

INFORME DE SÍNTESIS SOBRE EL ESTADO ACTUAL DEL MAR MENOR Y SUS CAUSAS EN RELACIÓN A LOS CONTENIDOS DE NUTRIENTES

Juan Manuel Ruiz Fernández. Instituto Español de Oceanografía
Víctor M. León. Instituto Español de Oceanografía
Lázaro Marín Guirao. Instituto Español de Oceanografía
Francisca Giménez Casalduero. Universidad de Alicante
José Álvarez Rogel. Universidad Politécnica de Cartagena
Miguel Angel Esteve Selma. Universidad de Murcia
Rosa Gómez Cerezo. Universidad de Murcia
Francisco Robledano Aymerich. Universidad de Murcia
Gonzalo González Barberá. CEBAS-CSIC
Julia Martínez Fernández. Fundación Nueva Cultura del Agua

1. Evolución del ecosistema marino lagunar

Durante décadas, los aportes de nutrientes (fundamentalmente nitratos, aunque también fosfato y amonio) y materia orgánica al Mar Menor han forzado el cambio del sistema, originalmente oligotrófico, a un estado **eutrófico**, el cual define un enriquecimiento en nutrientes inorgánicos (nitrógeno y fósforo) más allá del nivel crítico de la capacidad autorreguladora de un sistema determinado. La entrada de estos elementos a la laguna del Mar Menor se ha producido tanto a través de escorrentías superficiales, especialmente la rambla del Albuñón, como de las aguas subterráneas. A través de la rambla del Albuñón han accedido al Mar Menor durante décadas parte de los excedentes del riego de la cuenca del Mar Menor (el Campo de Cartagena) que han elevado los niveles del acuífero, los efluentes de la depuradora de Los Alcázares hasta marzo de 2014 y las descargas, muchas de ellas ilegales de las aguas de rechazo de desalobradoras o salmueras, ricas en nitratos, así como otras aportaciones de diversa índole y cuyo origen es con frecuencia de difícil identificación.

La evolución de la **clorofila a** es un macrodescriptor de dicho estado eutrófico que está relacionado con el desarrollo de plancton en la columna de agua y este desarrollo, a su vez, está relacionado con la disponibilidad de nutrientes. Por tanto, un mayor contenido en **clorofila a** indica un mayor aporte de nutrientes. La Figura 1 muestra la evolución de la **clorofila a** desde finales de la década de 1990 hasta 2017 en el agua del Mar Menor.

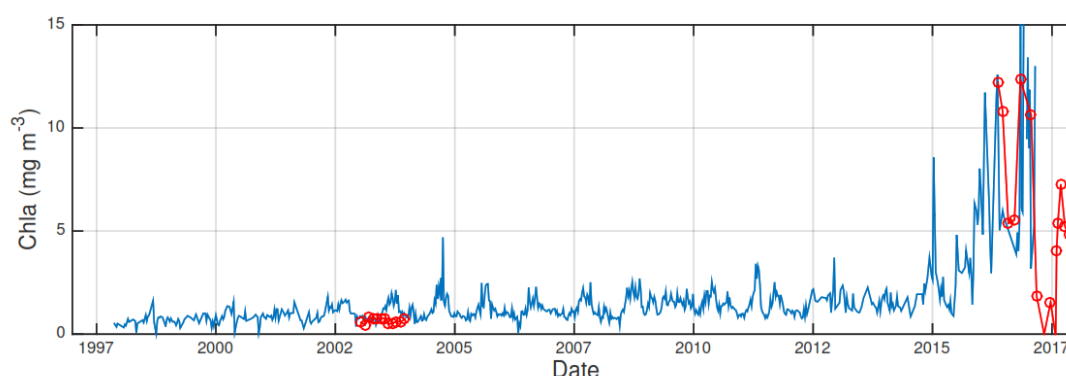


Figura 1. Evolución de la **clorofila a** en la columna de agua del Mar Menor entre 1998 y 2017. La línea azul muestra la evolución obtenida a partir del análisis espectral de imágenes de satélite. Los puntos y líneas rojas son valores de clorofila obtenidos directamente a partir de muestras de agua analizadas por espectrofotometría. Fuente: Belando et al (2019).

