

El papel social de la ecología: del dato a la pancarta (el caso de un ecosistema que se resiste a la eutrofización)*

Ángel Pérez Ruzafa**

PREÁMBULO: CIENCIA, ECOLOGÍA Y SOLUCIONES CIENTÍFICAS

Poco a poco, la sociedad empieza a mirar la ciencia y las opiniones de los científicos como un referente para la gestión de nuestro planeta y para las decisiones que tomamos ante numerosos aspectos de nuestras vidas. Hasta ahora, los científicos se consideraban personas aisladas en las “torres de marfil” de los centros de investigación y universidades, concentradas en investigar aspectos de la naturaleza y del universo alejados de las cuestiones cotidianas, pero que, quizás en un futuro más o menos lejano, terminarán siendo importantes para el desarrollo de avances tecnológicos que harán más fácil nuestras vidas. Sin embargo, en parte porque la distancia temporal entre el descubrimiento científico y su incorporación a nuestra actividad diaria se ha acortado considerablemente, en la actualidad la opinión de los científicos empieza a pesar también incluso en las decisiones políticas.

Esto es especialmente evidente en el ámbito de la Ecología. En apenas unas décadas, se ha pasado de que fuera un término casi desconocido a que esté presente en casi todos los productos de consumo y a que la preocupación por el deterioro del planeta y la contaminación de nuestros mares, ríos y costas, la calidad del aire o del agua, o las alteraciones del clima nos rodeen a todas horas en la prensa, la televisión o las redes sociales y en la política local, nacional e internacional.

Pero, ¿cuál es el papel real que debe jugar la ciencia en nuestras vidas? En alguna ocasión se escucha la opinión de que ya era hora de que los científicos tomen las decisiones. Esto, en mi opinión, es un enfoque totalmente equivocado. Este no es el papel de los científicos, sino el de los representantes políticos y sociales. Otra cosa es que la ciencia deba fundamentar muchos argumentos y utilizarse y aplicarse como apoyo a la toma de decisiones.

De hecho, acudiendo a las definiciones clásicas, “La ciencia es la rama del saber humano constituida por el conjunto de conocimientos objetivos y verificables sobre una ma-

* Discurso inaugural del curso 2019 de la Real Academia Canaria de Ciencias leído en el acto celebrado el día 25 de abril de 2019.

** Académico correspondiente de la citada institución.

teria determinada que son obtenidos mediante la observación y la experimentación, y que se caracteriza por la utilización del método científico para la verificación de las hipótesis”. Si nos detenemos a pensarlo, más allá del empleo de la lógica en el marco de la Filosofía, la Ciencia es la única herramienta que tenemos para responder preguntas con límites de error cuantificables y una probabilidad definida de que la respuesta a nuestras incertidumbres sea cierta. El método científico consiste precisamente en, hecha una pregunta y planteada una hipótesis sobre la respuesta, diseñar un experimento o la toma de datos que permitan comprobar si la ésta es cierta, fijando o controlando las variables que pueden determinarla. Una vez comprobada la hipótesis, y determinadas las variables que condicionan el comportamiento del sistema, podremos hacer modelos predictivos que anticipen el comportamiento de un determinado parámetro, climático, ambiental o biológico en función de lo que los condicionan.

En este contexto, el concepto de Ecología fue introducido por Haeckel ya en 1866 en su tratado sobre la morfología de los organismos (Haeckel, 1866) y la definió, sintetizada e interpretada libremente por Allee et al. (1949) como “el cuerpo de conocimiento relativo a la economía de la naturaleza, es decir la investigación de las relaciones totales del animal tanto con su ambiente orgánico como inorgánico, que incluyen sobre todo su relación amistosa y hostil con aquellos animales y plantas con los cuales entra directa o indirectamente en contacto; en una palabra, la Ecología es el estudio de todas las interrelaciones complejas a las que se refería Darwin como las condiciones de lucha por la existencia” (Stauffer, 1957).

Desde esta primera formalización se han añadido pocas cosas a lo que entendemos por Ecología. Las definiciones de Andrewartha como “el estudio científico de la distribución y la abundancia de los organismos” (Andrewartha, 1961) o de Krebs, en la misma línea, como el “estudio científico de las interacciones que determinan la distribución y abundancia de los organismos” (Krebs, 1972) se han centrado en la importancia de comprender la dinámica de poblaciones y la biogeografía. Otros ecólogos, como Odum que la describió como el “estudio de la estructura y función de la naturaleza” (Odum, 1963), se han concretado más en el funcionamiento del ecosistema como un todo complejo y en los flujos de energía que lo mantienen.

En la actualidad, las acepciones que propusieron los dos pioneros de esta disciplina en España, Ramón Margalef y Fernando González Bernáldez, que crearon dos escuelas bien definidas, territorial y conceptualmente, delimitan el espacio en el que nos movemos los ecólogos. Para Margalef, la Ecología era la “Biología de los ecosistemas” y más tarde lo llevó más lejos para definirla como la “Biofísica de los ecosistemas” (Margalef, 1974, 1992). Con ello marcaba un camino claro de estudio y aproximación a los problemas ambientales enmarcado por las leyes de la termodinámica y la física, cuyas predicciones no tienen por qué ser necesariamente deterministas y responder a relaciones lineales o funciones bien definidas, sino que podrían estar más cerca de las leyes que rigen el mundo cuántico, probabilista, y en el límite del caos donde dominan las leyes del azar.

Por su parte, González Bernáldez la definió como la “Ciencia de los ecosistemas” (González Bernáldez, 1970), con una perspectiva más abierta a las ciencias sociales y a la geografía física y humana, desde luego también necesarias para entender el funcionamiento actual de nuestro planeta y sus perspectivas de futuro.

En definitiva, podemos considerar la Ecología como “una forma holística de abordar los aspectos de la naturaleza en los que aparecen implicados los seres vivos (incluido el hombre)” (Pérez-Ruzafa, 2013).

LA ECOLOGÍA: UNA CIENCIA PARA LA RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS AMBIENTALES

Ecólogo vs ecologista

Frente al término único anglosajón “*ecologist*” para referirse a toda persona interesada en la ecología, en español, un idioma rico en matices, se distingue entre los conceptos “ecólogo” y “ecologista”. En cierta ocasión, un periodista le preguntó a Ramón Margalef la diferencia entre ambos términos. Él se limitó a responder: “Es fácil, ecólogo es un ecologista, lo que sociólogo a socialista”. Con ello resaltaba que la Ecología es una ciencia, mientras que el ecologismo es un movimiento social e, incluso, una actitud ante la vida. La Ecología, por tanto, debe permitirnos conocer cómo funciona la naturaleza y, de este modo, poder anticipar y resolver los problemas que afectan a su buen funcionamiento y que ponen en peligro la biodiversidad, los equilibrios en los ecosistemas y, en definitiva, nuestra propia existencia y calidad de vida.

En cualquier caso, es altamente improbable que la especie humana pueda acabar con la vida. Ésta se ha recuperado ya en multitud de ocasiones de catástrofes o extinciones en masa que han reducido sensiblemente su biodiversidad tanto en tierra como en los océanos, y siempre ha resurgido alcanzando nuevas cotas de complejidad. En todos los niveles de organización biológica, desde el individuo a las poblaciones, los ecosistemas o la evolución de la biosfera, la muerte de algunos componentes y la destrucción parcial del sistema parecen ser un requisito indispensable para su rejuvenecimiento y continuidad.

Al margen de que la naturaleza no nos necesite en un contexto evolutivo, el ecologismo lucha por preservar la integridad de los ecosistemas y del planeta. En ese sentido, debe fundamentarse en el conocimiento de los procesos que la mantienen. Su papel es esencial como revulsivo social para concienciar de la necesidad de no sobreexplotar los recursos y de reducir los impactos que ponen en peligro nuestra propia supervivencia.

Ecología y ecologismo no son incompatibles y un ecólogo puede ser y sentirse ecologista. Pero ambos papeles están bien diferenciados en los objetivos y en los métodos, aunque ambos deberían ser igual de objetivos y asépticos en la búsqueda de la verdad.

La Ecología como ciencia ha sufrido importantes transformaciones en las últimas décadas. Hasta muy recientemente, se la ha venido considerando como una ciencia blanda en comparación con la Física o la Química. Meramente descriptiva, escasamente predictiva, con excesivos conceptos y pocas leyes definidas. La corriente autocrítica, representada por el libro de Peters (1991) “*A Critique for Ecology*”, se ha tratado de replantear la forma de abordar los problemas y el diseño experimental de los muestreos para la obtención de datos de campo (Underwood, 1997) con el fin de construir modelos más sólidos. Si bien los enfoques actuales son ya plenamente experimentales, la Ecología aún se enfrenta a la complejidad de los procesos que debe explicar, la multiplicidad de variables que los afectan y las amplias escalas espaciales y temporales de muchos problemas. Esto hace que, de hecho, esté más cerca, probablemente, como hemos comentado antes, de la física

cuántica que de la mecanicista de Newton, en un universo que es probabilístico y en el que rige el principio de incertidumbre.

La Ecología como ciencia con responsabilidad social

La creciente conciencia de la importancia de preservar los equilibrios de la naturaleza para nuestra propia supervivencia le ha dado a la Ecología una dimensión social sin parangón en otras ciencias. Está permanentemente en la calle, en los medios de comunicación y en las redes sociales. La gente utiliza sus conceptos y enunciados a diario, los productos de consumo la utilizan como marketing, se utiliza como arma política para desprestigiar y derrocar gobiernos, se ha convertido en bandera y pancarta de reivindicaciones sociales, movimientos y partidos políticos y es objeto de numerosas denuncias ante la justicia. En este contexto, la responsabilidad del ecólogo ya no se limita a hacer progresar el conocimiento, sino que debe dar respuesta a multitud de interrogantes con consecuencias cotidianas en la calidad de vida y en la toma de decisiones de gestión política o empresarial e, incluso, judiciales.

El papel del ecólogo como profesional

Por esto, el papel del ecólogo como profesional va ya más allá de la ciencia tradicional, para centrarse en la resolución de cuestiones ambientales relativas al funcionamiento de los ecosistemas. Ello requiere plantear de forma adecuada los problemas y proponer soluciones, en un contexto en el que si lo que genera conocimiento es la ciencia, lo que responde preguntas es el método científico.

Una de las actividades habituales de los ecólogos que se dedican a la actividad profesional es el diagnóstico de la salud de los ecosistemas en el marco de la legislación vigente, tanto a través de la evaluación de impacto ambiental (EIA) o el establecimiento del estado de calidad ecológica, un imperativo de las directivas europeas como la Directiva Marco del Agua (European Union, 2000).

De acuerdo con su definición jurídico-administrativa (Real Decreto legislativo 1302/1986; Real Decreto-Ley 9/2000; Ley 21/ 2013), una EIA debe anticipar, detectar, caracterizar, evaluar y predecir, mitigar, corregir, prevenir y evitar la aparición de las alteraciones de los ecosistemas provocadas por la acción humana. De esto se deriva que es un procedimiento complejo que debe abarcar multitud de facetas ecológicas y técnicas que no pueden ser abordadas por un único perfil profesional.

De este modo, realizar el diagnóstico del estado de salud de un ecosistema, incluyendo las acciones de detectar, caracterizar, evaluar y predecir las posibles consecuencias de una determinada acción, corresponde a los profesionales de las ciencias de la vida, de acuerdo con su especialización en los distintos niveles de organización biológica que se vayan a ver principalmente afectados, sin perder la visión integradora y holística a nivel de ecosistema y biosfera. Por su parte, mitigar y corregir ya queda fuera del ámbito de los ecólogos, y el diseño de acciones, protocolos, procedimientos o tecnologías correctoras o mitigadoras de los impactos previsibles correspondería a las distintas ingenierías, entre ellas las ingenierías químicas y ambientales. Finalmente, las tareas de prevenir y evitar son responsabilidad de los gestores y administradores públicos que deben tomar las decisiones y elaborar sus políticas valorando los diagnósticos y consecuencias determinados por los primeros y las posibles alternativas propuestas por los segundos, en un contexto socioeco-

nómico dado, y con un análisis costo-beneficio realista, que incluya los costos ambientales y para la calidad de vida tanto a corto como a largo plazo.

