



Ciencia para
las Políticas
Públicas

Cuando el agua dulce se vuelve salada

Retos científicos y gestión
de los ecosistemas acuáticos

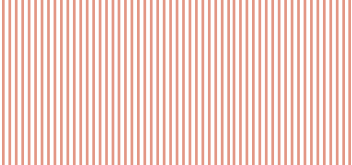
Coordinado por:

Eugènia Martí Roca · Miguel Cañedo-Argüelles · Miguel G. Matias · Marta I. Sánchez



CSIC
CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

SCIENCE  POLICY



Ciencia para las Políticas Públicas



Informe de transferencia
de conocimiento



SCIENCE  POLICY

Este es un libro de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional (CC BY 4.0).
Más información sobre esta licencia en <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Las noticias, los asertos y las opiniones contenidos en esta obra son de la exclusiva responsabilidad del autor o autores. La editorial, por su parte, solo se hace responsable del interés científico de sus publicaciones.

Catálogo de publicaciones de la Administración General del Estado:
<https://cpage.mpr.gob.es>

EDITORIAL CSIC: <http://editorial.csic.es> (correo: editorialcsic@csic.es)



Departamento de Comunicación
Gabinete de Presidencia
CSIC, Calle Serrano 117
28006 Madrid
Email: comunicacion@csic.es

NIPO: 155-24-210-3
e-NIPO: 155-24-209-0
Depósito Legal: M-23746-2024

Edición no venal

Coordinado por:
Eugènia Martí Roca
Miguel Cañedo-Argüelles
Miguel G. Matias
Marta I. Sánchez

**Coordinadores de la colección
Ciencia para las Políticas
Públicas:**
Jorge Hernández-Moreno
Cindy Matos Ramos

Edición: Marta García

Ilustraciones:
Freepress Coop

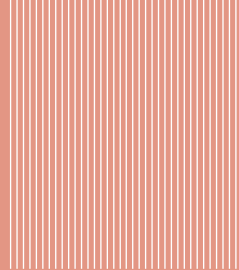
Diseño y maquetación:
David Pamplona Roche

Impreso en España. *Printed in Spain*

En esta edición se ha utilizado papel ecológico sometido a un proceso de blanqueado ECF, cuya fibra procede de bosques gestionados de forma sostenible.



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional.



EL CSIC tiene entre sus funciones la de informar, asistir y asesorar en materia de ciencia y tecnología a entidades públicas y privadas, según recoge el artículo 5 de su estatuto. Enmarcado en esta función, el presente informe, *Cuando el agua dulce se vuelve salada. Retos científicos y gestión de los ecosistemas acuáticos*, de la colección Ciencia para las Políticas Públicas, se presenta como un documento dirigido a las administraciones y a la sociedad en general. La salinización de los ecosistemas de agua dulce (ríos, lagos, humedales, etc.) está ocurriendo en todo el planeta a consecuencia de las actividades humanas y está muy extendida en España, pero ha recibido escasa atención. En este informe se explican las principales causas de este fenómeno y sus impactos sobre los ecosistemas, la economía y la salud humana. Además, se presentan las líneas de investigación prioritarias y se proponen medidas de gestión que incluyen recomendaciones para mejorar las políticas públicas.

ÍNDICE

uno

La salinización de los ecosistemas acuáticos continentales: causas y consecuencias

- 1.1. ¿Qué es la salinización de los ecosistemas acuáticos continentales?
- 1.2. Causas de la salinización de los ecosistemas acuáticos
- 1.3. Principales consecuencias para los ecosistemas acuáticos y la sociedad

dos

El CSIC ante los retos científicos, económicos y de gestión que presenta la salinización

- 2.1. Ampliación de estudios y diseño de estrategias de gestión
- 2.2. Trabajo en torno al impacto ecológico
- 2.3. Evaluaciones relacionadas con la salud humana
- 2.4. La problemática de la salinización para la economía

tres

Conclusiones y recomendaciones

cuatro

Listado de centros

cinco

Para saber más



uno



La salinización de los ecosistemas acuáticos continentales: causas y consecuencias

11.

¿Qué es la salinización de los ecosistemas acuáticos continentales?