Hasta 2015 los valores de *clorofila a* eran muy bajos, propios de un sistema oligotrófico, aunque en la década de 2000 ya se observaban algunos picos que alertaban del riesgo de eutrofización, especialmente en el área de influencia de la rambla del Albuñón (suroeste de la laguna). Desde finales de 2015 y los primeros meses de 2016 se confirmó un crecimiento inusual de fitoplancton (Aguilar et al, 2016) y ya en verano de 2016 se disparó bruscamente el nivel de clorofila como indicador de dicho crecimiento fitoplanctónico. Las aguas se volvieron turbias y de color verde en toda la laguna (es la denominada **crisis eutrónica** de 2016 en el Mar Menor). La luz dejó de llegar al fondo y como consecuencia el 85% de la vegetación bentónica del Mar Menor desapareció, tal y como se muestra en la Figura 2 y, con ella, todos los organismos asociados al fondo.

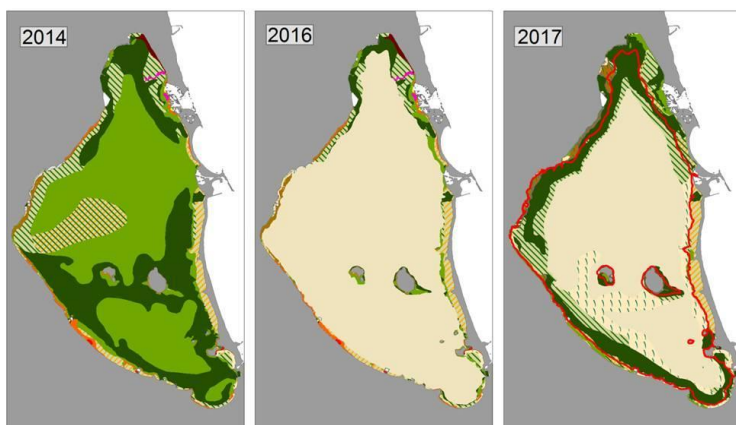


Figura 2. Evolución de la superficie ocupada por praderas marinas en el Mar Menor. Los colores y el rayado verde representan la cobertura vegetal del fondo del Mar Menor entre 2014 y 2017. Fuente: Belando et al (2019), IEO.

En la Figura 3 se muestra una comparativa del aspecto del fondo en 2014 (izquierda) antes del evento de crecimiento fitoplanctónico masivo, totalmente colonizado por vegetación y como quedó tras el episodio en 2016 (derecha), que provocó la muerte de la vegetación y fauna sésil de los fondos, en la que se percibe la capa bacteriana superficial de ambientes sedimentarios afectados por eutrofización extrema. Ambas imágenes corresponden al mismo sitio.

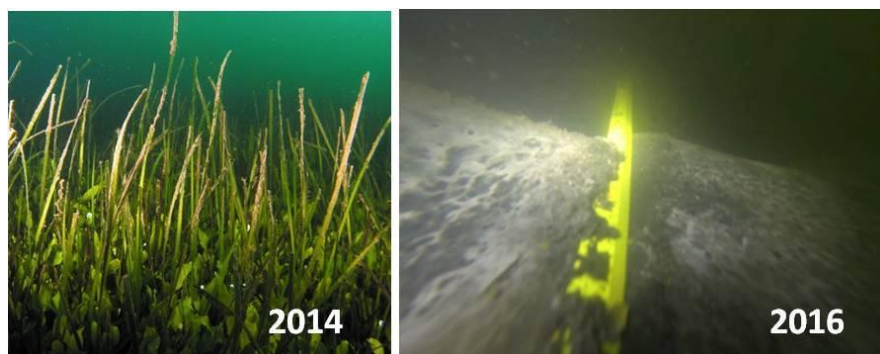


Figura 3. Comunidad de *Cymodocea nodosa* y *Caulerpa prolifera* a 5 m de profundidad en 2014 (izquierda) y aspecto del mismo sitio durante el muestreo de 2016. Fuente: Belando et al (2019), IEO.

