

4. Seguimiento de las condiciones hidrológicas y oceanográficas del Mar Menor

4.1. Condiciones geomorfológicas, meteorológicas e hidrográficas generales del Mar Menor

La dinámica y funcionamiento del Mar Menor están condicionados y determinados por su carácter de laguna costera hipersalina, con una conectividad restringida con el Mediterráneo occidental a través de las distintas golos que interrumpen la barrera de 22 km de largo que supone La Manga. A pesar que de las cinco entradas poco profundas o "golas" que mantienen la comunicación entre la laguna y el Mediterráneo, una de ellas, El Estacio, se amplió en 1973 hasta 35 m de ancho en su sección mínima, y se profundizó a 5 m de profundidad, para convertirlo en un canal de navegación, en la actualidad, la laguna aún se puede clasificar como muy confinada (Umgiesser *et al.*, 2014) ya que mantiene una razón de restricción baja de acuerdo con Chubarenko *et al.* (2005) (siendo la relación entre el ancho total de las golos y la máxima longitud de la laguna en paralelo al mar de 0,01) (Pérez-Ruzafa *et al.*, 2005b). No obstante, las consecuencias del dragado del canal del Estacio en la hidrografía (Tabla I) y ecología lagunar fueron drásticas y sus efectos aún persisten actualmente, como se ha comentado anteriormente.

El área del Mar Menor se caracteriza por una alta irradiación global con un promedio diario mínimo que varía en los períodos estudiados entre $3062,51 \pm 174,81$ y $3512,73 \pm 392,82$ wats/m² en otoño y unos máximos en primavera y verano entre $6387,78 \pm 421,33$ y $7471,46 \pm 291,74$ wats/m² (Tabla 2, Fig. 20) (Pérez-Ruzafa, 2019). Por el contrario, las precipitaciones son muy bajas y, por lo general, se concentran en eventos de lluvias intensas y cortas. En el entorno del Mar Menor, la precipitación media anual es inferior a 300 mm y la evapotranspiración potencial es cercana a 900 mm (López-Bermúdez *et al.*, 1981). El saldo hídrico neto en la cuenca, por tanto, alcanza un déficit anual de más de 600 mm/m² * año (Pérez-Ruzafa *et al.*, 2005a).

Durante los 24 años de seguimiento de la laguna por parte de nuestro grupo de investigación, las precipitaciones acumuladas en la semana anterior a los días de muestreo han oscilado entre $0,05 \pm 0,03$ L/m² en verano y $39,66 \pm 32,81$ L/m² en otoño (Tabla 2, Fig. 20). Sin embargo, algunos picos esporádicos han alcanzado 100 o más de 200 L/m² en una semana, como ocurrió en septiembre de 2009 o en diciembre de 2016,

respectivamente, o en los sucesivos eventos de DANA acaecidos durante los años 2019-2021.

Tabla 2. Medias estacionales ($\pm$ es) de las principales variables climáticas medidas para la semana anterior y el día del muestreo en el área del Mar Menor en los tres períodos considerados a lo largo del proceso de eutrofización en la laguna.

	Radiación global diaria (Wats/m ²)	Radiación global total semana previa (Wats/m ²)	Precipitación diaria (mm)	Precipitación total semana previa (mm)	Velocidad media diaria del viento (m/s)	Velocidad máxima diaria del viento (m/s)	Velocidad media del viento semana previa (m/s)
Periodo anterior a la crisis distrófica de 2016 (Prebreak)							
Invierno	3526.74 ± 208.83	22543.22 ± 1133.04	0.05 ± 0.03	6.59 ± 2.08	2.83 ± 0.19	5.77 ± 0.38	3.57 ± 0.13
Primavera	6429.4 ± 200.55	44405.24 ± 1117.16	0.47 ± 0.31	5.19 ± 1.27	3.38 ± 0.13	6.98 ± 0.24	3.89 ± 0.11
Verano	6778.06 ± 165.27	47860.13 ± 801.96	0.5 ± 0.29	2.57 ± 1.20	3.37 ± 0.13	6.64 ± 0.26	3.71 ± 0.07
Otoño	3062.51 ± 174.81	22987.85 ± 960.59	0.69 ± 0.36	12.63 ± 3.40	3.05 ± 0.18	6.21 ± 0.31	3.37 ± 0.12
Crisis distrófica 2016-2017 (Break)							
Invierno	3787.63 ± 273.46	21915.15 ± 1757.90	0.11 ± 0.09	9.52 ± 5.58	3.9 ± 0.48	7.7 ± 0.82	4.51 ± 0.42
Primavera	7471.46 ± 291.74	49540.66 ± 2826.61	0.06 ± 0.05	0.18 ± 0.10	3.83 ± 0.56	6.84 ± 0.45	4.51 ± 0.37
Verano	6387.78 ± 421.33	47639.44 ± 2295.41	2.18 ± 1.65	4. ± 2.58	3.67 ± 0.40	6.87 ± 0.50	3.62 ± 0.18
Otoño	3153.17 ± 634.63	21002.78 ± 3937.01	4.15 ± 3.96	39.66 ± 32.81	3.61 ± 0.44	5.95 ± 0.60	3.32 ± 0.26
Recuperación 2018 y años posteriores (Recovery)							
Invierno	4664.81 ± 589.93	25165.74 ± 2278.80	0.22 ± 0.21	6.61 ± 2.97	3.78 ± 0.33	6.73 ± 0.52	3.86 ± 0.30
Primavera	7207.78 ± 173.55	46212.5 ± 1439.60	0.11 ± 0.08	3.38 ± 1.14	3.77 ± 0.22	7.06 ± 0.47	4.9 ± 0.31
Verano	6918.69 ± 350.65	50185.61 ± 2337.36	0.02 ± 0.02	0.66 ± 0.61	3.39 ± 0.32	5.99 ± 0.39	3.56 ± 0.20
Otoño	3806.61 ± 272.18	26532.41 ± 1574.53	0.04 ± 0.04	3.65 ± 1.60	1.93 ± 0.20	5.2 ± 0.19	2.39 ± 0.22

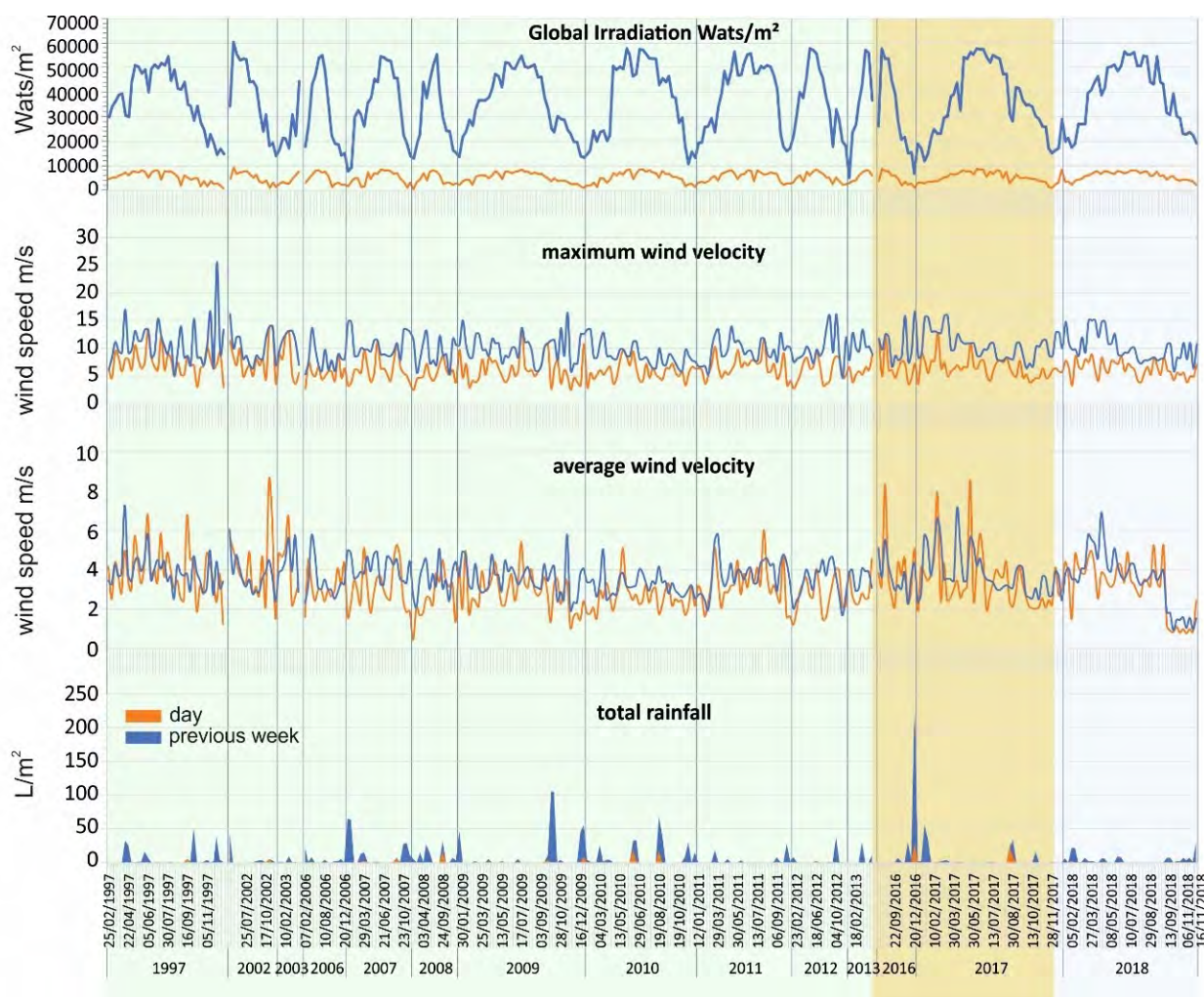


Figura 20. Evolución de las principales variables meteorológicas durante el período 1997-2018 en el área del Mar Menor. La fase previa a la crisis distrófica o ruptura (Prebreak) se resalta en verde, la fase de ruptura o de crisis (Break) en ocre y la fase de recuperación (Recovery) en azul claro.

El balance entre la entrada total anual de agua dulce a la laguna del Mar Menor, a través de la escorrentía y las precipitaciones, frente a la evaporación, se traduce en un déficit hídrico que oscila entre 38 y 115 hm³/año y que es compensado con la entrada de agua desde el Mediterráneo (Pérez-Ruzafa, 1989; Pérez-Ruzafa *et al.*, 2005a).

La hidrodinámica de la laguna está impulsada principalmente por el viento. La ampliación y la profundización de la gola de El Estacio provocaron cambios en la tasa de renovación del agua y tuvieron efectos sobre la salinidad y la temperatura, lo que a su vez permitió el acceso a nuevas especies colonizadoras como la ya mencionada *Caulerpa prolifera* (Pérez-Ruzafa *et al.*, 1991). El intercambio de agua entre la laguna y el mar

Mediterráneo se debe a las diferencias de fase en el nivel del mar (Arévalo, 1988; De Pascalis *et al.*, 2012) y tiene lugar fundamentalmente a través de dicho canal principal. Los tres giros principales que se pueden identificar en el esquema circulatorio general del agua y las condiciones hidrológicas definen tres cuencas principales en el Mar Menor: 1) la cuenca norte, con el nivel de salinidad más bajo, 2) la cuenca sur, con la salinidad más alta como consecuencia del déficit hídrico y el mayor grado de confinamiento, y 3) la cuenca central, que muestra valores de salinidad intermedios y que corresponde a la zona de mezcla de las aguas del Mediterráneo y de la laguna. Estas condiciones se han visto alteradas en épocas más recientes, desde la subida del nivel freático y las últimas lluvias recurrentes, habiéndose producido situaciones en las que la cubeta sur ha presentado valores de salinidad más bajos que el resto de la laguna.

La distribución de la temperatura del agua es relativamente uniforme en todo el Mar Menor, con algunas excepciones locales, principalmente relacionadas con las áreas más someras. La temperatura del agua muestra un ciclo estacional e interanual bastante regular (Fig. 21). Los máximos de alrededor de 30°C se alcanzan generalmente en agosto y los mínimos en febrero (alrededor de 11°C). La cuenca sur es más cálida en verano y más fría en invierno, pero las diferencias con respecto a la cuenca norte suelen ser inferiores a 2°C en cualquier época del año (Pérez-Ruzafa *et al.*, 2005a, 2005b). Después de que se agrandó la entrada de El Estacio, la salinidad de la laguna se redujo de 53-54,7 (Navarro, 1927; Lozano, 1954; Arevalo y Aravio-Torre, 1969; Aravio-Torre y Arevalo, 1971; Moreno, 1975) a un intervalo de 39 a 51 (Ros y Miracle, 1984; Pérez-Ruzafa, 1989; Pérez-Ruzafa *et al.*, 1987; 2005a), mostrando un gradiente norte-sur (Pérez-Ruzafa *et al.*, 2005b).

La turbidez y los materiales en suspensión son altamente variables, dependiendo de la distancia a la costa, la profundidad, la naturaleza y la pendiente del fondo, la productividad planctónica, el viento y la lluvia. Los valores varían desde 2 mg/L de sólidos en suspensión en aguas tranquilas sobre fondos rocosos hasta 6 g/L en fondos fangosos o arenosos bajo la acción de las olas (Pérez-Ruzafa, 1989; Pérez-Ruzafa *et al.*, 2005a).

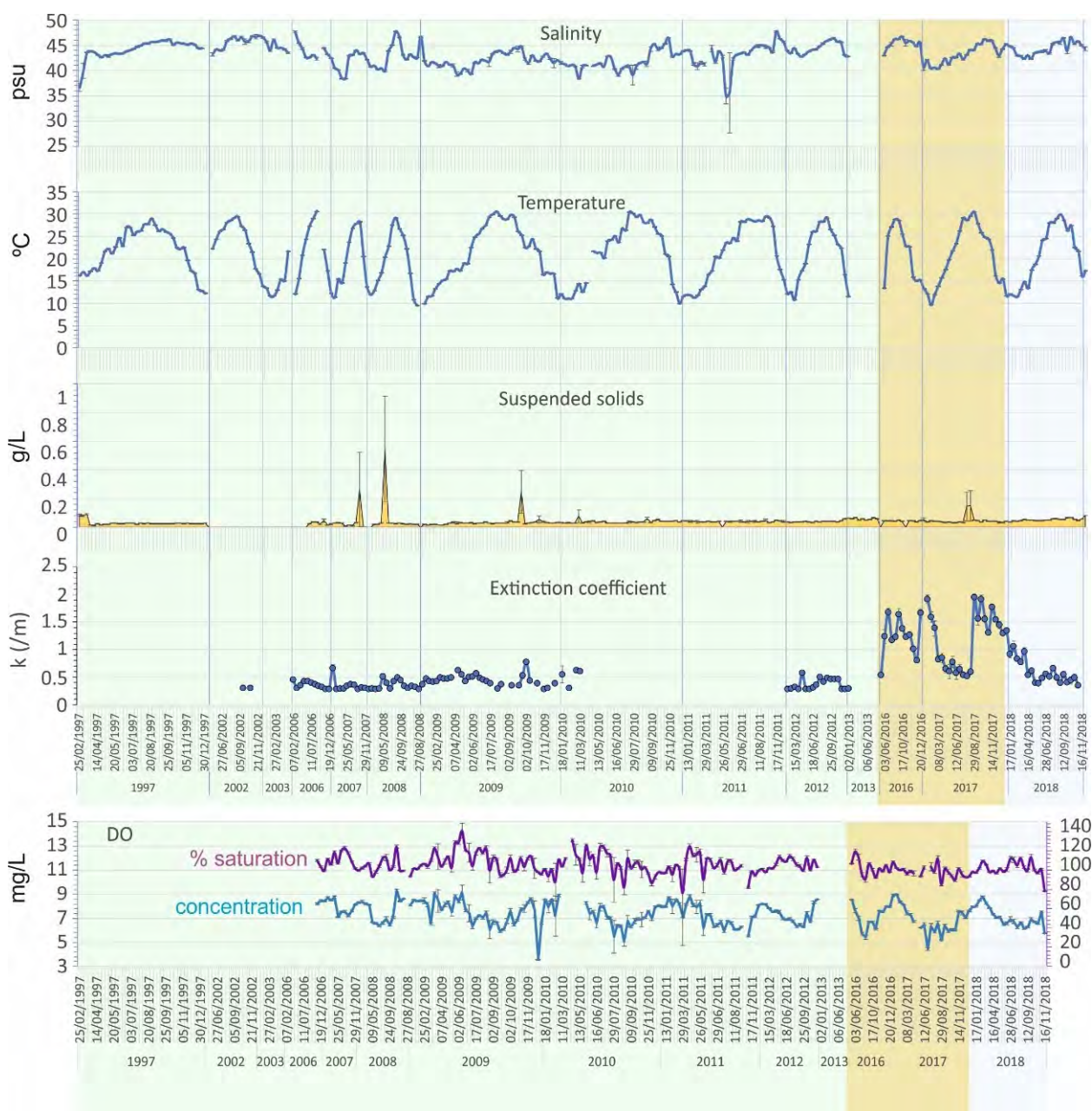


Figura 21. Evolución de las principales variables hidrográficas durante el periodo 1997-2018 en la columna de agua de la laguna Mar Menor. La fase previa a la crisis distrófica o ruptura (Prebreak) se resalta en verde, la fase de ruptura o de crisis (Break) en ocre y la recuperación (Recovery) en azul claro.

4.2. Evolución reciente de los principales parámetros físico-químicos

4.2.1. Temperatura y salinidad

Durante 2021 la temperatura ha oscilado entre un mínimo de 13,77°C en el fondo de la laguna el 4 de febrero de 2021 hasta un máximo de 29,9°C en las capas superficiales del centro de la laguna a mediados de agosto de 2021 (Fig. 22), manteniéndose uniforme y sin estratificación a lo largo de la columna de agua y con valores normales para el Mar Menor en las diferentes estaciones del año. Sin embargo, algunas localidades someras llegaron a alcanzar 32°C a mediados de agosto, cuando se observaron los primeros indicios de comportamientos anómalos y agrupamientos de algunas especies en las orillas de algunas localidades ribereñas del Mar Menor, manteniéndose entre 29,3°C y 29,9°C en la mayor parte de la zona central de la laguna. En general, las temperaturas han sido ligeramente más bajas y con oscilaciones más suaves que las de años anteriores y, aunque son elevadas con respecto al Mediterráneo, como se ha dicho pueden considerarse dentro del rango normal para el Mar Menor.

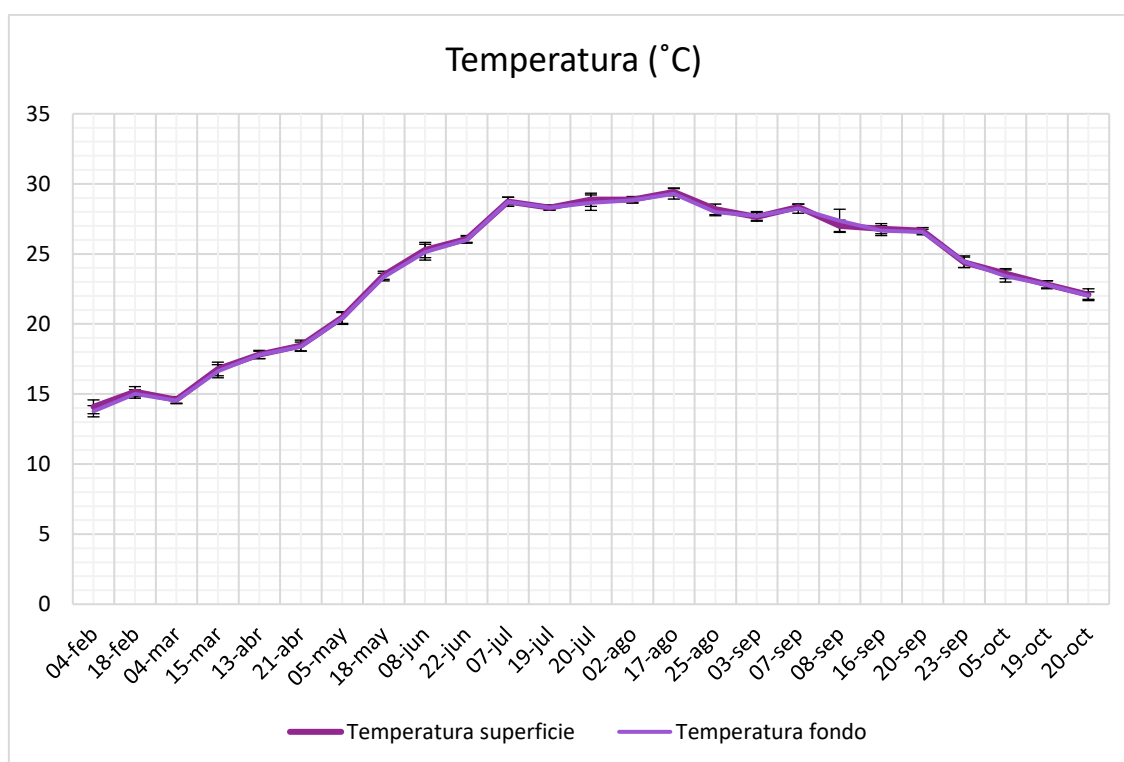


Figura 22. Temperatura promedio en la superficie y fondo del Mar Menor en el periodo de estudio en 2021. Las barras de error indican la desviación típica.

La salinidad sí ha sufrido cambios importantes a lo largo del periodo de estudio y muestra una tendencia preocupante a seguir descendiendo. El año 2020 se inició con una bajada muy significativa de la salinidad en febrero, fuertemente asociada a entradas de agua desde la ribera interna, principalmente por la rambla del Albuñón y la cubeta sur del Mar Menor (Fig. 23a). Aunque a lo largo de la primavera los valores se fueron recuperando, situándose en 42,4, se produjo un nuevo descenso de salinidad en las capas superficiales tras las últimas lluvias de agosto de 2020, llegando a descender bruscamente hasta 39,3 frente a La Ribera (Fig. 23f), muy por debajo, por tanto, de los valores normales del Mar Menor en esta época. Esto volvió a suponer una regresión en las posibilidades de recuperación y un incremento de los riesgos de estratificación en el caso de que se hubiera producido una DANA intensa durante el otoño de 2020. Afortunadamente dicha situación no se produjo.

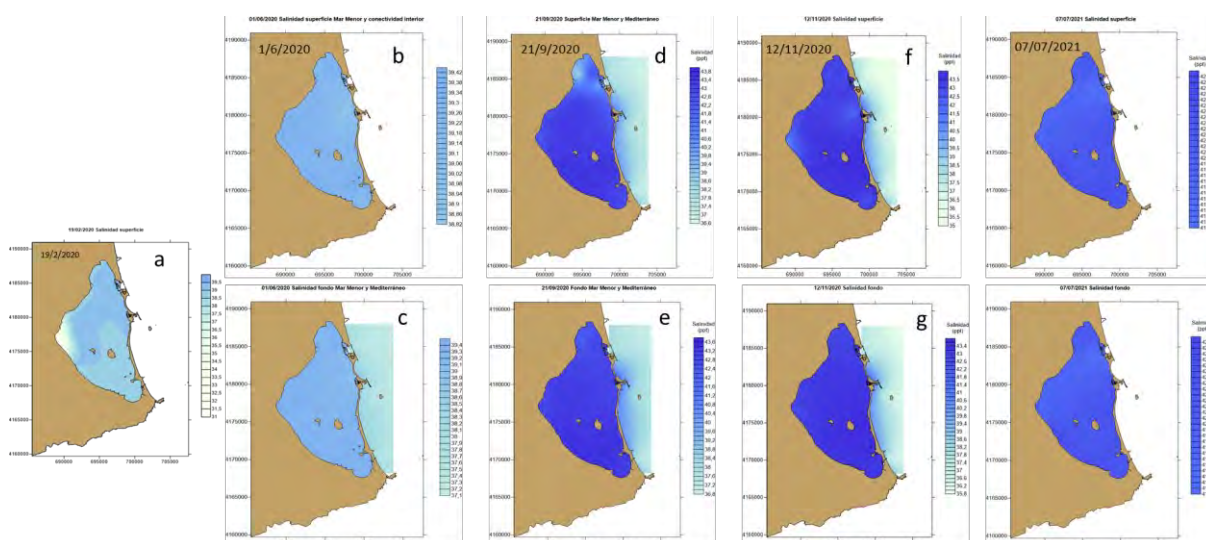


Figura 23. Distribución de los valores de salinidad en las aguas superficiales (arriba) y en el fondo (debajo) del Mar Menor en distintas fechas desde febrero de 2020 al 7 de julio de 2021.

En el inicio del invierno de 2021 puede decirse que el Mar Menor se encontraba en una fase de estabilidad con un futuro incierto. El año 2020 se caracterizó por la ausencia de incidencias notables. Se observó una buena claridad de aguas, y valores de salinidad que fueron recuperándose progresivamente y a pulsos tras el fuerte descenso que se produjo debido a la DANA de 2019 y las sucesivas lluvias torrenciales de la primavera de 2020 y de finales de verano de ese mismo año.