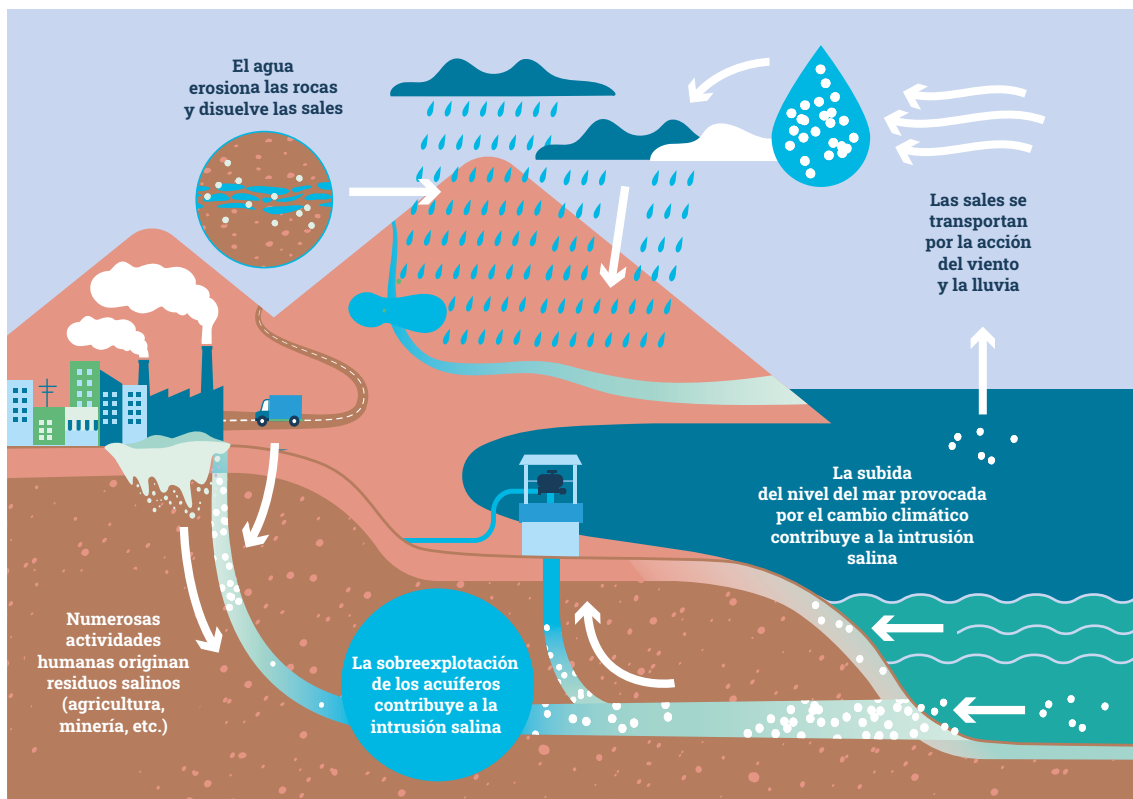
Los ecosistemas acuáticos continentales son aquellos cuerpos de agua que podemos encontrar tierra adentro: ríos, lagos, humedales, pantanos, etc. Salvo algunas excepciones (por ejemplo, la Rambla Salada de Murcia), estos ecosistemas son de agua dulce. Esto quiere decir que sus aguas tienen una concentración de sal muy baja, por debajo de un gramo de sal por cada litro de agua. En todo caso, aunque la concentración sea baja, es natural preguntarse: ¿de dónde vienen estas sales? Pues proceden en su mayor parte de la disolución de las rocas que contienen sales de manera natural, y, cuando entran en contacto con el agua, se disuelven. Además, la sal es también transportada desde el mar hacia el continente por medio del viento y el romper de las olas, así como por la intrusión de agua de mar en los acuíferos costeros. Todo esto es lo que se conoce como el *ciclo de la sal*.

Este ciclo de la sal se ha visto gravemente perturbado por la acción humana desde la Revolución Industrial. El desarrollo urbano, agrícola e industrial ha causado un notable incremento en la concentración de sales y un cambio en la proporción de los diferentes iones en los ecosistemas acuáticos continentales, fenómeno conocido como *salinización de los ecosistemas acuáticos* (SEA). La SEA es un fenómeno global, observado en todos los continentes excepto en la Antártida, con consecuencias drásticas para los ecosistemas y la sociedad. Aunque no existen datos exactos de la extensión espacial de la SEA a nivel global, actualmente se estima que uno de cada tres ecosistemas de agua dulce podría estar salinizado. Por ejemplo, en España se ha estimado, a través de datos oficiales proporcionados por las Confederaciones Hidrográficas, que 17 822 km de tramos de ríos están salinizados, lo que corresponde a un 28 % de la red hidrográfica de nuestro país. Este porcentaje varía según la localización geográfica. Por ejemplo, el 80 % de los ríos de la zona de La Mancha y las llanuras silíceas del Tajo y el Guadiana están salinizados. Hay diferentes actividades humanas responsables de la SEA. A continuación, detallamos las más relevantes según la información disponible hasta el momento.

Gráfico 1 Clasificación de las aguas según su salinidad y uso potencial



ELABORACIÓN PROPIA

Gráfico 2 El ciclo antrópico de la sal

ELABORACIÓN PROPIA

12.

Causas de la salinización de los ecosistemas acuáticos

La agricultura

La agricultura, especialmente la de regadío, es una de las principales causas de la SEA en el mundo. De hecho, las primeras grandes alertas por salinización que se generaron en nuestro planeta (en el oeste de Australia y en el mar de Aral) estaban causadas por la agricultura. En el caso de Australia, el reemplazo de la vegetación arbórea por cultivos y pastos conllevó un aumento de la infiltración del agua de lluvia y una subida del nivel freático. El agua subterránea era salina de forma natural, debido a la dilución de sales contenidas en el suelo. La subida del agua subterránea a la superficie y su posterior evaporación crearon grandes acumulaciones de sal en forma de costras blancas, claramente visibles. La escorrentía de estas zonas durante las lluvias llevó a la salinización de los ríos circundantes; como, por ejemplo, la cuenca del Murray-Darling. En el caso del mar de Aral, su área, que llegó a ser la cuarta más grande de la Tierra, se ha ido reduciendo de manera drástica desde 1960. El descenso de su volumen de agua ha resultado en un incremento de la salinización del 100 %. Esto se debió al efecto combinado de una pérdida en la capacidad de dilución de la sal (a menos agua, mayor concentración de sal) y a un incremento en la entrada de sales desde la cuenca de drenaje, como consecuencia de la expansión de la agricultura de regadío, principalmente cultivo de algodón, en las cuencas fluviales que lo alimentan. Este tipo de agricultura favorece la salinización porque el agua de riego que no es absorbida por las plantas se evapora, dejando una acumulación progresiva de sal que termina en los ecosistemas acuáticos adyacentes. Se estima que un riego anual de 1000 mm con agua con un contenido de sal tan bajo como 300 mg por litro añade 300 kg de sales por hectárea, dependiendo de la lixiviación (proceso por el cual el agua arrastra las sales a través del suelo y las lleva a capas más profundas o las elimina del perfil del suelo). A esto se suma el incremento de iones contenidos en los fertilizantes utilizados para aumentar la productividad de los cultivos. Tenemos ejemplos claros de este fenómeno en España, donde según datos oficiales del año 2005 del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, de los 3,4