Este episodio supuso la muerte de una elevada cantidad de biomasa vegetal (del orden de 20.000 toneladas) y con ella la de la fauna sésil acompañante y su posterior descomposición. Con ello, no solo la materia orgánica sino también los nutrientes mineralizados quedaron en gran medida almacenados en el sedimento. Este compartimento

constituye un importante reservorio de nitrógeno, fósforo y materia orgánica del ecosistema lagunar, tanto a consecuencia de estos aportes como por los vertidos que ha sufrido a lo largo de los años. Por otra parte, la desaparición de la vegetación bentónica supuso la pérdida de un elemento clave en la regulación de los niveles de nutrientes en la columna de agua y sus intercambios con el sedimento. Esto desequilibró los ciclos biogeoquímicos y convirtió los fondos de la laguna en una fuente de carbono soluble, amonio y fosfato a expensas de la actividad microbiana en el sedimento. Dicha, actividad, que se ve incrementada con la subida de la temperatura estival, acentúa el flujo de nutrientes y carbono desde los sedimentos a la columna de agua durante los meses más cálidos. Álvarez-Rogel et al. (2019) estimaron que en 2018 el sedimento aportó a la columna de agua unas 130 toneladas de amonio y en torno a 1,5 toneladas de fosfato por flujo difusivo. Este reservorio de nutrientes en los fondos y la ausencia de vegetación bentónica para regular sus flujos hacia la columna de agua, hacen a la laguna especialmente sensible a la re-suspensión y oxigenación brusca del sedimento, ya que ello podría provocar un pico de liberación de dichos nutrientes, acarreado un bloom de desarrollo fitoplanctónico.

En 2018, debido principalmente a las condiciones ambientales y a la sucesión de procesos internos de autorregulación de la laguna, la transparencia del agua del Mar Menor volvió a valores similares a los existentes antes del evento de 2016 y desde ciertos ámbitos se interpretó como una recuperación del ecosistema. Sin embargo, miembros de la comunidad científica en la que se incluyen investigadores del Instituto Español de Oceanografía (IEO), la Universidad de Murcia (UMU), la Universidad de Alicante (UA), el Centro de Edafología y Biología Aplicada del Sureste del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CEBAS-CSIC), la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT) y la Fundación Nueva Cultura del Agua (FNCA), consideramos que **la evidencia científica y las circunstancias reales no apoyaban un diagnóstico de recuperación**. Básicamente, seguía existiendo una grave alteración del ecosistema.

Tras la pérdida de la vegetación, que era el elemento principal que controlaba los ciclos y flujos de nutrientes entre el sedimento y la columna de agua, la vulnerabilidad del ecosistema aumentó, con una nula o muy lenta tasa de recuperación. De hecho, en 2019 la concentración de *clorofila a* en la columna de agua, **augmentó progresivamente hasta llegar a niveles similares a los rangos de 2015-2016**. Esto se hacía evidente a finales de agosto de 2019, justo antes de la DANA ocurrida en septiembre, como se muestra en la figura 4.

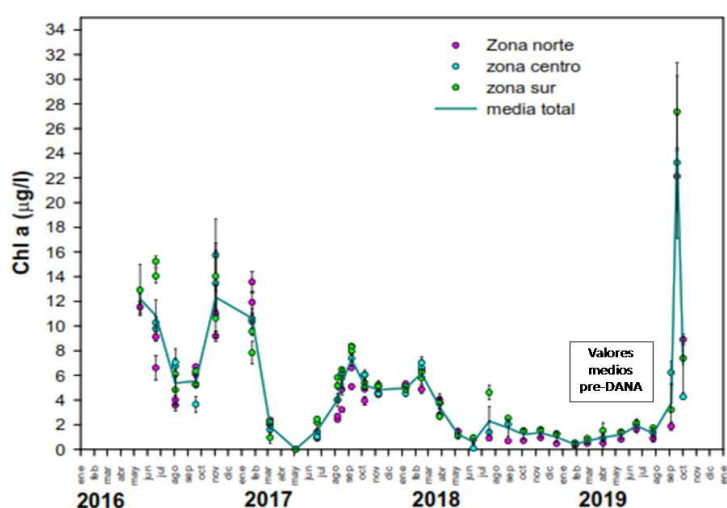


Figura 4. Evolución de la clorofila a en el agua del Mar Menor entre abril de 2016 y octubre de 2019. Fuente: IEO (2019).