Sin embargo, el primer problema de estos procedimientos es que lo que debería ser un equipo multidisciplinar con reparto de tareas en función de los distintos aspectos y objetivos del mandato de una EIA, se confunde en la práctica con el hecho de que cualquier profesional cualificado, entendido esto de una forma tan laxa que sería inaceptable en el caso del diagnóstico de enfermedades en la salud humana, puede realizar o firmar una EIA.

La Ecología como ciencia y la búsqueda de respuestas

Con frecuencia, a la hora de abordar los problemas de la vida cotidiana que requieren la evaluación fundamentada de alternativas, surge la discrepancia entre si lo que se necesita es un estudio científico o un informe técnico, o si las universidades y centros de investigación son los más adecuados para abordar dicha tarea frente a consultorías y empresas especializadas. Se asume, del mismo modo, la dicotomía entre ciencia básica y ciencia aplicada a la hora de valorar las aplicaciones inmediatas de la actividad científica a la resolución de dichos problemas. De hecho, en este contexto, las universidades y centros de investigación suelen ser dejados de lado, o escasamente valorados en los concursos públicos y licitaciones administrativas, ante la convicción generalizada de que los investigadores están particularmente interesados en la realización de tesis doctorales o en las publicaciones científicas y esto no es lo que necesita un problema de carácter aplicado, en el que deben tomarse decisiones de gestión, normalmente en espacios breves de tiempo.

Lo cierto es que dichas dicotomías son una falacia. A la hora de la verdad, para la toma de decisiones deben responderse preguntas que dejen claro las ventajas e inconvenientes de unas alternativas frente a otras. Por ejemplo, a la hora de diagnosticar el estado ecológico, un impacto ambiental o la salud de un ecosistema debe responderse a las preguntas ¿Se ha producido un cambio significativo en el ecosistema?, ¿Dicho cambio supone un deterioro?, ¿Qué factores ambientales o antrópicos han inducido ese cambio? y, como se comentaba anteriormente, la única manera de responderlas es aplicando el método científico, de modo que podamos llegar a conclusiones (cuantitativas, y lo más objetivas posible) acerca de la ocurrencia, intensidad, la dirección y sentido o la relevancia y consecuencias del impacto, acompañadas de una estima de su fiabilidad (límites de error).

Además, todo estudio que implique a los sistemas biológicos tiene que afrontar el hecho de que estos presentan una gran heterogeneidad espacial y grandes fluctuaciones temporales que pueden mostrar ritmos y tendencias diferentes en cada localidad, de tal modo que la abundancia de individuos y otros parámetros descriptores del ecosistema contienen un ruido de fondo elevado que dificulta el poder detectar diferencias entre unas localidades y otras y poder asociarlas con cambios ocurridos en una de ellas (Figura 1) (Glover, 1979; Pechmann et al., 1991; Underwood, 1991). De hecho, uno de los retos de la Ecología es, precisamente, ser capaz de diferenciar la variabilidad natural de la producida por las acciones del hombre (Underwood, 1992) y una evaluación de impacto ambiental, por tanto, tiene que resolver dicha dificultad o no cumplirá su cometido.

Por ello, todo análisis del efecto de una determinada acción sobre los organismos, sus poblaciones o los ecosistemas, debe partir de un diseño experimental de muestreo que haga posible descartar o aceptar la hipótesis nula de que dicha acción no ha supuesto ningún impacto (Underwood, 1991; 1994).

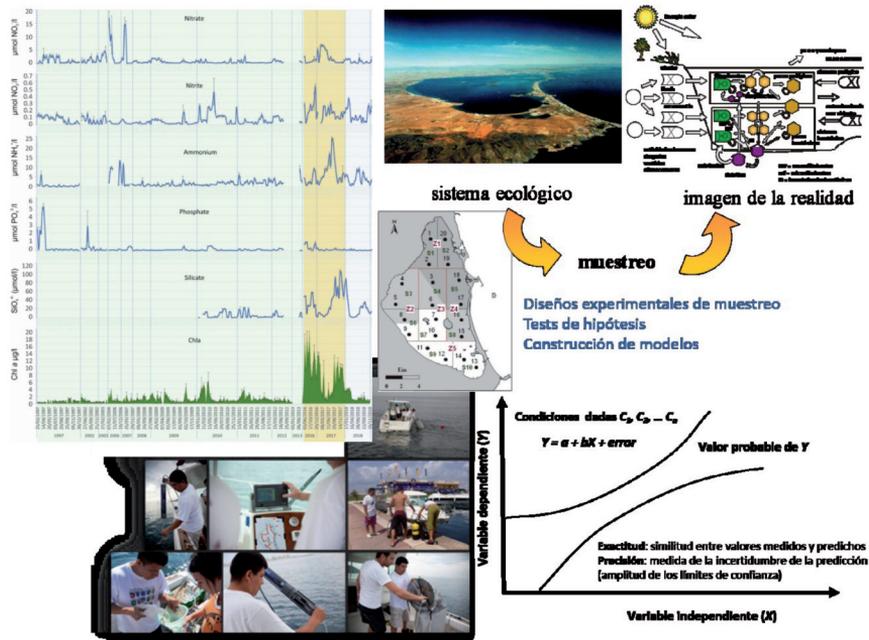


Figura 1.- Los ecosistemas, incluso los aparentemente más sencillos, son extremadamente complejos y muestran una elevada variabilidad espacio-temporal en sus condiciones ambientales y en la dinámica de sus componentes, por ello, para poder estudiarlos es necesario construir modelos que permitan hacer predicciones acertadas. Pero para ello, y para poder comprobar hipótesis sobre si los cambios que muestran se corresponden con factores determinados, como el cambio climático o los impactos humanos, es esencial realizar diseños experimentales de muestreo que controlen dicha variabilidad y garanticen la exactitud de las respuestas y la mayor precisión posible.

Un elemento importante de las normativas de evaluación de impacto, que suele ser obviado, es la realización de planes de seguimiento. En ciencia, este aspecto es básico, porque solo desarrollándolos con el diseño adecuado podrán comprobarse las predicciones realizadas y construirse un cuerpo teórico, con una masa crítica de datos, que permita pasar de los modelos conceptuales a modelos de regresión predictivos, en los que el valor de una variable descriptora del estado e integridad ecológica del ecosistema, como la riqueza de especies, la abundancia de individuos de una de ellas o la diversidad, pueda ser anticipado para un escenario dado a partir del valor de una o varias variables independientes, ya sean ambientales o indicadoras de contaminación o presión ambiental, que lo definan.

En la construcción de dichos modelos es importante diferenciar entre su precisión y su exactitud. Ambos atributos son importantes, pero tienen connotaciones distintas que conviene priorizar. Mientras que la precisión hace referencia a la repetibilidad o el grado de dispersión de los valores cuando se realiza una medida, la exactitud indica hasta qué punto los valores obtenidos se ajustan a la realidad. En los trabajos científicos y documentos técnicos suele hacerse especial hincapié en la precisión ya que cuenta con des-

criptores estadísticos como el error típico o la desviación estándar y generalmente depende de las características del aparato o sistema de medida. Sin embargo, el grado de exactitud no suele mencionarse ya que no tiene más medidor que la comparación con la realidad, y ésta es precisamente lo que desconocemos y deseamos conocer. Dicha exactitud depende fundamentalmente del diseño de muestreo. Es decir, de si las muestras obtenidas y las escalas espaciales y temporales en las que se ha realizado el muestreo representan toda la variabilidad espacio-temporal de los procesos estudiados y de si nuestra propia observación y los procedimientos empleados no alteran ya de por si la respuesta de los organismos o el funcionamiento del sistema.

Es evidente que de poco sirve contar con aparatos y sistemas de medición precisos si los resultados no tienen nada que ver con la realidad debido a un diseño experimental o de muestreo inadecuado o la consideración de variables irrelevantes para el problema a estudiar.

Está claro que responder a las preguntas implicadas en una EIA o en el diagnóstico del estado de salud de un ecosistema no es una tarea estandarizable en un protocolo aplicable a cualquier lugar y circunstancia, más allá de los principios básicos del método científico, y requiere un conocimiento tan profundo como sea posible de cómo funcionan los ecosistemas en general, y el sistema estudiado en particular.

Responder a las preguntas que permitan la toma de decisiones en la gestión ambiental no es por tanto cuestión de ciencia básica o aplicada, de informes técnicos o trabajos científicos, de centros de investigación o consultorías. O se responde a las cuestiones planteadas o se quedan sin solventar, limitándonos a rellenar un formulario, y el único método con el que contamos es el método científico, que puede aplicarse bien o mal, independientemente de quien lo haga. Si las preguntas son relevantes y se responden adecuadamente, serán útiles para resolver el problema y, sin duda, los resultados serán publicables en revistas científicas.

Lo cierto es que las normativas de EIA no consideran la importancia de estos aspectos y hay una falta de sintonía grave entre la legislación, su aplicación y las necesidades que la originaron (García-Charton, 2003). Con demasiada frecuencia, las EIA se consideran meros trámites administrativos que tienen poco que ver con la ciencia o el método científico y se resuelven a menudo mediante “recorta y pega” de otros estudios realizados en otros lugares, fuera de contexto y con consideraciones y conclusiones especulativas, en el mejor de los casos basadas en datos reales, pero completamente inútiles, si no falsas.

En esta dicotomía entre formular preguntas relevantes y responderlas con fiabilidad vs. limitarnos a aplicar normativas o protocolos administrativos, los ecólogos sentimos que somos como la conciencia de los técnicos de administraciones y consultorías. Estos, ante nuestras advertencias y recomendaciones, tienen el sentimiento de que abordar los estudios desde una perspectiva científica es complejo y costoso en términos económicos y de tiempo, y ante las urgencias por obtener los informes y los resultados, no se plantean si se responde adecuadamente a la pregunta, sino si el trabajo cumple con la legislación o si se adecua a un determinado pliego de prescripciones técnicas. Muchas veces se da la paradoja de que las urgencias por tener los informes y el ahorro económico en los estudios para el diagnóstico del problema no se corresponden con los tiempos posteriores para la toma de decisiones, la implementación de medidas, los costos de ejecución de las mismas, o los potenciales costos de restauración cuando las decisiones no han sido acertadas.

EL MAR MENOR COMO ECOSISTEMA COMPLEJO BAJO PRESIÓN ANTRÓPICA QUE SUSCITA MÚLTIPLES PREGUNTAS

Un buen ejemplo de lo que aquí se comenta es la evolución y situación ambiental del Mar Menor, una laguna costera situada en el SE de la península Ibérica (Figura 2). Con sus 136 km² de superficie y 4,5 m de profundidad media, es una de las mayores del Mediterráneo y particularmente singular por ser capaz de aunar una elevada producción biológica, que se traduce en importantes rendimientos pesqueros, y una calidad y transparencia de las aguas poco frecuentes en estos ambientes, lo que le confiere un atractivo único para actividades de ocio, turismo, deportes náuticos o talasoterapia.

Esto hace que las presiones antrópicas sean muy intensas y que las consecuencias de las mismas hayan supuesto un deterioro del ecosistema, hasta el punto de que han terminado por romper su equilibrio. Como consecuencia, la preocupación social ha ido en aumento en los últimos años. Gestionar dichas presiones requiere responder a un sinnúmero de cuestiones.

La minería en sus alrededores se remonta a tiempos de los romanos y, hasta la década de 1960, aportó sedimentos con altas concentraciones de plomo y zinc a la laguna a través de las ramblas. Aún hoy, las lluvias torrenciales generan importantes cantidades de materiales de escorrentía cargados de metales pesados. Estos materiales ¿son un riesgo para la salud o quedan retenidos en los sedimentos lagunares?, ¿pueden incorporarse a la red trófica y bioacumularse en los productos de la pesca si se realizan dragados o se alteran las condiciones del fondo?