millones de hectáreas de regadío en España, alrededor de un 3 % presenta un grado de salinización severo y un 15 %, un riesgo creciente de salinización. Por ejemplo, en el barranco de la Violada, situado en la zona regable de Monegros (Huesca), se encontraron concentraciones elevadas de iones (especialmente sulfatos) en los desagües.

Detalle de la forma de rastrillo en la superficie de la escombrera de Vilafruns, debido a la disolución de la sal por el agua de lluvia. / MONTSATAT

Extracción de recursos

La minería es una causa importante de salinización por varios motivos, como la generación de residuos y la erosión, principalmente. Quizás el ejemplo más claro y fácil de entender es el de las minas de extracción de potasa (sales minerales extraídas



La escombrera salina del Cogulló, mostrando la vertiente oeste desde la sierra de Castellnou. La imagen de la montaña de residuos salinos del Cogulló, destacadamente visible desde prácticamente todo el centro de Cataluña, impacta como una gran mancha de esterilidad y artificialidad situada en el *pla* de Bages. / MONTSLAT

y manufacturadas que contienen potasio en forma hidrosoluble), como las que existen en la región del Bages (Cataluña, España). En estas minas, por cada parte de potasa que se extrae, se generan tres partes de residuo salino, que es almacenado a cielo abierto y crea una montaña de residuos (actualmente mide unos 120 metros de altura). Las sales de esta montaña se disuelven por la acción de las lluvias y la humedad, y son transportadas por escorrentía superficial o por aguas subterráneas hacia los ecosistemas acuáticos. Por ejemplo, en el agua de la torrentera de Soldevilla, que recibe escorrentía de la montaña

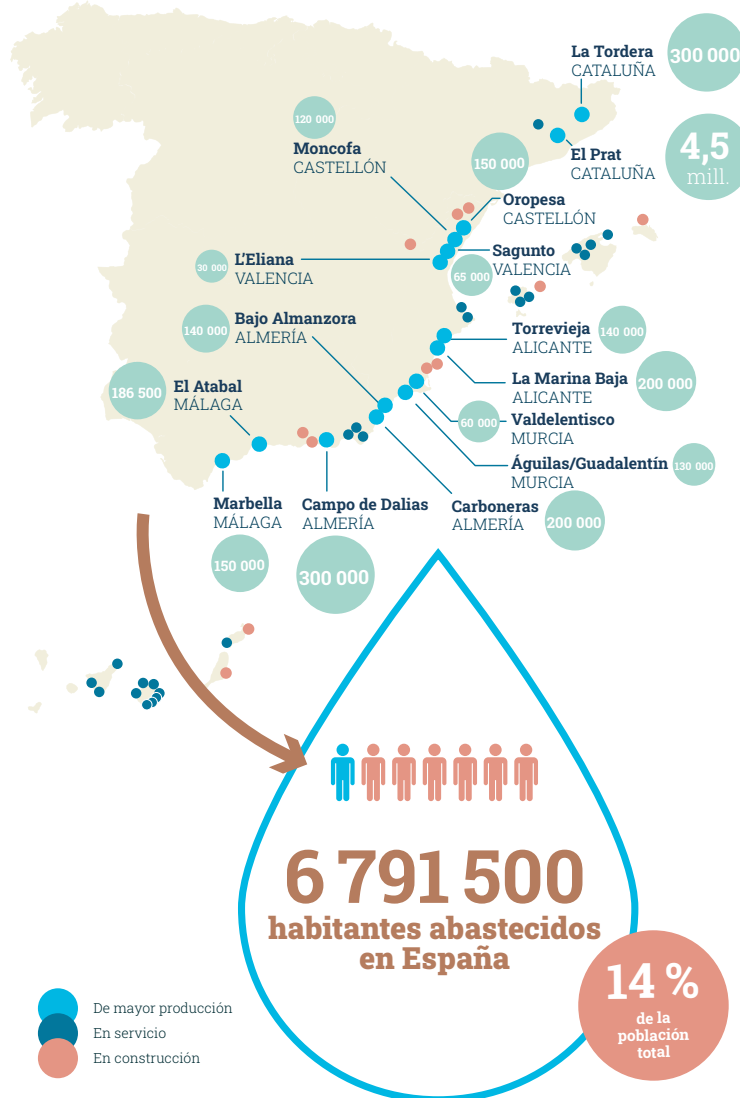
de residuos, se han detectado salinidades cinco veces superiores a la del agua de mar. Para tratar de evitar esta situación, se diseñó un canal perimetral que recoge la escorrentía, y la lleva a una balsa de retención. Esa balsa está conectada a una tubería enterrada de más de 30 kilómetros de longitud que transporta la sal recogida hasta el mar. No obstante, el canal perimetral no recoge toda la escorrentía, y la tubería sufre corrosión y se ha roto en numerosas ocasiones, extendiendo el problema de la salinización aguas abajo de la zona minera y afectando los campos agrícolas de la llanura aluvial de los ríos Llobregat y Soldevilla *per se*. Este caso es muy ilustrativo de una situación que se da en otras zonas del mundo donde la minería de potasa ha proliferado (por ejemplo, en la cuenca del río Werra, en Alemania). Más allá del caso particular de la minería de potasa, la extracción minera de otros materiales a cielo abierto significa una fuente de salinización debido a la disolución de las sales contenidas en las rocas expuestas. Por ejemplo, en los arroyos cercanos a minas de carbón en Asturias se han registrado incrementos importantes de sulfatos, incluso después de que las explotaciones hayan sido abandonadas, con el consecuente incremento de salinidad en las aguas de los ecosistemas acuáticos receptores.