Tras la DANA, el agua arrastrada procedente de la lluvia se mezcló con la capa superficial de agua de la laguna y los niveles de clorofila aumentaron de forma muy brusca hasta niveles superiores a los máximos de 2016, lo que se ha atribuido a la entrada masiva de nitrógeno, fósforo y materia orgánica asociada a la entrada de agua, sedimentos terrígenos y materiales arrastrados procedentes del Campo de Cartagena. La clorofila disminuyó pocos días después, aunque a finales de octubre volvió a aumentar hasta alcanzar los rangos medidos en 2016. Mientras, la capa de agua profunda (caracterizada por las condiciones de salinidad y carga fitoplanctónica del agua de la laguna previo a la DANA) quedó aislada. La columna de agua se estratificó, formando una capa superficial menos salina, reduciendo la transferencia de oxígeno atmosférico hacia partes más profundas de la columna de agua. En paralelo, la elevada turbidez del agua redujo drásticamente la luz que alcanzaba el fondo, impidiendo la producción de oxígeno por la actividad fotosintética de la vegetación bentónica. En la capa de agua profunda a partir de 3 m de profundidad, el oxígeno se agotó y se alcanzaron valores de 0 ppm, como consecuencia de la descomposición de la materia orgánica presente (tanto la ya existente como la introducida durante las riadas). El color negro del agua y olor a gas sulfhídrico que emanaba de la laguna, eran claros indicadores de la existencia de un fuerte metabolismo anaerobio sulfato-reductor en la capa profunda anóxica (fenómeno denominado euxinia). Una de las consecuencias de este metabolismo es la aparición de sulfuros disueltos en el agua, que son tóxicos para muchos animales y plantas. Los cuerpos de agua euxínicos se caracterizan por una fuerte estratificación, con una capa de agua superior con oxígeno y otra inferior anóxica y sulfídica y se han documentado en lugares como el Mar Negro. La combinación de ausencia de oxígeno y presencia de sulfuros en la capa de agua profunda causó la muerte de la vida asociada al fondo lagunar y la huida masiva de organismos de todas las especies con capacidad de desplazamiento, hacia las zonas menos profundas de la laguna. Se ha estimado que una superficie superior a 9.000 hectáreas ha quedado de nuevo devastada en el fondo de la laguna.

El sábado 12 de octubre (un mes después de la DANA) y a consecuencia de los vientos de levante, parte de **esta capa anóxica y tóxica afloró** en la plataforma del extremo norte de la laguna, causando un déficit extremo de oxígeno y liberación de productos procedentes del metabolismo anaerobio acumulados en las aguas profundas, como los sulfuros disueltos y el gas sulfhídrico. El afloramiento de la capa anóxica favoreció la proliferación de cierto tipo de microorganismos que acumulan el azufre, que obtienen al metabolizar sulfuros. Esto se puso de manifiesto por la aparición de espumas lechosas blanquecinas en algunas zonas, las cuales están formadas por acumulaciones de este tipo de microorganismos. Tanto la falta de oxígeno como los sulfuros debieron contribuir a la muerte de la fauna presente en una extensa área al norte de la laguna. No obstante, los animales muertos aparecieron **en casi toda la extensión de la laguna**. De acuerdo con los datos disponibles, parece que la capa anóxica del fondo se habría mezclado total o parcialmente con la capa óxica superior, causando una reducción generalizada de las concentraciones de oxígeno, con los consecuentes efectos negativos sobre la fauna lagunar. A finales de octubre se observó una recuperación de los niveles de oxígeno en la mayor parte de la columna de agua, sobre todo en la parte central y sur de la cubeta, quedando en la zona norte una capa residual de agua subóxica (con bajos niveles de oxígeno).