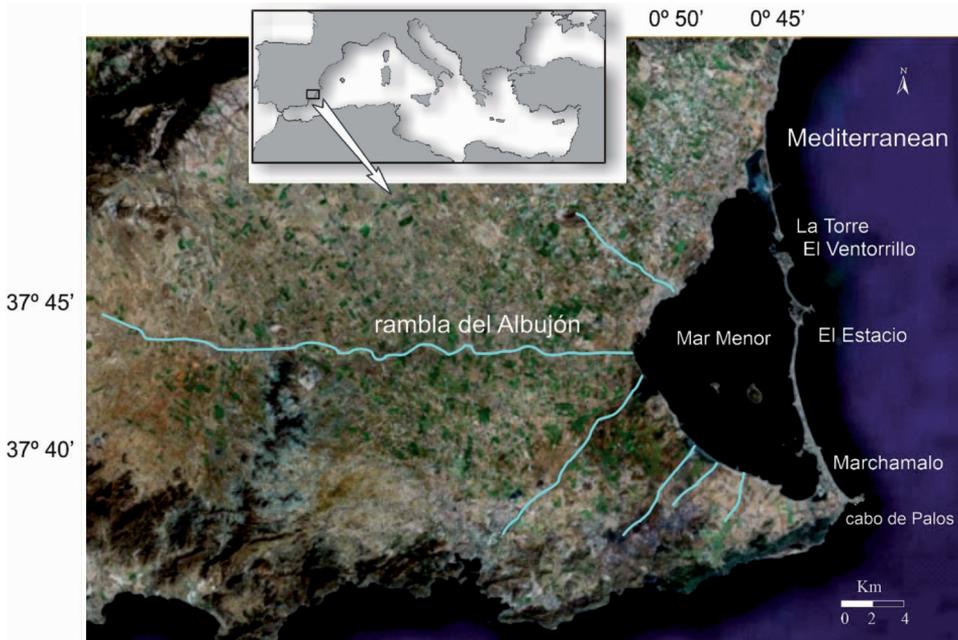


Figura 2.- Localización de la laguna costera del Mar Menor y su cuenca de drenaje con indicación de las principales ramblas y de los canales de comunicación con el Mediterráneo.

El dragado del canal de El Estacio produjo modificaciones importantes en las condiciones hidrodinámicas e indujo cambios muy señalados en las comunidades de la laguna, destacando la colonización del alga *Caulerpa prolifera*, el consiguiente aumento progresivo de materia orgánica y de las condiciones anóxicas en el sedimento y la drástica reducción de las capturas de mújol. Ahora, tras el paulatino proceso de eutrofización sufrido, la entrada masiva de nutrientes procedentes de la actividad agrícola y la pérdida de calidad del agua, hay quienes proponen el dragado de canales para aumentar las tasas de renovación. ¿Sería esto realmente una solución?, ¿sería preferible restituir el canal de El Estacio a su calado original?

Durante décadas se han estado colocando diques, dragando y vertiendo sedimentos para la creación y el mantenimiento de playas artificiales. Estas acciones han demostrado producir efectos contrarios a los esperados, favoreciendo el enfangamiento, la turbidez y la deposición de materiales orgánicos. ¿Deben quitarse los espigones?, ¿producen los mismos efectos en todas las playas?, ¿es posible recuperar los ambientes deteriorados?

La construcción de balnearios sobre pilares ha sido la solución tradicional en el Mar Menor para el baño en áreas pedregosas o fangosas. En dichos pilares, en las zonas oscuras bajo las plataformas se asientan comunidades esciáfilas, con una elevada diversidad, constituidas entre otros muchos organismos por filtradores bentónicos como esponjas, cnidarios, briozoos, ascidias. ¿Son una buena alternativa a las regeneraciones de playas?, ¿qué contribución hacen al mantenimiento de la calidad de aguas?, ¿existe un diseño óptimo para maximizar sus efectos positivos y reducir cualquier posible efecto negativo?

Frente al proceso de eutrofización, ¿cuál es la contribución de las aguas subterráneas?, ¿son los filtros verdes una solución?, ¿dónde y cómo debemos construirlos?, ¿sirven para algo los canales perimetrales, tanques de tormenta, etc.?, ¿en cualquier sitio?, ¿pueden poner en riesgo el aislamiento de freáticos y masas de agua?, ¿qué papel han jugado las proliferaciones de medusas en el control del proceso de eutrofización durante los últimos 20 años?

Continuamente surgen éstas y otras muchas incertidumbres de cara a la correcta gestión de la laguna: ¿cómo afectan las distintas actuaciones a la pesca?, ¿es la navegación a motor un problema ecológico o simplemente de gestión de uso?, ¿producen los puntos de amarre algún tipo de problema ambiental o pueden ser promotores de diversidad de hábitats y biodiversidad?...

Responder todas estas preguntas requiere planteamientos científicos y diseños experimentales que tengan en cuenta el funcionamiento de las lagunas costeras y las singularidades del Mar Menor.

Las lagunas costeras como sistemas complejos

Las lagunas costeras son ecosistemas en la transición tierra-mar, caracterizados por ser someros, relativamente aislados del mar y con un elevado número de fronteras con fuertes gradientes físicos, químicos y biológicos (UNESCO, 1981). Debido a su escasa profundidad, los fondos suelen estar bien irradiados, condicionando además a las corrientes, y los vientos y las olas afectan a toda la columna de agua, favoreciendo la resuspensión de sedimentos, nutrientes y pequeños organismos. Su escaso volumen hace que las condiciones climáticas les afecten de forma más extrema y rápida que al mar adyacente, lo que las convierte en ambientes fluctuantes.

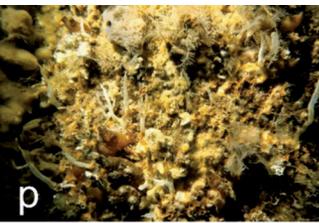
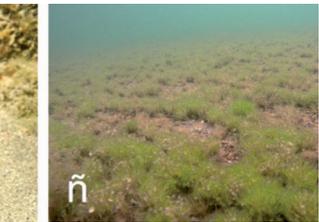
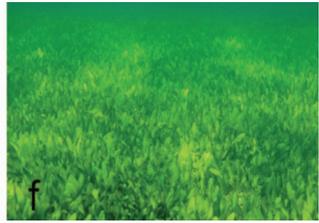
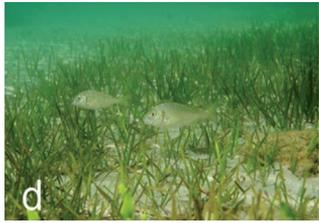
Debido a estas características, las lagunas costeras están entre los ecosistemas con una productividad biológica más elevada, superior en algunos casos a la de las áreas de afloramientos (Knoppers, 1994), y actúan como criadero y zona de reclutamiento de numerosas especies de peces estuáricos y migradores que penetran en ellas buscando refugio y alimento (Yañez-Arancibia y Nugent, 1977; Clark, 1998).

Los pescadores de todo el Mediterráneo utilizan el conocimiento ancestral de dichas migraciones para el diseño de artes de pesca, con una marcada convergencia cultural, realizadas a base de encañizadas y barreras que permiten el paso de los juveniles en su camino de entrada a las lagunas, pero impiden el de los adultos que tratan de salir de ellas para la reproducción.

En conjunto, aparte de por su productividad biológica, las lagunas costeras también son utilizadas para la producción salinera, ejercen un papel de eliminación de nutrientes, sustancias orgánicas (plaguicidas, fármacos) o metales pesados en la columna de agua, y de retención de los mismos en los sedimentos. Amortiguan y regulan la dinámica sedimentaria en las costas en las que se encuentran, y los intercambios de aguas en la interfaz tierra-mar o los riesgos de inundación. Igualmente, suelen comportarse como captadores netos de CO₂, retrasando las consecuencias del efecto invernadero, y asimismo generan diversidad genética seleccionando poblaciones adaptadas a valores ambientales extremos y fluctuantes, que pueden resultar claves para la supervivencia de las especies en los escenarios de cambio climático. Además, también aportan toda una serie de bienes y valores culturales y estéticos.

En general, los ecosistemas muy productivos suelen ser simples y con mecanismos homeostáticos poco desarrollados y, por tanto, los ecosistemas acuáticos con una productividad elevada suelen presentar una baja calidad de aguas debido a la alta concentración de fitoplancton en la columna de agua. Pero el Mar Menor, sin embargo, a pesar de que presenta un rendimiento pesquero alto y semejante al de otras lagunas con sus mismas características geomorfológicas, es de las pocas que, al mismo tiempo, presenta aguas transparentes y una elevada biodiversidad y biomasa en sus comunidades bentónicas (Figura 3).

► **Figura 3.-** El Mar Menor presenta una gran heterogeneidad de comunidades bentónicas, dependiendo del tipo de sustrato, la zonación vertical, la exposición al oleaje, el confinamiento y el nivel de iluminación. a: acúmulos de conchas de *Cerastoderma* y otros moluscos en el medio y supralitoral; b: arribazones de *Cymodocea nodosa* y algas; c: Comunidades de la roca mediolitoral; d-e: praderas de *Cymodocea nodosa* sobre arena; f: pradera de *Caulerpa prolifera* sobre fango; g: pradera mixta de *Caulerpa prolifera* y *Cymodocea nodosa* sobre fango; h: pradera de *Caulerpa prolifera* sobre fango y roca con colonias de *Amathia verticillata* (delle Chiaje, 1822); i: *Hippocampus guttulatus* Cuvier, 1829 en la pradera de *Caulerpa prolifera* sobre sustrato mixto con *Alsidium corallinum* y *Chondrophycus tenerrimus*; j: roca infralitoral superficial bien iluminada sin fucales con rodomeleáceas; k: arcillas rojas terrígenas compactadas infralitorales con *Pholas dactylus* Linnaeus, 1758; l: roca infralitoral superficial de modo batido, bien iluminada, con fucales; m: grupo de mújoles alimentándose en una comunidad de roca infralitoral colonizada por *Caulerpa prolifera* n-ñ: facies de *Acetabularia calyculus* en arenas finas infralitorales bien calibradas (n) y fondos de costra rocosa y cascajo (ñ); o-q: comunidades esciáfilas de aguas someras con esponjas, cnidarios, poliquetos, briozoos y ascidias en sustratos duros infralitorales con iluminación escasa, en los pilares bajo los balnearios.



Las actividades humanas en el Mar Menor

Pero, como se ha comentado anteriormente, y como consecuencia de los bienes y servicios que proveen, las lagunas costeras suelen ser sistemas bajo una intensa demanda de usos y presiones antrópicas.

En el caso del Mar Menor, algunos de estos usos, como las explotaciones salineras, dan lugar a una mayor diversidad de hábitats y especies, favoreciendo el establecimiento permanente o como parada migratoria de numerosas poblaciones de aves acuáticas.

Sin embargo, otros usos como la minería, cuya explotación se remonta a los fenicios y romanos, han producido impactos persistentes como consecuencia de la acumulación de residuos en los sedimentos lagunares y en los suelos de las ramblas que conducían los estériles desde la sierra minera.

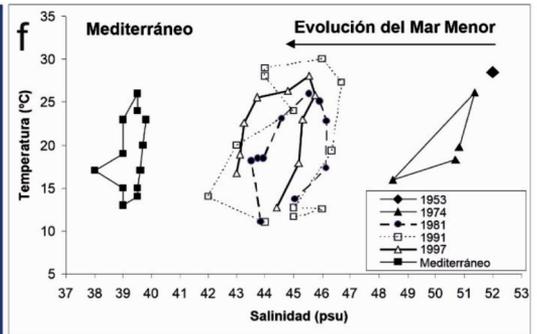
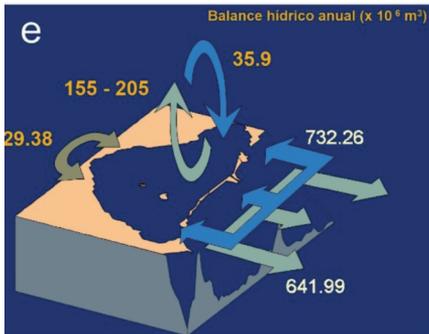
Los efectos de dicha actividad han sido objeto de una antigua preocupación social y es un buen ejemplo de la importancia de la denuncia social para la preservación de los ecosistemas. En el caso del Mar Menor, un grupo de vecinos, mediante publicaciones en la prensa diaria y denuncias ante notario acerca de los lodos cargados en metales pesados que llegaban a la laguna, lograron, de alguna manera, que dichos vertidos se desviarán hacia el mar abierto. Esto tuvo lugar a principio de la década de 1950, cuando el concepto de integridad ecológica aún no existía y ni siquiera había surgido el movimiento ecologista cuya materialización tendría lugar casi una década después a raíz de la publicación en 1962 del libro “La primavera silenciosa” de Rachel Carson.