A lo largo de la primavera de 2021, este parámetro comenzó a descender desde valores superiores a 42 hasta los 40,90 el día 21 de abril como consecuencia de las entradas de agua dulce por escorrentía y desde el freático tras las lluvias de marzo y abril (Fig. 24; AEMET, 2021a, 2021b), no recuperando valores superiores a 42 hasta inicios de julio. En los informes de 24 de mayo de 2021 (anexo I) ya se advertía que la excesiva homogeneidad de la salinidad detectada en esos momentos entre las cubetas del Mar Menor suponía un factor de riesgo ante presiones que sobrepasaran su capacidad de respuesta. De hecho, en el informe de 19 de julio de 2021 (anexo I) se ponía de manifiesto una entrada de agua dulce por la Ribera (Fig. 25), semejante a la del año anterior y se volvía a insistir en que los valores de salinidad aún se mantenían bajos, con un valor medio de 42,1 que, si bien era ya dos puntos superior al la del año 2020 en esas fechas, estaba aún 3 puntos por debajo de la habitual (>45) (Fig. 26) y, en dichas condiciones, las altas temperaturas podrían ser un factor de riesgo importante de cara a que se produjeran proliferaciones algales y bajadas de oxígeno. Situación que se desencadenó un mes más tarde.

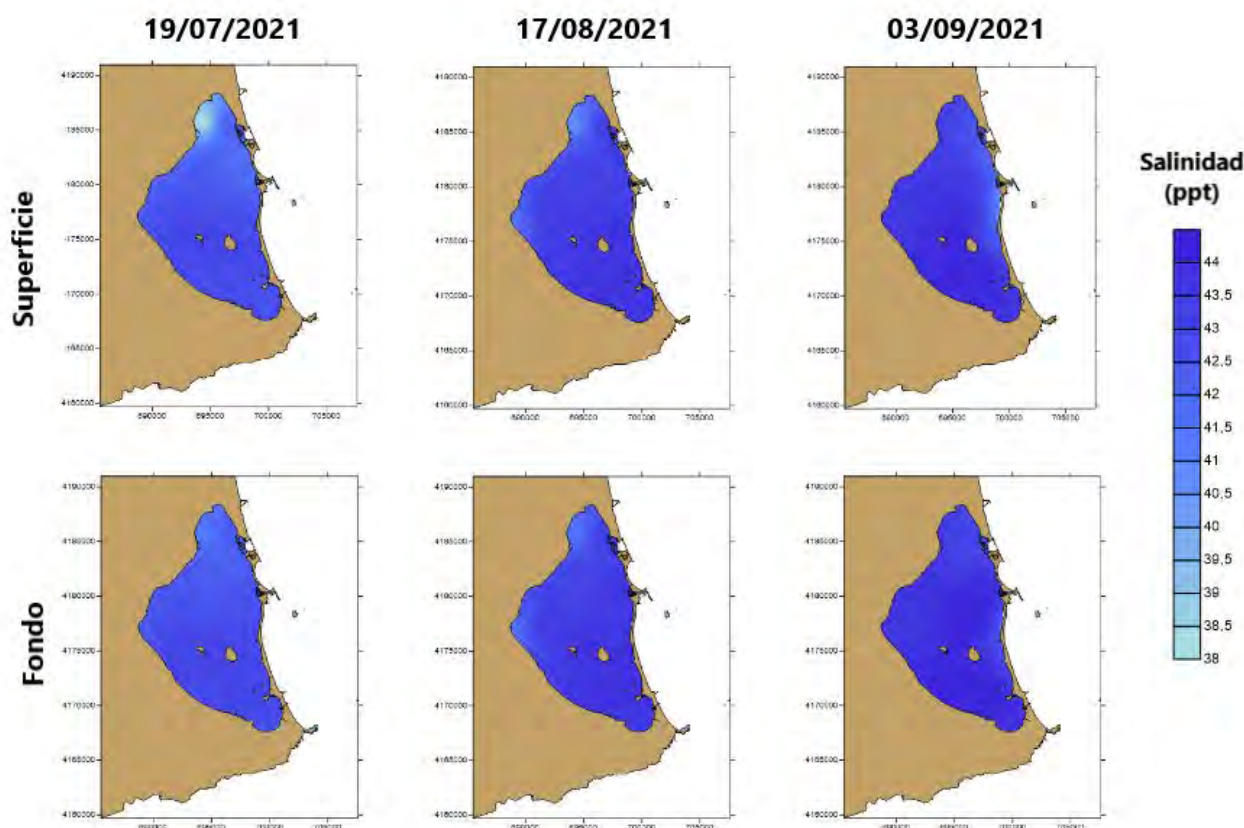


Figura 24. Evolución de la distribución horizontal de la salinidad en superficie y fondo del Mar Menor, destacándose algunos eventos de entradas de aguas dulces por la cubeta norte en julio y agosto de 2021.

A principios de agosto, la temperatura media en el Mar Menor era de 28,9°C y la salinidad de 42,89 (Fig. 25), semejante a la de estas fechas en 2020 pero igualmente aún tres puntos por debajo de la de 2019, que se situaba en 45,24, mostrando que las entradas continuas de agua dulce desde el freático y la cuenca vertiente no permiten una recuperación adecuada de las condiciones hidrográficas de la laguna. Esto se puso especialmente de manifiesto el día 17 de dicho mes, en el que la distribución de los valores de salinidad en superficie y fondo mostraban una fuerte entrada de aguas dulces por la ribera interna, entre la marina de El Carmolí y Lo Pagán (Fig. 27).

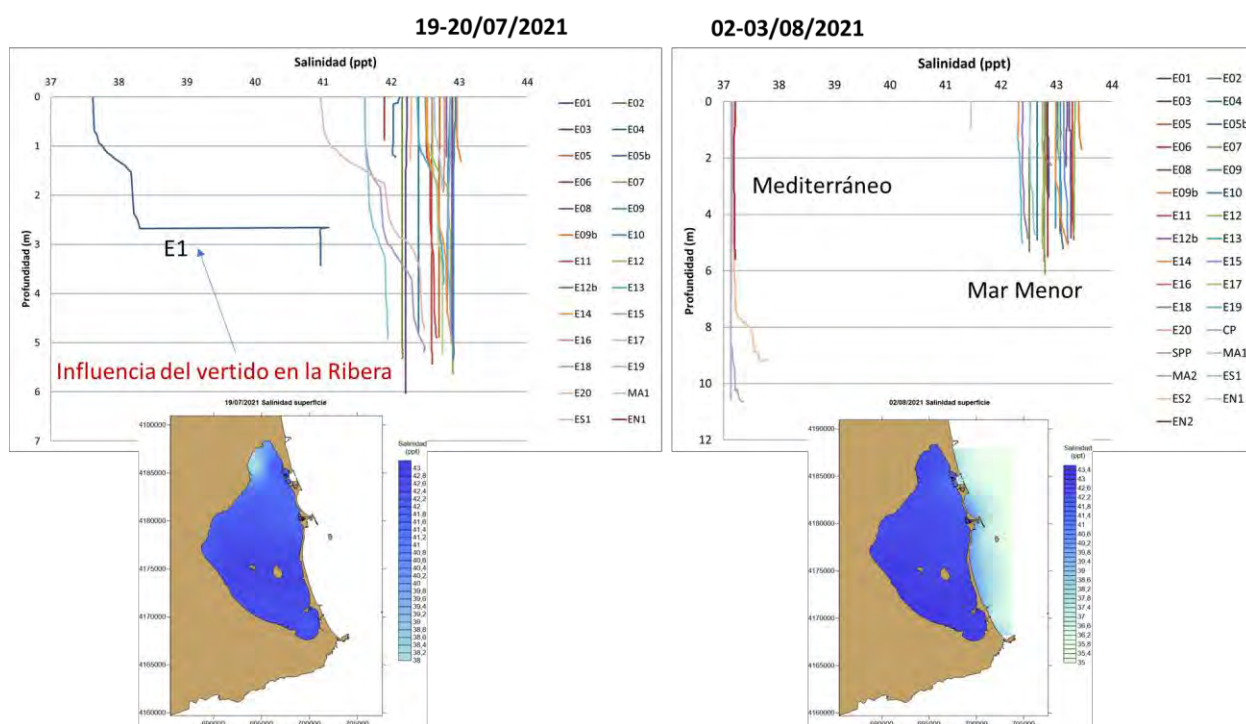


Figura 25. Perfiles y distribución superficial de los valores de salinidad en el Mar Menor el 19 de julio y el 2 de agosto de 2021.

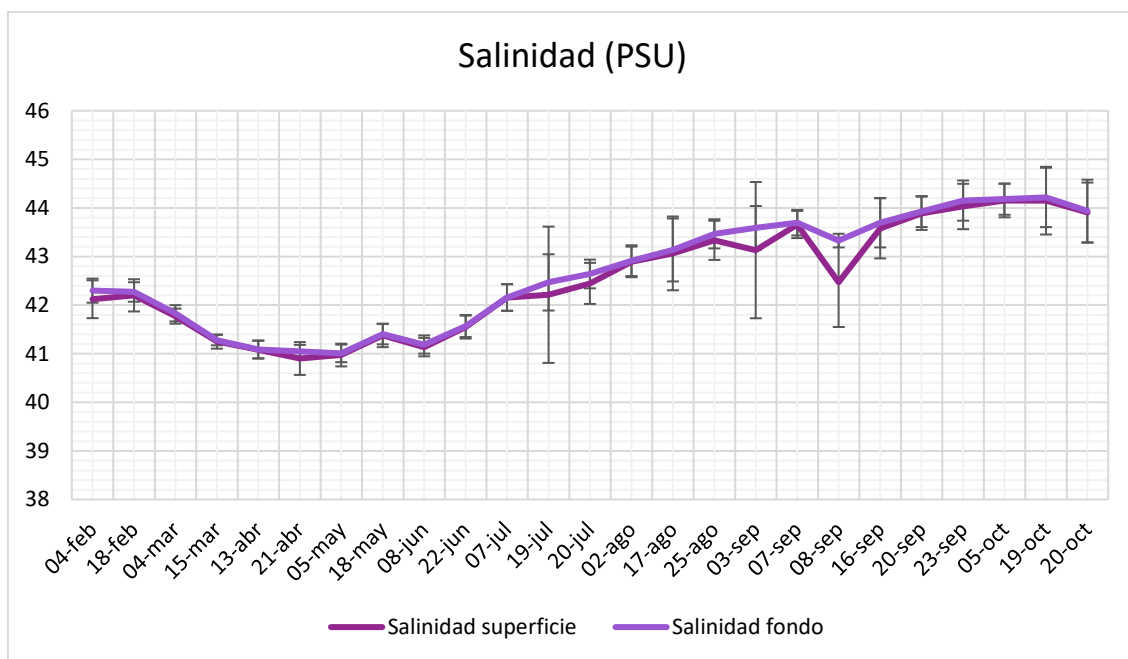


Figura 26. Salinidad promedio en la superficie y fondo del Mar Menor entre febrero y octubre de 2021. Las barras de error indican desviación típica.

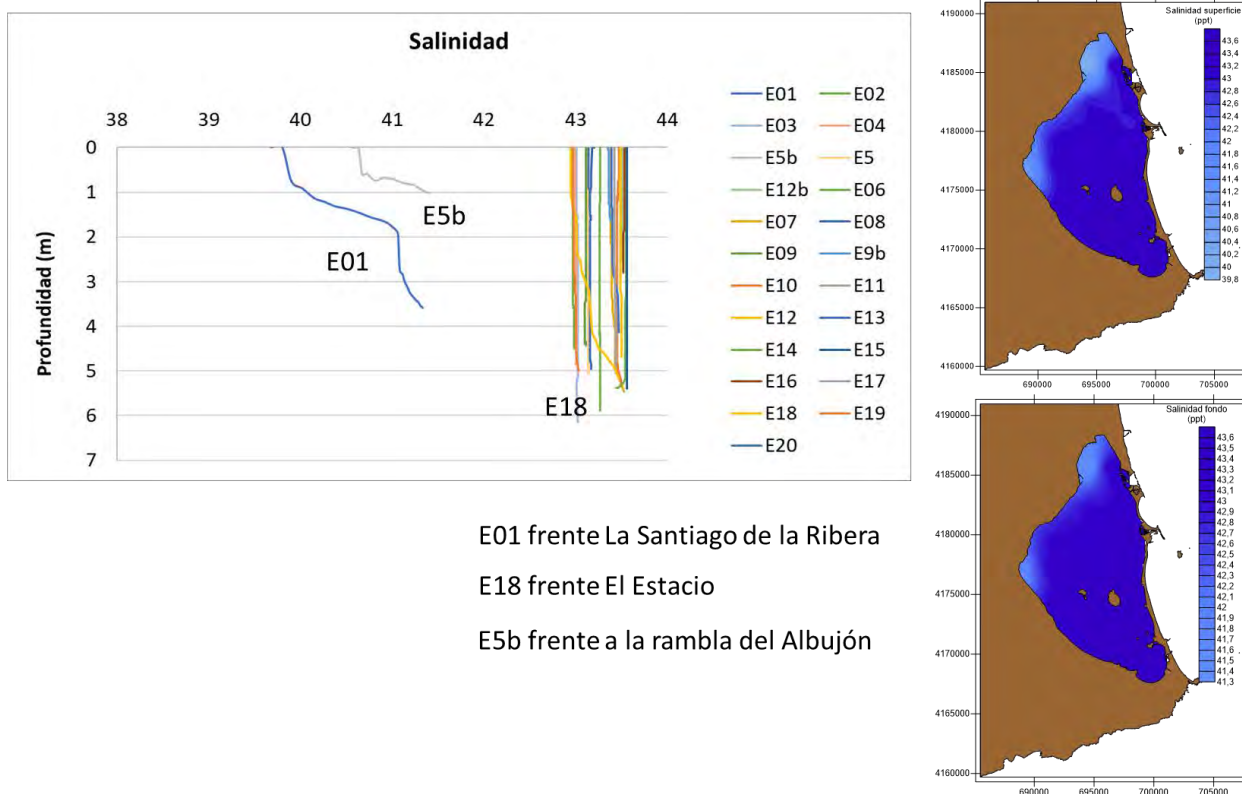


Figura 27. Perfiles y distribución superficial de los valores de salinidad en el Mar Menor el 17 de agosto de 2021.

En general, la salinidad está mostrando una tendencia preocupante a seguir decreciendo progresivamente (Fig. 28). Esto puede tener consecuencias en la colonización de nuevas especies que pueden afectar a especies lagunares mas o menos vulnerables, como la nacra *Pinna nobilis* Linnaeus, 1758, y puede hacer al Mar Menor cada vez más sensible al proceso de eutrofización y más propenso a sufrir crisis distróficas.

Además, si ya se venía observando un incremento en el tiempo de recuperación de la salinidad típica de la laguna tras los eventos lluviosos (Pérez-Ruzafa *et al.*, 2019b), actualmente ésta no llega a producirse como consecuencia de la entrada continua de agua superficial y procedente del freático en las cubetas oeste y sur (Dirección General del Mar Menor, 2021), debido a la recarga que sufre el acuífero y el consiguiente tiempo de retardo en su descarga (Fig. 29).

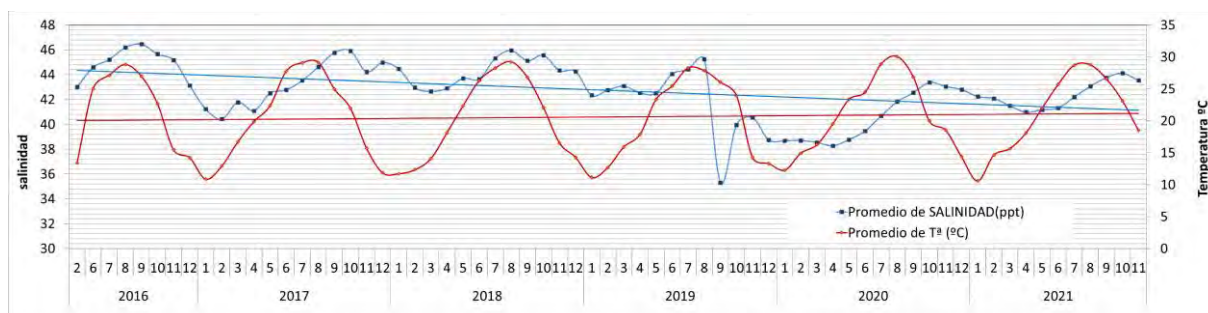


Figura 28. Evolución del ciclo anual de la salinidad y la temperatura (medias mensuales para la laguna) desde 2016 hasta noviembre de 2021 mostrándose las respectivas líneas de tendencia para ambos parámetros a lo largo del periodo de estudio.

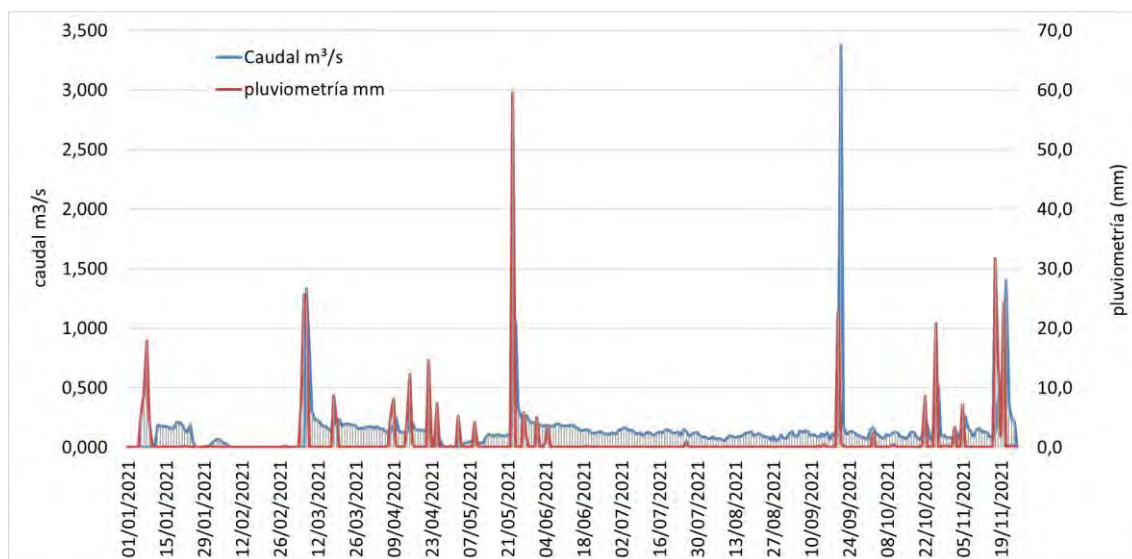


Figura 29. Evolución de los caudales de descarga al Mar Menor en la desembocadura de la rambla de El Albujón en relación con los eventos de lluvia ocurridos en la cuenca del Mar Menor entre enero de y noviembre de 2021.

Aunque en general no se ha observado una estratificación marcada de la columna de agua, siendo los valores de salinidad y temperatura en superficie y fondo semejantes, sin embargo, la existencia de eventos puntuales y locales muestra que los riesgos de que esto ocurra si se producen entradas importantes de agua desde la ribera interna son reales. Por otro lado, debe destacarse que las diferencias espaciales entre estaciones de muestreo en la laguna ya no son entre cubetas, sino vinculadas a las entradas de agua dulce por la ribera interna, como las mencionadas anteriormente, que generan un gradiente de salinidad inverso a la comunicación con el Mediterráneo, y estratificación local como las mostradas en las figuras 25 y 27 o la detectada frente al canal de El Estacio el día 3 de septiembre de 2021. La estratificación registrada frente a El Estacio este día de septiembre coincidió con la formación de las bolsas de hipoxia en las capas profundas, advirtiendo del riesgo existente de la generación de nuevos eventos de anoxia tras precipitaciones torrenciales y épocas de alta producción primaria y temperaturas elevadas.

4.2.2. Materiales en suspensión

Durante el periodo de estudio, los valores medios de sólidos en suspensión en la columna de agua del Mar Menor han estado oscilando normalmente entre 0.002 g/L y 0.01 g/L, obteniendo el valor máximo registrado en 2021 en la campaña realizada el 17 de agosto, justo en el momento en el que se produjo el primer evento de hipoxia, alcanzándose en ese caso valores de 0.037 g/L (Fig. 30).

Aunque la mayor parte de las estaciones en este periodo de 2021 se han mantenido en valores inferiores a 0,01 g/L, sin embargo, se han detectado dos estaciones con unos valores muy por encima del resto, la estación E05b en la desembocadura de la rambla del Albuñón con una media de 0.017 g/L y la estación E13 en la zona mas confinada de la cubeta sur, frente a la gola de Marchamalo, donde se ha encontrado el mayor valor de 0.037 g/L.



Figura 30. Concentración media de sólidos en suspensión en la columna de agua del Mar Menor en el seguimiento realizado en el año 2021.

5. Seguimiento, análisis y evolución de la calidad de las aguas marinas y del estado trófico del Mar Menor, contenido en nutrientes, materiales en suspensión, concentración de clorofila y concentración de oxígeno

5.1. Profundidad de visibilidad del disco de Secchi

La combinación de sólidos en suspensión, proliferaciones de fitoplancton y densidad de zooplancton determinan la transparencia de la columna de agua. Salvo en los momentos de intenso oleaje o descargas torrenciales en circunstancias de lluvias intensas en los que se produce la resuspensión de los sedimentos de las zonas someras (hasta 1,5 m de profundidad) o el aporte de cantidades importantes de nuevos sedimentos a la laguna, el estado trófico del sistema pelágico es el principal determinante de la transparencia del agua.

En el Mar Menor, durante el invierno de 2020 los datos de visibilidad del disco Secchi se situaron en valores mucho más bajos que los que se midieron durante la recuperación de 2018 y se aproximaron a los peores de la serie histórica. No obstante, desde abril de 2020 se inició una recuperación semejante a la observada en 2018, con una visibilidad media alta durante todo el verano que se situó en 4,69 m a finales del mismo y alcanzó los 5 m a final de septiembre (Fig. 31). Esta progresiva bajada de la concentración de clorofila *a* en la columna de agua se tradujo en una recuperación de la transparencia en condiciones de relativa calma. Sin embargo, las zonas someras aún contenían abundantes partículas finas de sedimento, como consecuencia de los arrastres de las lluvias torrenciales, lo que producía pérdidas locales de transparencia como consecuencia de la resuspensión de dichos materiales por el oleaje en las zonas expuestas.

No obstante, los caudales descargados en la zona de la desembocadura del Albuñón y el drenaje de los Alcázares desde 2020 han superado frecuentemente los 400 l/s, con picos de más de 1400 l/s. Esto está en el rango, e incluso supera, las estimaciones del periodo previo a la crisis de 2016. Este hecho hacía que en los sucesivos informes que ha emitido este grupo de investigación apareciera de forma reiterada la advertencia de que el ecosistema seguía bajo una intensa presión por la entrada de agua dulce y nutrientes, lo que lo ponía en serio riesgo de sufrir crisis distróficas (Fig. 32).

Pero, por otro lado, como se recogió en el informe de 28 de febrero de 2021 (Anexo I), lo más preocupante era que la entrada de nutrientes por la ribera interna provocaba

picos puntuales de clorofila. El sistema aún mostraba una capacidad de recuperación relativamente rápida (un par de semanas) tras la regresión en la transparencia del agua sufrida en enero y principios de febrero, volviendo a alcanzar profundidades medias de visibilidad del disco de Secchi en la columna de agua de más de 5 m a finales de dicho mes. Hasta principios de verano de 2021 se mantuvo el periodo más largo de recuperación desde que se produjo la crisis de 2016, con valores de transparencia de las aguas superiores a los 4 metros (Fig. 31).

En el mencionado informe se resaltaba que los momentos de mayor entrada de nutrientes y el deterioro de la calidad de aguas, se veían fuertemente influenciados por los caudales de entrada en el área de la desembocadura de la rambla del Albujón (Albujón, Miranda y Canal de drenaje de los Alcázares) (Fig. 32), y que la recuperación de la calidad de aguas y del estado de las comunidades durante 2018 apuntada en informes anteriores, se corresponde con los periodos de mínima descarga en dichos puntos.

De hecho, la primera consecuencia del aumento en la concentración de clorofila en el verano de 2021 se ha manifestado en la transparencia del agua que disminuyó sensiblemente, pasando de más de 5 m de media mantenidos desde la primavera hasta mediados de julio a menos de 3,5 m la primera semana de agosto, con menos de 2 metros en la zona de influencia de la rambla del Albujón hasta los Urrutias.