2. Causas de la crisis ecológica del Mar Menor

El Mar Menor recibe desde la década de 1980 grandes cantidades de materia orgánica y **nutrientes procedentes de vertidos de diversa naturaleza, entre los que se encuentran las aguas residuales urbanas (actualmente prácticamente suprimidas, salvo episodios de lluvias y vertidos puntuales) y, sobre todo, los flujos contaminantes tanto difusos como puntuales, procedentes de la actividad agraria y agropecuaria del Campo de Cartagena**. No obstante, mientras los vertidos urbanos y agropecuarios han estado mayoritariamente focalizados en determinados puntos (alcantarillados, depuradoras, granjas

de ganado, balsas de purines) y se han concentrado en episodios puntuales o en periodos del año con elevada ocupación (por ejemplo, en verano), la agricultura ha provocado, además de vertidos puntuales como las salmueras, una contaminación difusa tanto a nivel subterráneo (al acuífero Cuaternario) como superficial (escorrentías, arrastres), debido a la gran extensión que ocupa en la cuenca. El principal compuesto procedente de la actividad agrícola es el nitrato, debido a que es la fuente de nitrógeno más utilizada para los cultivos y tiene una alta solubilidad, no siendo retenido en el suelo a causa de su estructura química. El fosfato aplicado como fertilizante, además de utilizarse en dosis menores que el nitrato, queda retenido con facilidad en los suelos, por lo que su lixiviación es escasa. De hecho, el acuífero Cuaternario está fuertemente contaminado por nitrato pero no por fosfato. Esta diferencia es muy importante para identificar las fuentes de contaminación: aguas con elevado contenido en nitrato tienen fundamentalmente un origen agrícola y aguas con elevado contenido en fosfato provienen sobre todo de aguas residuales mal depuradas, lixiviados de granjas y estiércoles. Además, los lixiviados de origen agrícola contienen poco amonio (otra forma en la que se aplica el nitrógeno como fertilizante, pero que en este caso sí queda retenida en el suelo) y muy poca materia orgánica, mientras que las residuales y las procedentes de granjas pueden contener ambos componentes en elevadas concentraciones (García Pintado et al, 2007). Distintos estudios hidroquímicos e isotópicos han permitido determinar que el principal origen de la contaminación por nitratos son los fertilizantes químicos utilizados en los cultivos (MAGRAMA, 2015).

Entre 1988 y 2009 la agricultura intensiva de la cuenca, basada fundamentalmente en la fertirrigación (aplicación de fertilizantes a través del sistema de riego) pero en la que también se aplican cantidades elevadas de estiércol, pasó de unas 25.150 hectáreas a más de 55.000 hectáreas, de acuerdo con los estudios de teledetección disponibles (Carreño, 2015). Desde 2009 ha continuado esta transformación a regadío. La entrada continuada de parte de los nutrientes aplicados desde hace décadas por vía superficial (ramblas y tuberías de vertido) y subterránea (filtraciones del acuífero), se considera un factor crucial para que se desencadenara la crisis eutrófica de 2016. La muerte masiva de la vegetación bentónica constituyó, además, junto a la eliminación del principal elemento de retención de nutrientes, un aporte masivo de materia orgánica y nutrientes para el fondo de la laguna, lo que disparó la actividad microbiana en el sedimento y lo volvió mayoritariamente anóxico desde los primeros milímetros. Gran parte de los nutrientes que contenía la vegetación que murió quedaron retenidos en los fondos, junto a los nutrientes que habían entrado durante años. De esta forma, a los aportes externos de nutrientes que sigue recibiendo de forma continuada la columna de agua **procedentes de la cuenca**, se suman **los que libera el propio sedimento** (sobre todo fósforo y amonio), debido a los procesos de mineralización de la materia orgánica acumulada. Este problema se agrava con episodios agudos de entrada de agua, sedimentos y nutrientes, como la DANA de septiembre.