Pero las presiones sobre el Mar Menor nunca han cesado y, desde entonces, a unas se han ido superponiendo otras. El crecimiento urbanístico ha ocupado y artificializado la mayor parte de la costa, y la deforestación de la cuenca y las obras costeras han alterado la geomorfología de la laguna, haciéndola más pequeña y menos profunda.

El dragado y ensanche del canal del Estacio indujo importantes cambios hidrológicos e hidrodinámicos en el Mar Menor que han ido produciendo un proceso continuo de mediterraneización de las condiciones hidrográficas de la laguna (Pérez-Ruzafa et al., 2005a) (Figura 4a-f). Ello acarreó, como se ha comentado, la colonización y establecimiento de nuevas especies como el alga *Caulerpa prolifera* y las especies de medusa *Cotylorhiza tuberculata* y *Rhizostoma pulmo* (Figura 4g-i).

La expansión de *C. prolifera* fue rápida, constituyendo praderas mixtas con la fanerógama *Cymodocea nodosa*, ocupando más del 80% de los fondos (Pérez-Ruzafa et al., 2012). La densidad que alcanza *C. prolifera* hace que actúe como trampa de sedimento, mientras que su producción no es utilizada en las redes tróficas debido a su contenido en

► **Figura 4.-** a-b: vistas aéreas de la encañizada del Estacio en los años 1970, con una profundidad de 0.5 m; c-d: vistas aéreas del canal y puerto deportivo del Estacio en los años 1980, con una profundidad superior a 5 m; e: balances hídricos en un año hidrológico medio en los años 1980 en la laguna del Mar Menor (Pérez-Ruzafa, 1989); f: diagrama S-T para el ciclo anual de los valores de Salinidad y Temperatura en las masas de agua del Mar Menor antes y después del dragado del canal del Estacio y del Mediterráneo, mostrando el proceso de mediterraneización sufrido por la laguna (Pérez-Ruzafa et al., 2005a); g-i: algunas de las especies con mayor influencia en la dinámica posterior del Mar Menor tras el dragado del canal del Estacio, de izquierda a derecha el alga *Caulerpa prolifera*, y las medusas *Rhizostoma pulmo* y *Cotylorhiza tuberculata*.



sustancias tóxicas como las caulerpinas, acumulándose progresivamente en los sedimentos que pasan a presentar déficits de oxígeno y producción de sulfhídrico debido a los procesos de descomposición. Aunque no parece haber competencia directa entre *C. prolifera* y *C. nodosa*, la combinación de una alta concentración en materia orgánica y en partículas finas propiciadas por la primera limita el desarrollo de la fanerógama (Figura 5).

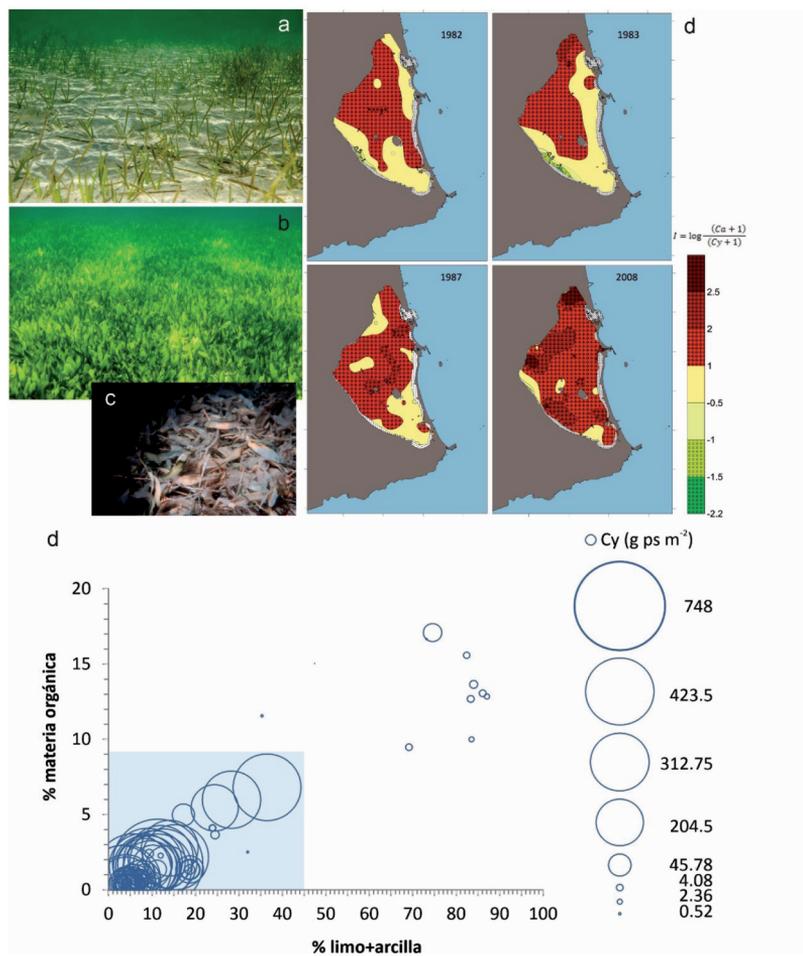


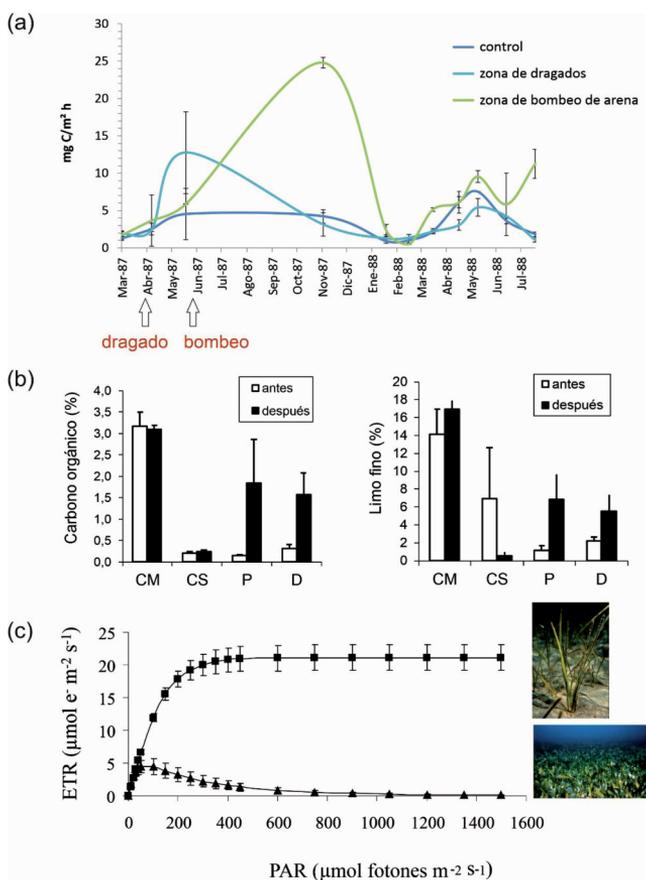
Figura 5.- El dragado del canal del Estacio en 1973 y los cambios hidrográficos consiguientes favorecieron la colonización del alga *Caulerpa prolifera* (b) que cubrió los fondos profundos donde antes se asentaban praderas monoespecíficas poco densas de la fanerógama *Cymodocea nodosa* (a). *Caulerpa* pierde anualmente los frondes aportando gran cantidad de materia orgánica al sedimento (c). La serie de mapas (d) muestra la rápida expansión de *Caulerpa* en el Mar Menor. La escala representa un índice de dominancia de *Caulerpa* (rojos) o de *Cymodocea* (verdes). Los amarillos corresponden a praderas con codominancia. d) *C. nodosa* tiende a ser muy escasa o desaparece cuando los sedimentos presentan concentraciones elevadas de materia orgánica y de partículas finas (Pérez-Ruzafa et al., 2012).

Los cambios producidos en los sedimentos lagunares condujeron a la caída drástica de las capturas de mújol, cuya pesca se vio reducida al mínimo, perdiéndose el uso de artes tradicionales como las pantasanas o las propias encañizadas.

Apenas cuando estas transformaciones estaban estabilizándose, a mediados de la década de 1980 comenzó una política bastante generalizada de “regeneraciones de playas”, que en realidad consistía en crear playas artificiales con la colocación de espigones y la traslocación de sedimentos mediante el correspondiente dragado y vertido de arenas.

En las condiciones del Mar Menor, los espigones y los diques ciegos afectan al hidrodinamismo y las corrientes litorales, y aunque con el oleaje dominante no impiden la erosión de la playa, sí favorecen la retención de algas flotantes, el enfangamiento y el aumento de materia orgánica, perjudicando el desarrollo de las comunidades esciáfilas asentadas bajo los balnearios tradicionales y reduciendo la calidad de las aguas y de baño. Además, la resuspensión de materiales y nutrientes activa la producción primaria microfítobentónica, al mismo tiempo que favorece la colonización y expansión de *Caulerpa prolifera*, que en aguas transparentes se ve limitada por la luz intensa, acelerando asimismo el enfangamiento y el aumento de materia orgánica en el sedimento (Figura 6).

Figura 6.- Los vertidos y dragados de arena para las regeneraciones de playas inducen el aumento de la producción primaria del microfítobentos (a) (Pérez-Ruzafa et al., 1991); aumentando tanto la concentración de materia orgánica como de limo (b) (Pérez-Ruzafa et al., 2006). c) Con aguas transparentes, los fondos someros están dominados por *Cymodocea nodosa* que tolera radiaciones elevadas, pero con el aumento de la turbidez y la disminución de la luz fotosintéticamente activa disponible (PAR) producida por los vertidos de arena se favorece la proliferación de *Caulerpa prolifera* cuya capacidad fotosintética (ETR) está inhibida cuando la luz es intensa (García-Sánchez et al., 2012).



Tras veinte años de erosión y reposición de arenas, la retención de sedimentos por parte de las praderas mono-específicas de *Cymodocea nodosa* fue conformando secos paralelos a la playa que terminaron dejando zonas muertas entre ellos y la costa en las que el escaso hidrodinamismo ha provocado de nuevo la acumulación de fangos y materia orgánica y los consiguientes cambios en la fauna.

El proceso de eutrofización en el Mar Menor

Pero los problemas del Mar Menor se han ido sumando unos a otros. Cuando, en la década de 1990, los vertidos urbanos empezaban a estar controlados por el establecimiento de una red de saneamiento de las aguas urbanas, con alcantarillado y depuradoras en las poblaciones costeras, en la cuenca de drenaje empezaban a tener lugar profundas transformaciones con la sustitución de una agricultura extensiva de secano por otra intensiva de regadío.

El nivel freático comenzó a subir a razón de un metro al año y las aguas del acuífero empezaron a cargarse de nitratos. La combinación de un freático a ras de superficie en las zonas próximas a la línea de costa, con los vertidos directos de las salmueras del rechazo de la desalobración de las aguas bombeadas desde el acuífero, hicieron de la rambla del Albujón, que históricamente solo llevaba agua con las lluvias torrenciales, un curso permanente con una descarga media que llegó a ser de unos 400 L/s de agua (García-Pintado et al., 2007) con una elevada concentración de nitratos (más de 200 mg NO₃⁻/L) (Álvarez-Rogel et al., 2006), que amenazan con romper la integridad y complejidad ecológicas del Mar Menor de forma irreversible.