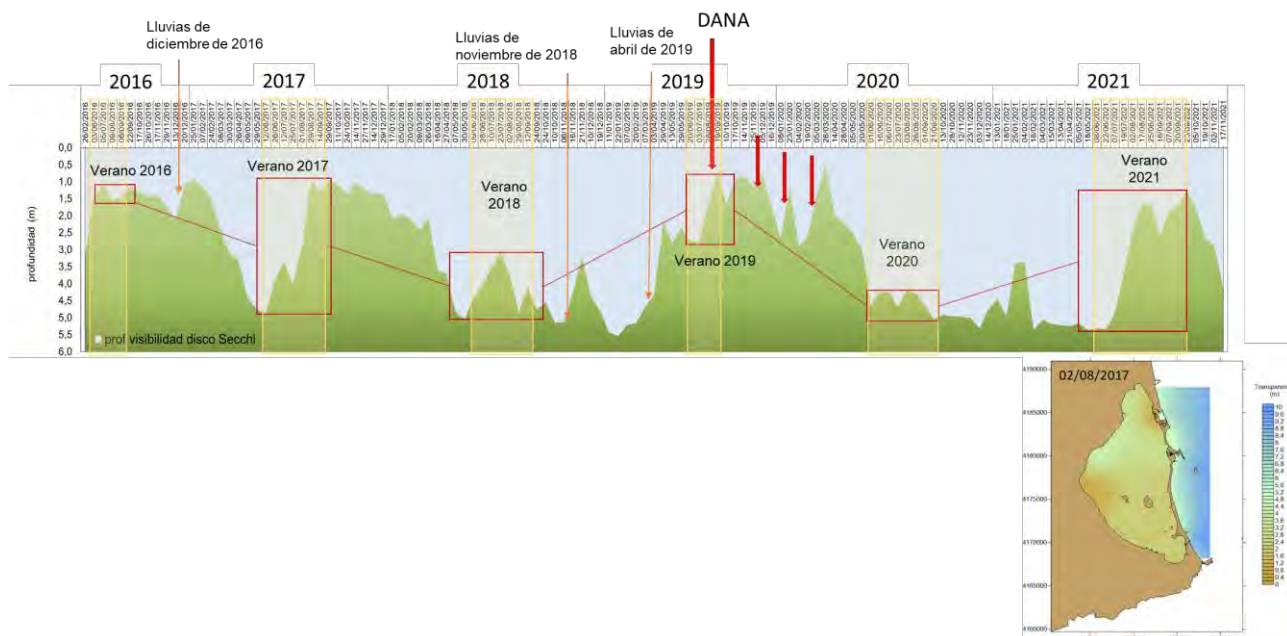


Figura 31. Profundidad de visibilidad del disco de Secchi en la columna de agua del Mar Menor entre el verano de 2016 y noviembre de 2021 y mapa con la distribución espacial de la profundidad de visibilidad el 2 de agosto de 2021.

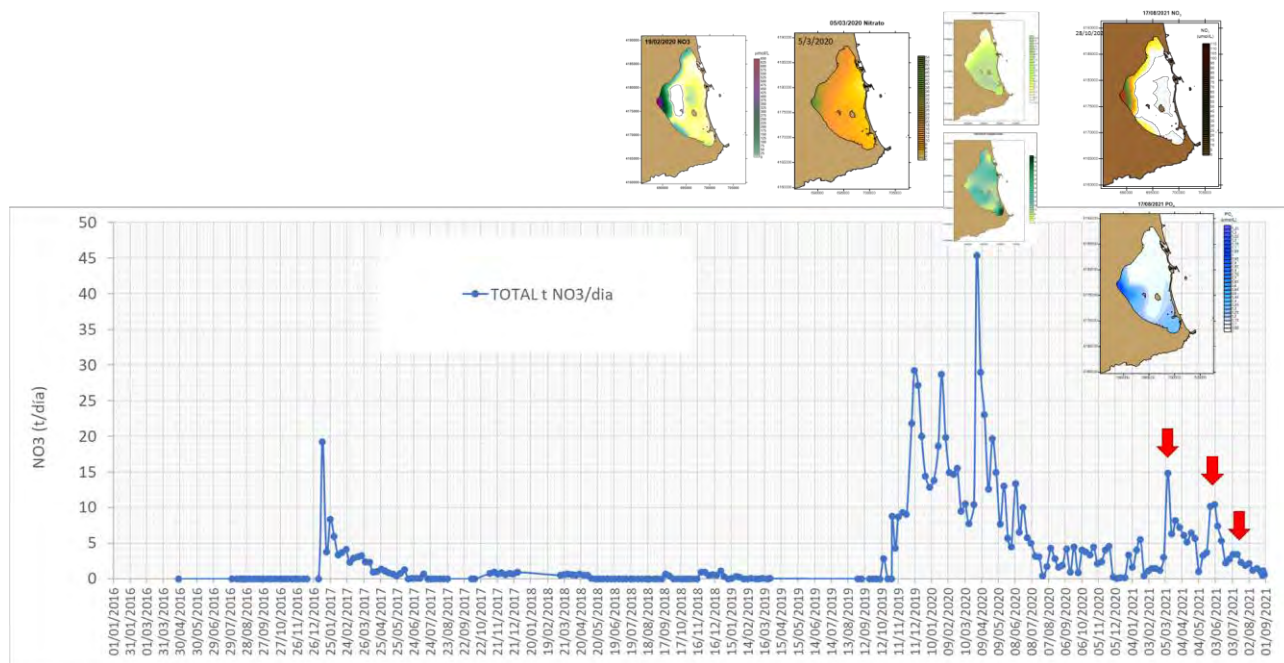


Figura 32. Evolución de las descargas de nitratos al Mar Menor a través de la rambla del Albujón, asociados a los caudales en la misma, en relación con algunos los momentos de peor estado del Mar Menor desde 2016 hasta septiembre de 2021. Es importante resaltar el incremento ocurrido desde octubre de 2019 (tras la DANA de septiembre) y tras las sucesivas lluvias, lo que indica la importante recarga del acuífero y sus consecuencias en la llegada de nutrientes al Mar Menor.



Figura 33. Mala calidad del agua en el área de influencia de la rambla del Albujón el 13 de abril de 2021, en un día en el que el resto de la laguna mostraba una distancia media de visibilidad superior a los 5 m.



Figura 34. Evolucion del valor medio del coeficiente de extinción de la luz en la columna de agua del Mar Menor entre el verano de 2016 y noviembre de 2021.

Como se decía en el informe de primeros de agosto de 2021, la pérdida de cierta calidad del agua es normal a mediados de verano, pero la respuesta del ecosistema puede depender de las condiciones ambientales (temperatura, periodos de calma, etc.) y, sobre todo, de las presiones en forma de entrada de nutrientes. Esta situación ya se dio en el verano de 2017 y en el de 2019 (y en menor medida en el de 2018). En 2018, gracias a la recuperación franca de las comunidades y a la disminución en las entradas, el efecto fue menor y la recuperación rápida. En 2019, con las entradas de nuevo incrementadas, la respuesta del ecosistema fue menos efectiva y en 2021, tal y como anticipamos en dicho informe, con la entrada sostenida de agua y nutrientes que se mantuvo durante todo el invierno y la primavera, el sistema no pudo recuperarse, presentando ya durante todo el verano profundidades de visibilidad del disco Secchi inferiores a 2 m. El fuerte deterioro producido a mediados de julio, y sus consecuencias biológicas, sin descartar posibles proliferaciones de dinoflagelados, tuvo que ver con la concentración de clorofila en las capas profundas de la columna de agua y la acumulación de los excedentes de producción primaria en dichas capas. Como ejemplo, en la estación E9, al sur de los Urrutias, se alcanzaron concentraciones de $189,5 \mu\text{g/L}$ y la estación E18, frente al Estacio, llegó a $148,1 \mu\text{g/L}$ de clorofila a .

Por todo ello se ha venido insistiendo reiteradamente en la importancia y la urgencia de un plan de gestión de las aguas en la cuenca y de regulación, no solo de los vertidos, sino también de los niveles del freático. Es muy importante el consenso social, técnico y

político en este sentido y que se adopten las medidas con los especialistas en hidrogeología, con la participación y colaboración de los sectores que desarrollan sus actividades en la cuenca, y mediante el uso de las infraestructuras disponibles para reducir el nivel freático al menos entre 1,5 y 2 metros.

5.2. Estado trófico

Junto a los aspectos relativos a la hidrología e hidrodinamismo de la laguna, los problemas que han requerido de forma más inmediata su estudio y un seguimiento continuado de cara a la prevención de consecuencias y el diseño de medidas gestión, han sido el estado trófico de las aguas y la respuesta del ecosistema a la eutrofización. Ambos aspectos están muy relacionados ya que el estado trófico está siendo forzado por las entradas de agua y nutrientes desde la cuenca de drenaje y su freático que han alterado de forma drástica los balances hídricos.

Según los datos obtenidos por Esamur (Esamur, 2018), desde abril de 2017 hasta octubre de 2018, el flujo medio de agua que llegaba al Mar Menor a través de la rambla de El Albuñón se redujo a $5,89 \pm 1,32$ L/segundo y a una descarga de $38,76$ t NO_3^- /año, lo que representa una reducción de aproximadamente el 97,55% del flujo y el 82,3% de las cargas de nitrato con respecto a las dos décadas anteriores (García-Pintado *et al.*, 2007; Pérez-Ruzafa, 2010).

Gracias a esta reducción, el ecosistema pudo restaurar sus mecanismos reguladores e inició una fase de recuperación que, a pesar de que algunos pronósticos suponían que sería muy lenta o imposible, resultó ser razonablemente rápida. Esto era un indicio de que el sistema no se había roto completamente y aún conservaba su estructura ecológica básica. Al cabo de dos años, hacia el otoño de 2018, la concentración media de clorofila *a* regresaba a concentraciones inferiores a 2 $\mu\text{g/L}$ ($0,94 \pm 0,04$ $\mu\text{g/L}$) y con ello la transparencia de las aguas, con un coeficiente de extinción de la luz de $0,42 \pm 0,02/\text{m}$, permitía de nuevo una visibilidad de 4,5 a 5 m.

Al mismo tiempo, en el verano y el otoño de 2018 muchas comunidades mostraron diversidades y biomasa semejantes a las anteriores a la crisis e, incluso, algunas comunidades que habían casi desaparecido tras la expansión del alga *Caulerpa prolifera*, como las praderas más o menos extensas del alga *Acetabularia calyculus* J. V. Lamouroux o zonas de sedimentos sin vegetación, bien oxigenadas superficialmente y cubiertas por cianofíceas y diatomeas bentónicas y con fauna de moluscos, cnidarios y poliquetos, volvieron a ser importantes (Fig. 35) (Pérez-Ruzafa *et al.*, 2019b).



El inicio de los mecanismos de regulación en la red trófica, tanto para impedir la proliferación de clorofila *a* en 2009 y 2010, como para recuperar el sistema después de las crisis de 2016, parece manifestarse por una producción de amonio en la columna de agua, probablemente como consecuencia de la actividad biológica de los herbívoros y los niveles más altos de la red trófica. De hecho, durante el proceso de eutrofización, los rendimientos de la pesca tendieron a aumentar en el Mar Menor (Marcos *et al.*, 2015).

Podríamos resumir que los mecanismos homeostáticos que han hecho posible esta respuesta compleja del Mar Menor a las presiones y a la eutrofización, y su recuperación relativamente rápida se basan en tres pilares fundamentales:

- 1) una alta heterogeneidad espacio-temporal hidrográfica y biológica (Pérez-Ruzafa *et al.*, 2005a, 2007a), inducida por la conectividad restringida con el mar Mediterráneo (Pérez-Ruzafa, 2015; Pérez-Ruzafa *et al.*, 2019b),
- 2) una alta producción de micro y macrófitos bentónicos y una importante biomasa de filtradores, detritívoros y carroñeros (Pérez-Ruzafa, 1989), y
- 3) la acumulación del exceso de producción en los sedimentos o su exportación fuera del sistema a través de la pesca y las especies migratorias (Pérez -Ruzafa *et al.*, 2019b).

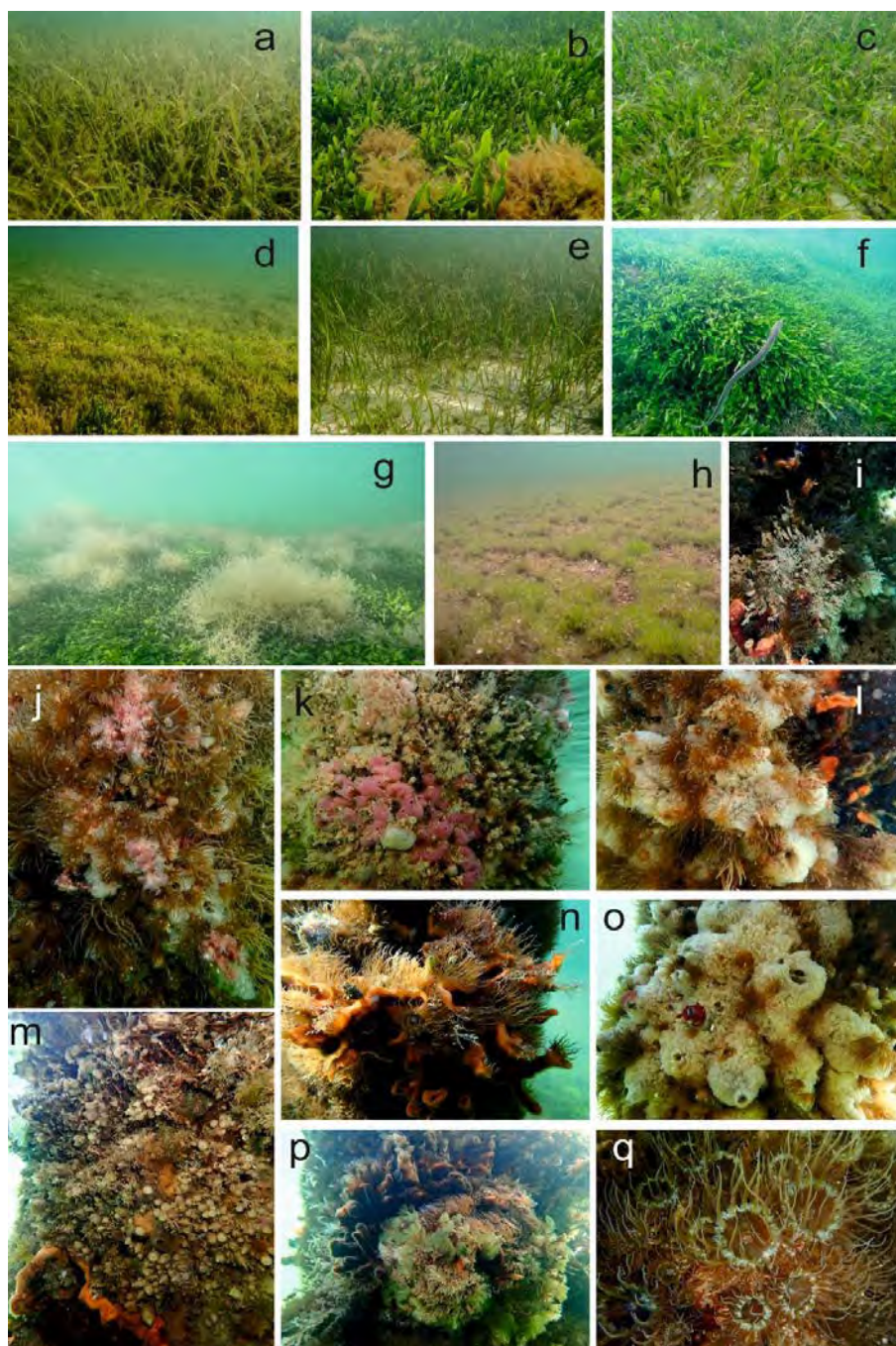


Figura 35. Algunas de las comunidades bentónicas de los fondos del Mar Menor tras la recuperación de la calidad de las aguas en agosto y otoño de 2018, a: praderas de *Cymodocea nodosa* muy epifitadas. b: pradera de *Caulerpa prolifera* sobre sustrato mixto con *Alsidium corallinum* y *Chondrophycus tenerrimus*; c: pradera mixta de *C. prolifera* y *C. nodosa* sobre arena; d: pradera densa del alga *Dasycladus vermicularis* que ha aparecido recientemente en el Mar Menor durante la fase de recuperación y tras la regresión de las praderas de *C. prolifera*; e: pradera de *C. nodosa* poco epifitada sobre arena; f: pradera monoespecífica de *C. prolifera* colonizando la roca infralitoral; g: pradera monoespecífica de *C. prolifera* con colonias de *Zoobotrion verticillatum*; h: facies de *Acetabularia calyculus* sobre arena, gravas y cascajo infralitorales; i-q: comunidades esciáfílas de aguas someras con esponjas, cnidarios, poliquetos, briozoos y ascidias en sustratos duros infralitorales con iluminación escasa, en los pilares bajo los balnearios.

5.3. Nutrientes

Los nutrientes son sustancias disueltas en el agua que los organismos necesitan para su desarrollo (Steele *et al.*, 2001). En el caso de los productores primarios estos son básicamente compuestos que contienen nitrógeno (N) como el nitrato (NO_3^-), el amonio (NH_4^+) o el nitrito (NO_2^-), silicatos (SiO_4^{4-}) y fosfatos (PO_4^{3-}) (Steele *et al.*, 2001).

Durante los 35 años que lleva activo el proceso de eutrofización en el Mar Menor la principal fuente de N han sido las aguas de origen agrícola a través de vertidos de salmueras derivadas de la desalobración de las aguas subterráneas, muy concentradas en nitratos. Sin embargo, desde las restricciones a la extracción de aguas subterráneas, la desmantelación del salmueroducto y las prohibiciones al vertido de salmueras a los cauces, el nivel del freático ha ascendido rápidamente y ahora las descargas de agua dulce y nutrientes son más difusas y contienen también cada vez mayores concentraciones de fósforo (P), que suele ir vinculado a las aguas de origen urbano.

La dinámica de los nutrientes está determinada por los patrones de entrada, condicionados por la dinámica de lluvias y los retardos introducidos por la recarga y flujos desde el freático, y la actividad biológica que determina la demanda y consumo o liberación de los nutrientes. Dicha dinámica tiene un patrón estacional, con una influencia importante de la temperatura, especialmente en los periodos en los que los días son más largos. En el caso del fósforo se superpone un patrón estacional determinado por los periodos vacacionales y mayor la actividad urbana en primavera y verano.

Esta combinación de factores hace que algunos picos de lluvia no produzcan los mismos efectos que otros. El primer pico en la entrada de nutrientes ocurrido durante 2021 se observó durante los meses de abril y mayo en la zona de influencia de la rambla de El Albujón. Este no desencadenó una proliferación masiva de fitoplancton presumiblemente debido al control *top-down* ejercido por los estratos superiores de la red trófica, fundamentalmente por la medusa *Aurelia* sp., jugando estos organismos un papel importante en el mantenimiento de la transparencia de las aguas y regulando las proliferaciones de fitoplancton (Pérez-Ruzafa *et al.*, 2002; Fernández-Alías *et al.*, 2020). Sin embargo, sí fue probablemente el desencadenante de las proliferaciones de algas bentónicas nitrófilas en las zonas ribereñas desde Lo Pagán a Los Urrutias.

La segunda entrada elevada de nutrientes, registrada en los meses de julio y agosto, ya sí desencadenó una proliferación de fitoplancton, análoga a la registrada en los años 2016 y 2017 (Pérez-Ruzafa *et al.*, 2019b), compuesta por diatomeas y dinoflagelados

(Montaño-Barroso, obs. pers.) y que se relacionó también con el incremento de silicatos registrado en el mes de julio.

Se debe resaltar el aumento de los niveles de fosfato, nutriente limitante para el desarrollo fitoplanctónico en el Mar Menor (Pérez-Ruzafa *et al.*, 2019b), durante los meses de veraneo. Históricamente, este nutriente registraba un incremento en los meses previos al comienzo de la estación estival debido al desagüe de las plantas de tratamiento de aguas en el Mar Menor en la preparación de estas para la temporada turística (Pérez-Ruzafa *et al.*, 2002; Fernández-Alías *et al.*, 2020). Desde el abandono de esta práctica y tras la instalación de la red de alcantarillado siguen detectándose entradas puntuales en los meses de verano difíciles de explicar (Pérez-Ruzafa *et al.*, 2019b), lo que podría indicar que, al concentrarse en esta zona un gran número de residencias secundarias (Romero-Díaz *et al.*, 2017), alguna pudo quedar desconectada de la red de saneamiento y sigue realizando vertidos a la laguna al ser ocupada.

5.3.1. Nitratos

El nitrato es la forma de N dominante en la columna de agua durante la mayor parte del tiempo, solo sustituida por el amonio cuando las poblaciones de fitoplancton proliferan consumiéndolo, y las poblaciones de herbívoros comienzan a crecer a costa del fitoplancton produciendo compuestos de amonio.

La concentración de nutrientes y clorofila había ido descendiendo progresivamente desde finales de marzo de 2020, cuando se alcanzaron valores medios para la laguna de $50 \mu\text{mol NO}_3^-/\text{L}$, lo que supuso un máximo histórico. Sin embargo, el sistema respondió muy rápidamente y no solo se redujeron las concentraciones máximas, sino que se amortiguaron, también drásticamente, las oscilaciones en la concentración de nutrientes y clorofila *a*, lo que es un buen indicio de que el sistema mantenía su capacidad de respuesta y autorregulación.

La concentración media de nitrato en la laguna durante 2021 ha sido de $1,26 \mu\text{mol NO}_3^-/\text{L}$ con dos picos importantes, el 14 de abril y el 17 de agosto, con $4,78 \mu\text{mol NO}_3^-/\text{L}$ y $5,37 \mu\text{mol NO}_3^-/\text{L}$, respectivamente (Fig. 36), asociados a los dos picos de descarga más importantes en este periodo a través de la rambla del Albuñón, detectados especialmente en su desembocadura y por toda la ribera oeste del Mar Menor (Fig. 37).

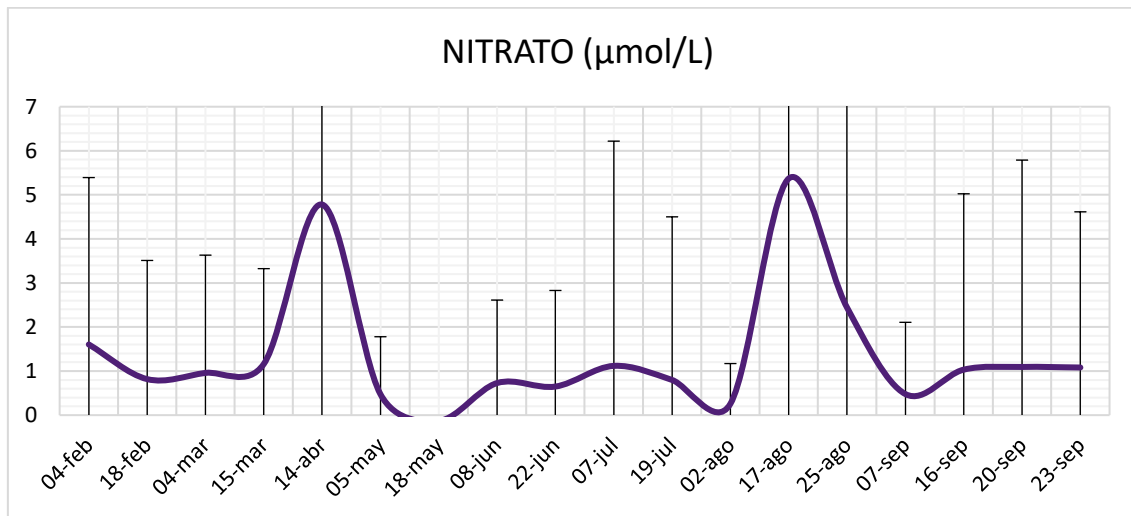


Figura 36. Concentración promedio del nutriente nitrato en la columna de agua del Mar Menor en las campañas de prospección de 2021. Las barras de error indican la desviación típica.