En síntesis, la profunda degradación del Mar Menor ha sido causada por el proceso de eutrofización debido al exceso de nutrientes, degradación que la laguna viene sufriendo desde la crisis eutrófica de 2016 y que se ha agravado por lo arrastrado por las escorrentías durante la DANA. Estimaciones preliminares basadas en muestras recogidas durante la DANA cuantifican los nutrientes que han entrado disueltos en el agua en un mínimo de entre 500 y 1.000 toneladas de nitratos, 35 toneladas de amonio y más de 100 toneladas de fosfato. La estimación está sometida a fuentes de incertidumbre que se están evaluando, pero las cifras que se proporcionan aquí se consideran conservadoras. A esto hay que añadir el carbono orgánico y el fósforo fijado en diversas formas en las ingentes cantidades de sedimento que entraron en la riada (más de 100.000 toneladas en una estima también conservadora). Por tanto, el problema no es consecuencia de la entrada en sí misma de agua dulce (lo que favoreció la formación de las dos capas de agua de diferentes salinidad y densidad), sino de los nutrientes arrastrados por el agua, que son el “combustible” del proceso eutrófico y que se suman a los nutrientes que ya contenía la laguna. De hecho, como recuerda AMETSE (Asociación Meteorológica del Sureste), los datos pluviométricos

muestran que la avenida de noviembre de 1987 presentó una precipitación acumulada un tercio mayor que la DANA de este año, pese a lo cual en 1987 no hubo episodios de mortandad masiva en la laguna, al igual que en otros muchos episodios históricos de avenida. Unos días después de la DANA se analizaron muestras de agua de la laguna encontrándose concentraciones de nitratos en torno a 13 mg/L, cien veces por encima de las que se pueden considerar “normales”. Con estos datos y conociendo el estado eutrófico de la laguna previo al evento meteorológico y las toneladas de nitrógeno y fósforo que entraron con las riadas, todo apuntaba a que se desencadenaría una nueva “sopa verde” generalizada y un posterior episodio de anoxia por colapso del sistema. **La eutrofización, por tanto, ha supuesto una degradación profunda del Mar Menor, que se está cronificando y además lo ha convertido en un ecosistema extremadamente vulnerable a múltiples factores**, que pueden ir variando (la DANA sería un ejemplo, pero no el único) y **en cualquier momento se pueden volver a desencadenar episodios agudos de mortandad**.

La recuperación del Mar Menor será un proceso **largo y muy complejo** porque, incluso con la eliminación de todas las entradas de nutrientes procedentes de la cuenca, la **liberación de nutrientes desde sus fondos continuará durante bastante tiempo**. Por tanto el primer paso para la recuperación es atajar la entrada de sedimentos y nutrientes con medidas de **prevención en origen**, mejorando de forma sustancial las técnicas y eficiencia de la fertilización agrícola en términos de cantidades, tiempo y formas de aplicación y conseguir que la propia cuenca sea capaz de retener y eliminar la mayor parte de los nutrientes que aún así pudiesen circular, aplicando distintas **Soluciones Basadas en la Naturaleza** (NBS, según sus siglas en inglés). Algunas de estas soluciones incluyen: la recuperación ambiental y funcional de los cauces y del conjunto de la red hidrológica de la cuenca del Mar Menor; la reducción de los riesgos de erosión nivelando el terreno, implantando sistemas de laboreo menos agresivos y mejorando las propiedades físicas de los suelos; la utilización de cubiertas vegetales y setos que contribuyan a reducir la energía de las escorrentías y a retener el suelo; la recuperación de las **superficies naturales de humedales** periféricos a la laguna y la construcción de humedales artificiales de localización estratégica, en combinación con otros sistemas capaces de retener y depurar las aguas de escorrentía y efluentes generados en la zona (por ejemplo, biorreactores de madera). Los humedales son además los **únicos sistemas capaces de retener y eliminar buena parte de los sedimentos y nutrientes transportados en caso de avenidas**, las cuales serán cada vez más frecuentes debido al cambio climático. Además, deberían adoptarse medidas para reducir los aportes desde los centros urbanos ribereños, mejorando la red de saneamiento y evitando descargas de los efluentes urbanos tratados o sin tratar a la laguna. Deberían revisarse en este sentido las medidas priorizadas en el Proyecto Vertido Cero, cuyas actuaciones centrales en la cuenca se sitúan en una línea diferente, basada principalmente en obra pública, que no cuentan con un análisis de su eficacia en el cumplimiento de objetivos, ni análisis de riesgos de las propias actuaciones, ni de un análisis coste-eficacia de las distintas opciones.