Mientras que la mayoría de los sistemas acuáticos son especialmente vulnerables a la eutrofización y muestran una respuesta directa en el aumento de la concentración de clorofila con la entrada de nutrientes (Cloern, 2001), el Mar Menor, sin embargo, a pesar de la descarga de nutrientes, ha sido capaz durante más de 20 años de conservar la transparencia de la columna de agua y mantener la concentración de clorofila en niveles semejantes a los periodos anteriores, con una relación negativa entre dicha concentración y la de nutrientes (Pérez-Ruzafa et al., 2005b). El único indicio de que el estado trófico estaba cambiando fueron las primeras proliferaciones de medusas (Pérez-Ruzafa et al., 2002).

Además, la relación entre la concentración de clorofila y la densidad del ictio-plancton, mostraba un ciclo límite. Esto sugería la existencia de mecanismos de regulación complejos y un control por parte de los niveles altos de la red trófica sobre los productores primarios en el plancton (*top-down*) (Pérez-Ruzafa et al., 2005b) (Figura 7).

Sin embargo, a pesar de que desde el ámbito científico se insistió en que las medusas jugaban un papel esencial en el mantenimiento del estado ecológico de la laguna, las administraciones dedicaron fondos a la pesca de medusas, en lugar de actuar sobre el origen del problema, las entradas de nutrientes.

Es un ejemplo de por qué, frecuentemente, los científicos sentimos la maldición de Casandra.

Según la mitología, Apolo, enamorado de Casandra, hija de los reyes de Troya Príamo y Hécuba, le concedió a ésta el don de la profecía. Sin embargo, al verse rechazado por ella, aunque le conservó el don, la maldijo con que nadie creyera jamás sus advertencias. Las consecuencias fueron dramáticas para Troya.

En nuestra actividad, los científicos buscamos el conocimiento de cómo funciona la naturaleza e inferimos y anticipamos, mediante modelos conceptuales o numéricos, las

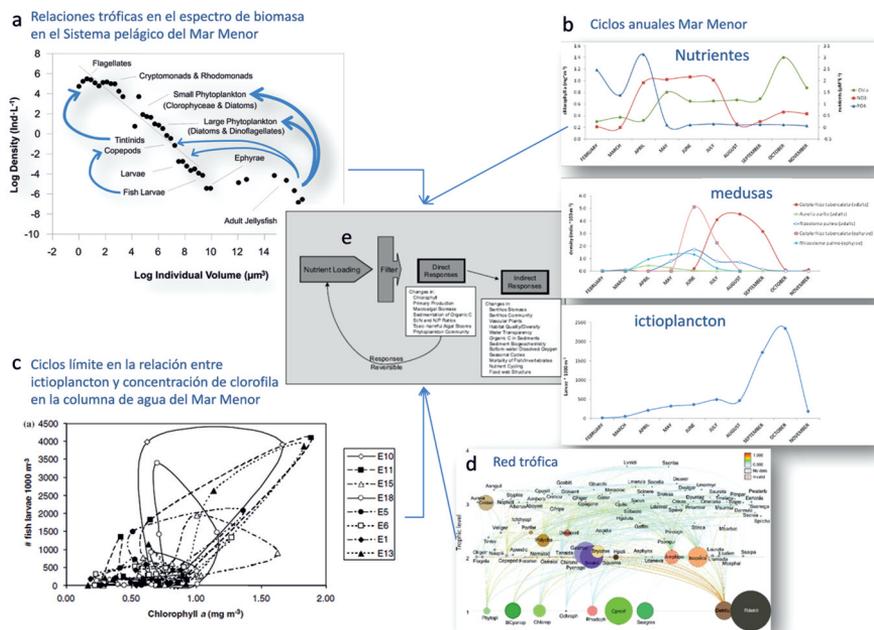


Figura 7.- La capacidad homeostática u homeorrética del Mar Menor ante la eutrofización se basa en su complejidad y heterogeneidad espacio-temporal. Su red trófica pelágica cuenta con (a) Control de arriba abajo (*top-down*) ejercido por medusas e ictioplancton sobre los diferentes compartimentos del espectro de tamaños y de biomasa desde los niveles más bajos y abundantes que corresponden a los flagelados pequeños (2 μm de diámetro) hasta los niveles superiores constituidos por las medusas adultas (hasta 40 cm de diámetro), según Pérez-Ruzafa et al. (2002); (b) un reparto estacional de los grupos que ejercen la regulación, con una sucesión de las tres especies de medusas y el ictioplancton; (c) ciclo límite en la dinámica estacional de la relación entre la densidad de larvas de peces y la concentración de clorofila *a* con una importante variabilidad espaciotemporal (los símbolos representan diferentes estaciones de muestreo: E1 a E18)(Pérez-Ruzafa et al., 2005) y d) una compleja red trófica con un importante componente de diversidad y biomasa bentónica. Todos ellos contribuyen a conformar los filtros y retardos que Cloern (2001) plantea como mecanismos de defensa a la entrada de nutrientes en los ecosistemas marinos costeros.

consecuencias de las actividades humanas o los cambios ambientales. Frecuentemente se nos acusa de estar alejados y ajenos a los problemas reales del mundo que nos rodea. Pero cuando decidimos salir y advertir de los cambios que se avecinan por culpa de las actuaciones que se acometen ignorando el funcionamiento de la naturaleza, pocas veces se nos hace caso y vemos irremediamente como estamos abocados a un desenlace que podría haberse evitado. La impotencia que se siente es mayor cuando, con frecuencia, no son únicamente las personas ajenas a la ciencia las que ignoran o no creen en nuestras conclusiones. Muchas veces, son los propios colegas del ámbito científico los que las ponen en duda. Unas veces en el ejercicio sano del método científico y otras, lamentablemente, por otro tipo de intereses. Aunque el criticismo siempre es bueno porque nos obliga a ser cuidadosos y

exigentes con los diagnósticos y las opiniones basadas en los datos, tiene el lado negativo de que cuando no tiene lugar en una mesa de trabajo, sino en los medios de comunicación, produce confusión social.

Un problema añadido para los que trabajamos en el medio marino es que mientras que los proyectos de obras costeras, puertos deportivos, playas inmensas de arena o paseos marítimos ajardinados... se presentan en maquetas e imágenes atractivas para los usuarios, las predicciones sobre sus impactos realizadas desde la ciencia se refieren a comunidades y propiedades de los ecosistemas que no se ven a simple vista desde la costa. Aquí se aplicaría el refrán que dice “ojos que no ven, corazón que no siente”.

Tarde o temprano, el deterioro alcanza niveles que ya se hacen evidentes, pero entonces suele ser ya demasiado tarde.

Esto pasó en el Mar Menor en 2016 cuando, tras décadas de advertir de la situación y alertar apenas un año antes de que el sistema estaba a punto de colapsar, repentinamente la rotura del ecosistema se hizo evidente, con aguas completamente turbias y verdosas y la muerte de la vegetación por debajo de los 3 m de profundidad.

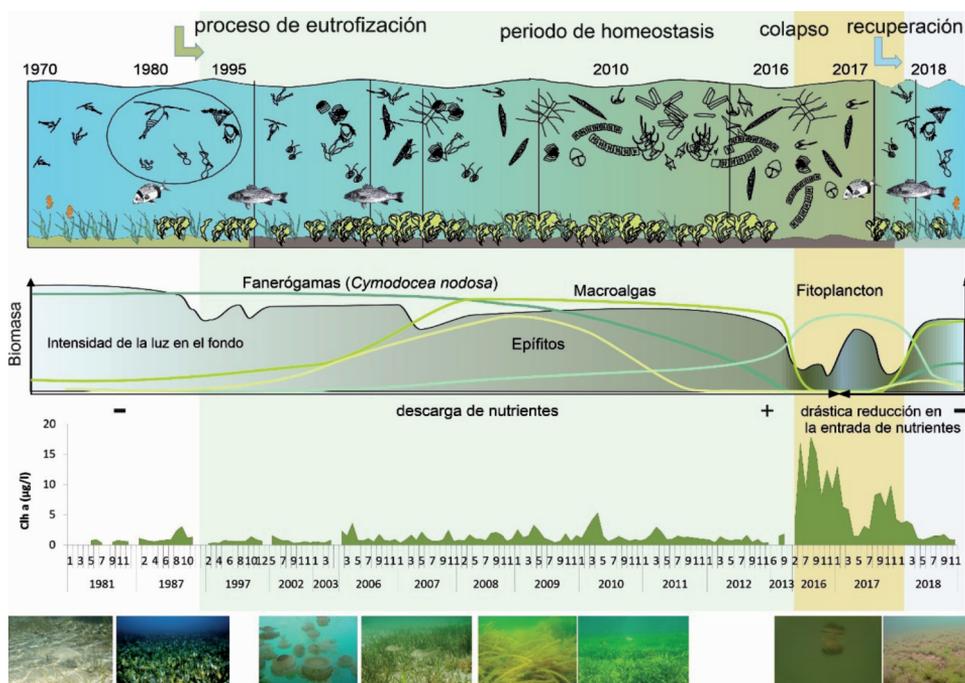


Figura 8.- Fases del proceso de eutrofización desarrollado en el Mar Menor. Se inició en la década de 1990 tras el cambio de agricultura de secano por regadío. Durante 20 años, a pesar de la entrada de nutrientes, se mantuvo la calidad de aguas gracias a los mecanismos de autorregulación y homeostasis cuyo indicador principal fue la proliferación de medusas. En 2016, el sistema colapsó, produciéndose la proliferación de fitoplancton y la pérdida de transparencia del agua. Tras las medidas que limitaron la entrada de nutrientes procedentes de la agricultura, el ecosistema entró en una rápida fase de recuperación de su integridad ecológica y de la calidad del agua (Pérez -Ruzafa et al., 2019), sin embargo, al no existir medidas estructurales estables, a mediados de 2019 se inició una nueva regresión.

Esto produjo una gran alarma social, que rápidamente pasó de la reivindicación al catastrofismo, dando por muerta a la laguna.

Diagnosticando el estado de salud

Pero el diagnóstico del estado de salud de un sistema vivo no es simple y, en su funcionamiento habitual, cuando se enfrenta a presiones externas o en los procesos de recuperación, se pasa por distintos estados que implican cambios de estructura y organización (Figura 9). Los ecosistemas, como los individuos, están continuamente enfrentándose a un mayor o menor grado de estrés ambiental. Esto ha hecho que, a lo largo de la evolución, hayan desarrollado mecanismos de regulación de sus funciones y parámetros ecológicos o fisiológicos, para mantenerlos dentro de ciertos márgenes de variación y, así, preservar su integridad.