Además de la minería, la extracción de gas y petróleo mediante fracturación hidráulica está asociada a la producción de aguas de formación (aguas que emergen de las formaciones geológicas durante el proceso de perforación) con salinidad muy superior a la del agua de mar. En algunas regiones del planeta, como la Amazonía peruana, millones de litros de este tipo de aguas han sido vertidas directamente al río como consecuencia de la extracción de petróleo. En otros países (por ejemplo, Estados Unidos de América) la descarga directa de aguas de formación está más regulada, pero sigue habiendo un riesgo alto de contaminación asociado a vertidos accidentales y a derrames o fallos en la infraestructura de transporte y almacenamiento. En España, la extracción mediante fracturación hidráulica está prohibida, por lo que ahora mismo no supone un riesgo de salinización de los ecosistemas acuáticos.

Plantas desalinizadoras

Las plantas desalinizadoras se emplean para extraer la sal del agua del mar o de ecosistemas acuáticos continentales con elevadas concentraciones salinas, para el consumo humano, el riego, la minería, etc. Esta industria genera como residuos grandes cantidades de salmueras (agua con una concentración de sal disuelta muy elevada) que van a parar a los océanos o a los ecosistemas acuáticos continentales, con efectos devastadores sobre los organismos, las propiedades del agua (densidad, pH, temperatura, etc.) y el ecosistema. De acuerdo con el informe del United Nations University Institute for Water, Environment and Health (UNU-INWEH), de enero de 2024, por cada litro de agua desalinizada se producen 1,5 litros de salmuera. Este informe estima que la industria de desalinización descarga globalmente 142 millones de metros cúbicos de salmuera al día. El número de plantas desalinizadoras ha aumentado en todo el mundo de forma exponencial, sobre todo en los países áridos, y se espera que su uso se dispare en los próximos años a medida que la temperatura del planeta aumenta y las sequías se agravan. Desde 2012, el número de plantas desalinizadoras prácticamente se ha duplicado. España, con más de 770 plantas desalinizadoras, es el quinto país del mundo que más agua desalinizada produce, y el mayor de Europa, con hasta 250 000 metros cúbicos al día. También es uno de los países que más salmueras genera y, por tanto, es más vulnerable a sus impactos. Por ejemplo, las comunidades humanas que dependen de los recursos de los ecosistemas que reciben los vertidos de salmuera pueden verse gravemente afectadas. Aunque en España las plantas desalinizadoras han estado tradicionalmente asociadas a regiones como Canarias, Ceuta, Melilla, la cuenca del Segura y, en un grado medio, a Baleares y las cuencas mediterráneas andaluzas, la dependencia del agua desalinizada se está extendiendo a otras áreas, como consecuencia del cambio climático y el acceso cada vez más limitado al agua potable. Es el caso de Cataluña que, tras tres años de sequía muy severa, se ha visto obligada a invertir 467 millones de euros para la construcción en 2028 de dos plantas desalinizadoras con una capacidad para tratar 80 millones de metros cúbicos al año.

Gráfico 3 Desalinizadoras en España y población abastecida con agua desalada



KANSAS DEPARTMENT OF
TRANSPORTATION (EE. UU.)



Fuentes de carreteras

La sal es utilizada de manera generalizada durante el invierno en las carreteras de montaña y de regiones frías para evitar la formación de hielo y preservar la seguridad viaria. La sal reduce la temperatura de fusión del agua, por lo que esta se puede mantener en estado líquido a una temperatura aproximada de unos -10°C (incluso llegando hasta -21°C). Esto evita los problemas de congelación de carreteras durante los episodios de nieve o lluvias en invierno. Normalmente se utiliza cloruro sódico por su fácil acceso, eficacia y bajo coste, aunque existen alternativas como el cloruro de magnesio o el cloruro cálcico. Como las carreteras forman superficies impermeables, la sal aplicada termina siendo transportada por la lluvia o la fusión del hielo hacia los ríos y lagos circundantes. Este fenómeno ha sido ampliamente estudiado en Canadá, donde se ha convertido en uno de los principales problemas ambientales, pero también está ocurriendo en Europa (por ejemplo, en la región de los Alpes). En España no existen estudios sobre la salinización de los ecosistemas acuáticos asociada a los fundentes de carreteras, pero datos oficiales recientes en relación con esta práctica sugieren que es necesario un estudio detallado para evaluar el alcance del problema. Según la Campaña de Viabilidad Invernal del

Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, en el invierno de 2021-2022 el consumo de fundentes a escala nacional ascendió a 101 995 toneladas de cloruro sódico, 133 992 m³ de salmuera (agua con una concentración de sal disuelta superior al 5 %) y 93 toneladas de cloruro cálcico.