En relación con posibles actuaciones en la laguna, hay que señalar que planteamientos como incrementar los aportes de agua desde el Mediterráneo no son una opción para solucionar el problema, ya que no actúan sobre su origen y además provocarían efectos colaterales completamente indeseables. Siguiendo las directrices de la propia “Estrategia estatal de infraestructura verde y de la conectividad y restauración ecológicas”, siempre debe valorarse como primera opción la **restauración pasiva**, evaluando si la eliminación de la presión que provoca el impacto da como resultado una recuperación natural. Deben priorizarse las **soluciones basadas en la naturaleza** y potenciar el desarrollo de **infraestructura verde-azul**. Es necesario evaluar los costes potenciales y los múltiples beneficios de la restauración del ecosistema a escalas relevantes, llevar a cabo estudios de coste/beneficio de las acciones con el fin de priorizar las acciones más eficientes y aplicar el principio de precaución y de gestión adaptativa a la hora de aplicar las posibles acciones,

con el fin de minimizar los riesgos de posibles efectos no deseados.

Para finalizar, la eficacia de las actuaciones que se pongan en marcha tiene un claro termómetro: el estado real de los hábitats, comunidades y especies de la laguna del Mar Menor, así como los de la franja adyacente del Mediterráneo, los humedales litorales de la laguna y otros espacios protegidos asociados al Mar Menor. Una implementación precipitada, insuficiente o inadecuada de medidas de restauración, comprometerá seriamente la aplicación de instrumentos de planificación y gestión recientemente aprobados como el Decreto n.º 259/2019, de 10 de octubre, de declaración de Zonas Especiales de Conservación (ZEC), y de aprobación del Plan de gestión integral de los espacios protegidos del Mar Menor y la franja litoral mediterránea de la Región de Murcia. Recuperar el buen estado ecológico de todos estos espacios de forma integral, que cuentan con múltiples figuras de protección nacional e internacional, ha de ser la finalidad última de tales actuaciones.

Referencias

Aguilar Escribano, J., Gimenez-Casaldueiro, F., Mas Hernández, J., & Ramos-Esplá, A. A. (2016). Evaluación del estado y composición de la Comunidad Fitoplanctónica de las aguas del Mar Menor, Murcia (mayo de 2016).

Álvarez-Rogel, J. (coordinador). 2019. *Informe final de la Asistencia Técnica Estudio biogeoquímico de los fondos del Mar Menor (Murcia) – Caracterización geoquímica de sedimentos*. Ref. Tec0004881. Grupos de Investigación Edafología Ambiental, Química y Tecnología Agrícola (ETSIA-Universidad Politécnica de Cartagena)-Seagrass Ecology Group-IEO (Centro Oceanográfico de Murcia)- Cartografía de suelos y paisaje, físico-química, degradación y recuperación de suelos y aguas (Universidad de Santiago de Compostela). TRAGSA-CARM-FEDER.

Belando-Torrente MD, García-Muñoz R, Ramos Segura A, Bernardeau-Esteller J, Giménez-Casero J, Marín-Guirao L, García-Moreno P, Franco-Navarro I, Fraile Nuez E, Mercado-Carmona J, Ruiz JM. 2019. *Collapse of macrophytic communities in a eutrophicated coastal lagoon*. XXth Simposio de Estudios del Bentos Marino. Braga (Portugal). Septiembre 2019.

Carreño, M.F. 2015. *Seguimiento de los Cambios de Usos y su Influencia en las Comunidades y Hábitats Naturales en la Cuenca del Mar Menor, 1988-2009, con el Uso de SIG y Teledetección*. Tesis Doctoral. Universidad de Murcia.

García-Pintado, J., Martínez-Mena, M., Barberá, G., Albaladejo, J., Castillo, V.M., 2007. Anthropogenic nutrient sources and loads from a Mediterranean catchment into a coastal lagoon: Mar Menor, Spain. *The Science of the Total Environment* 373, 220–239.

IEO. 2019. *Informe parcial de resultados sobre la evolución de los efectos de la DANA en el Mar Menor*. Seagrass Ecology Group-IEO, Centro Oceanográfico de Murcia.

MAGRAMA. 2015. *Caracterización de las fuentes de contaminación de aguas subterráneas mediante técnicas multisotópicas*. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.