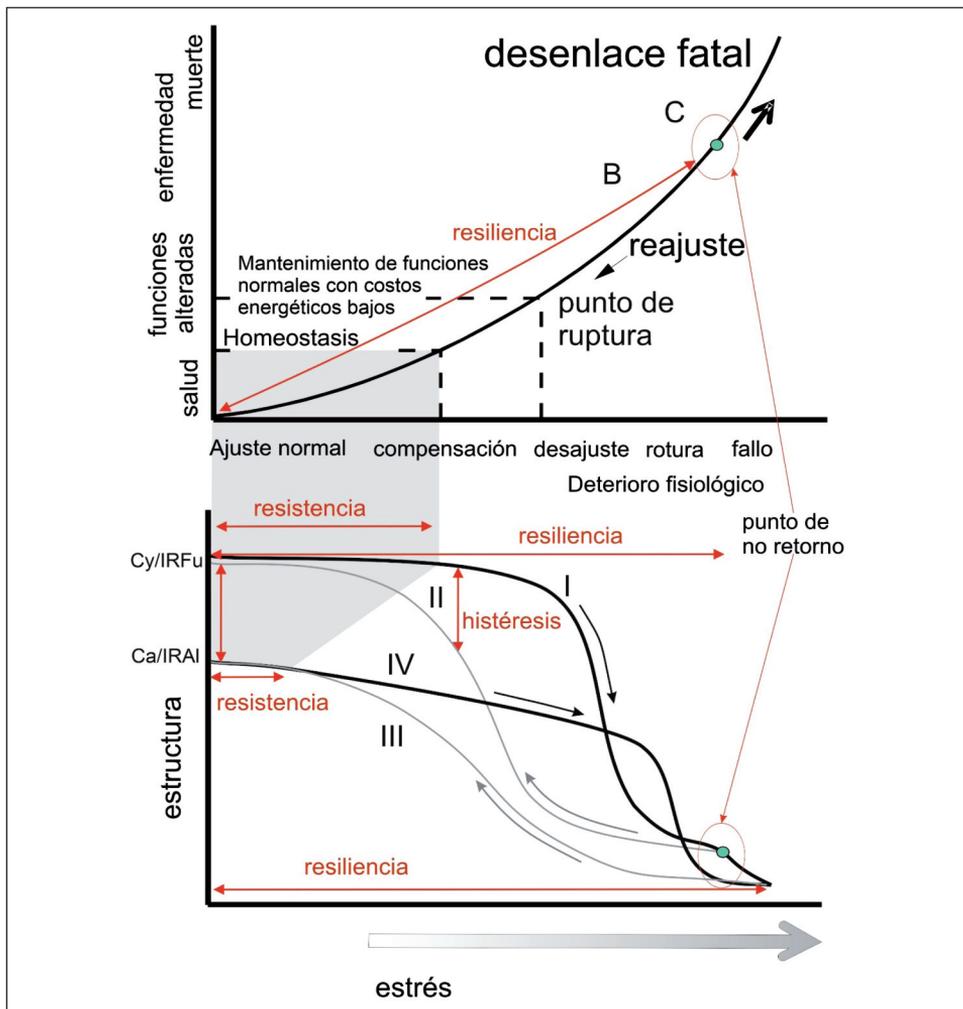
Los procesos implicados en esta regulación se conocen como mecanismos homeostáticos u homeorréticos. Odum (2000) empleó este último término para referirse a la capacidad de mantener el flujo de energía a través del ecosistema utilizando regulaciones de retroalimentación, aunque éstas muestran un comportamiento y pulsos más caóticos que las regulaciones fisiológicas que tienden, más bien, a mantenerse en estados de equilibrio (Odum & Barret, 2006). En el funcionamiento normal, los parámetros fisiológicos o descriptores de la estructura y organización del ecosistema sufren oscilaciones en su ajuste a las fluctuaciones ambientales, pero dichos cambios no implican un deterioro de la salud del sistema. La capacidad de mantenerse en esta región (área gris en la Figura 9), ante situaciones de estrés más o menos moderado, suele conocerse como resistencia o inercia. Cuando la presión sobre el ecosistema aumenta, o se mantiene en el tiempo, los cambios en dichos parámetros se hacen más marcados y, en un momento dado, en un contexto como el definido en la teoría de las catástrofes de René Thom (Thom, 1989), pueden alejarse bruscamente de los estados de equilibrio, produciendo un funcionamiento deficiente o descontrolado del sistema y una pérdida notable de la eficiencia en el control de la energía. Un ecosistema que ha sobrepasado su capacidad homeostática y ha sufrido un cambio brusco de estado, aún puede conservar cierta resiliencia, es decir, la capacidad de volver a su estado original y recuperar su integridad (ruta II en Figura 9). Dicha propiedad se mide en unidades de tiempo (Pimm, 1984; Tett et al., 2007).

Pero si el estrés es muy intenso o muy persistente, se puede llegar a un punto de no retorno en el que el daño es irreparable y el cambio de estado irreversible. En los individuos ello implica un proceso más o menos acelerado que lleva irreversiblemente a la muerte o, en el caso de los ecosistemas, a una configuración de las comunidades completamente diferente y un reinicio de la sucesión ecológica, en el que raramente el ecosistema recorrerá el mismo camino (ruta III en la Figura 9). Las nuevas comunidades serán más simples estructuralmente y sus capacidades de autorregulación menos eficientes, pero, al estar compuesto principalmente por especies pioneras en la sucesión ecológica, con estrategias de la *r* basadas en mantener tasas de reproducción altas y escasa biomasa, normalmente pueden tolerar un mayor estrés si volvieran las presiones ambientales antes de alcanzar un nuevo punto de ruptura (ruta IV). La diferencia entre el estado originario del ecosistema y el que presenta a lo largo de su proceso de recuperación por una u otra vía si cesa el estrés se denomina histéresis (Tett et al., 2007) o histéresis tipo II (Elliot et al., 2007).

Los modelos de respuesta al estrés, en la mayoría de los casos, son conceptuales y hay muy poca información cuantitativa sobre cuándo se alcanzará el punto de ruptura o el

de no retorno en un sistema. Cuando uno se enfrenta a un cambio brusco de estado como el que sufrió el Mar Menor en el verano de 2016, la gran incertidumbre fue y sigue siendo si el ecosistema será capaz de ser el mismo si se cortan completamente las entradas de agua dulce y nutrientes.

La monitorización continua o regular de un ecosistema facilita información básica que permite anticipar problemas, diagnosticar su estado ecológico y comprender los procesos implicados en su buen funcionamiento y mecanismos de autorregulación. Además, la única manera de que nuestra capacidad predictiva y de anticipación avance, de cara a la gestión de la biodiversidad y de la integridad ecológica de los ecosistemas del planeta, es disponer de redes de observación que permitan monitorizar el funcionamiento y las respuestas a las actividades humanas y los cambios ambientales en el mayor número posible de tipos de ecosistemas.



Aquí, sin pretender abandonar el hilo conductor de este discurso, cabe decir que se está perdiendo una gran oportunidad en el proceso de implementación de las directivas europeas, como la Directiva Marco del Agua. El hecho de que todos los países miembros de la UE tengan que realizar el seguimiento y la evaluación periódica del estado ecológico de todas sus masas de agua abre la posibilidad de generar un volumen de datos con multiplicidad de casos de estudio y variables de estado, hidrográficas, geomorfológicas, climáticas y socio-económicas, como nunca antes se había planteado, para encontrar regularidades y leyes generales en el funcionamiento de los ecosistemas acuáticos. Sin embargo, la total descoordinación entre grupos de investigación o consultorías implicadas, administraciones y países, y la falta de un protocolo de seguimiento más dirigido a la aplicación de diseños experimentales de toma de datos, hacen que sea muy difícil realizar comparaciones en un contexto de método científico.

¿Cómo ha conseguido el Mar Menor resistir casi 30 años de entrada masiva de nutrientes manteniendo aguas transparentes y una calidad ambiental razonablemente alta?

En una charla anterior, en mi discurso de entrada como académico correspondiente a esta Academia Canaria de Ciencias, ya hablamos de los mecanismos con los que la vida aprovecha la energía que fluye donde existen gradientes de cualquier tipo, en cumplimiento de la primera Ley de la termodinámica. Y también de cómo, ofreciéndole resistencia lo que le permite hacer un trabajo destinado a construirse a sí misma, podía contrarrestar la segunda Ley que predice que todo tiende al desorden.

Entonces planteábamos el papel de la conectividad restringida como promotora de heterogeneidad espacio-temporal en los ecosistemas insulares y lagunares y cómo esto podía

◀ **Figura 9.-** Estados funcionales de un organismo o ecosistema cuando está expuesto a un estrés creciente, desde la salud hasta diferentes grados de desajuste y deterioro fisiológico o estructural (modificado de Lloyd, 1972 y Elliott et al., 2007). Las líneas negras representan las rutas bajo dicho estrés creciente. El área gris corresponde a las regiones homeostáticas o homeoréticas donde el sistema mantiene sus parámetros dentro de los límites para el funcionamiento normal (resistencia). Cuando el estrés excede la capacidad de autorregulación del sistema, el sistema pierde parte de su integridad y muestra síntomas de alteración. Si el estrés persiste, se alcanza un punto de ruptura donde repentinamente la estructura y las funciones del sistema se alteran de manera significativa. En estas condiciones, si el estrés se detiene, el sistema aún puede recuperarse (las líneas grises representan las rutas de recuperación). El alcance del cambio que aún permite una recuperación se llama resiliencia. Sin embargo, si el estrés persiste o aumenta, el sistema puede alcanzar un punto de no retorno, lo que lleva a la muerte o un nuevo estado de equilibrio, generalmente con la estructura y las funciones disminuidas. La mayoría de los indicadores utilizados actualmente, tanto a nivel fisiológico como comunitario y de ecosistema, son útiles para detectar cambios en la región B. Sin embargo, debemos encontrar buenos indicadores y comprender los procesos en la región homeostática y los puntos de no retorno para anticipar un deterioro significativo o daño irreparable, respectivamente. En ambas regiones, la fase de transición puede ser difícil de anticipar porque pueden ocurrir cambios repentinos y dramáticos en el marco de la teoría de catástrofes. En el caso del Mar Menor estos cambios de estado vendrían representados por la sustitución de praderas de *Cymodocea nodosa* (Cy) o rocas infralitorales con Fucales (IRFu) por praderas de *Caulerpa prolifera* (Ca) o rocas infralitorales con *Alsidium corallinum* (IRAI)(modificado de Pérez-Ruzafa et al., 2018).

ser determinante de la formación de estructuras hidrodinámicas y biológicas complejas, con procesos de especiación, o diferenciación genética y adaptativa a nivel de poblaciones, introduciendo un componente de azar en la estructuración de las comunidades. Dicha heterogeneidad y los desfases en el funcionamiento entre sitios, constituirían una parte esencial de los mecanismos de autorregulación y amortiguación de los efectos del estrés ambiental.

Las lagunas costeras, como el Mar Menor, son un ejemplo perfecto para observar cómo su aislamiento relativo con respecto al mar abierto y las intensas diferencias en multitud de parámetros físico-químicos en sus fronteras (con el sistema terrestre, entre los sedimentos y la columna de agua y entre la masa de agua lagunar y el mar), se traducen en multitud de gradientes generadores de flujos de materia y energía. Además, todo ello tiene lugar a lo largo de distancias muy cortas, lo que intensifica los gradientes y sus flujos y la posibilidad de generar trabajo, haciendo estos ambientes altamente productivos desde el punto de vista biológico y pesquero. Pero, al mismo tiempo, las restricciones impuestas por los canales de comunicación con el mar les pueden conferir una complejidad estructural muy elevada.

El estudio de la red trófica del Mar Menor muestra que las claves para que la elevada producción biológica no se traduzca en una aceleración del ecosistema que conduzca a su desequilibrio se basan en dos mecanismos principales. El primero consiste en el desarrollo de una red trófica compleja, con múltiples vías para el flujo de energía y en la canalización de dicha producción hacia el sistema bentónico, en el que se desarrolla una gran biodiversidad y biomasa elevada de ramoneadores, filtradores, carroñeros y detritívoros. Un segundo mecanismo consiste en la exportación de biomasa fuera del ecosistema, a través de las numerosas especies migradoras que penetran como juveniles y regresan al mar abierto para su reproducción ya como adultos. En parte, dicha biomasa es extraída también por las aves acuáticas y la pesca. Finalmente, los excedentes de energía que no han podido procesarse, son acumulados en los sedimentos.

De este modo, tiene lugar lo que hemos llamado la paradoja lagunar. Como sistemas productivos, con intensos flujos de energía, sería esperable que la dinámica de las lagunas costeras se correspondiera con los estadios juveniles de la sucesión ecológica, de acuerdo con el modelo de Odum (1969). Y que, por tanto, fueran simples, dominadas por especies oportunistas y similares a los sistemas contaminados. Sin embargo, como hemos visto, algunas lagunas costeras, como el Mar Menor, son al mismo tiempo sistemas altamente complejos, heterogéneos y con una elevada biodiversidad, lo que les confiere una importante capacidad de autorregularse y defenderse de las presiones antrópicas.

En este contexto, el funcionamiento de una laguna costera y su capacidad homeostática, dependen íntimamente de la conexión restringida con el mar abierto. Las restricciones en los canales contribuyen a mantener, por un lado, los gradientes que las hacen ser muy productivas, y, por otro, el trabajo que les confiere una elevada heterogeneidad hidrológica que se traduce en heterogeneidad y diversidad biológica, conformando los mecanismos homeostáticos antes mencionados.

Es por eso que, aunque parezca contraintuitivo, la solución a la eutrofización y a la entrada de nutrientes en una laguna costera no es dragar sus canales para aumentar sus tasas de renovación y diluir cualquier contaminante. Esto solo provocaría la homogeneización del sistema y la pérdida de su capacidad de respuesta, lo que lo conduciría a acelerar el colapso, especialmente si las descargas de nutrientes se mantienen.