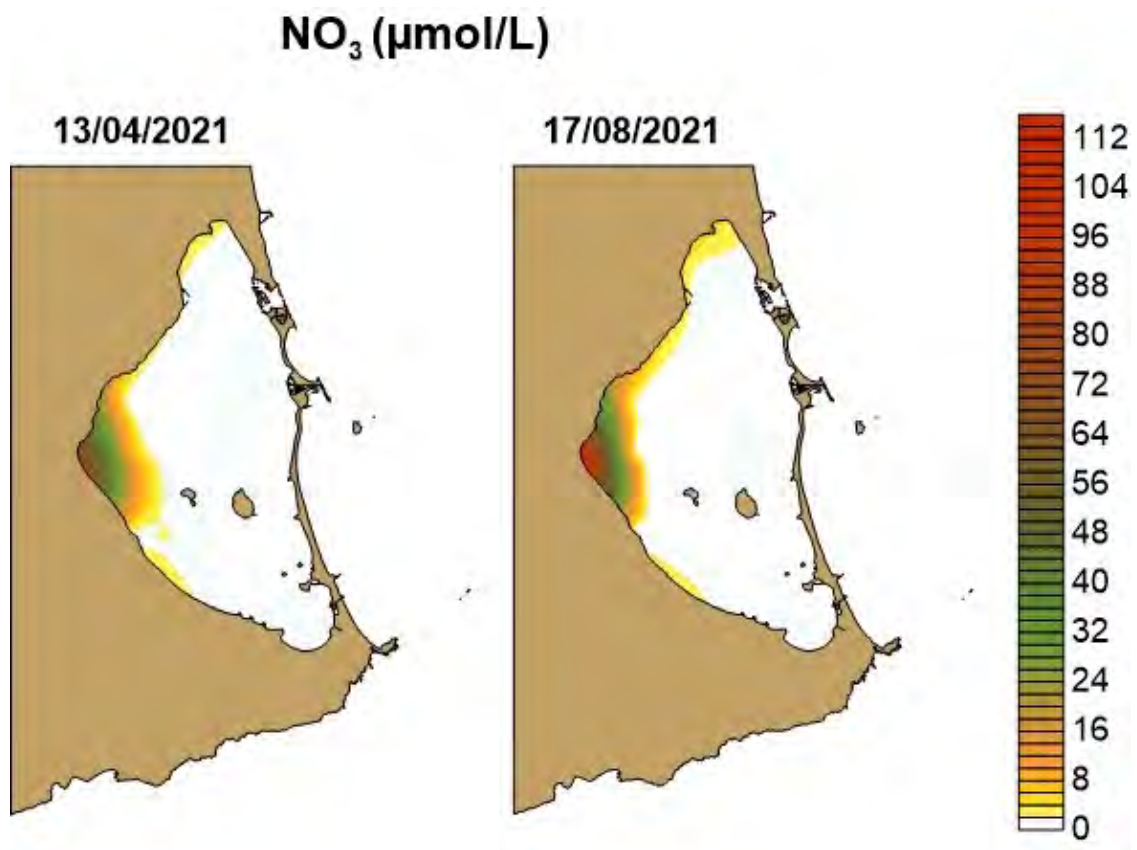


Figura 37. Distribución horizontal de la concentración nitratos en el Mar Menor durante los dos picos de máxima entrada por la rambla del Albuñol en 2021.

5.3.2. Nitritos

La concentración del nitrito se ha mantenido sensiblemente más baja que la de nitrato durante todo 2021, con un valor promedio en la laguna de $0,14 \mu\text{mol NO}_2^-/\text{L}$, siempre por debajo de $0,5 \mu\text{mol NO}_2^-/\text{L}$ y sin un patron estacional claro (Figs. 38, 39).

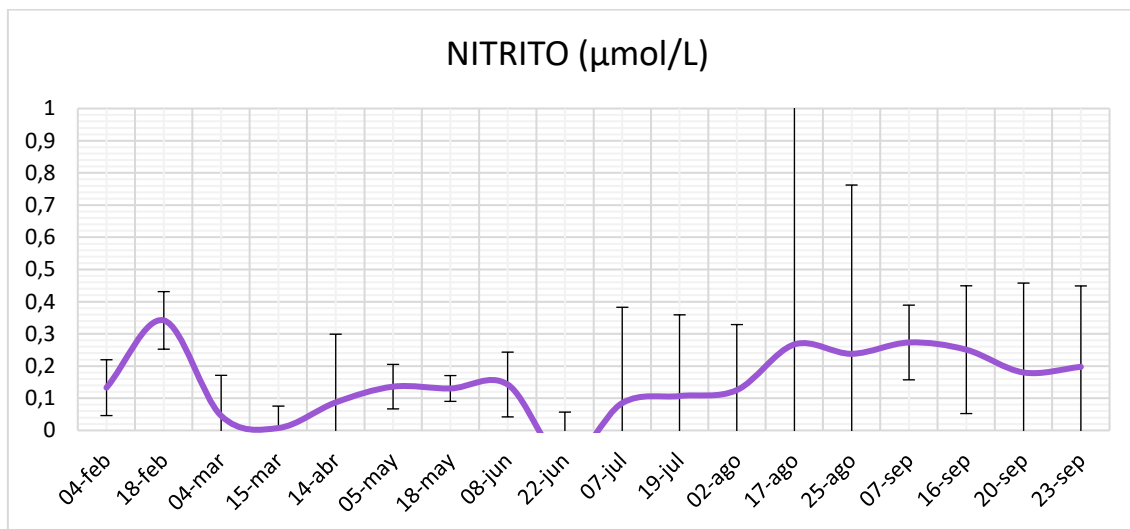


Figura 38. Concentración promedio del nutriente nitrito en la columna de agua del Mar Menor en el año 2021. Las barras de error indican la desviación típica

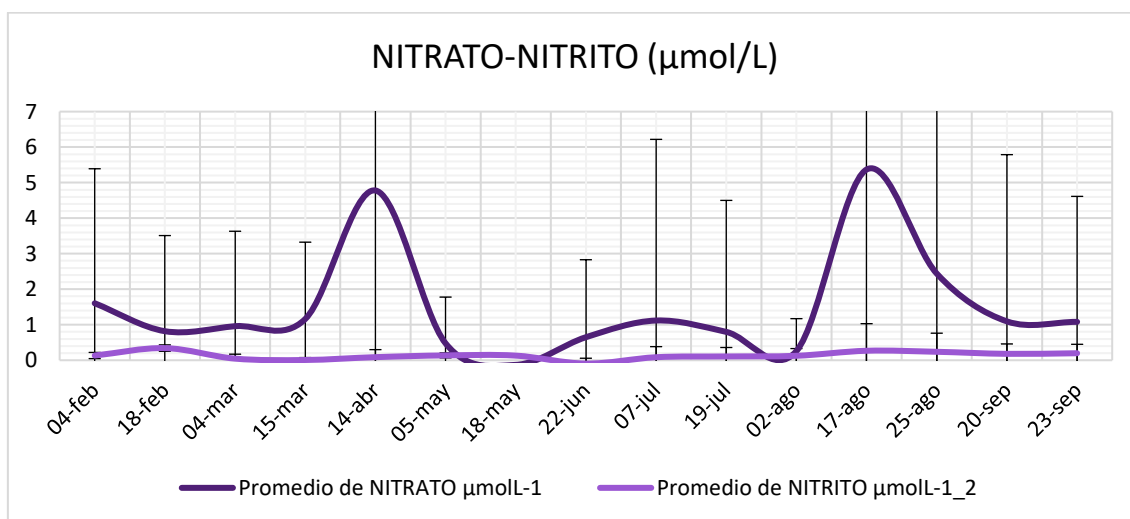


Figura 39. Concentración promedio del nutriente nitrato en la columna de agua del Mar Menor en el año 2021. Las barras de error indican la desviación típica.

5.3.3. Amonio

La concentración promedio de amonio en la laguna en 2021 ha sido de $0,85 \mu\text{mol NH}_4^+/\text{L}$, mostrando diferencias estacionales, con valores de $0,16 \mu\text{mol NH}_4^+/\text{L}$ en invierno y de $0,39 \mu\text{mol NH}_4^+/\text{L}$ durante los meses de primavera y de verano previos al episodio de anoxia (Fig. 40).

A finales de julio y hasta la segunda semana de agosto tuvo lugar una bajada de la concentración de amonio, hasta los $0,12 \mu\text{mol NH}_4^+/\text{L}$, con un ascenso a partir del 17 de agosto con valores promedio en agosto y septiembre de $3,45 \mu\text{mol NH}_4^+/\text{L}$. En la campaña del 25 y 26 de agosto, las estaciones con mayores valores fueron las situadas en la proximidad del canal de Marchamalo y en la zona central de la cubeta sur (MA1, E12b y E13), con valores de $16,02 \mu\text{mol NH}_4^+/\text{L}$, $17,05 \mu\text{mol NH}_4^+/\text{L}$ y $15,67 \mu\text{mol NH}_4^+/\text{L}$ de amonio respectivamente. Estas áreas son las zonas de acumulación por las corrientes de los materiales suspendidos en la columna de agua, incluyendo material detrítico. Esto conduce, no solo a la remineralización bacteriana de dicho material, sino también, probablemente, a la concentración de organismos herbívoros y detritívoros, que producen amonio con sus excreciones. En la campaña del 16 de septiembre los valores más altos se presentaron en el área de Los Urrutias y Lo Poyo (estaciones E09, E09b) y frente a la isla de El Ciervo (E14), con valores de $19,29 \mu\text{mol NH}_4^+/\text{L}$, $20,08 \mu\text{mol NH}_4^+/\text{L}$ y $19,35 \mu\text{mol NH}_4^+/\text{L}$, respectivamente (Fig. 41).

Como se ha comentado, estos valores están asociados a una alta actividad biológica, y a la excreción de amonio durante el catabolismo de materiales biológicos que contienen nitrógeno. Las altas concentraciones observadas indican una fuerte demanda de oxígeno en los procesos de remineralización de la materia orgánica muerta y por la respiración de los organismos consumidores lo que, en las condiciones de fin de verano, con altas temperaturas y baja solubilidad del oxígeno conduce a los episodios de hipoxia ocurridos en dicho periodo.

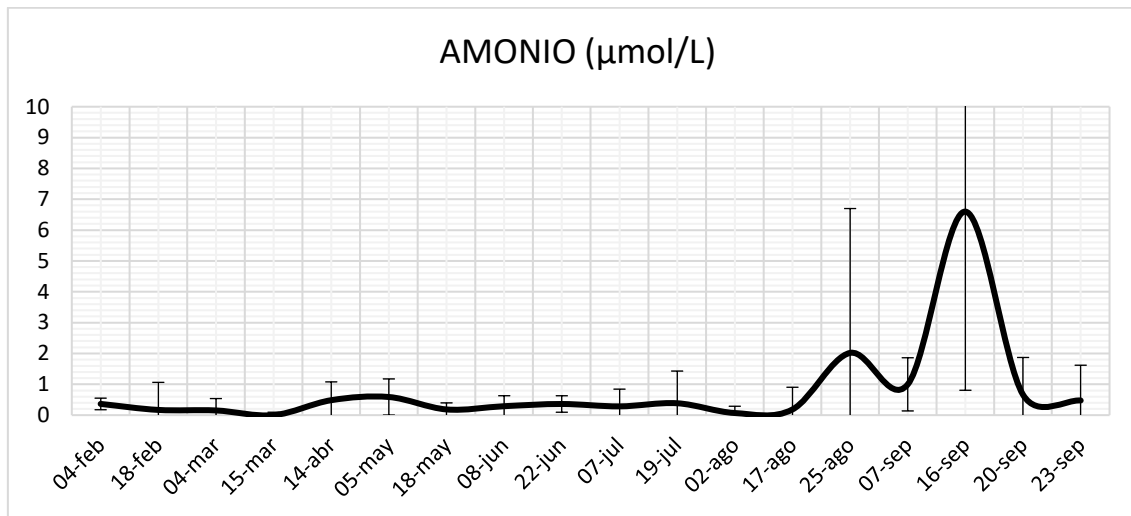


Figura 40. Concentración promedio del nutriente amonio en la columna de agua del Mar Menor. Las barras de error indican desviación típica.

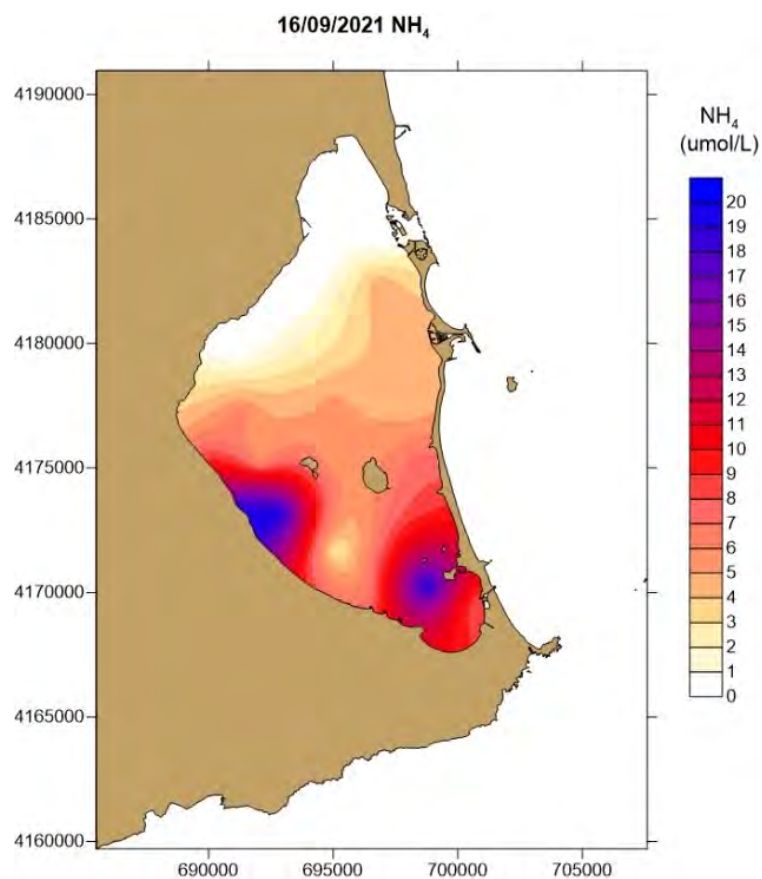


Figura 41. Distribución horizontal de la concentración de amonio ($\mu\text{mol NH}_4^+/\text{L}$) en el Mar Menor en la campaña de prospección del 16 de septiembre de 2021.

5.3.4. Fosfatos

Durante 2021, la concentración media de fosfato en el Mar Menor ha sido de $0,2 \mu\text{mol PO}_4^{3-}/\text{L}$, con diferencias estacionales entre invierno-primavera y verano, presentando concentraciones medias de $0,09 \mu\text{mol PO}_4^{3-}/\text{L}$ y $0,31 \mu\text{mol PO}_4^{3-}/\text{L}$, respectivamente (Fig. 42). Las principales entradas de este nutriente tuvieron lugar por la ribera interna de las cubetas central, especialmente vinculadas a la rambla de El Albujón, y sur (Zonas Z2 y Z5 respectivamente). No obstante, entre ambas zonas existe un patrón estacional diferente (Fig. 43). La zona 2 tiende a mostrar concentraciones algo más elevadas y más picos de entrada en invierno y primavera, como los detectados en marzo, abril y mayo, muy vinculados a la actividad de la rambla de El Albujón. A partir de mayo, ambas zonas empiezan a incrementar sus concentraciones de fosfato, con picos más numerosos y marcados en la zona Z5, el 2 y el 25 de agosto, mientras que la Z2 muestra un incremento más progresivo hasta el máximo del 25 de agosto (Fig. 43). Este patrón coincide con lo observado en 1997, al inicio de los primeros síntomas del proceso de eutrofización (Pérez-Ruzafa *et al.*, 2002, 2019b; Fernández-Alías *et al.*, 2020).

El aumento de la concentración detectada a partir del 2 de agosto ($1,08 \mu\text{mol PO}_4^{3-}/\text{L}$), fue especialmente significativo en el área de Los Nietos y Playa Honda (estaciones E12, E11 y E13) con concentraciones de $1,68 \mu\text{mol PO}_4^{3-}/\text{L}$, $1,67 \mu\text{mol PO}_4^{3-}/\text{L}$ y $1,63 \mu\text{mol PO}_4^{3-}/\text{L}$, respectivamente (Fig. 44 izquierda). El pico del día 25 de agosto (con valor medio en la Z5 de $1,14 \mu\text{mol PO}_4^{3-}/\text{L}$) alcanzó sus máximos en las estaciones E13 ($1,20 \mu\text{mol PO}_4^{3-}/\text{L}$) y E14 ($1,70 \mu\text{mol PO}_4^{3-}/\text{L}$) (Fig. 44 derecha) y se produjo ya en un ambiente de alta concentración de fósforo en toda la laguna, particularmente en las cubetas sur y central.

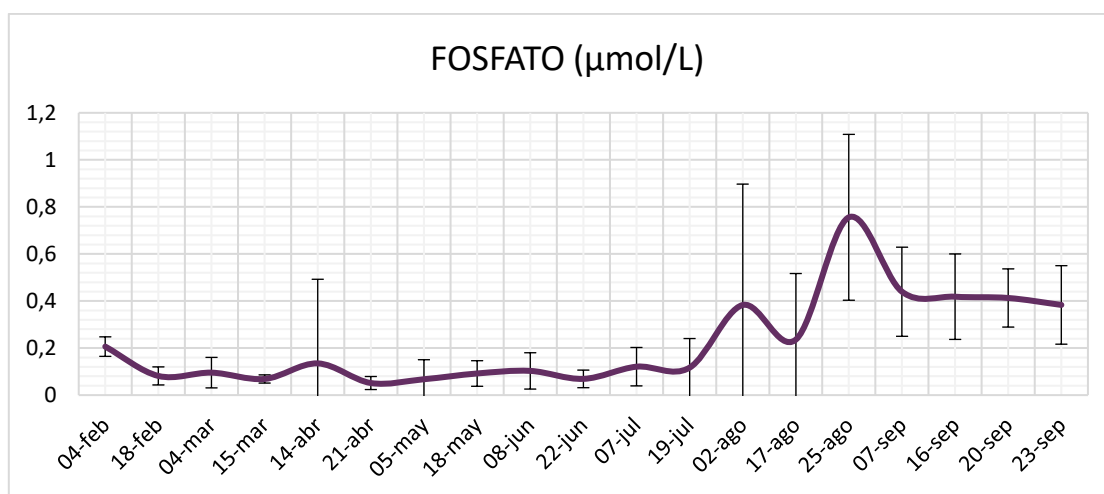


Figura 42. Concentración promedio del nutriente fosfato en la columna de agua del Mar Menor en 2021. Las barras de error indican la desviación típica.

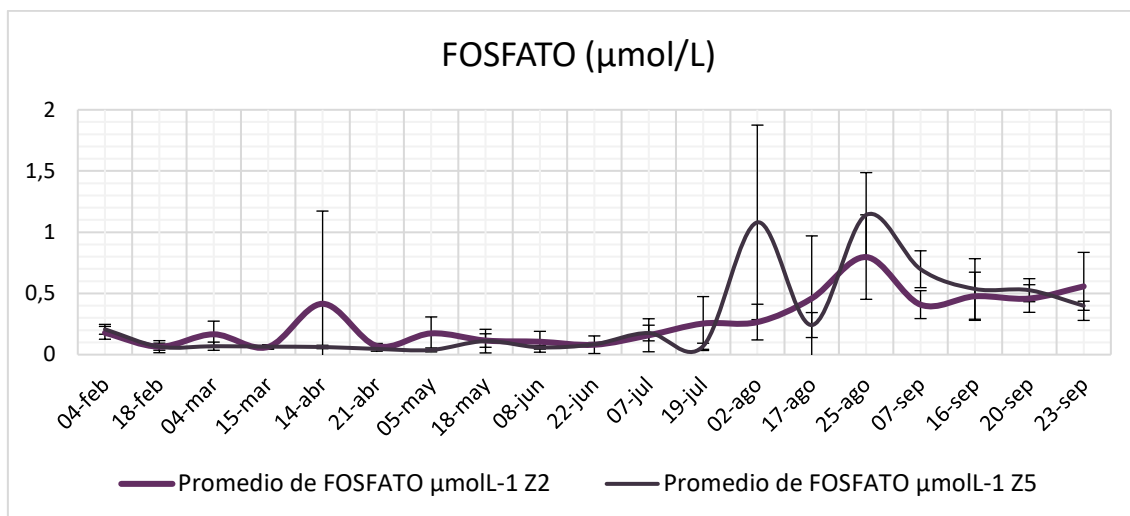


Figura 43. Concentración promedio del nutriente fosfato en la columna de agua del Mar Menor en 2021, zonas 2 y 5. Las barras de error indican desviación típica.

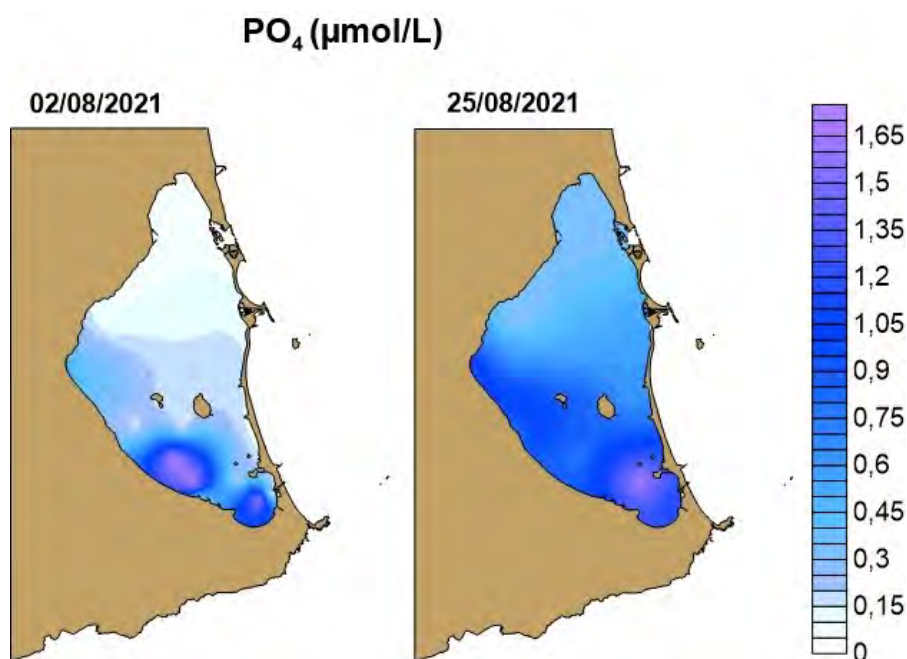


Figura 44. Distribución horizontal de la concentración fosfatos en el Mar Menor durante el incremento detectado en la estación estival de 2021.

Hay que resaltar que el fosfato es un macronutriente que ha actuado como limitante del crecimiento fitoplanctónico en e Mar Menor desde la implementación de la red de saneamiento a finales los años 1990, y que solo mostraba entradas significativamente altas en momentos muy puntuales vinculados a la rambla de El Albuñón (Pérez-Ruzafa *et al.*, 2002, 2005a). Es claro que el incremento de este nutriente en el periodo estival fue

un desencadenante de las proliferaciones de fitoplancton y las subsiguientes crisis distróficas y eventos de hipoxia ocurridas durante la segunda mitad del verano.

5.3.5. Silicatos

El silicato (SiO_4^{4-}) es utilizado por las diatomeas para construir su pared celular por lo que puede actuar como factor limitante en determinados momentos si su disponibilidad es escasa. En esos casos, su incremento puede ser un estímulo para la proliferación del fitoplancton. Al mismo tiempo, su disminución puede ir asociada a su absorción por parte de las células para construir sus caparazones en los momentos de proliferación del fitoplancton. Su concentración en la laguna tradicionalmente aumenta en el periodo de mayo a septiembre (Gilabert, 2001a), lo que coincide con lo observado durante 2021, con las fases de aumento y máximos coincidiendo con el aumento de la fracción del zooplancton de menos de $200\mu\text{m}$, especialmente copépodos.

La concentración media de silicato en la laguna en el año 2021 ha sido de $8,04\mu\text{mol SiO}_2/\text{L}$, con patrones estacionales muy vinculados a la dinámica del fitoplancton, presentando $2,21\mu\text{mol SiO}_4^{4-}/\text{L}$ en invierno, $3,57\mu\text{mol SiO}_4^{4-}/\text{L}$ en primavera y $13,66\mu\text{mol SiO}_4^{4-}/\text{L}$ en verano (Fig. 45).

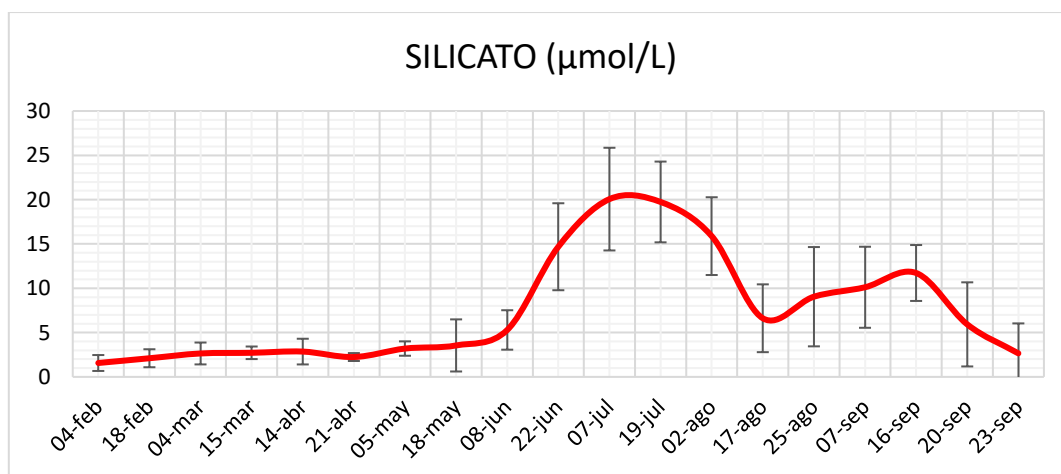


Figura 45. Concentración promedio del nutriente silicato en la columna de agua del Mar Menor en las prospecciones realizadas en 2021. Las barras de error indican la desviación típica.