Actividades industriales

Hay una gran variedad de actividades industriales que generan salmueras y que terminan en los ríos, a veces como efluente directo y otras veces a través de las plantas de tratamiento de aguas residuales. Por ejemplo, la sal se utiliza en la industria textil para la fabricación de telas, tanto para separar los contaminantes orgánicos de las fibras que serán la base de las telas como para estandarizar los concentrados y favorecer la correcta absorción de los colorantes. En España, las colonias textiles eran comunes en cuencas como la del río Llobregat y causaban un incremento significativo de la salinidad del río. Hoy en día las fábricas textiles se concentran en otros países como la India o China, donde los datos disponibles también alertan sobre un proceso de salinización de los ecosistemas acuáticos receptores. La sal es muy usada también en la industria cárnica para reducir el contenido de agua en carnes y embutidos ayudando así a inhibir o detener la aparición de bacterias. Otro ejemplo es la industria papelera, que consume sal en forma principalmente de sosa cáustica y clorato de sodio. La producción de celulosa a nivel mundial consumió alrededor de 6,7 millones de toneladas de sosa cáustica y 3,2 millones de toneladas de clorato de sodio en 2022. Existen muchos otros ejemplos de actividades industriales que requieren sales en sus procesos de producción. No obstante, en términos generales hay poca información sobre la contribución de las actividades industriales a la salinización de los ecosistemas acuáticos, en parte por el estado de confidencialidad asociado a estas actividades.

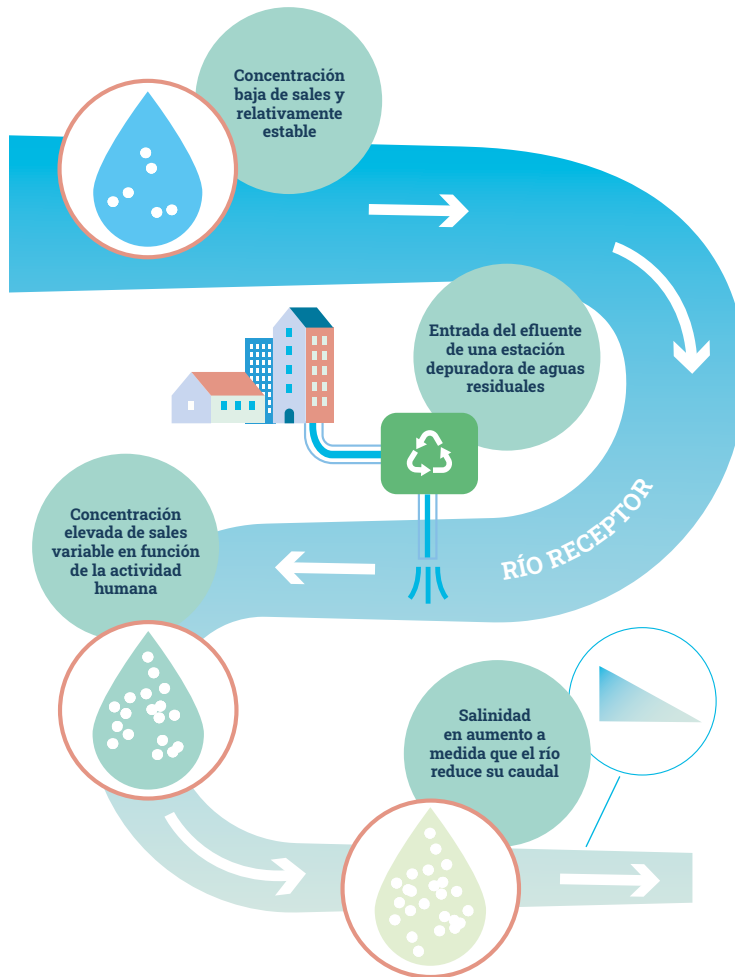


WIKIPEDIA

Aguas residuales urbanas

La actividad urbana lleva asociada la generación de aguas residuales con elevada salinidad. La materia orgánica y la urea procedentes de la actividad fisiológica de las personas contribuyen en gran medida a esta salinidad. Además, algunos productos de higiene personal y de cuidado doméstico utilizan sales (por ejemplo, la sal del lavavajillas) para mejorar su eficiencia, por tanto, su uso también contribuye a incrementar la salinidad de las aguas residuales urbanas. Estas aguas finalmente son vertidas a ecosistemas acuáticos receptores, y, por tanto, son una de las causas de la SEA en zonas urbanas. Los países más ricos tratan el 70 % de las aguas residuales que generan, un dato que cae hasta el 38 % en las naciones de renta media y al 8 % entre las más pobres, según un informe publicado por ONU-Agua y la Unesco en el 2018. En promedio, en España se depura el 63 % de las aguas residuales urbanas. No obstante, en el proceso de depuración de las aguas residuales solo se elimina una fracción de los iones, sobre todo los asociados a la materia orgánica y a los compuestos nitrogenados (por ejemplo, amonio), mientras que otras sales no pueden ser eliminadas (como los cloruros). En este sentido, incluso en países con rentas elevadas, las aguas residuales tratadas constituyen una fuente adicional de sales que se vierten a los ecosistemas acuáticos de manera puntual. Estos vertidos

