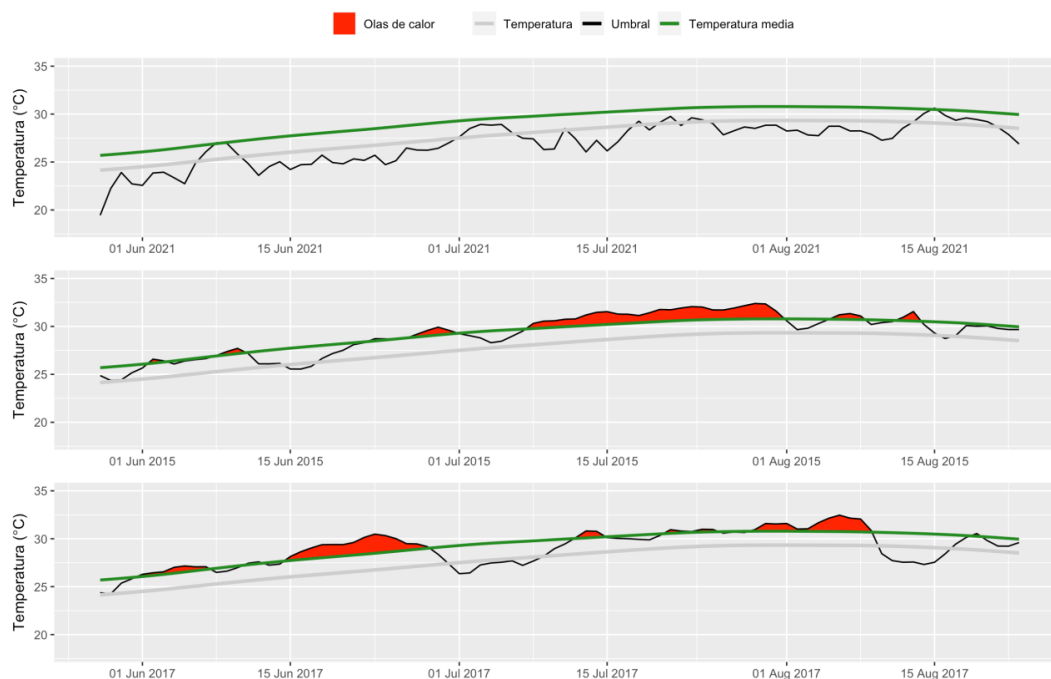
sobre todo si lo comparamos con los años del periodo 2014-2017, que fueron especialmente cálidos y con varias olas de calor estivales (Figuras 11 y 13). De hecho, el análisis estadístico de olas de calor, realizado de acuerdo con los criterios de Hobday et al (2016) (<http://www.marineheatwaves.org/>), pone en evidencia que en lo que llevamos de 2021 solo se han detectado 3 anomalías térmicas positivas en los meses de invierno (Figura 8), manteniéndose la temperatura estival claramente por debajo de la media general de la serie temporal y de la categoría más leve de ola de calor marina, que corresponde al percentil 90.



**Figura 11.** Variación y tendencia de la temperatura media anual y rango anual en el Mar Menor. **Fuente:** datos propios del programa DMMEM IEO-CSIC.



**Figura 12.** Variación del número de días en que se superan umbrales de temperatura de 28, 29, 30 y 31°C en el Mar Menor a lo largo de cada año en las últimas cuatro décadas. **Fuente:** datos propios del programa DMMEM IEO-CSIC.



**Figura 13.** Análisis de olas de calor en verano de 2021 (arriba), 2017 (abajo) y 2015 (centro) en el Mar Menor. La temperatura media diaria es la línea negra. La línea gris oscuro es la media de la serie temporal (1982-2021) y las líneas verdes representan las diferentes categorías de ola de calor establecidas por Hobday et al (2016) (moderada, fuerte, severa y extrema). En color rojo se ilustran las zonas de la serie temporal que entran en diferentes categorías de ola de calor, observándose solo en los meses invernales para el año 2021. **Fuente:** datos propios del programa DMMEM IEO-CSIC.

Por tanto, estos resultados descartan que un evento de temperatura particularmente anómalo y con potencial efecto letal haya sido el desencadenante del evento de mortalidad masiva de organismos marinos en el Mar Menor en agosto de 2021. De hecho, durante los años 2016-2017, en los que el Mar Menor experimentó dos episodios intensos y prolongados de “sopa verde” (Figuras 1 y 5), tuvieron lugar varias olas de calor marinas, pero no se llegó a producir una mortalidad de fauna tan masiva y llamativa como la observada este verano de 2021, con diferencia el menos cálido de la última década. El papel de la temperatura se limita al efecto habitual durante la época estival, contribuyendo a acelerar los procesos de descomposición microbiana de la materia orgánica, que al estar en exceso por los aportes externos de origen antrópico contribuye a precipitar al sistema a un estado de déficit de oxígeno, ya sea suboxia, hipoxia, o en su caso más extremo anoxia.