5.3.6. Clorofila *a*

Entre febrero y final de julio de 2021 la concentración de clorofila *a* se mantuvo bajo el umbral de los $2\mu\text{g/L}$. A partir del 2 de agosto se inició un incremento, con tendencia a

detectarse los valores mas altos en las capas profundas de la columna de agua, que alcanzó su máximo el día 17 de este mes con valores medios de 15,74 $\mu\text{g/L}$ en las proximidades del fondo (Fig. 46), con picos que alcanzaron los 141,56 $\mu\text{g/L}$ en Los Urrutias y 34,83 $\mu\text{g/L}$ frente al canal de El Estacio (Fig. 47). A partir del 25 de agosto, los valores de clorofila comenzaron a disminuir, homogeneizándose las capas superficiales y profundas.

Sin embargo, a partir del 8 de septiembre se produjo una nueva proliferación generalizada de fitoplancton que elevó los valores de clorofila *a* hasta un máximo el día 23 de septiembre con una concentración media en la laguna de 19,92 $\mu\text{g/L}$ en las capas profundas de la columna de agua. Esta segunda proliferación fue más homogénea y extendida que la detectada el día 17 de agosto, con desviaciones estándar en las capas profundas de 28,53 $\mu\text{g/L}$ (17 agosto) y de 9,86 $\mu\text{g/L}$ (23 septiembre) (Fig. 46). De este modo, los valores medios durante el mes de agosto de 2021 han sido similares a los registrados durante la fase de rotura del ecosistema lagunar (2016-2017) en la que se alcanzaron concentraciones de 17 $\mu\text{g/L}$ en 2016 y 12 $\mu\text{g/L}$ en 2017 (Pérez-Ruzafa *et al.*, 2019b).

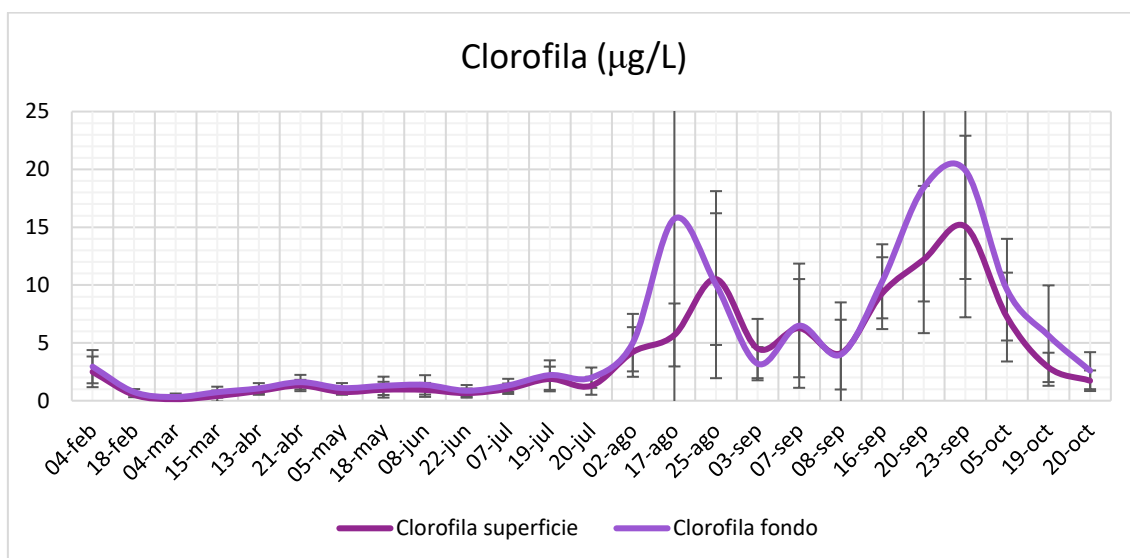


Figura 46. Concentración promedio de clorofila en la superficie y fondo del Mar Menor en las campañas de prospección de 2021. Las barras de error indican la desviación típica de los valores.

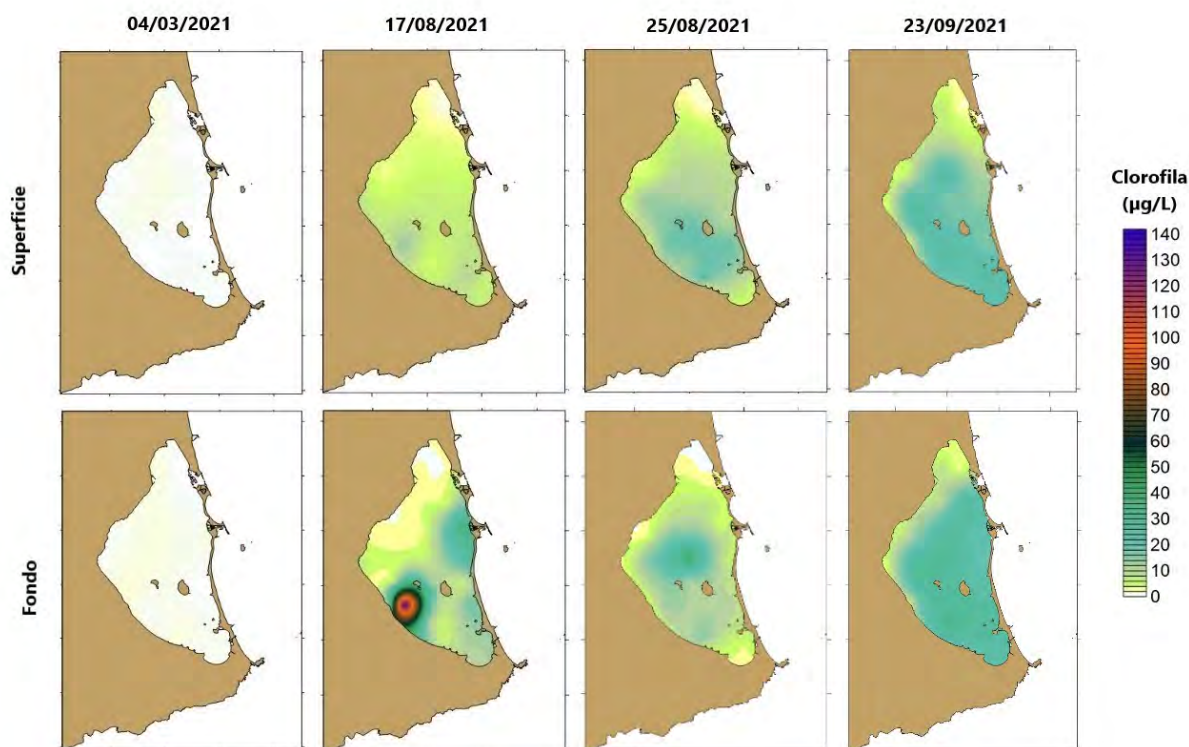


Figura 47. Evolución de la distribución horizontal de la concentración de clorofila en superficie y fondo del Mar Menor en marzo, agosto y septiembre de 2021.

5.3.7. Oxígeno

La concentración de oxígeno disuelto en la columna de agua es el resultado de la combinación de los procesos que lo incorporan (disolución desde la atmósfera y producción fotosintética) y los que lo eliminan (pérdidas hacia la atmósfera y respiración de los organismos). Las condiciones ambientales favorecen de distinta manera ambos procesos. Los vientos y las turbulencias favorecen la mezcla y disolución del oxígeno, especialmente en periodos fríos y cuando existe una presión parcial mayor en la atmósfera, mientras que las temperaturas elevadas favorecen su eliminación, tanto disminuyendo su solubilidad, como acelerando los procesos metabólicos que lo consumen. Desde 2020 y hasta mediados de verano de 2021, la concentración de oxígeno en la columna de agua se mantuvo en valores de saturación (>100%). Sin embargo, a principios de agosto sufrió un descenso hasta valores medios inferiores al 80% en las capas superficiales de la laguna e inferiores al 70% en las capas profundas (Fig. 48).

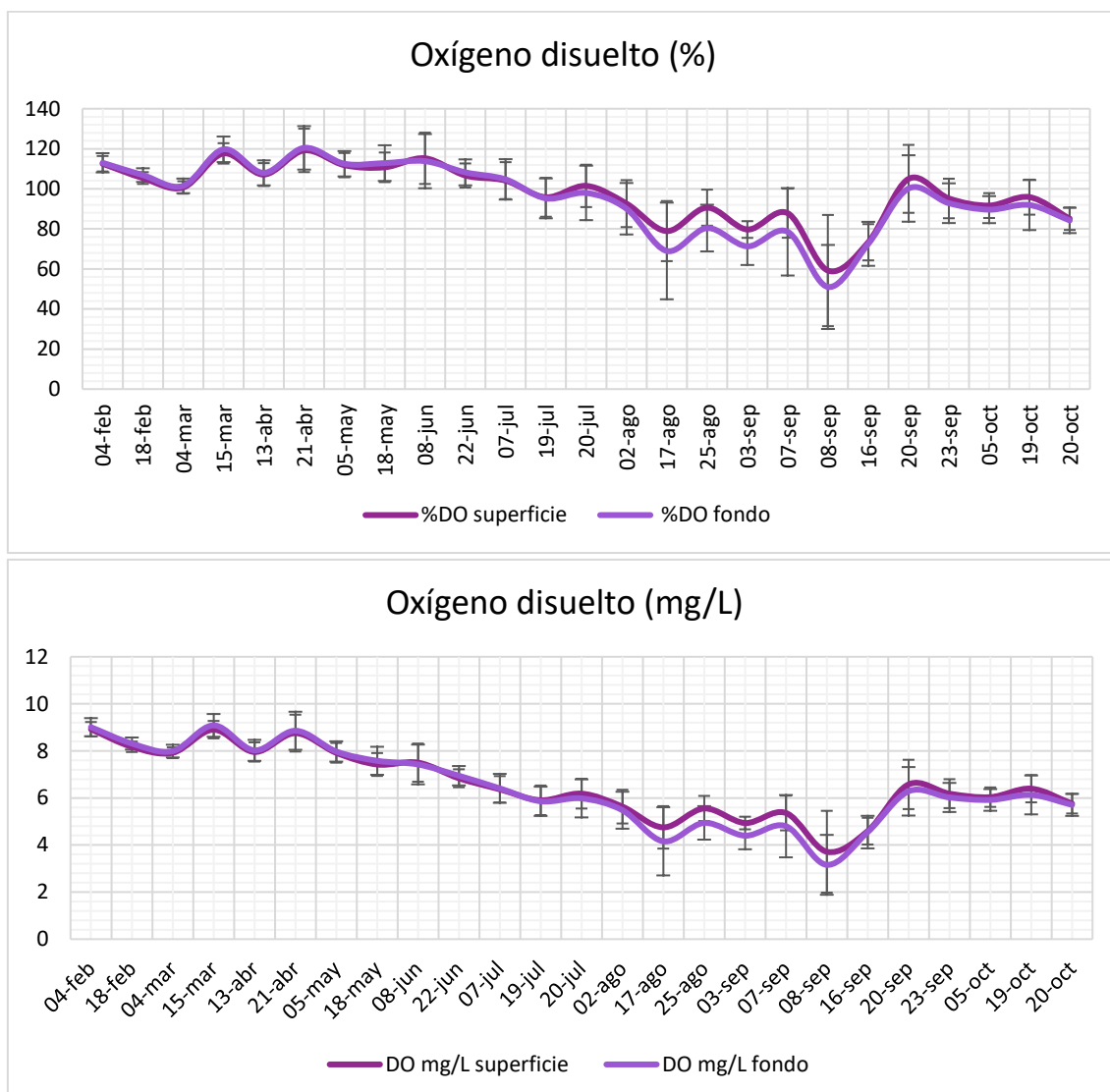


Figura 48. Porcentaje y valores absolutos de oxígeno disuelto promedio en la superficie y fondo del Mar Menor en las campañas de 2021. Las barras de error indican la desviación típica de los valores medios.

A partir del 17 de agosto empezaron a detectarse áreas hipóxicas superficiales y se desarrolló una bolsa de hipoxia severa en las capas profundas de la columna de agua (<10% de la concentración de saturación). Dicha bolsa ocupó el centro de la cubeta sur y toda la ribera interna de la mitad sur de La Manga, extendiéndose hasta Veneziola, con las concentraciones mínimas frente al canal de El Estacio (<50%) (Fig. 49).

Este evento provocó la mortandad de fauna bentónica principalmente de pequeño tamaño, incapaz de escapar hacia aguas someras o más oxigenadas.

La bolsa hipóxica formada se mezcló con la columna de agua durante la última semana de agosto, pero a partir de ese momento se sucedieron los procesos de formación, dispersión y disolución de forma continua. A principio de septiembre se detectó un nuevo descenso del oxígeno disuelto hasta niveles de hipoxia, esta vez más concentrado en el área de El Estacio y frente al canal de Marchamalo (Fig. 49).

Estos eventos han estado especialmente relacionados con las proliferaciones de fitoplancton, propiciadas por la entrada continua de nutrientes al Mar Menor, y su concentración en las capas profundas de la columna de agua en el centro de los giros circulatorios, y por el efecto de succión frente a las golas de El Estacio y Marchamalo, en un periodo en el que la temperatura fue elevada.

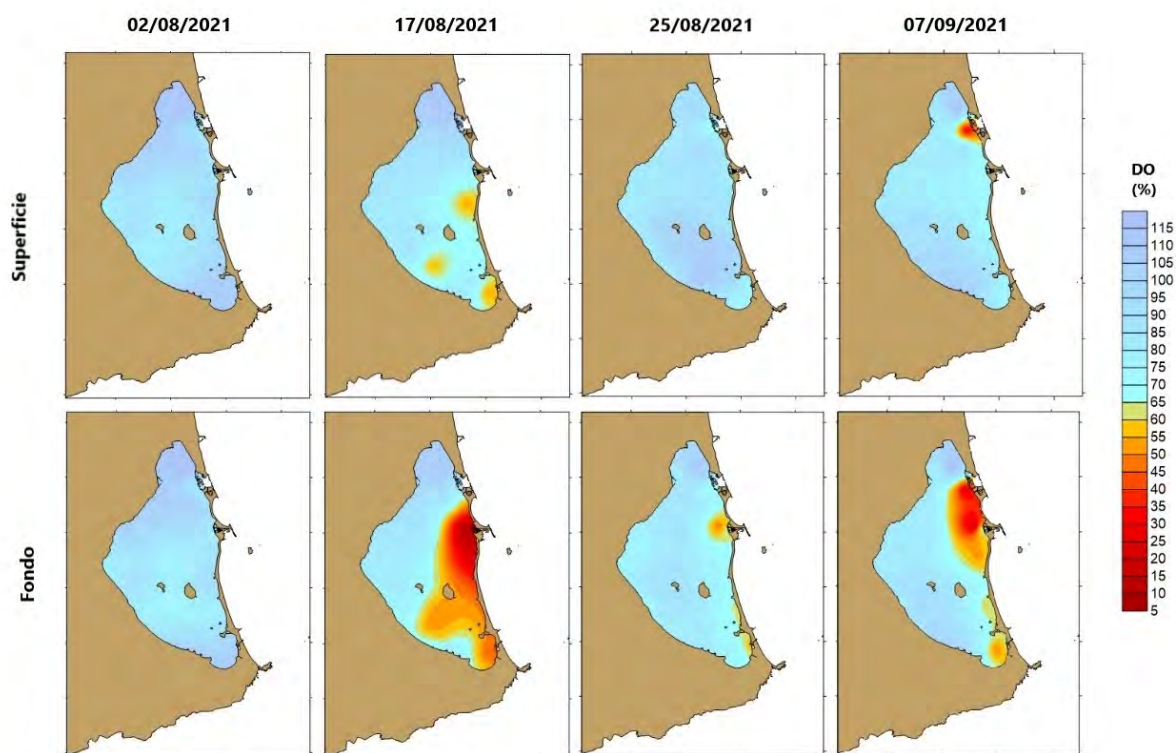


Figura 49. Evolución de la distribución horizontal del porcentaje de oxígeno disuelto en superficie y fondo del Mar Menor en agosto y septiembre de 2021.

5.4. Discusión de la evolución del estado trófico

La evolución del estado trófico del Mar Menor durante los dos últimos años ha sido la típica de un proceso de eutrofización en el que un sistema con una gran capacidad de autorregulación termina viéndose desbordado por la presión de la entrada continuada de agua dulce cargada en nutrientes.

La principal diferencia entre el proceso que culminó en la crisis de 2016 y el ocurrido desde la recuperación observada en 2018 y la nueva crisis distrófica en el verano de 2021 ha consistido en la duración más corta del periodo de resistencia de la laguna que ha pasado de más de 20 años en el primer caso, a apenas 3 años en este último. Esta diferencia podría deberse a que la recuperación ocurrida tras el cese de los vertidos durante 2017 no llegó a consolidarse suficientemente, pero más probablemente es debida a que las medidas de gestión se basaron en prohibiciones y no en infraestructuras que estabilizaran y regularan el uso del agua. El rápido ascenso en el nivel freático se tradujo, desde 2018, en un aumento y una deslocalización y dispersión amplia de los caudales concentrados en nutrientes que llegaban de forma continua a la laguna, con la circunstancia fundamental de que en este último periodo las entradas de fósforo han supuesto un cambio de escenario trascendental.

En 2020, la concentración de nutrientes y clorofila *a* fue descendiendo progresivamente desde finales de marzo, cuando se alcanzaron valores medios para la laguna de $50 \mu\text{mol NO}_3^-/\text{L}$, (un máximo histórico) y valores de clorofila *a* de $14,6 \mu\text{g}/\text{L}$. Sin embargo, el sistema respondió muy rápidamente y no solo se redujeron las concentraciones máximas, sino que se amortiguaron también drásticamente las oscilaciones en la concentración de nutrientes y clorofila *a*, lo que es un buen indicio de que el sistema mantenía su capacidad de autorregulación (Fig. 50). Aunque los valores medios de nitrato para el Mar Menor eran ya inferiores a $1,5 \mu\text{mol NO}_3^-/\text{L}$, a primeros de julio de 2020 se detectaron valores de $22,58 \mu\text{mol NO}_3^-/\text{L}$ en las proximidades de la desembocadura de la rambla del Albujién. A finales de julio, los niveles medios para el Mar Menor eran ya inferiores a $1 \mu\text{mol NO}_3^-/\text{L}$, lo que puede considerarse un valor bajo. Sin embargo, las concentraciones más altas de nitrato y fosfato se desplazaron hacia el sur, situándose en la costa entre la marina del Carmolí y Lo Poyo. En esta zona, la concentración de nitrato alcanzó $11,85 \mu\text{mol NO}_3^-/\text{L}$ y la de fosfato $0,43 \mu\text{mol PO}_4^{3-}/\text{L}$. Ocasionalmente, también se detectaron entradas por la ribera nororiental. Esta disminución generalizada, pero con afloramientos dispersos, podría estar vinculada a la reducción de las entradas directas por la rambla del Albujién, probablemente como consecuencia de la puesta en marcha de la estación de bombeo, pero a la persistencia de entradas importantes de agua superficial y subsuperficial desde las inmediaciones de



la rambla de Miranda hasta la llanura de Lo Poyo y por la costa entre Los Narejos y La Ribera. La presencia de concentraciones significativas de fósforo indicaba una posible mezcla con aguas de origen urbano. De acuerdo con la disponibilidad de nutrientes, los valores medios de Chl α se situaron a final de agosto en 1,37 $\mu\text{g/L}$, pudiendo considerarse buenos, y bajaron hasta 2,3 $\mu\text{g/L}$ en el área de influencia de la rambla del Albujón, aunque el que llegaran a 8,1 en la zona entre la Marina del Carmolí y Lo Poyo a finales de julio, indicaba que las presiones seguían activas.

La baja concentración de clorofila α en la columna de agua se tradujo en una recuperación de la transparencia en condiciones de calma. Si durante el invierno de 2020, los datos de visibilidad del disco Secchi se situaron en valores mucho más bajos que los que se lograron durante la recuperación de 2018 y se aproximaron a los peores de la serie histórica, desde abril de 2020 se inició una recuperación semejante a la que se observó en 2018.

En septiembre de 2020, transcurridos los meses de julio y agosto en los que las altas temperaturas suelen propiciar las proliferaciones de fitoplancton, el Mar Menor se encontraba en una situación caracterizada por la respuesta progresiva de recuperación del ecosistema, pero con todas las amenazas aún presentes. Aunque se mantuvo en los distintos informes emitidos por nuestro equipo de investigación (anexo I) la alerta de que, tras las sucesivas DANAs ocurridas desde septiembre de 2019, la situación de la laguna era más grave que la que presentaba en el momento de su rotura manifiesta ocurrida en junio de 2016. En ellos se resaltaba también que la respuesta positiva del ecosistema demostraba que aún la situación podría ser reversible si se actuaba sobre las aguas freáticas y la cuenca de drenaje. Sin embargo, como se insistía en los informes emitidos el 20 de agosto y el 8 de septiembre (anexo I), si bien, esto era un indicio de que el Mar Menor mantenía buena parte de sus capacidades homeostáticas, también era un hecho que las presiones aún seguían muy altas y que no podían descartarse eventos extremos en condiciones de altas temperaturas, periodos largos de calmas o entradas torrenciales de aguas desde la cuenca en eventos de lluvias intensas. Este tipo de eventos, en forma de DANAs o gotas frías, antes restringidos a septiembre, ahora, con el calentamiento generalizado de la superficie del mar, podrían extenderse hasta noviembre o principios de diciembre.

Durante todo el verano de 2020, la concentración de oxígeno en la capa por encima de 1,5 m de profundidad se mantuvo en niveles de saturación, con valores medios de 6,5 mg/L, y la concentración absoluta de oxígeno en toda la columna de agua estuvo todas las estaciones de muestreo por encima de 4,8 mg/L.

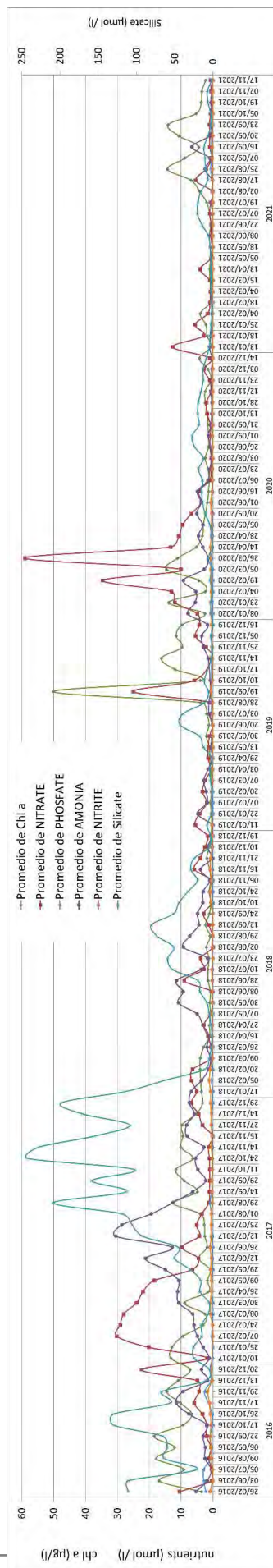


Figura 50. Evolución de los valores medios de la concentración en nutrientes y clorofila *a* en el Mar Menor en la red de estaciones de muestreo distribuidas en el interior de la laguna, desde el inicio de la crisis distrófica en 2016 hasta noviembre de 2021.

A finales de septiembre de 2020, iniciado ya el otoño y habiendo superado el verano sin incidencias notables, el Mar Menor se encontraba en una situación que seguía caracterizada por la respuesta progresiva de recuperación del ecosistema, pero, como se ha dicho, con todas las amenazas aún presentes, materializadas en su baja salinidad y en la entrada continuada de aguas con alto contenido en nutrientes desde la cuenca de drenaje y el elevado nivel freático. Hacía un año desde que, en septiembre de 2019, se había producido un cambio drástico de las condiciones hidrográficas del Mar Menor y un proceso de anoxia generalizado, con afloramiento de aguas con sulfhídrico en la playa de Villananitos y mortandades importantes de organismos. En aquel momento, junto a la entrada torrencial de agua dulce que provocó la estratificación de la columna de agua, tuvo lugar una entrada masiva de nutrientes que indujo una proliferación brusca de fitoplancton. La salinidad media de la laguna en el metro y medio superficial de la columna de agua se situó en 35, por debajo incluso de la del Mediterráneo. La concentración media de nitrato en la laguna alcanzó $24,96 \mu\text{mol NO}_3^-/\text{L}$ y la concentración media de Clorofila a llegó a $50,01 \mu\text{g/L}$. Aunque los valores de nutrientes y clorofila a recuperaron valores significativamente más bajos en apenas una semana, la laguna volvió a sufrir fluctuaciones marcadas en sus parámetros, propias de un ambiente desestabilizado. Desde entonces, la salinidad se ha mantenido excepcionalmente baja de forma permanente. Cabe destacar que, tras cada pulso de concentración, la recuperación fue más notable y las fluctuaciones siguieron amortiguándose, incluso a pesar de que las sucesivas DANAs, de menor intensidad, sufridas durante el otoño de 2019 y el invierno de 2020 produjeron los correspondientes picos de entrada de nutrientes. Dichas entradas llegaron a superar los $600 \mu\text{mol NO}_3^-/\text{L}$ en febrero de 2020. El último episodio de cierta envergadura tuvo lugar en la última semana de marzo de 2020 y elevó los nitratos hasta una concentración media de $59,0 \mu\text{mol NO}_3^-/\text{L}$. Estos valores están por encima de los máximos de la serie histórica y muestran que el problema está aún lejos de estar resuelto. En apenas dos semanas los valores habían descendido a $13,36 \mu\text{mol NO}_3^-/\text{L}$, en mayo eran ya menores de $6,8 \mu\text{mol NO}_3^-/\text{L}$, y durante todo el verano se mantuvieron por debajo de $0,8 \mu\text{mol NO}_3^-/\text{L}$ y de $2 \mu\text{g/l}$ para la clorofila. Nuevamente, algunas de las lluvias intensas ocurridas en octubre de 2020 hicieron superar también los $50 \mu\text{mol NO}_3^-/\text{L}$ en el Mar Menor (Fig. 50).