Gráfico 4 Incremento de la salinidad en los ríos por la entrada de aguas residuales procedentes de estaciones depuradoras



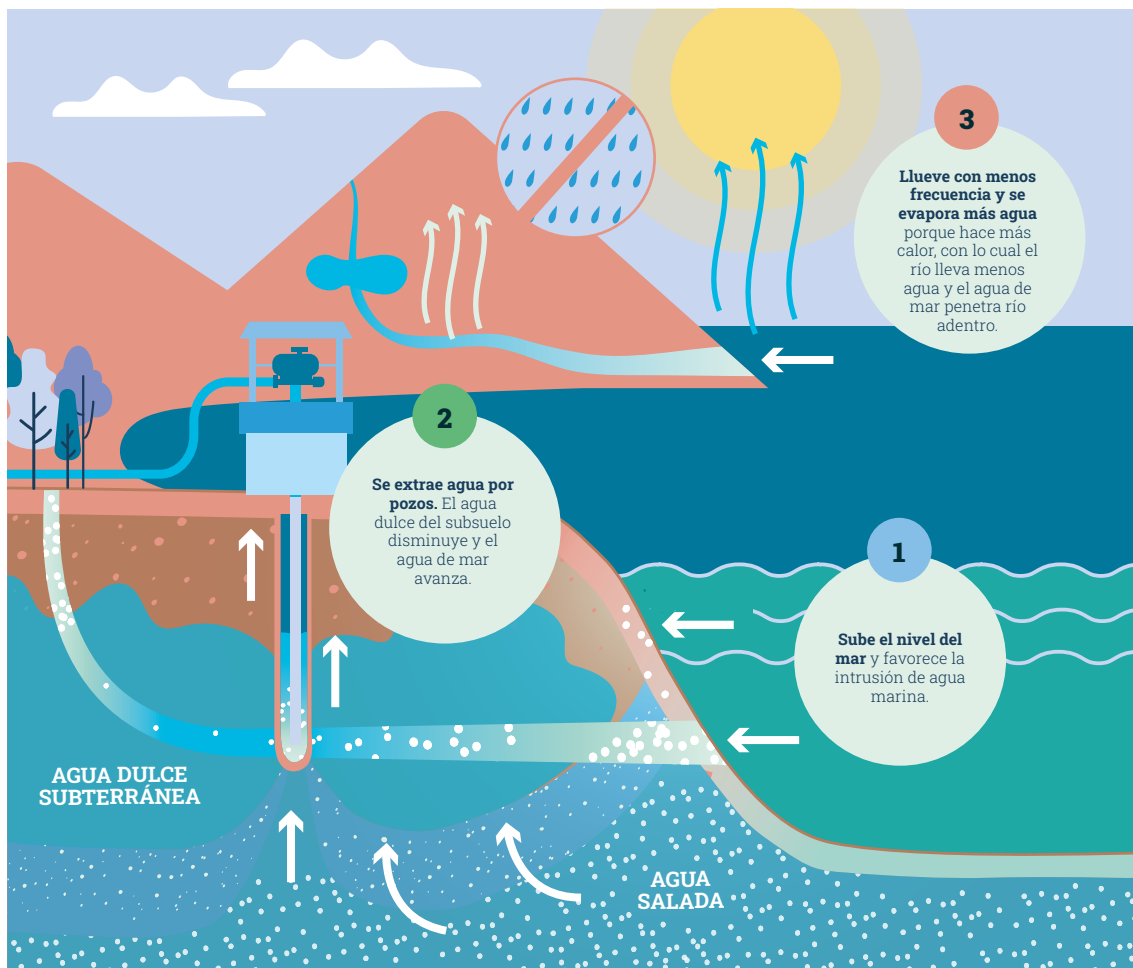
ELABORACIÓN PROPIA

causan incrementos abruptos de la salinidad del agua, aunque depende del grado de dilución de los ecosistemas acuáticos receptores. No obstante, en regiones pobladas con escasez de agua, estos vertidos pueden aumentar la conductividad de los ríos en un orden de magnitud (por ejemplo, pasar de 100 a más de 1000 microsiemens por centímetro). Finalmente, es importante indicar que los vertidos de aguas residuales urbanas no solo elevan la salinidad de los ecosistemas acuáticos receptores, sino que también modifican la dinámica temporal de la salinidad, dado que en parte está asociada a momentos punta de actividad doméstica diaria (como el inicio del día y antes de ir a dormir) o estacional (por ejemplo, en municipios con actividad turística).