EL RÍO REVUELTO SOCIAL... ¿Y “CIENTÍFICO”?

Con frecuencia valoramos y cuantificamos la inteligencia por la capacidad de resolver problemas. Pero la verdadera inteligencia es la capacidad de anticiparlos y no llegar a tenerlos, y uno de los principales papeles de la ciencia debería ser contribuir a esto último. Sin embargo, es un objetivo difícil, a veces, por las propias limitaciones de los que nos dedicamos a la investigación, frecuentemente por la falta de medios humanos y materiales para desarrollar investigaciones en problemas que aún no se han hecho patentes y, como hemos visto, porque la maldición de Casandra siempre está vigente.

Sin embargo, una vez que el problema ha dado la cara, todos los esfuerzos deberían dirigirse a resolverlo. Si hay suerte, algunos investigadores ya tienen el terreno ganado porque han estado trabajando en ello con más o menos dificultades. En el peor de los casos, hay que partir casi de cero y diseñar investigaciones que acoten los factores clave y den con los planteamientos adecuados. Ello implica destinar fondos y medios a la investigación que se espera que se realice contra reloj.

Pero mientras se está en éstas, la sociedad se impacienta y reclama soluciones inmediatas. Los datos que, en algunos casos, esgrimieron los científicos años antes, y que nadie atendió, se traducen ahora en alarma social, pasan a convertirse en pancartas y, casi inmediatamente, en armas arrojadas contras las administraciones. Se exigen responsabilidades y se piden dimisiones. Rápidamente, los problemas se politizan y se convierten en una oportunidad para quitar a unos y poner a otros, en una democracia mal entendida. Frecuentemente surgen voces que alimentan más el enfrentamiento y perpetuar la percepción de problema que la búsqueda de soluciones. Una vez que se erigen las pancartas, los datos y las opiniones fundadas pasan a ser ignoradas e incluso atacadas, teniendo más acogida cualquier opinión, incluso sin respaldo de dato alguno, que siga justificando la movilización (Figura 10).

El río revuelto social...



Figura 10.- Cuando el deterioro de la integridad ecológica de los ecosistemas se hace patente, surgen movimientos sociales de denuncia de la situación que ayudan a que el mensaje científico llegue a las esferas políticas y de toma de decisiones. Sin embargo, con frecuencia se utiliza dicha sensibilidad para utilizar la denuncia como arma política, donde se busca el enfrentamiento y perpetuar la alarma, más que la solución del problema, en el ánimo de desplazar a unos para posicionarse otros.

... y “científico”?



Figura 11.- El confusionismo social suele verse alimentado por el científico, en el que “expertos” de todo tipo se apuntan a opinar, incluso sin ser directamente especialista en el tema o de no disponer de datos que avalen las conjeturas. Aunque el criticismo debe ser inherente a la ciencia y es siempre bueno para la calibración de los diagnósticos, las opiniones infundadas suelen dificultar la toma de decisiones y el consenso social necesario para la actuación política y la puesta en marcha de medidas de gestión.

Algo similar a lo ocurrido en Canarias



Figura 12.- Polémica y opiniones contrapuestas en Canarias ante la proliferación de cianobacterias en el verano de 2017 y su relación con vertidos urbanos o el incremento de las temperaturas.

En este contexto, los científicos deben seguir trabajando y convencer a los gestores para que implementen las medidas necesarias, pero estos están más pendientes de contrarrestar las corrientes de opinión que de resolver las dificultades reales, incluso teniendo intención de hacerlo.

Una parte de la sociedad mira ahora a la ciencia como la única opción para encontrar soluciones, pero las sensibilidades se extreman en el caldo de cultivo de la politización del problema, y los diagnósticos y propuestas se juzgan más por a quién benefician que por su base científica.

Las posibilidades de tener un protagonismo inesperado y de captar financiación revuelven el mundo científico y surgen expertos con diagnósticos a la medida de lo que unos y otros quieren oír... y se discute todo y en todos los ámbitos. Incluso surge una resistencia inesperada a aceptar las evidencias de que el sistema da síntomas de recuperación y se niegan los diagnósticos basados en datos con manifiestos e informes que no se apoyan en ellos, perdiéndose la oportunidad de centrar los esfuerzos en las medidas que resolverían el problema (Figura 11).

Al mismo tiempo que esto ocurría en Murcia, algo similar tenía lugar en Canarias con la polémica de si las mareas rojas podían ser debidas a una subida de la temperatura de las aguas o iban ligadas a descargas de aguas residuales y nutrientes (Figura 12).

LECCIONES APRENDIDAS

A lo largo de las más de dos décadas que ya lleva el proceso de eutrofización ocurriendo en el Mar Menor hemos aprendido algunas lecciones. La primera es que los modelos conceptuales, contruidos desde el conocimiento de los procesos ecológicos, son una herramienta potente para la gestión y anticipación de problemas (Figura 13). Por ello, aunque la investigación tienda a ir por caminos de especialización, conviene, de vez en cuando, dar un paso atrás para recuperar la perspectiva holística y estudiar las relaciones causales entre las actuaciones humanas y los cambios ambientales y la respuesta de la biodiversidad y los ecosistemas.

Otra lección importante es que ignorar el conocimiento en la gestión del medioambiente sale muy caro. Las inversiones realizadas durante dos décadas en pescar medusas o dragar playas superan las decenas de millones de euros y, no solo han sido ineficientes, sino que han producido más daños que los que pretendían remediar. Con los ecosistemas debemos actuar como con nuestra salud, autorrecetarse es muy peligroso (Figura 14).

Por otro lado, es muy importante ser reivindicativos. La presión social resulta esencial para mover voluntades políticas que rara vez atienden a razones que no sean el poder, los beneficios económicos inmediatos y la captación de votos. Frecuentemente, esta es la única manera de que los argumentos basados en la ciencia lleguen a los ámbitos de la gestión. Pero hay que ser muy conscientes de que dichas reivindicaciones deben ejercer la presión justa para cambiar mentalidades y actitudes, pero no pueden ser un fin en sí mismas. Cuando los movimientos reivindicativos necesitan perpetuarse, dejan de buscar las soluciones y solo se quedan en el problema. No es raro que se caiga entonces en el catastrofismo, que se busquen argumentos que no responden a la realidad de los pro-

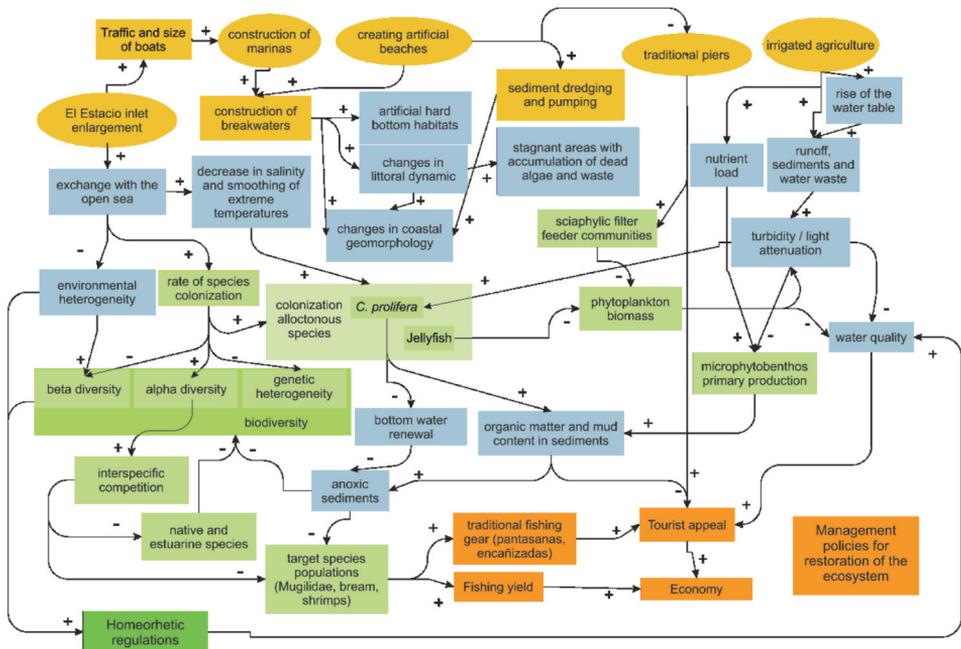


Figura 13.- Modelo conceptual de relaciones causa efecto de distintas actuaciones humanas (amarillo) sobre las condiciones y procesos ambientales (azul), los procesos biológicos (verde) y sus consecuencias socio-económicas (naranja). El diagrama original se remonta a 1996. Lo interesante es que muchas de las consecuencias recogidas fueron previstas antes de que tuvieran lugar y pudieran ser cuantificadas (Pérez-Ruzafa, 1996; Pérez-Ruzafa et al., 2018).

Ignorar el conocimiento en la gestión sale muy caro y con los ecosistemas debemos actuar como con nuestra salud, autorrecetarse es muy peligroso



Figura 14.- Algunas actuaciones fallidas, muy costosas económicamente, y con consecuencias muy negativas para el ecosistema, que han sido mantenidas por las administraciones, durante años, en el Mar Menor a pesar de las evidencias científicas en su contra.

Es importante ser muy reivindicativos, pero conscientes de que las verdades a medias y el catastrofismo no ayudan a solucionar los problemas



Figura 15.- Algunas verdades a medias utilizadas en la denuncia “científico-ecologista” del problema, después de que este se hiciera evidente. Siendo cierta la pérdida de las praderas por el deterioro de la calidad del agua y la disminución de la radiación luminosa, se obvia que ese 81% se correspondía en realidad con praderas dominadas por *Caulerpa prolifera* (y no por *Cymodocea nodosa* como la que se muestra en la foto de la noticia del periódico), y que esos fondos ya eran fangosos (como corresponden a una cubeta de sedimentación, y, además, anóxicos y con desprendimientos de sulfhídrico como consecuencia de la densidad de la pradera y de los aportes de materia orgánica por la propia dinámica de *C. prolifera*, como se muestra en las fotos de la derecha tomadas en los años 1980.

cesos ecológicos, pero que resultan efectistas, y que se utilicen verdades a medias (Figura 15). Con ello se mantiene la tensión social, pero difícilmente se ayuda a solucionar los problemas.

Aquí puede aplicarse la reflexión del filósofo alemán Arthur Schopenhauer (1818) sobre las tres fases por las que pasa la verdad “a la que solo se le permite brillar apenas un momento entre los dos largos períodos en los que se la condena como paradójica o se la menosprecia como trivial” y que la cultura colectiva ha traducido como que: “primero es ridiculizada; segundo, se le opone violentamente; y tercero, es aceptada como evidente” (Shallit, 2005).

Todos los que nos dedicamos al medio ambiente disponemos de numerosos ejemplos que confirman dicha reflexión. Desde la negación del cambio climático, al ejemplo que he utilizado sobre el estado del Mar Menor en los años previos a que se hiciera patente su

deterioro. La negación y oposición a las evidencias fundamentadas en la ciencia no vienen solo de los políticos, que tendrían la obligación de gestionarlas adecuadamente para anticipar y evitar problemas mayores, o de los sectores económicos interesados en extraer beneficios de la situación en la que se producen, sino también de la sociedad en general, que se beneficia de una dinámica de crecimiento económico y oferta de oportunidades y que no desea oír malos augurios, e, incluso, del propio ámbito científico al que le rompe los esquemas preestablecidos. Estos dos últimos casos, incluso cuando son minoritarios, suelen ser utilizados por los sectores políticos y económicos como excusa para desoír las advertencias. Frecuentemente, incluso, los poderes político y económico tienden a sembrar y retroalimentar la duda mediante la financiación de los grupos de investigación discrepantes y la realización de campañas publicitarias.