## Salinidad

La salinidad es una variable oceanográfica de gran importancia en el Mar Menor. Registros históricos, posteriores a la apertura del canal del Estacio, indican que su valor medio varía generalmente entre 42 en invierno y 47 en verano, pudiendo alcanzar valores más bajos e incluso más altos respecto a este rango dependiendo de la variabilidad anual de los factores climáticos (precipitaciones, temperatura atmosférica, régimen de vientos) y oceanográficos (tasa de intercambio con el Mediterráneo, componente mareal y presión atmosférica, etc.) (Fraile Nuez et al 2018; Ruiz et al 2020).

Inmediatamente después del primer evento de “sopa verde” en 2016, las riadas del invierno 2016-2017 aportaron grandes cantidades de agua dulce cargada de nutrientes y sedimentos, que causaron una caída brusca de la salinidad por debajo del promedio de los valores mínimos del rango anual (Figura 14). Esta bajada de la salinidad fue más acusada en la capa superficial que en la profunda aunque la diferencia fue de tan solo 1.7. A partir de este momento, la salinidad muestra una tendencia ascendente muy clara en los dos siguientes años de forma que ya alcanza valores anuales normales en 2017 e incluso más elevados en 2018, muy similares a los que presentaba en 2016 antes de la riada. Estos valores normales se mantienen estables hasta las riadas de las DANAs de 2019-2020, cuyos aportes de agua masivos redujeron la salinidad de las capas superficiales del Mar menor hasta valores extremadamente bajos (33-34), favoreciendo una fuerte estratificación que se mantuvo durante varias semanas. Desde entonces, como ya ocurrió tras la riada de 2017, la salinidad ha mostrado una tendencia ascendente hasta el 3 de septiembre de 2021, con valores medios de 43,3 tanto en superficie como en fondo. Esta salinidad es muy similar a la de otras zonas de la laguna diferentes de los puntos de muestreo de este programa de seguimiento, como las zonas someras de La Manga, al sur del canal del Estacio (Pueblo Nuevo), donde se ubica una población de *Pinna nobilis* de gran interés de conservación.



## SÍNTESIS Y CONCLUSIONES

- a) El último y reciente evento de mortalidad masiva de organismos marinos ocurrido en el Mar Menor las últimas semanas es un fenómeno muy estrechamente relacionado con el proceso de eutrofización que experimenta la albufera en las últimas décadas y cuyos síntomas se empezaron a hacer visibles a partir de 2016, con el *bloom* fitoplanctónico conocido popularmente como “sopa verde”. Desde entonces, la laguna ha experimentado varios episodios extremos de naturaleza similar al del verano de 2021 que muestran que el ecosistema ha perdido su capacidad de autorregulación.
- b) De acuerdo con la gran cantidad de literatura científica disponible, el origen de este tipo de eventos extremos se encuentra en aportes masivos y casi continuos de nutrientes y materia orgánica, que en el caso del Mar Menor vienen ocurriendo desde hace décadas debido al desarrollo creciente y no controlado de la actividad humana, con especial contribución por parte de la actividad relacionada con la agricultura intensiva del campo de Cartagena y en menor proporción, pero no desdeñable, con las poblaciones ribereñas.
- c) El mecanismo por el que se produce este nuevo episodio de mortalidad parece estar relacionado con el desencadenamiento de un nuevo *bloom* fitoplanctónico, cuyo inicio se produce a finales de primavera y continúa creciendo de forma casi exponencial a finales del mes de agosto. De acuerdo con la evidencia disponible este nuevo evento de crecimiento masivo de fitoplancton parece haberse originado en las aguas frente a la rambla del Albujón, por donde se están vertiendo continuamente aguas con altas concentraciones de nutrientes (tal y como lo corroboran informes recientes del Comité Científico disponibles en el portal de la CARM). La localización del origen del bloom en esta zona y el patrón general de corrientes del Mar Menor, explicarían la localización del fenómeno en las zonas centro y sur de la laguna, donde el tiempo de renovación de la masa de agua es menor. Un cambio reciente (principios de septiembre) en el régimen de vientos ha desplazado la masa de agua verde y turbia desde el sur hacia el norte, extendiendo el fenómeno a toda la laguna.
- d) El desarrollo del fitoplancton ha causado una reducción muy severa de la luz disponible para la fotosíntesis hasta niveles totalmente críticos para la supervivencia de la vegetación del fondo (bentónica). Si la situación persiste por más tiempo la vegetación bentónica que actualmente coloniza los fondos podría morir y agravar el estado de la columna de agua y el ecosistema lagunar. Este hecho ha sido ya confirmado en la zona sur,, donde la pradera de *C. prolifera* a 5m ha desaparecido casi por completo.
- e) El crecimiento del fitoplancton ha supuesto la entrada en el sistema de grandes cantidades de materia orgánica cuya descomposición explicaría la reducción de las concentraciones de oxígeno disuelto a lo largo del mes de agosto, cuando las temperaturas estivales son las más elevadas, hasta niveles próximos a la hipoxia. Los valores alcanzados, si bien no tan bajos como en el episodio de anoxia de 2019, se encuentran muy por debajo de los valores más bajos registrados históricamente en el

Mar Menor y de las concentraciones que son estresantes e incluso letales para muchas especies marinas.