Intrusión marina y cambio climático

La intrusión marina es un fenómeno complejo que resulta de la sobreexplotación de los acuíferos costeros, de los que se extrae agua para consumo humano y usos agrícolas y ganaderos, en combinación con una menor recarga de dichos acuíferos, asociada en parte a una mayor demanda de agua en las cuencas fluviales. De los 95 acuíferos costeros de España, más de la mitad presentan algún tipo de intrusión marina. Por ejemplo, en el delta del Llobregat el agua de mar llegó a avanzar alrededor de cuatro kilómetros tierra adentro entre 1960 y 1980, lo que llevó a la Agencia Catalana del Agua a la construcción de una barrera hidráulica positiva mediante la inyección de agua regenerada en 14 pozos. La intrusión marina en España se verá agravada por el cambio climático, que conlleva una subida del nivel del mar, una disminución de las precipitaciones y un incremento de los temporales. Los ríos que experimentan reducciones de caudal en sus cuencas aportarán menos agua a los acuíferos costeros, que a su vez estarán sujetos a una mayor entrada de agua salada por la subida del nivel del mar y el aumento de los temporales, llevando a una salinización de los acuíferos, sus ecosistemas asociados (por ejemplo, humedales) y los estuarios. Al mismo tiempo, los modelos climáticos e hidrológicos existentes predicen una reducción de caudal en la mayor parte de las cuencas fluviales de España para las próximas décadas como consecuencia del cambio climático. Obviamente, este no es un problema exclusivo de España; es algo que ocurre en muchos otros lugares del mundo como la costa de Bangladesh o el delta del Nilo.

Gráfico 5 Cambio climático e intrusión marina



ELABORACIÓN PROPIA

13.

Principales consecuencias para los ecosistemas acuáticos y la sociedad

A medida que se acumulan estudios en relación con el efecto de la SEA sobre los ecosistemas y la sociedad, se hace cada vez más evidente que se trata de una amenaza global que necesita una solución urgente. Aún desconocemos muchos de los potenciales impactos de la SEA, que apenas son cuantificados en términos de pérdidas económicas o de servicios ecosistémicos. Sin embargo, algunos desastres ecológicos asociados a la salinización de los ecosistemas acuáticos han encendido las alarmas sociales. Por ejemplo, cientos de miles de peces murieron en el río Oder (el más largo de Polonia) en solo unas semanas durante julio y agosto del 2022. Se trata de uno de los mayores desastres ecológicos documentados en ríos de Europa, y se debió a la presencia en el agua de prymnesina, una toxina generada por el alga *Prymnesium parvum*. Esta es una especie estuarina, adaptada a condiciones de elevada salinidad, que proliferó de forma masiva durante el verano de 2022 gracias a las elevadas concentraciones de sales en el río Oder procedentes de la minería y la agricultura. En España aún no hay evidencias claras de que la SEA haya causado grandes desastres ecológicos. No obstante, existen diferentes incidentes a escala local que alertan sobre la necesidad de anticipar y mitigar riesgos. A continuación, describimos los impactos ecológicos y socioeconómicos de la SEA según la información disponible, ya que la identificación de estos factores es indispensable para poder proponer e implementar estrategias de gestión adecuadas. En este sentido, es importante recalcar que la salinización de los ecosistemas acuáticos no implica únicamente un incremento de sales, sino que también comporta un cambio en la composición iónica del agua. Este cambio depende de cuál sea el origen del incremento de salinidad. Por ejemplo, la adición de sal en las carreteras para evitar el hielo suele elevar la proporción de cloruro del agua de los ecosistemas acuáticos receptores; mientras que la agricultura contribuye a aumentar la proporción de otros iones, como el sulfato. Así pues, se hace necesario entender los riesgos ambientales y socioeconómicos asociados a los diferentes iones y su relación con las actividades humanas que causan la SEA.

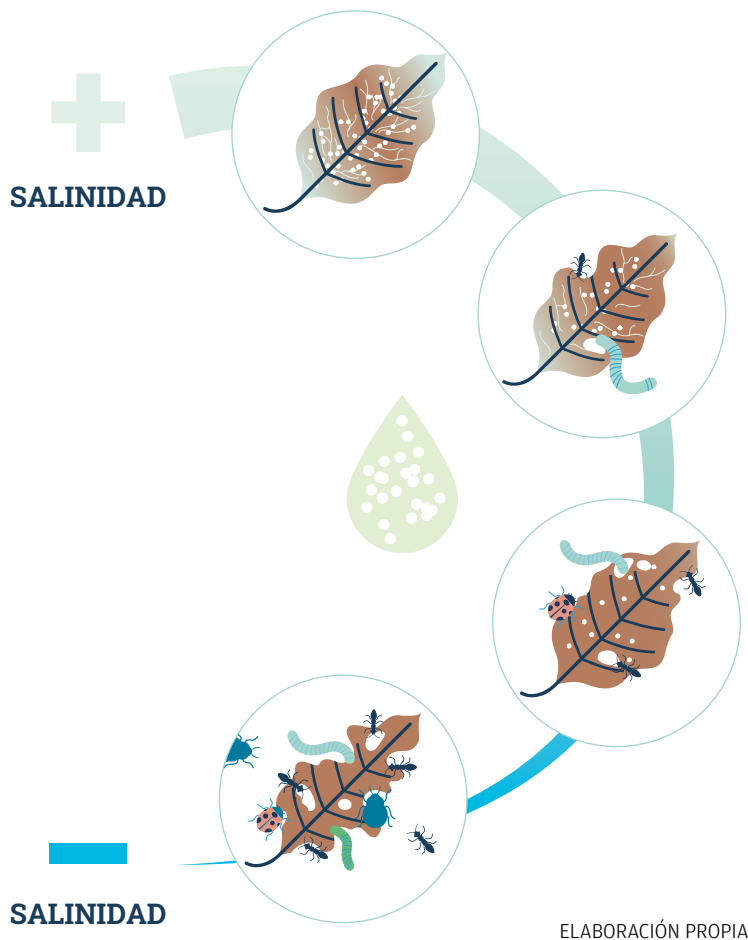
Consecuencias para la biodiversidad y el funcionamiento de los ecosistemas