Los valores medios de Chl a se situaron a final de agosto en $1,37 \mu\text{g/L}$ y a finales de septiembre en $1,7 \mu\text{g/L}$, a pesar de las lluvias. Estos valores pueden considerarse buenos, y bajaron hasta $2,3 \mu\text{g/L}$ en el área de influencia de la rambla del Albujón, aunque el que llegaron a $8,1 \mu\text{g/L}$ en la zona entre la Marina del Carmolí y Lo Poyo confirman que las presiones seguían activas, con especial incidencia en la zona del Albujón, pero también distribuidas por toda la ribera de poniente, más o menos difusas.

Por todo ello, en los informes de final de 2020 seguía subrayándose la respuesta positiva del ecosistema y su capacidad de autorregulación, pero insistiendo en que tras las sucesivas DANAs ocurridas desde septiembre de 2019 la situación de la laguna no había vuelto a ser la de la recuperación franca que se produjo en 2018 y que las amenazas por entrada de agua y nutrientes debido al elevado nivel freático eran más graves que las que presentaba la laguna en el momento de su rotura manifiesta en junio de 2016.

La intensa recarga del acuífero siguió propiciando entradas muy importantes de aguas procedentes de la cuenca que afloraban en el tramo bajo de las principales ramblas (Albujón, Miedo y Miranda, y área de Lo Poyo) y por las zonas de playa de la costa nororiental de la laguna. Evidenciándose también un retardo con respecto al momento en el que se producían las lluvias y la descarga y entrada de aguas de escorrentía y la bajada de salinidad en la laguna. Las últimas lluvias importantes tuvieron lugar la última semana de agosto de 2020 y, sin embargo, no se detectó la bajada de salinidad en la columna de agua hasta la segunda semana de septiembre (Fig. 51) afectando a toda la ribera interna, pero siendo especialmente notable en la ribera norte. La dinámica general observada reafirmaba probablemente el efecto de la reducción significativa de las descargas en el tramo bajo de la rambla del Albujón tras la puesta en marcha de la estación de bombeo, aunque ésta seguía siendo una zona sensible para la entrada de nitratos y era donde se detectaban las mayores concentraciones de clorofila *a* cuando se incrementaban dichas descargas. La importancia de estas relaciones indicaba la necesidad de poder realizar análisis detallados a partir de datos periódicos de descargas superficiales y subsuperficiales desde la cuenca de drenaje por los distintos puntos de la costa y confrontarlos con la dinámica observada en las masas de agua lagunares.

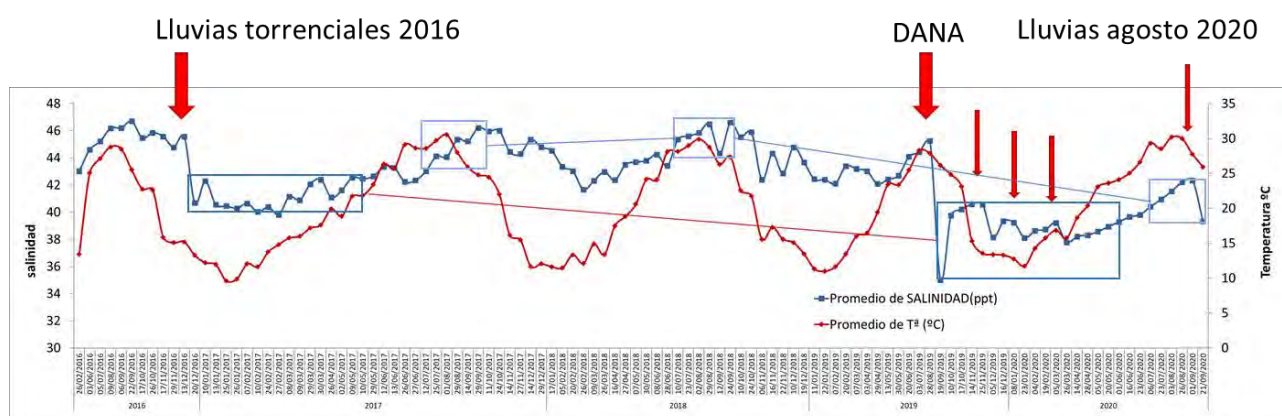


Figura 51. Evolución del ciclo anual de la salinidad y la temperatura desde 2016 hasta septiembre de 2020, un año después de la DANA de 2019, donde se pueden apreciar los tiempos de retardo, cada vez más largos entre las lluvias, y los efectos sobre la salinidad de las aguas lagunares.

En enero de 2021 los datos seguían confirmando la respuesta progresiva de recuperación del ecosistema y su capacidad de autorregulación, pero, sin embargo,

también el que todas las amenazas y presiones siguían aún presentes, con la salinidad manteniéndose baja y, sobre todo, con la entrada continua de aguas con alto contenido en nutrientes desde la cuenca de drenaje y el elevado nivel freático. Dichas descargas estaban especialmente focalizadas en la zona de la desembocadura de la rambla del Albuñón y en ocasiones a lo largo de la ribera suroriental de la laguna, con fuertes entradas de nitratos y, en ocasiones, también de fosfato. La persistencia del protagonismo de la rambla del Albuñón, a pesar de que intermitentemente pareciera reducir sus aportes, incican que sigue siendo el principal cauce de recogida de aguas de escorrentía y subsuperficiales de la cuenca de drenaje y que la estación de bombeo o presenta un funcionamiento irregular o, en todo caso, es insuficiente para los volúmenes que transporta.

A mediados de enero se produjo una entrada de aguas cargadas en nitrato, que dio lugar a valores de hasta $128,4 \mu\text{mol NO}_3^-/\text{L}$ en las proximidades de la desembocadura de la rambla y una subida en la concentración media de nitrato en la columna de agua de la laguna que alcanzó los $12,67 \mu\text{mol NO}_3^-/\text{L}$.

En la zona situada entre la Marina del Carmolí y Lo Poyo aún se mantenían concentraciones altas, con valores cercanos a $5 \mu\text{g/L}$ a finales de enero de 2021, lo que seguía remarcando que las presiones continuaban activas, especialmente en la ribera suroeste del Mar Menor. Además, la presencia de concentraciones significativas de fósforo indicaba la posible mezcla con aguas urbanas en determinados momentos.

A mediados de la primavera, en abril y mayo, la concentración de nutrientes y clorofila seguían en niveles bajos y con fluctuaciones suaves (Fig. 50), pero los picos puntuales como el de la primera quincena de enero de 2021, y valores muy altos en la ribera interna, principalmente en las cercanías de la rambla del Albuñón, así como la persistencia en la bajada de la salinidad alertaban de la necesidad de controlar los procesos en la cuenca de drenaje.

Esta situación se mantuvo hasta el mes de julio de 2021. La salinidad empezó a recuperarse a principios de junio, pero aún se mantenía relativamente baja, con un valor medio de 42,1 frente a los más de 45 que corresponderían a esta época del año.

Un buen ejemplo de la lucha entre las presiones desde la cuenca de drenaje y la capacidad de autorregulación del Mar Menor y los indicios de que podría romperse en cualquier momento es la distribución de la concentración de nitrato a mediados de enero tras un evento de lluvia (Fig. 52 centro) y el retardo en la subida de la concentración de clorofila dos semanas después (Fig. 52 derecha).

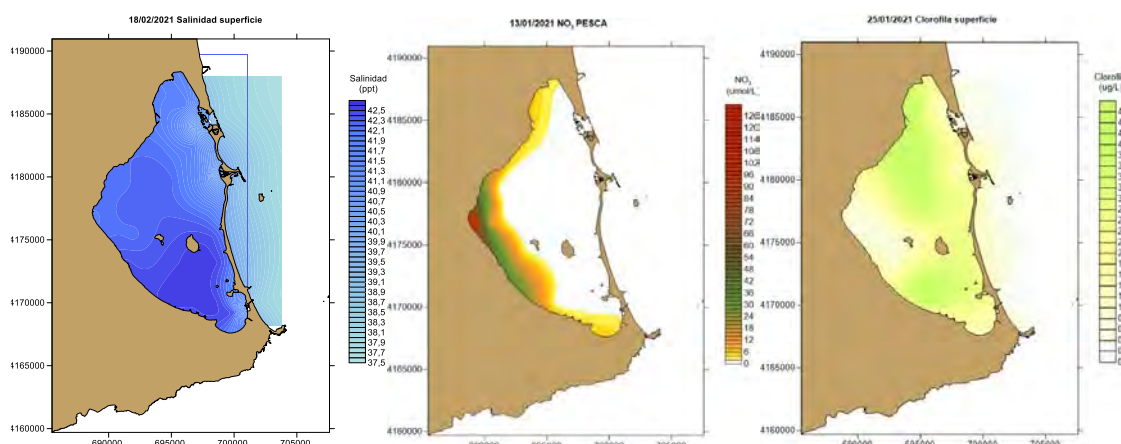


Figura 52. Distribución de los valores de salinidad (izquierda), concentración de Nitrato ($\mu\text{mol/L}$) (centro) y clorofila *a* ($\mu\text{g/L}$) (derecha) en las aguas superficiales del Mar Menor el 13 de enero de 2021 y el 25 de enero de 2021, respectivamente.

El volumen de nutrientes que scontinuaba entrando en el ecosistema contrastaba con las concentraciones encontradas en la columna de agua y la progresiva de recuperación del ecosistema, lo que seguía evidenciando su capacidad de respuesta y de autorregulación. Esto se manifestaba también desde el punto de vista de la abundancia y composición microbiana, que seguía ofreciendo un panorama de "limpieza" evidente por lo que respectaba al bacterioplancton. Únicamente en la zona de influencia de la Rambla del Albujón se observó una mayor concentración de microorganismos, incluidos *Synechococcus* sp., el grupo que dominaba la columna de agua en la crisis de 2016 (Francisco Torrella, com. pers.).

La presencia de concentraciones significativas de fósforo, cada vez más frecuentes, especialmente desde la primavera y principios de verano, indicaba la posible mezcla con aguas urbanas. El hecho de que la presencia de fósforo ya no estuviera asociada necesariamente a eventos de lluvia torrencial, sugería que aún pueden existir pozos negros no conectados a la red de alcantarillado, especialmente desde el sur de Los Alcázares y hasta Los Nietos y urbanizaciones del sur del Mar Menor, y que el elevado nivel freático estaba produciendo su desbordamiento difuso desde áreas que podrían estar remontándose hacia el interior de la cuenca de drenaje (Fig. 53).

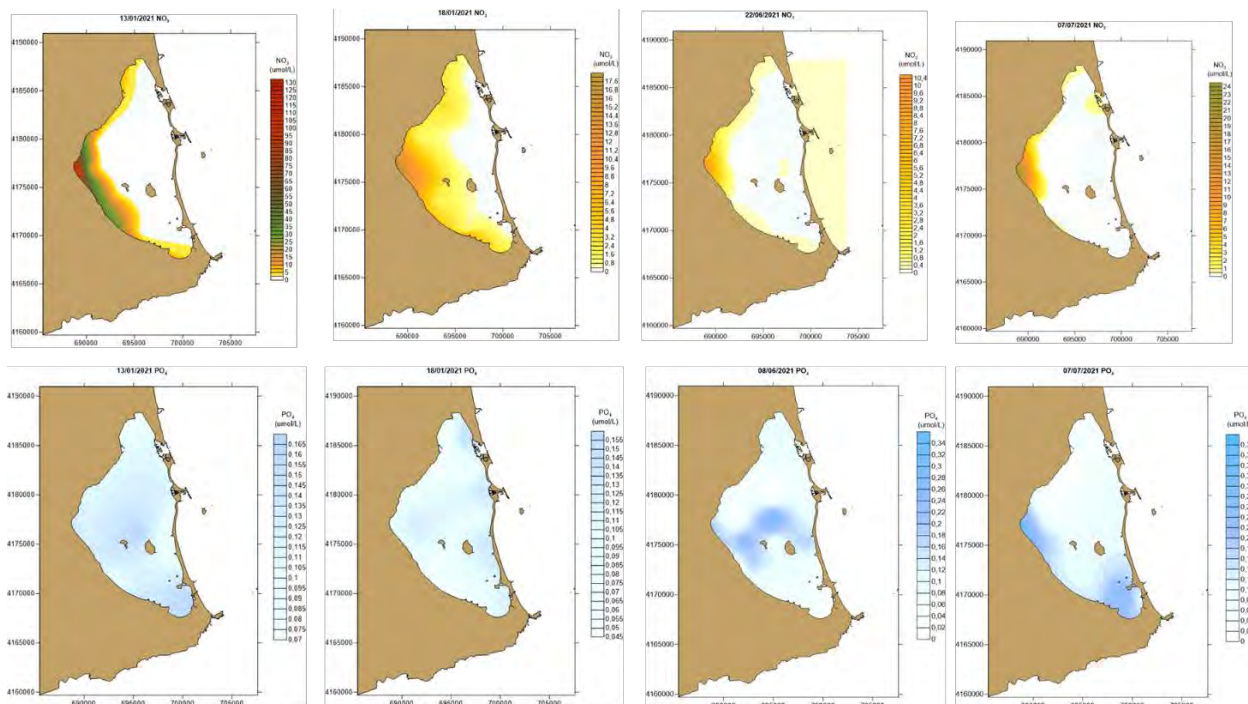


Figura 53. Distribución espacial de los valores de concentración de nitrato ($\mu\text{mol NO}_3^-/\text{L}$) en las aguas superficiales (arriba) y de fosfato ($\mu\text{mol PO}_4^{3-}/\text{L}$) (abajo) en el Mar Menor a lo largo de 2021.

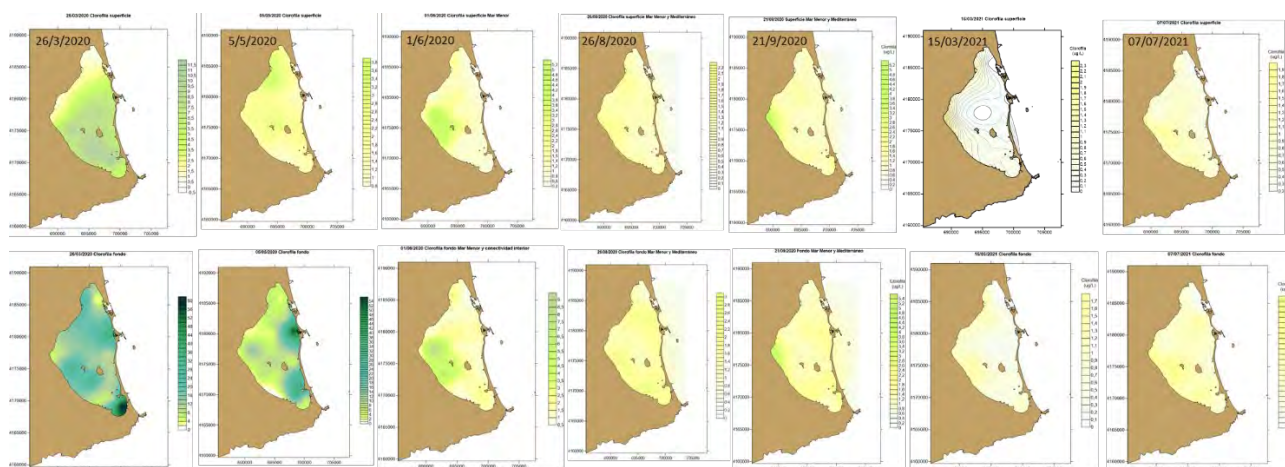


Figura 54. Distribución de los valores de concentración de clorofila *a* ($\mu\text{g/L}$) en las aguas superficiales (arriba) y en el fondo (abajo) del Mar Menor desde finales de invierno hasta julio de 2021.

A pesar de las entradas continuas de agua, la progresiva reducción de la concentración de clorofila *a* en la columna de agua por la acción reguladora del ecosistema (Fig. 54) se venía traduciendo en la recuperación bastante generalizada de la transparencia del agua. Dicha transparencia se perdía puntualmente al reactivarse las lluvias torrenciales o los vientos y la acción del oleaje. Si durante el invierno de 2020 el Mar Menor perdió la transparencia que había alcanzado durante la recuperación de 2018 y los valores de

profundidad de visibilidad del disco Secchi se aproximaron a los peores de la serie histórica, desde abril de 2020 se inició una recuperación semejante a la que se observó en 2018 y que, por el momento, aún se seguía manteniendo en la primavera de 2021, si bien con fluctuaciones puntuales y con la excepción de la desembocadura de la rambla de El Albujón. Dichas pérdidas puntuales de transparencia se debían, en buena medida, a que las zonas someras aún contenían abundantes partículas finas de sedimento, como consecuencia de los arrastres de las lluvias torrenciales, lo que hacía que el oleaje resuspendiera dichos materiales con facilidad en las zonas expuestas. Pero, por otro lado, y más preocupante, la entrada de nutrientes por la ribera interna provocaba picos puntuales de clorofila que también afectaban a la calidad del agua. Hasta ese momento el sistema estaba siendo capaz de recuperarse en apenas un par de semanas tras cada evento de lluvias y, tras la regresión en la transparencia del agua sufrida en enero y principios de febrero de 2021, la columna de agua volvió a presentar en unos días visibilidades medias de más de 5 m que se mantuvieron hasta el mes de julio. En ese momento se estaba teniendo el periodo más largo con transparencia de las aguas superior a los 4 metros desde que se produjo la crisis de 2016.

En los informes emitidos en esas fechas se subrayaba que, de cara al verano de 2021, el Mar Menor mostraba una doble vertiente. Por un lado, la complejidad del ecosistema seguía permitiéndole una capacidad de autorregulación muy elevada, manteniendo en niveles bajos tanto la concentración de nutrientes como de clorofila *a*, así como una transparencia generalizada de las aguas. Sin embargo, por otro lado, era muy importante tener presente que el ecosistema seguía bajo una presión extrema por la entrada continua de aguas hipohalinas con altas concentraciones de nutrientes. Esto, a pesar de que los valores de salinidad se iban recuperando progresivamente, mantenía aún valores de este parámetro relativamente bajos para el Mar Menor y, en conjunto, hacían que los riesgos de sufrir una crisis distrófica siguieran siendo altos si se daban condiciones de alta temperatura, periodos de calmas y/o entrada masiva de aguas dulces, todo ello esperable durante el verano. El elevado nivel freático se había traducido también en la proliferación de algas nitrófilas y de crecimiento rápido (cladóforas, ulvales, enteromorfos, etc.) en las zonas de playa, con la consiguiente acumulación de materia orgánica degradándose y el enfangamiento de los sedimentos. Ello estaba induciendo también bajas concentraciones de oxígeno y producción de ácido sulfhídrico en algunos lugares de la costa. El elevado nivel freático inducía también la aparición de lagunajes y el aumento de las poblaciones de mosquitos, así como el crecimiento de carrizos en la arena a pie de agua (Fig. 55).



Figura 55. Imágenes de la proliferación y acumulación de algas en las playas urbanas de Los Urrutias como consecuencia de la entrada de nutrientes por el elevado nivel freático. Este hecho se manifiesta también en el crecimiento de carrizo al borde de la playa (imagen derecha).

Todo ello nos hacía insistir en que la clara recuperación de la integridad ecológica del ecosistema del Mar Menor tras la reducción de las entradas de agua y nutrientes desde la cuenca de drenaje entre los años 2017 y 2018, su deterioro nuevamente tras el regreso de las entradas indiscriminadas de agua hipohalina desde la cuenca, y su actual respuesta autorreguladora tras la activación de la estación de bombeo junto a la rambla del Albujién, debían interpretarse como una demostración de la importancia de consolidar estructuralmente la capacidad de gestión del agua. Como se decía reiteradamente en los informes (anexo I), se confirmaba que, por el momento, las leves tendencias a la estratificación y reducción de la concentración de oxígeno en las capas profundas, mostradas eventualmente durante las primaveras de los años anteriores y tras las entradas masivas de agua dulce en 2019, se habían disipado en buena medida, pero no podían descartarse si se dieran condiciones adversas sinérgicas, con entrada de nutrientes, acumulación de algas, resuspensión de materia orgánica desde el fondo y altas temperaturas, como se había observado puntualmente en la zona de las encañizadas en junio y del Albujién en la primera semana de julio de 2021.

Se insistía, nuevamente, por tanto, en la importancia y la urgencia de un plan de gestión de las aguas en la cuenca, y de regulación, no solo de los vertidos, sino también de los niveles del freático. Se mantenía la recomendación de que se deberían consensuar las medidas con los especialistas en hidrogeología, y valorar la necesidad de reducir el nivel freático al menos entre 1,5 y 2 metros. Esto resultaba especialmente importante teniendo en cuenta que en los próximos años es esperable un aumento de la frecuencia de las lluvias torrenciales que recargarán el acuífero en las zonas más altas, presionando

las bajas, y aumentará la escorrentía superficial donde el subsuelo está saturado y no retiene ya agua nueva. De este modo, aunque las entradas son de múltiples orígenes, ya que se detectan concentraciones relativamente altas tanto de nitratos como de fosfatos, con posible mezcla de aguas de origen agrícola y urbano, están también forzadas por un nivel freático muy elevado y, como se muestra en este informe, las zonas de mayor influencia se desplazan en función de las actuaciones de gestión del agua.

Las medidas recomendadas a principios del verano de 2021 seguían siendo, por tanto, una vez más, mantener una vigilancia extrema en los posibles vertidos, descargar el freático y establecer una red de infraestructuras que permitan la gestión y tratamiento de las aguas que se utilizan y se generan en la cuenca de drenaje con el fin de reducir al máximo las entradas regulares y los riesgos de vertidos incontrolados y maximizar su reutilización. Todo esto, al margen de otras medidas conducentes a una agricultura sostenible a medio y largo plazo, incluyendo las propias estrategias de diversificación de secano y regadío, la implantación de setos, prácticas conducentes a minimizar el uso y la movilidad de nutrientes, las escorrentías superficiales y la erosión y transporte de sedimentos, la recuperación de zonas naturales y, en general, las previstas en el plan de vertido cero.

Se reiteraba, en los sucesivos informes que, si bien el ecosistema del Mar Menor daba pruebas de que mantenía buena parte de sus capacidades homeostáticas, también era un hecho que las presiones, aunque ligeramente reducidas tras la puesta en funcionamiento de la estación de bombeo de los Alcázares, aún se mantenían muy altas y no podían descartarse eventos extremos en condiciones de altas temperaturas, periodos largos de calmas o entradas torrenciales de aguas desde la cuenca en eventos de lluvias intensas. Se advertía, nuevamente, que este tipo de eventos, con el calentamiento generalizado de la superficie del mar, podrían extenderse durante todo el otoño y hasta principios de invierno en nuestra región.

A primeros de junio de 2021, los valores medios de oxígeno se mantenían próximos a saturación, y en los rangos normales para cada época del año (Fig. 48). No obstante, empezaron a detectarse algunos indicios de la fragilidad del ecosistema con dos bajadas locales puntuales relevantes. Una de ellas el 8 de junio, localizada en la zona de influencia de las encañizadas del norte, donde la concentración de oxígeno bajó del 50% de saturación y presentó valores de 3 mg/L (Fig. 56). No obstante, la media lagunar se mantuvo superior a 7 mg/L. El análisis de las muestras de agua mostró abundante material particulado en suspensión (Fig. 56). En los informes emitidos en esas fechas se resaltaba que cualquier actividad de mantenimiento de las golas y encañizadas que supusiera resuspensión de materiales del fondo debía estar excluida en los meses de primavera y verano, por el efecto negativo que podría tener el aumento de materia

orgánica particulada en la columna de agua sobre los niveles de oxígeno. Esta observación se extendía también a actuaciones en playas y puertos o a cualquier otro supuesto dentro de la laguna.