- f) La reducción de la concentración de oxígeno en el agua da lugar a potenciales redox muy bajos (muy negativos) indicando la existencia de metabolismo anaerobio y a la consiguiente acumulación de compuestos reducidos del carbono, el nitrógeno y el azufre, particularmente en las partes más profundas y próximas al fondo marino (a lo que además podrían contribuir los flujos positivos de estos compuestos procedentes del metabolismo anaerobio del sedimento). Tanto el déficit de oxígeno observado, como la acumulación de subproductos del metabolismo anaerobio, son dos factores clave que potencialmente podrían explicar los cambios en el comportamiento de la fauna marina y su muerte posterior desde el inicio del episodio de este año.
- g) Observaciones realizadas a principios de septiembre (3/09/2021) sugieren una mejora en el nivel de oxigenación de la laguna, que al estar relacionada con el cambio en el régimen local de vientos puede ser una situación meramente transitoria. Las elevadas concentraciones de materia orgánica y la elevada turbidez persisten ya no solo en la zona centro-sur de la laguna, sino también en la zona norte, y en consecuencia la probabilidad de nuevos eventos de déficit de oxígeno en algún grado (hipoxia, anoxia) también persiste.
- h) Aunque los efectos del calentamiento global son cada vez más evidentes en las aguas de la albufera, el análisis estadístico de las series de temperatura del agua del Mar Menor en las últimas cuatro décadas permite descartar que en verano de 2021 haya tenido lugar una anomalía térmica positiva que pueda haber contribuido a desencadenar la mortalidad masiva de organismos marinos.
- i) La salinidad media de la laguna muestra una tendencia general de ascenso desde verano de 2020 y se prevé que recupere valores normales hacia verano del 2022, en caso de que no ocurra algún tipo de evento climatológico extremo (p.e. DANAs) o intervención humana (p.e. apertura de los canales de comunicación con el Mediterráneo o golas). La recuperación de esta variable es fundamental para la recuperación del ecosistema lagunar, su funcionamiento y biodiversidad.
- j) Los sucesos ocurridos recientemente en el Mar Menor y la enorme confusión sobre sus causas son en parte reflejo de un deficiente sistema de monitorización de la albufera, que debe ser mejorado y actualizado para detectar estos eventos y sus causas de forma inequívoca, fiable y transparente.

## Referencias bibliográficas

Bagariano TU. 1993. Sulfide as a toxicant in aquatic habitats. SEAFDEC Asian Aquacultura, 15(3), 2-4.

Hobday, A. J. et al. (2016), *A hierarchical approach to defining marine heatwaves*, Prog. Ocean., 141, pp. 227-238, 10.1016/j.pocean.2015.12.014

Fraile-Nuez, E., Machín, F., Santana-Casiano, J. M., González-Dávila, M., Domínguez-Yanes, J. F., Mercado, J., Cortes, M.D., Gómez-Ballesteros, M., Santos-Echeandía, J., García-Muñoz, R., Ramos-Segura, A., Bernardeau-Esteller, J., Belando-Torrentes, M.D., Garrido-Faustino, S., Conde-Caño, R.M., Ruíz-Fernández, J. M., 2018. Estudio Oceanográfico Integral de Alta Resolución de la Laguna Costera de El Mar Menor, Murcia Informe Final (noviembre 2016 - septiembre 2017).

Mercado, J.M., Cortés, D., Gómez-Jakobsen, F., García-Gómez, C., Ouissa, S., Yebra, L., Ferrera, I., Valcárcel-Pérez, N., López, M., García-Muñoz, R., Ramos, A., Bernardeau, J., Belando, M.D., Fraile, E., Ruíz, J.M. 2021. Role of small-sized phytoplankton in triggering an ecosystem disruptive algal bloom in a Mediterranean hypersaline coastal lagoon. Pollution Bulletin 164, 111989.

Ruiz JM, Albentosa M y 20 autores más. 2020. Informe de evolución y estado actual del Mar Menor en relación con el proceso de eutrofización y sus causas. Informe de asesoramiento científico-técnico del Instituto Español de Oceanografía IEO, 165 pp.