Cuando finalmente, la realidad se impone, aunque muchas veces ya es demasiado tarde, la verdad termina siendo aceptada. Pero, entonces, se produce una reacción inversa que no recogió Schopenhauer y es la fase en la que, una vez asumida, se inicia la explotación de la “nueva verdad”. Quienes la negaban hacen ahora alarde de haberla defendido siempre, se inician nuevas líneas basadas en ella, y comienza la utilización, más o menos interesada, intelectual y económica, de la misma. Entonces surge un cuarto estadio, en el que la verdad se pretende que sea absoluta y es enarbolada de forma fundamentalista y se convierte en pancarta, impidiendo captar sus matices dependiendo de las variables de contorno y anulando los enfoques críticos. Ahí se inicia un nuevo ciclo.

La ciencia parte de datos para construir esquemas conceptuales de cómo funciona el mundo. Las teorías deben ser capaces de explicar dichos datos y la respuesta de los sistemas dadas unas condiciones de partida. Cuando un dato se sale de las predicciones, debe ser revisado por si fuera resultado de un error de medida, pero si no hay razones objetivas para descartarlo, entonces lo que debe ser revisado es el esquema conceptual que lo explique y que debe seguir siendo coherente también con los datos anteriores. De este modo nuestro conocimiento progresa continuamente. Lo que funciona en unas condiciones dadas, y parece una verdad absoluta y sin resquicios, puede tener comportamientos distintos en otras condiciones, y el cambio de una sola variable que no se ha tenido en cuenta puede llevar a conductas muy distintas. Debemos desarrollar el sentido crítico, especialmente el autocrítico, con una mirada abierta, holista, y flexible ante la naturaleza para no ir de fundamentalismo en fundamentalismo. Solo así descubriremos poco a poco los matices y complejidades de la verdad. Y entonces nos hará libres.

BIBLIOGRAFÍA

- ALLEE, W.C., EMERSON, A.E., PARK, O., PARK, T. & SCHMIDT, K.P., 1949. *Principles of Animal Ecology*. Philadelphia: Saunders.
- ÁLVAREZ-ROGEL, J., JIMÉNEZ-CÁRCELES, F.J. & NICOLÁS, C.E., 2006. Phosphorus and Nitrogen content in the water of a coastal wetland in the Mar Menor lagoon (SE Spain): Relationships with effluents from urban and agricultural areas. *Water, Air, and Soil Pollution* 173 (1-4): 21-38.
- ANDREWARTHA, H.G., 1961. *Introduction to the Study of Animal Populations*. University of Chicago Press, Chicago. 281 pp.

- CLARK, J.R., 1998. *Coastal Seas: The Conservation Challenge*. Blackwell Science, Oxford.
- CLOERN, J.E., 2001. Our evolving conceptual model of the coastal eutrophication problem. *Marine Ecology Progress Series*, 210: 223-253.
- EUROPEAN UNION, 2000. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 Establishing a Framework for Community Action in the Field of Water Policy. Official Journal L 327.
- ELLIOTT, M., BURDON, D., HEMINGWAY, K.L. & APITZ, S.E., 2007. Estuarine, coastal and marine ecosystem restoration: Confusing management and science—A revision of concepts. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 74: 349-366.
- GARCÍA-CHARTON, J.A., 2003. Bases ecológicas de las evaluaciones de impactos ambientales. En: PÉREZ-RUZAFÁ, A., MARCOS, C., SALAS, F. Y ZAMORA, S. (Eds.) *Perspectivas y herramientas en el estudio de la contaminación marina*. Aulas del Mar. Universidad de Murcia: 75-99.
- GARCÍA-PINTADO, J., MARTÍNEZ-MENA, M., BARBERÁ, G.G., ALBALADEJO, J. & CASTILLO, V.M., 2007. Anthropogenic nutrient sources and loads from a Mediterranean catchment into a coastal lagoon: Mar Menor, Spain. *Science of the Total Environment* 373 (1): 220-239.
- GARCÍA-SÁNCHEZ, M., KORBEE, N., PÉREZ-RUZAFÁ, I.M., MARCOS, C., DOMÍNGUEZ, B., FIGUEROA, F.L. & PÉREZ-RUZAFÁ, A. 2012. Physiological response and photoacclimation capacity of *Caulerpa prolifera* (Forsskål) J.V. Lamouroux and *Cymodocea nodosa* (Ucria) Ascherson meadows in the Mar Menor lagoon (SE Spain). *Marine Environmental Research*, 79: 37-47. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marenvres.2012.05.001>
- GLOVER, R.S., 1979. Natural fluctuations of populations. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 3(2): 190-203.
- GONZÁLEZ BERNALDEZ, F. 1970. Ecología. *Graellsia*, 25: 339-346.
- HAECKEL, E. 1866. *Generelle Morphologie der Organismen*. Vol.2 Berlin: Georg Reimer.
- KNOPPERS, B. 1994. Aquatic Primary Production in Coastal Lagoons. In: KJERFVE, B. (Ed.), *Coastal Lagoon Processes*. Elsevier Oceanography series 60, Elsevier, Amsterdam. pp. 243-286.
- KREBS, C.J., 1972. *Ecology*. Harper & Row, New York. 694 pp.
- MARGALEF, R., 1974. *Ecología*. Omega, Barcelona. 951 pp.
- MARGALEF, R., 1992. *Planeta azul, planeta verde*. Prensa Científica, Barcelona. 265 pp.
- ODUM, E.P., 1963. *Ecology*. Holt, Rinehart & Winston, New York. 152 pp.
- ODUM, E. P., 1969. The strategy of ecosystem development. *Science* 164, 267-270. doi: 10.1126/science.164.3877.262
- ODUM, E.P., 2000. Tidal marshes as outwelling/pulsing systems. In: Weinstein, M.P. & Kreeger, D.A. (eds.) *Concepts and Controversies in Tidal Marsh Ecology*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht: 3-8.
- ODUM, E.P. & Barret, G.W., 2006. *Fundamentals of Ecology*. Thomson.
- PETERS, R.H., 1991. *A Critique for Ecology*. Cambridge University Press, Cambridge. 366 pp.

- PECHMANN, J. H. K., SCOTT, D. E., SEMLITSCH, R. D., CALDWELL, J. P., VITT, L. J., & GIBBONS, J. W. (1991). Declining Amphibian Populations: The Problem of Separating Human Impacts from Natural Fluctuations. *Science*, 253(5022), 892-895. doi:10.1126/science.253.5022.892
- PÉREZ-RUZAF A., 1996. Les lagunes mediterraneennes. The Mar Menor, Spain. En: MORILLO, C. & GONZÁLEZ, J.L. (Ed.), *Management of Mediterranean Wetlands*. Ministerio de Medio Ambiente. Dirección General de Conservación de la Naturaleza: 133-155.
- PÉREZ-RUZAF A., 2013. *La Ecología, una ciencia empeñada en comprender la complejidad*. Academia de Ciencias de la Región de Murcia: 1-48.
- PÉREZ-RUZAF A., MARCOS, C. & ROS, J., 1991. Environmental and Biological Changes Related to Recent Human Activities in the Mar Menor. *Marine Pollution Bulletin* 23: 747-751.
- PÉREZ-RUZAF A., GILABERT, J., GUTIÉRREZ, J.M., FERNÁNDEZ, A.I., MARCOS, C. & SABAH, S., 2002. Evidence of a planktonic food web response to changes in nutrient input dynamics in the Mar Menor coastal lagoon, Spain. *Hydrobiologia* 475/476: 359-369.
- PÉREZ-RUZAF A., MARCOS, C. & GILABERT, J., 2005a. The ecology of the Mar Menor coastal lagoon: a fast-changing ecosystem under human pressure. En: GÖNENÇ, I.E. & WOLFLIN, J.P. (Eds.), *Coastal Lagoons: Ecosystem Processes and Modeling for Sustainable Use and Development*. CRC Press, Boca Ratón, Florida: 392-422.
- PÉREZ-RUZAF A., FERNÁNDEZ, A.I., MARCOS, C., GILABERT, J., QUISPE, J.I. & GARCÍA-CHARTON, J.A., 2005b. Spatial and temporal variations of hydrological conditions, nutrients and chlorophyll a in a Mediterranean coastal lagoon (Mar Menor, Spain). *Hydrobiologia* 550: 11-27.
- Pérez-Ruzafa, A., García-Charton, J.A., BARCALA, E. & MARCOS, C., 2006. Changes in benthic fish assemblages as a consequence of coastal works in a coastal lagoon: The Mar Menor (Spain, western Mediterranean). *Marine Pollution Bulletin* 53: 107-120.
- PÉREZ-RUZAF A., MARCOS, C., BERNAL, C.M, QUINTINO, V., FREITAS, R., RODRIGUES, A.M., GARCÍA-SÁNCHEZ, M. AND PÉREZ-RUZAF A, I. 2012. *Cymodocea nodosa* vs. *Caulerpa prolifera*: Causes and consequences of a long term history of interaction in macrophyte meadows in the Mar Menor coastal lagoon (Spain, southwestern Mediterranean). *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 110: 101-115. doi: 10.1016/j.ecss.2012.04.004
- PÉREZ-RUZAF A., MARCOS, C. AND PÉREZ-RUZAF A, I.M., 2018. When maintaining ecological integrity and complexity is the best restoring tool: The case of the Mar Menor lagoon. In: QUINTANA, X., BOIX, D., GASCÓN, S. AND SALA, J. (coords). *Management and restoration of Mediterranean coastal lagoons in Europe*. *Recerca i territori* 10: 67-95.
- PÉREZ-RUZAF A., CAMPILLO, S., FERNÁNDEZ-PALACIOS, J.M., GARCÍA-LACUNZA, A., GARCÍA-OLIVA, M., IBAÑEZ, H., NAVARRO-MARTÍNEZ, P.C., PÉREZ-MARCOS, M., PÉREZ-RUZAF A, I.M., QUISPE-BECERRA, J.I., SALAMIRETE, A., SÁNCHEZ, O. & MARCOS, C., 2019. Long-Term Dynamic in Nu-

- trients, Chlorophyll a, and Water Quality Parameters in a Coastal Lagoon During a Process of Eutrophication for Decades, a Sudden Break and a Relatively Rapid Recovery. *Frontiers in Marine Science* 6. DOI=10.3389/fmars.2019.00026
- PIMM, S.L., 1984. The complexity and stability of ecosystems. *Nature* 307: 321e326.
- SHALLIT, J., 2005. 'Science, Pseudoscience, and the Three Stages of Truth', mimeo, Department of Computer Science, University of Waterloo, <https://cs.uwaterloo.ca/~shallit/Papers/stages.pdf>
- Schopenhauer, A., 1818. Die Welt als Wille und Vorstellung. English translation The Project Gutenberg EBook of The World As Will And Idea (Vol. 1 of 3). Release Date: December 27, 2011 [Ebook 38427]
- STAUFFER, R. C., 1957. *Haeckel, Darwin, and Ecology. The Quarterly Review of Biology*, 32(2), 138-144. doi:10.1086/401754
- TETT, P., GOWEN, R., MILLS, D., FERNANDES, T., GILPIN, L., HUXHAM, M., KENNINGTON, K., READ, P., SERVICE, M., WILKINSON, M. & MALCOLM, S., 2007. Defining and detecting undesirable disturbance in the context of eutrophication. *Marine Pollution Bulletin* 53: 282e297.
- UNDERWOOD, A.J., 1991. Beyond BACI: Experimental designs for detecting human environmental impacts on temporal variations in natural populations. *Marine and Freshwater Research*, 42: 569-587.
- UNDERWOOD, A.J., 1992. Beyond BACI: the detection of environmental impacts on populations in the real, but variable, world. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 161, (2): 145-178.
- UNDERWOOD, A.J., 1994. On Beyond BACI: Sampling Designs that Might Reliably Detect Environmental Disturbances. *Ecological Applications*, 4 (1): 3-15.
- UNDERWOOD, A.J., 1997. *Experiments in ecology: their logical design and interpretation using analysis of variance*. Cambridge University Press, Cambridge. 504 pp.
- UNESCO, 1981. Coastal lagoons research, present and future. *UNESCO Tech. papers Mar. Sci.*, 33.
- YAÑEZ-ARANCIBIA, A. & NUGENT, R.S., 1977. El papel ecológico de los peces en estuarios y lagunas costeras. *Anales del Centro de Ciencias del Mar y Limnología*, Universidad Nacional Autónoma de México 4, 107-114.