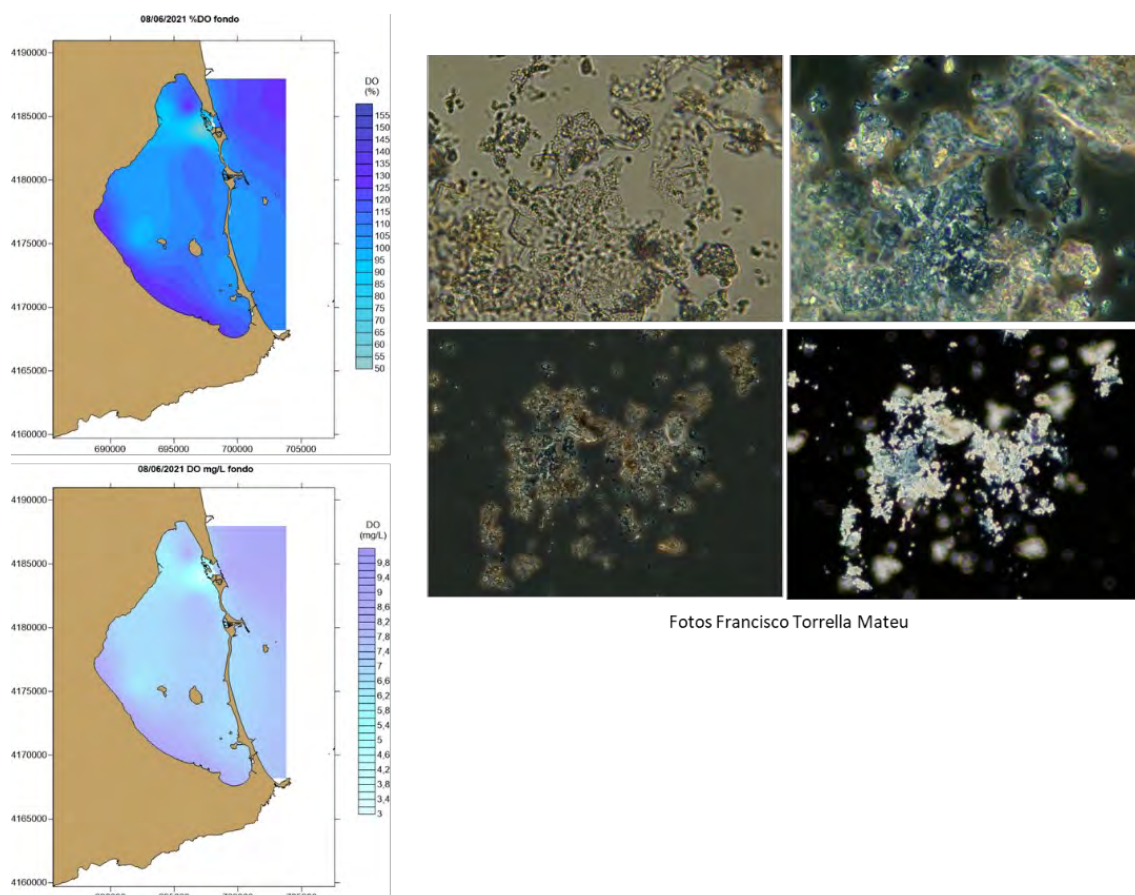


Figura 56. Izquierda: mapas de distribución de la concentración de oxígeno el 8 de junio de 2021 (expresada como % de saturación arriba, y en mg/L, abajo); derecha: imágenes del material particulado en la columna de agua en el área de las encañizadas obtenidas de las muestras de la campaña de ese día (facilitadas por el Dr. Francisco Torrella).

Como se había anunciado que podría ocurrir, a mediados de julio de 2021, el ecosistema sufrió un brusco cambio. La concentración de clorofila *a*, tal y como se anticipaba como probable en los informes emitidos, aumentó drásticamente su concentración. El 19 de julio de 2021 la mayoría de las localidades presentaron concentraciones inferiores a 4 $\mu\text{g/L}$, y tan solo la estación E9, frente a Los Urrutias, presentaba valores máximos de 5,41 $\mu\text{g/L}$, pero el 2 de agosto la estación E12 ya alcanzaba valores de 10,69 $\mu\text{g/L}$ en la columna de agua y la estación E6 llegaba a 11,4 $\mu\text{g/L}$ en la capa del fondo. Claramente, la cubeta sur, especialmente en la zona de influencia de la entrada de aguas por las

ramblas y línea de costa, debido a lo elevado del nivel freático, mostraba niveles claros de eutrofización y de que el ecosistema veía superada su capacidad de regulación (Fig. 57). Esto se tradujo en una bajada todavía ligera, pero generalizada, de los niveles de oxígeno que empezaron a situarse entre el 70 y el 100 %, por debajo de la concentración de saturación (Fig. 58). Dichos valores aún podían considerarse en los rangos normales para la época del año y en ningún caso bajaron de 4 mg/L, ni siquiera en las proximidades del fondo, pero ya eran un indicio de que el sistema podría tener pocos márgenes si se sobrepasaba la carga de materia orgánica en la columna de agua.

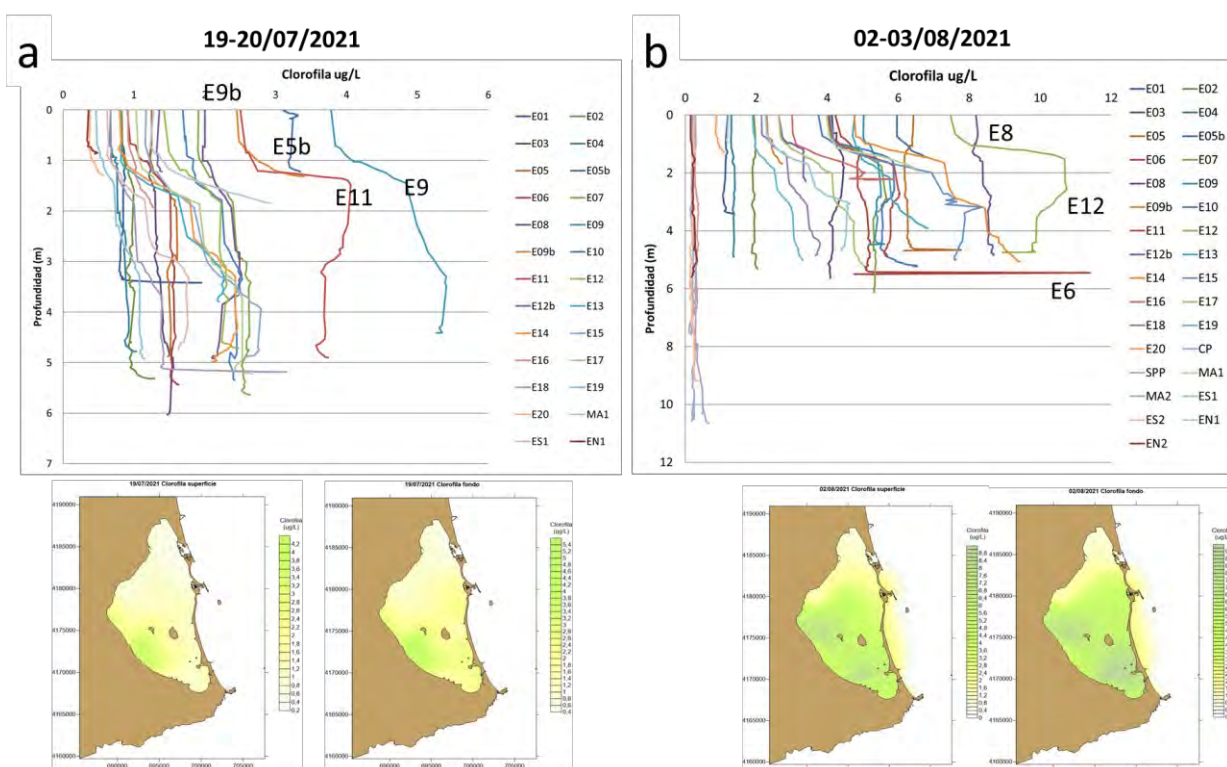


Figura 57. Perfiles y mapas de superficie y fondo de la concentración de clorofila en la red de estaciones en el Mar Menor el 19 de julio de 2021 (a) y el 2 de agosto de 2021 (b).

02-03/08/2021

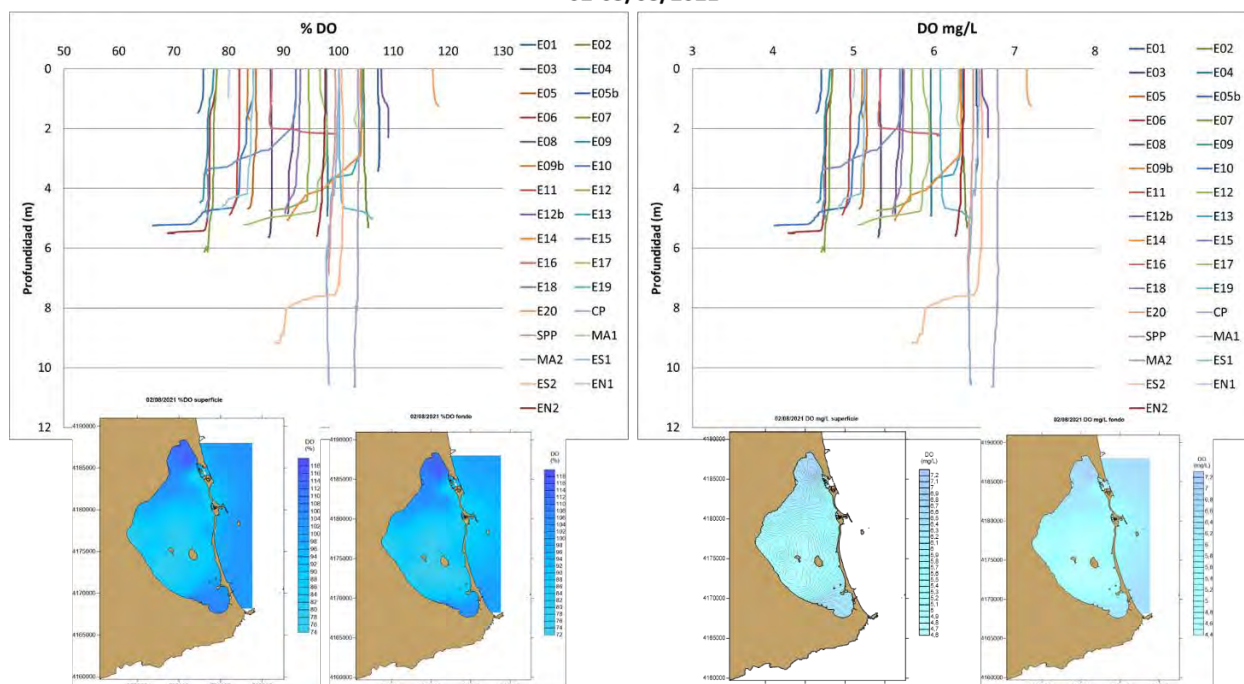


Figura 58. Perfiles y mapas de superficie y fondo de la concentración de oxígeno en la red de estaciones en el Mar Menor el dos de agosto de 2021.

Como consecuencia del aumento en la concentración de clorofila, la transparencia del agua disminuyó sensiblemente, pasando de más de 5 m de media, mantenidos durante la primavera y hasta mediados de julio, a menos de 3,5 m de media en la primera semana de agosto (Fig. 31), y con menos de 2 metros en la zona de influencia de la rambla del Albuñón hasta los Urrutias.

La entrada de agua conllevaba una elevada carga de nutrientes que el 17 de agosto de 2021 alcanzó máximos, tanto en los nitratos, como de manera muy significativa en las concentraciones de fosfatos, con concentraciones de $116,95 \mu\text{mol NO}_3^-/\text{L}$ y $1,34 \mu\text{mol PO}_4^{3-}/\text{L}$, ambas frente a la rambla del Albuñón, pero con aportes también por la ribera interna oriental y sur de la laguna (Fig. 59). Ello seguía reforzando las evidencias de la mezcla de aguas de origen agrícola y urbano muy probablemente producida por el efecto de un freático muy alto y la posibilidad de la existencia de urbanizaciones o viviendas aún no conectadas a las redes de saneamiento en el área cada vez más extensa de influencia de las aguas subterráneas.

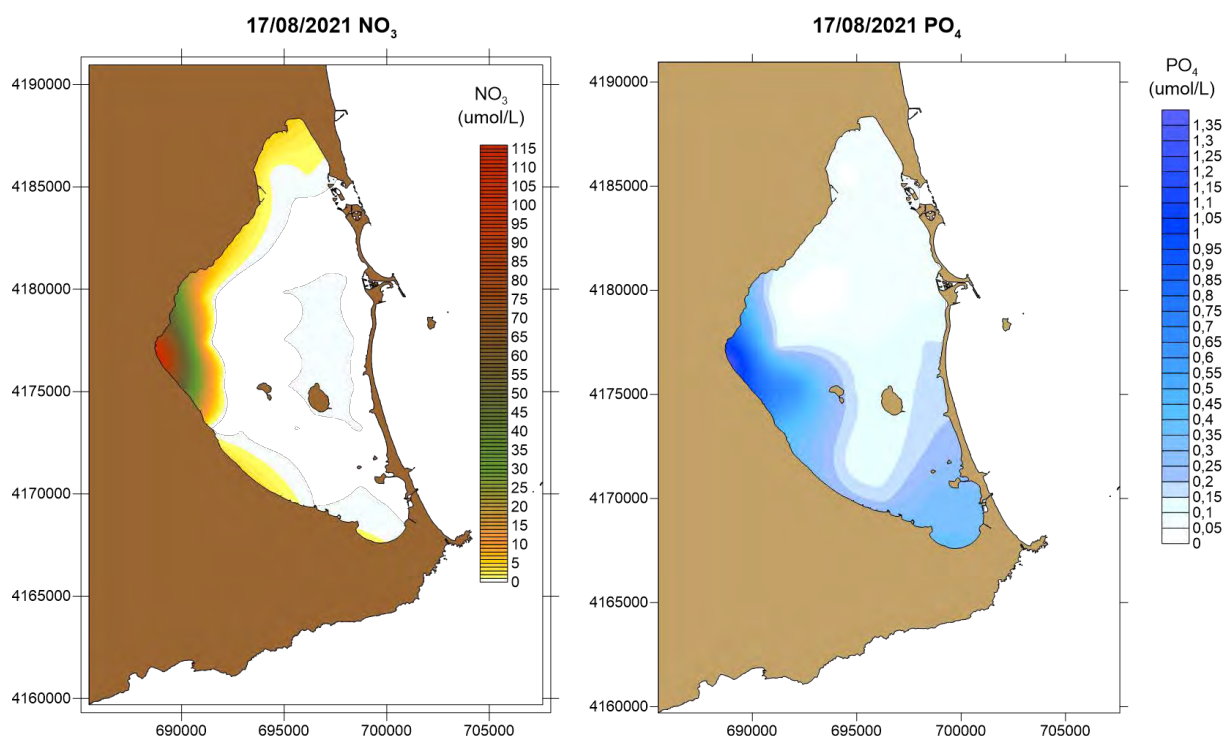


Figura 59. Mapas de superficie de la concentración de nitrato (izquierda) y fosfato (derecha) en la red de estaciones en el Mar Menor en la campaña del 17 de agosto de 2021.

Como consecuencia, la concentración de clorofila a , tras haber mostrado un cambio drástico tal y como se anticipaba como probable a finales de julio y se constató a primeros de agosto, siguió aumentando inexorablemente. En superficie, los valores se mantenían ligeramente por debajo de 10 $\mu\text{g/L}$, pero numerosas estaciones sobrepasaban ya los 5 $\mu\text{g/L}$ y la estación E9, frente a los Urrutias, que el 19 de julio presentaba valores máximos de 5,41 $\mu\text{g/L}$ en esta ocasión alcanzó 12,5 $\mu\text{g/L}$ en superficie.

Pero si esto era ya grave, el problema que resultaba muy preocupante era la concentración de clorofila en las capas profundas de la columna de agua. En dicha estación E9, al sur de Los Urrutias, se alcanzaron valores de 189,5 $\mu\text{g Chla/L}$ y la estación E18, frente al Estacio, llegó a 148,1 $\mu\text{g Chla/L}$ (Fig. 60). De este modo, el problema que dio lugar en buena medida a la situación de mediados de agosto, sin descartar posibles proliferaciones de dinoflagelados, fue la concentración de clorofila en las capas profundas de la columna de agua y la acumulación de los excedentes de producción primaria en dichas capas. En general, estas concentraciones en la capa profunda en toda la cubeta sur son las que dieron origen a las capas hipóxicas y anóxicas que se desarrollaron durante este periodo como consecuencia de la acumulación de materia

orgánica cuya remineralización y consumo por parte de detritívoros pelágicos produjo una elevada demanda de oxígeno.

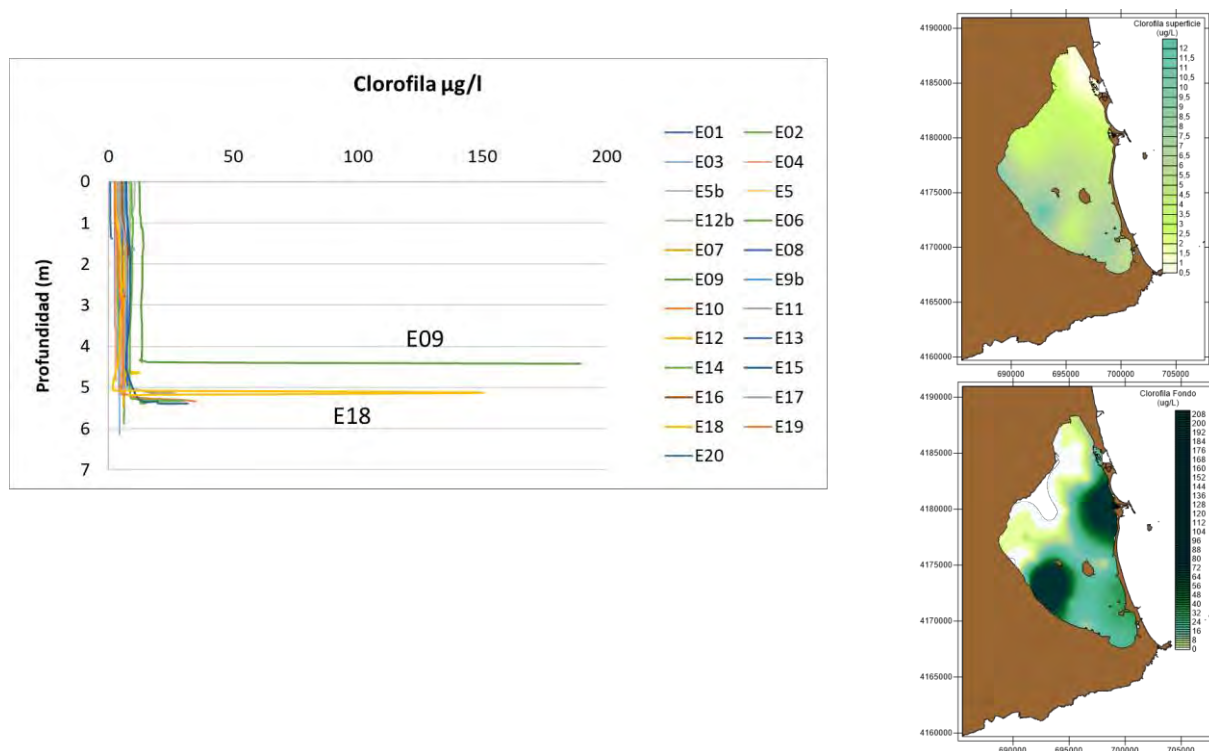


Figura 60. Perfiles y mapas de superficie y fondo de la concentración de clorofila en la red de estaciones en el Mar Menor en la campaña del 17 de agosto de 2021.

La elevada demanda de oxígeno en dichas concentraciones de material biológico se tradujo en condiciones de hipoxia y bajo porcentaje de oxígeno respecto a la concentración de saturación en algunas localidades (Fig. 61). Los valores más bajos se produjeron en el centro de los giros circulatorios y, de forma recurrente, frente a la bocana de El Estacio, correspondiendo a la zona de concentración por el efecto de succión de las corrientes de salida, algo que ya se había observado en años anteriores en circunstancias semejantes. La otra zona especialmente preocupante era la que se situaba desde los Urrutias hacia el centro del giro circulatorio de la cubeta sur y a lo largo de la ribera interna de La Manga hacia el norte, hasta El Estacio. Los eventos de hipoxia y aparición en las orillas de la cubeta sur de juveniles muertos de algunas especies de peces observados los días 14-16 de agosto estuvieron provocados, muy probablemente, por esta situación, sin descartar alguna proliferación de dinoflagelados, y no se descartaba que pudieran volver a producirse o intensificarse teniendo en cuenta que las entradas de agua y nutrientes se mantenían muy activas y que se estaba en un periodo de alta producción primaria, máxima actividad biológica y baja saturación de oxígeno debido a las altas temperaturas. En los informes de estas fechas se subrayó que los periodos con olas de calor y vientos flojos serían probablemente críticos y que una

estratificación forzada por la entrada de masas de agua con menor densidad que la del fondo del Mar Menor podría dar lugar a una crisis distrófica y anóxica importante.

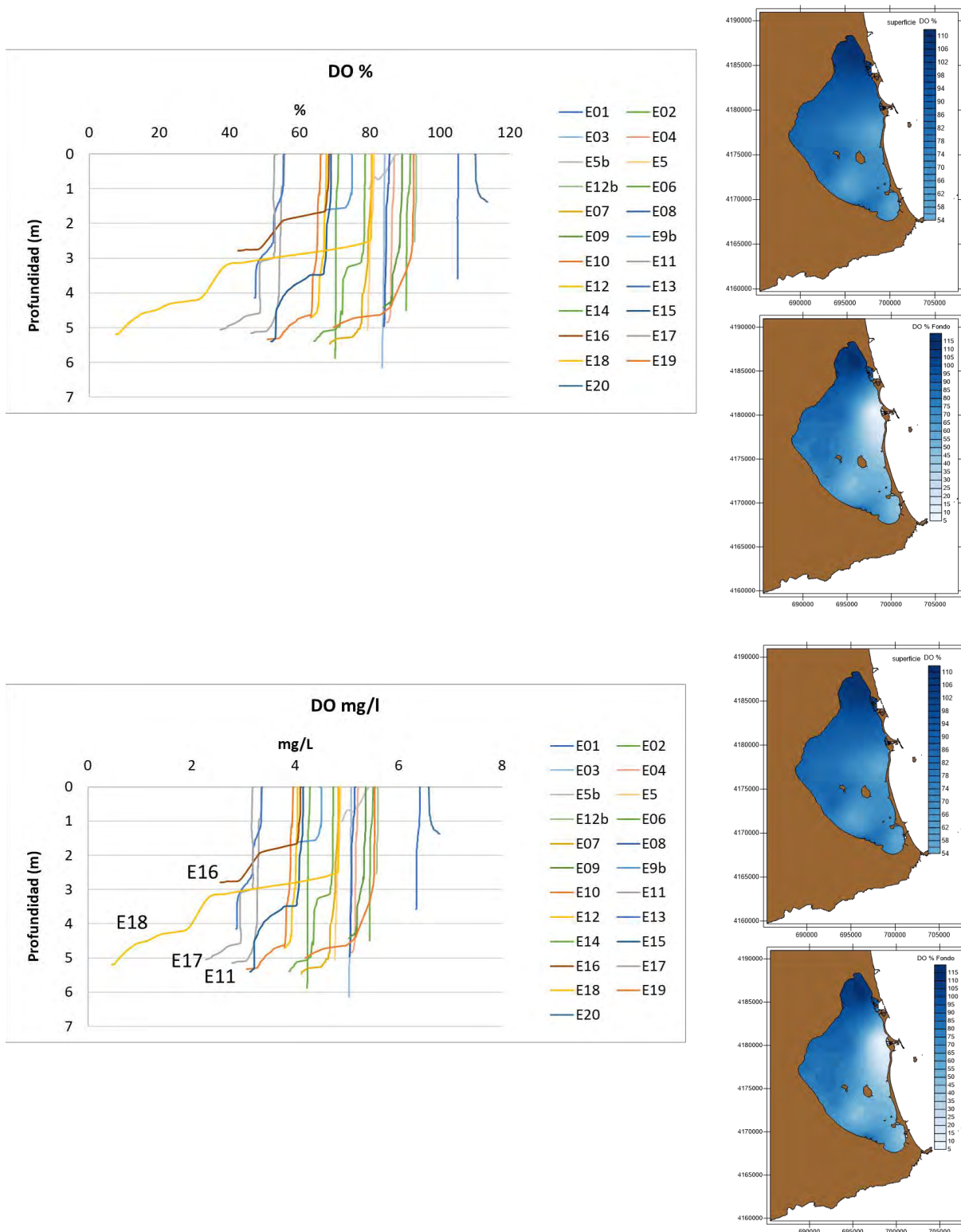


Figura 61. Perfiles y mapas de superficie y fondo de la concentración de oxígeno en la red de estaciones en el Mar Menor en la campaña del 17 de agosto de 2021.

Los perfiles y mapas de distribución espacial de los datos de salinidad y temperatura (Figs. 62 y 63), y especialmente el hecho de que tanto en fondo como en la superficie los valores de temperatura fueran más bajos en las zonas someras de toda la ribera oriental del Mar Menor cuando en pleno agosto deberían ser las más cálidas, mostraba y confirmaba la entrada generalizada de aguas subsuperficiales.

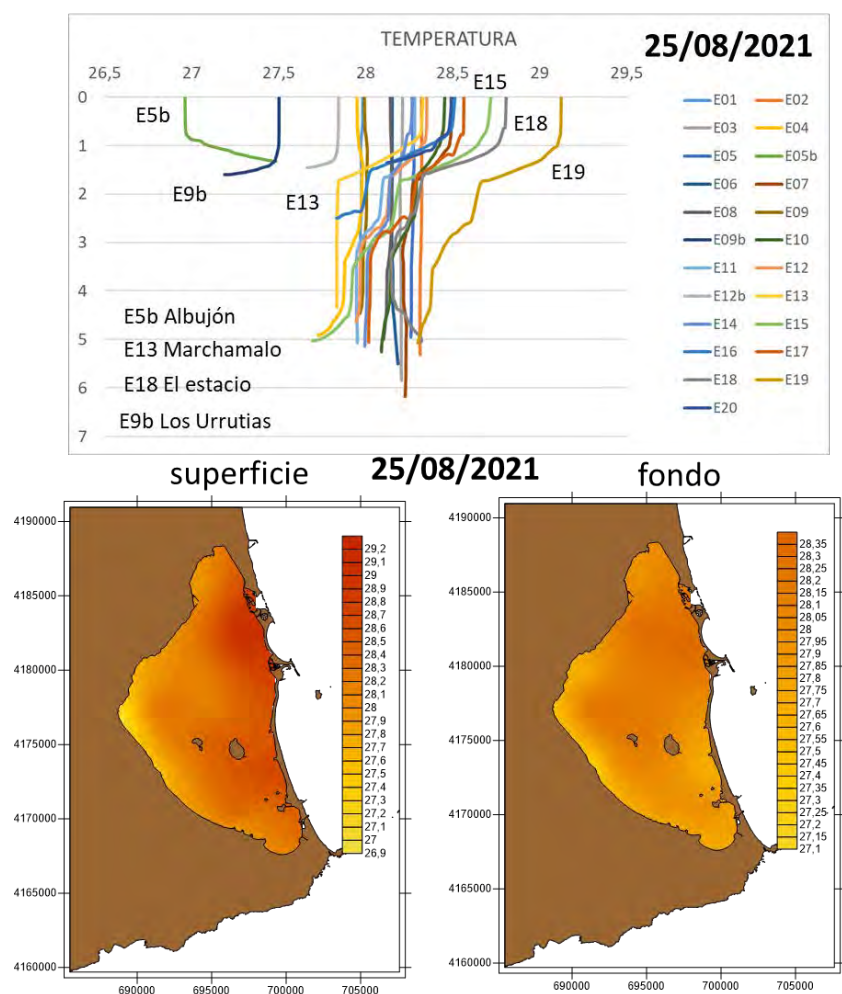
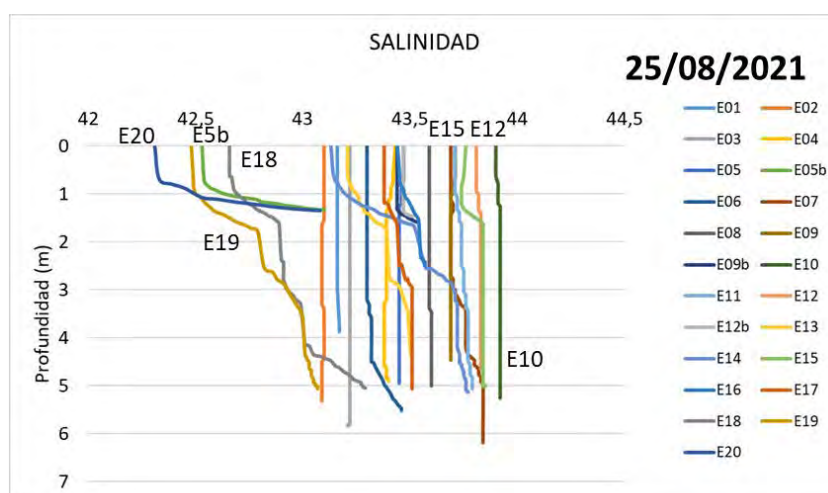


Figura 62. Perfiles (arriba) y mapas de superficie (abajo izquierda) y fondo (abajo derecha) de la temperatura del agua (°C) en la red de estaciones en el Mar Menor en la campaña del 25 de agosto de 2021.



superficie

25/08/2021

fondo

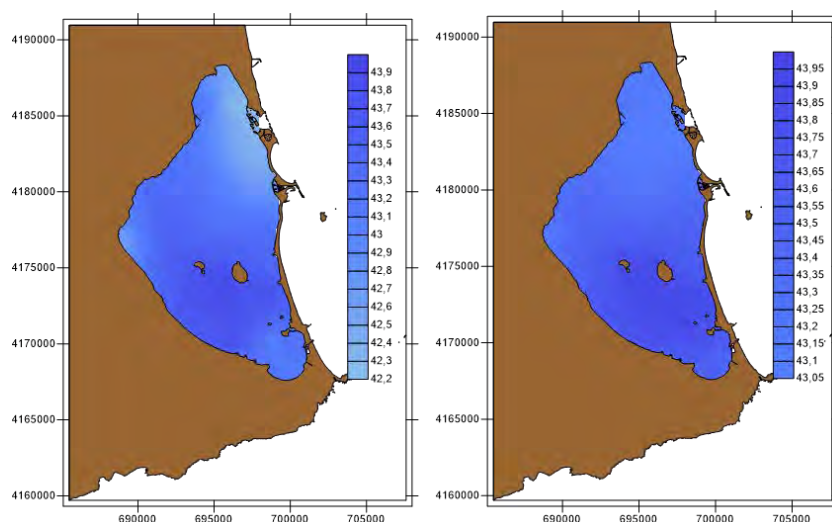


Figura 63. Perfiles (arriba) y mapas de superficie (abajo izquierda) y fondo (abajo derecha) de la salinidad del agua en la red de estaciones en el Mar Menor en la campaña del 25 de agosto de 2021.

Tras dos días en los que la bolsa hipóxica provocada por la acumulación de materia orgánica procedente de los excedentes de producción primaria había ido remitiendo, el sistema seguía alimentado con el mantenimiento de las descargas de agua dulce y nutrientes y volvió a detectarse una nueva acumulación de clorofila *a* en las capas profundas al norte de las islas centrales del Mar Menor, apareciendo algunas áreas en las que los niveles de oxígeno comenzaban a estar muy bajos. Los informes advertían que dicho acúmulo incrementaría la demanda de oxígeno en las horas siguientes, por lo que si las condiciones ambientales evolucionaban hacia un incremento de la temperatura y/o un periodo de calmas, sería muy probable un nuevo evento de hipoxia. Se insistía en que esta situación seguiría repitiéndose mientras el sistema siguiera alimentado por un exceso de agua hipohalina y nutrientes procedentes de la cuenca vertiente y, forzado por un nivel freático alto, se agravaría, incluso, si se produjera una

entrada masiva de agua dulce por posibles lluvias que forzaría una estratificación de la columna de agua.

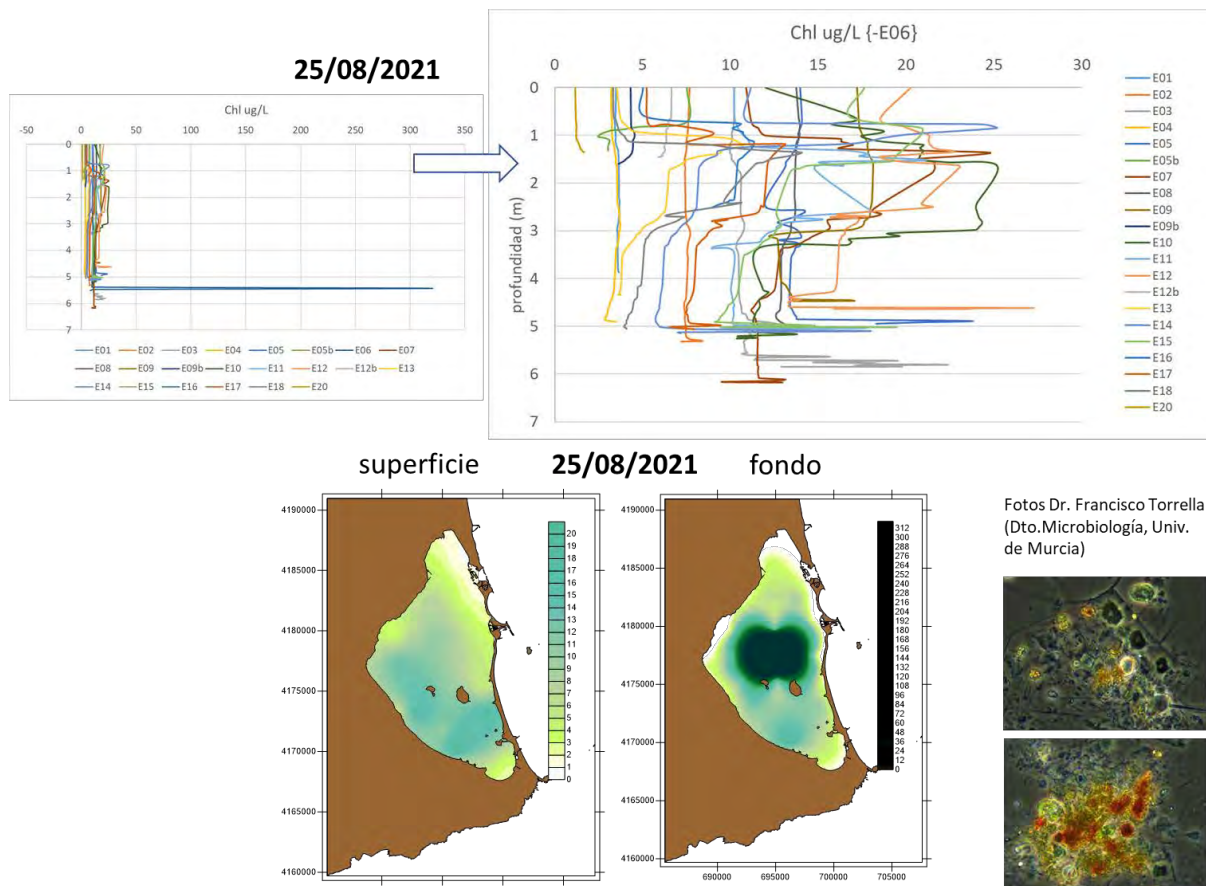


Figura 64. Perfiles y mapas de superficie y fondo de la concentración de clorofila *a* en la red de estaciones del Mar Menor en la campaña del 25 de agosto de 2021. A la derecha se muestran imágenes del material detrítico que aparecía en dichas concentraciones (obtenidas por el Dr. Francisco Torrella).

Los datos del día 26, obtenidos por los equipos de monitorización del IMIDA, el Servicio de pesca de la CARM y la UPCT, junto con nosotros, para dar una mayor cobertura a la crisis que se estaba produciendo, mostraron una fuerte estratificación térmica y salina en las estaciones afectadas por las entradas de agua dulce que a lo largo del día siguiente fue rompiéndose. La continua entrada de agua dulce superficial y subsuperficial por el Albuñón y la ribera interna del Mar Menor, seguía siendo el principal motor del proceso de eutrofización y suponía un riesgo alto de estratificación, y se advertía en los informes que podría tener aún consecuencias más dramáticas que el evento de anoxia de la semana previa. Los datos obtenidos por dichos equipos de monitorización durante el 27 de agosto mostraban que la acumulación de clorofila aún se mantenía, con valores algo menores en el fondo, pero aún suficientemente altos para suponer un riesgo alto de



formación de una bolsa hipóxica o de anoxia. Además, se había incrementado la concentración de clorofila *a* en superficie en la mayor parte del Mar Menor por lo que la concentración en el fondo aumentaría en los días siguientes. Las bolsas formadas se desplazaron algo hacia el sur, hacia el canal entre las islas del Barón y la Perdiguera, pero su ubicación final estaría determinada por los vientos y las corrientes a lo largo del día.

La temperatura, en general, tampoco mostraba estratificación (Fig. 66). Cabía resaltar que la estaciones con menor temperatura se correspondían, frecuentemente, con las estaciones más costeras, la estación 5b, frente a la rambla del Albuñón, y las 9b y 12b, frente a Los Urrutias y Los Nietos. Esto seguía siendo un indicio de la influencia de la entrada de aguas subterráneas por la zona costera.

Los eventos ocurridos durante el mes de agosto de 2021 en el Mar Menor, y en particular la mortandad anormal de peces observada los días 15, 16, y 17 de dicho mes, se enmarcan en el contexto de un proceso clásico de crisis distrófica producida por un proceso de eutrofización clásico que se inicia con el aporte excesivo de nutrientes y materia orgánica al ecosistema y que implica un desequilibrio energético en el mismo. La disponibilidad de nutrientes en exceso en el agua favorece el crecimiento de las algas, primero las de crecimiento más lento, luego las oportunistas, nitrófilas y de crecimiento rápido y, finalmente, éstas son sustituidas por el fitoplancton, que termina dominando el sistema, volviendo turbia y verde la columna de agua y reduciendo de manera significativa la penetración de la luz. Todos los excesos de materia orgánica terminan acumulándose en las capas profundas de la columna de agua y en el sedimento, donde se descomponen reduciendo la concentración de oxígeno y haciendo que la mayor parte de la fauna tenga dificultades para sobrevivir.

En este contexto, la situación producida en el Mar Menor este pasado mes de agosto fue más el resultado de la sinergia de diferentes factores que de un único factor. Por un lado, la temperatura media del agua en la laguna alcanzó 29,5°C, con valores de 29,8°C en algunas localidades y superando los 30°C en algunas áreas someras. En la campaña realizada el 16 de agosto para caracterizar el estado del Mar Menor, tras la alerta por la aparición de concentraciones elevadas de camarones y juveniles de peces muertos en algunas playas, la temperatura llegó a alcanzar los 32°C, manteniéndose entre 29,3 y 29,9°C en la mayor parte de su zona central. Por su parte, a lo largo del verano, se mantenían las entradas de agua dulce por la ribera interna del Mar Menor. El 17 de agosto volvió a detectarse una bajada significativa de la salinidad en las estaciones E1, frente a La Ribera, y en las 5b y 18, frente a la rambla del Albuñón y El Estacio, respectivamente. La primera, junto con una estratificación marcada, ya se había detectado a finales de julio de este mismo año, su efecto se había perdido la primera semana de agosto, pero de nuevo volvía a aparecer, y se justifica principalmente por el

vertido de aguas urbanas. La segunda era debida a las descargas en el área de la rambla del Albuñón y la última a la entrada directa de agua del Mediterráneo. Las dos primeras situaciones eran una clara evidencia de que las entradas de agua cargadas de nutrientes seguían activas forzando el estado trófico del Mar Menor. Los datos de El Estacio servían como alerta de que forzar el intercambio con el Mediterráneo podría agravar los procesos de estratificación y es importante acotar en sus justos términos este tipo de acciones.

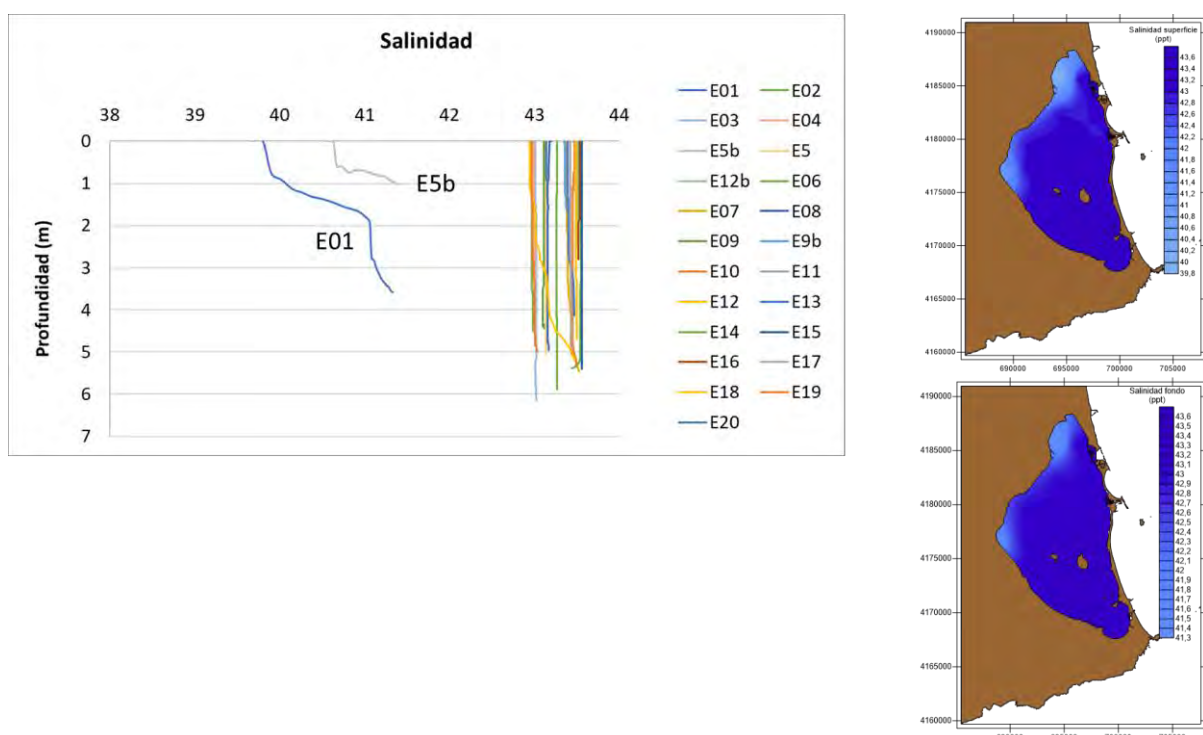


Figura 65. Perfiles y mapas de superficie y fondo de la salinidad en la red de estaciones en el Mar Menor en la campaña del 17 de agosto de 2021.

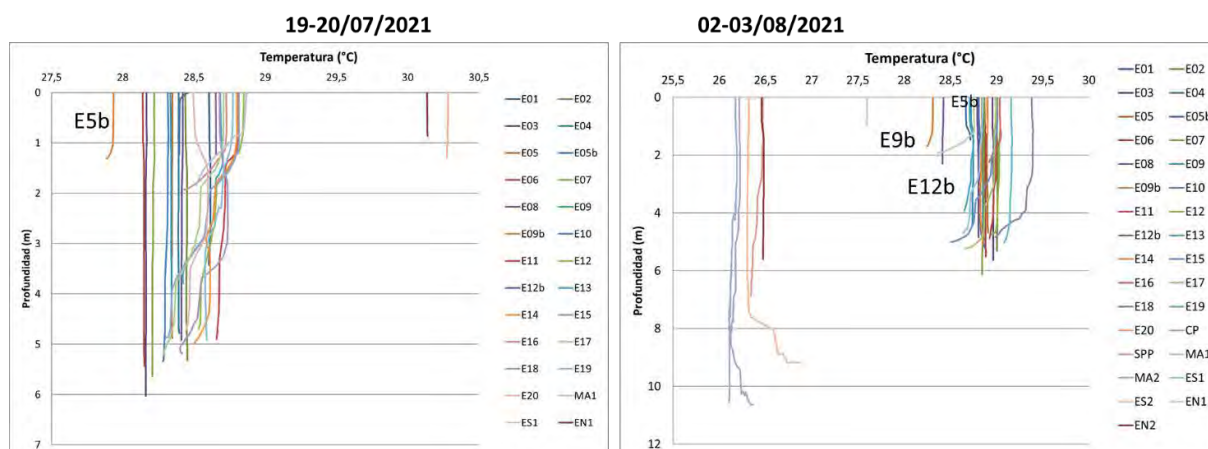


Figura 66. Perfiles de temperatura a finales de julio y principios de agosto de 2021 en la red de estaciones en el Mar Menor.

A primeros de septiembre (Fig. 67), dichas masas con alta concentración de clorofila y materia orgánica particulada y disuelta seguían formándose, evolucionando y deshaciéndose. El que la situación se agravara de forma dramática y diera lugar a una crisis distrófica y anoxia importante dependía de que hubiera periodos con olas de calor y vientos flojos o que se diera una estratificación forzada por la entrada de masas de agua con menor densidad que la del fondo del Mar Menor. Esta situación se preveía especialmente grave en el contexto de una hipotética DANA.

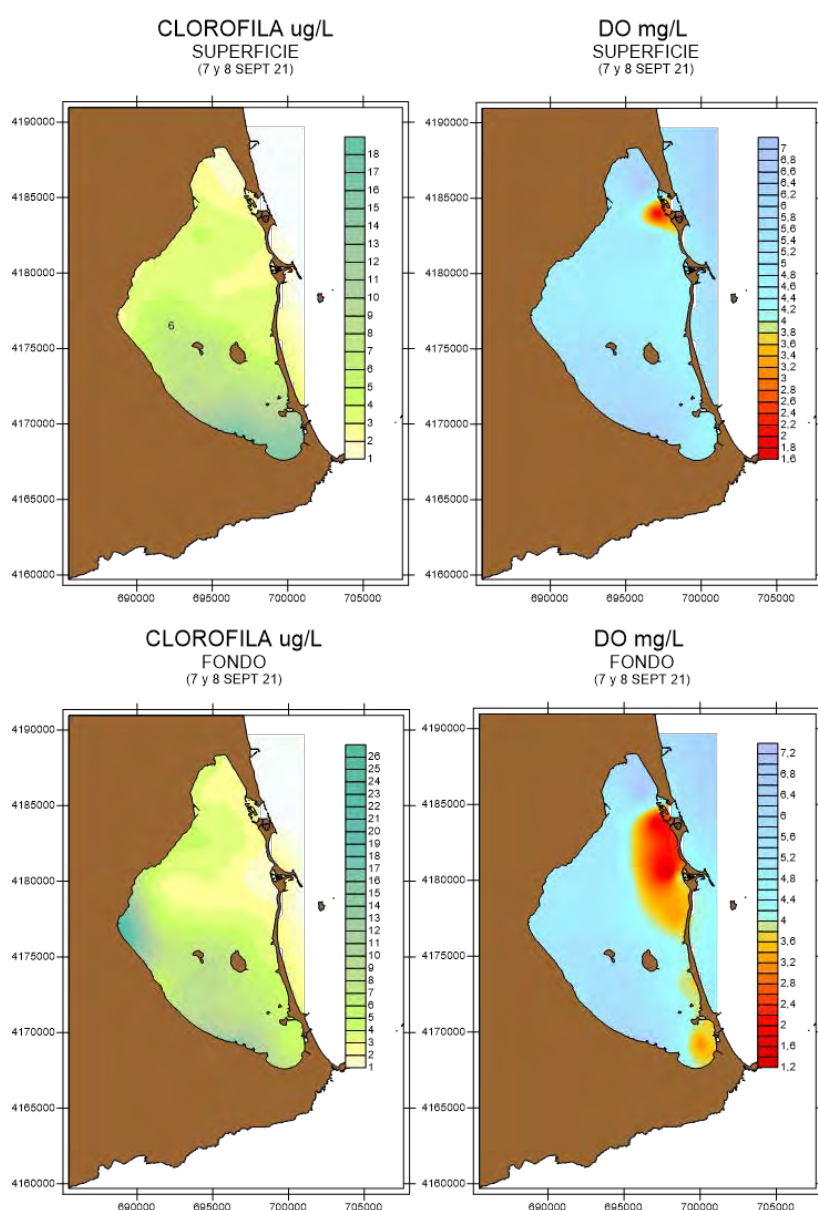


Figura 67. Mapas de superficie (arriba) y fondo (debajo) de la concentración de clorofila (izquierda) y de oxígeno (derecha) en la red de estaciones en el Mar Menor en la campaña del 7-8 de septiembre de 2021.



Por todo ello, una vez más, en los informes de septiembre se siguió insistiendo en la importancia y la urgencia de un plan de gestión de las aguas en la cuenca y de regulación, no solo de los vertidos, sino también de los niveles del freático. Se recalca la importancia de alcanzar un consenso social, técnico y político en este sentido y que se adoptaran las medidas contando con los especialistas en hidrogeología, y con la colaboración de los sectores activos en la cuenca y el uso de las infraestructuras disponibles para reducir el nivel freático al menos entre 1,5 y 2 metros a nivel de la orilla. Ante una situación que ya estaba clara y diagnosticada desde hace años, era urgente avanzar en la toma de decisiones y la ejecución de actuaciones para la gestión y control del agua, sin las cuales la solución del problema y la compatibilidad de las actividades en la cuenca, con las regulaciones necesarias, y la integridad ecológica del Mar Menor no será posible.