La mayoría de los organismos que habitan en los ecosistemas acuáticos continentales (larvas de insecto, anfibios, peces, etc.) han evolucionado en agua dulce y no toleran salinidades elevadas. Esto es porque necesitan mantener un equilibrio osmótico, es decir, la concentración de iones (las partículas que componen la sal) dentro de la célula debe estar en equilibrio con la que hay en los fluidos del organismo. Si la concentración de sal en el agua aumenta, también lo hace en los fluidos del organismo, ya que los cuerpos de las especies acuáticas son semiimpermeables. Esto rompe el equilibrio osmótico y lleva a la muerte de la célula y del individuo. Para evitar este desequilibrio, los organismos tienen mecanismos internos que les permiten excretar iones, pero esto les consume mucha energía, que sería necesaria para funciones básicas como el crecimiento o la reproducción. Así, se ha encontrado que poblaciones de peces de lagos contaminados por sales tenían un menor tamaño que el de poblaciones de lagos que no lo estaban.

En términos generales la salinización causa una reducción de la biodiversidad acuática. A medida que la concentración de sales aumenta, desaparecen las especies de agua dulce (que son la mayoría) y al final tan solo sobreviven un puñado de aquellas capaces de tolerar concentraciones elevadas de salinidad (por ejemplo, algunas bacterias, algas y larvas de insecto). Si la concentración de sal llega a ser extremadamente elevada (como ha pasado, por ejemplo, en la torrentera de Soldevilla afectada por las minas de sal de Sallent, en Cataluña) el agua se vuelve transparente debido a la ausencia de organismos (incluyendo algas). Estamos inmersos en una crisis global en la que están desapareciendo las especies de agua dulce a un ritmo acelerado, mucho más rápido que las especies marinas y terrestres. La desaparición de la biodiversidad de agua dulce podría tener graves consecuencias para el funcionamiento de los ecosistemas, ya que todas las especies desempeñan una función en ellos. Por ejemplo, algunas larvas de insectos son responsables de triturar las hojas que caen en el lecho de los ríos. Al desmenuzarlas, la materia orgánica que contienen las hojas queda disponible para el resto

de especies, beneficiando así a todo el ecosistema. Se ha demostrado que estas larvas de insectos son especialmente sensibles a la salinidad, de manera que, cuando la concentración de sales aumenta, estos organismos desaparecen y, por tanto, la tasa de descomposición de la hojarasca en los ríos disminuye.

Gráfico 6 Efectos de la salinidad sobre la descomposición de hojarasca en ecosistemas acuáticos



Consecuencias para la salud humana

La ingesta de agua con elevado contenido en sales puede tener riesgos graves para la salud humana. Por ejemplo, en Bangladesh se registró un aumento significativo de la incidencia de preeclampsia en mujeres embarazadas, lo que puede llevar a la muerte de la madre, del bebé o de ambos. También se ha registrado un aumento de la hipertensión en diferentes lugares del mundo, asociado con una mayor incidencia de enfermedades cardíacas. Obviamente, los riesgos para la salud asociados con la ingesta directa de agua con alto contenido en sales son mucho más frecuentes en países en vías de desarrollo donde no se dispone de plantas de tratamiento de agua con tecnologías avanzadas. Sin embargo, los riesgos existen también en países desarrollados. Por ejemplo, en la ciudad de Flint (Michigan, Estados Unidos de América), desde el año 2014 hasta la actualidad, la elevada salinidad del agua, principalmente debida al uso de fundentes en carreteras, provocó una movilización del plomo que había en las cañerías del sistema de distribución de agua. Este plomo fue a parar al agua consumida por la población, encontrándose niveles de plomo entre dos y tres veces superiores a la media en la sangre de las niñas y niños de la ciudad. Esta contaminación afectó a entre 6000 y 12 000 menores, que presentaron evidencias de efectos en su salud mental y desempeño escolar. Muestras de agua recolectadas en 252 hogares por los propios residentes indicaron que los niveles de plomo en toda la ciudad habían aumentado. Además, casi el 17 % de las muestras registraron valores por encima del nivel de acción federal (15 partes por mil millones, ppb, del inglés *parts per billion*), en el cual se deben tomar medidas correctivas. Más del 40 % de las muestras revelaron valores superiores a 5 ppb de plomo, lo que los investigadores consideraron una indicación de un problema muy grave. Otro ejemplo es el del río Llobregat, donde las sales provenientes de la minería (especialmente sales de bromo) dieron lugar a la formación de trihalometanos (THM), que son compuestos químicos volátiles que se generan por la reacción de la materia orgánica con la sal. Desde 1977, el laboratorio de la Sociedad General de Aguas de Barcelona analizó la presencia de THM en las aguas del Llobregat y encontró concentraciones totales frecuentemente superiores a 100 microgramos por litro, superando el valor por encima del límite establecido por la Agencia de Protección Am-

biental estadounidense (EPA, por sus siglas en inglés). Aunque la situación mejoró a lo largo del tiempo, especialmente después de la construcción de un colector de salmueras en la mina de sal, la concentración de THM siguió siendo significativamente elevada. Los THM suponen un riesgo grave para el medio ambiente y la salud, según han corroborado estudios epidemiológicos en aguas de Barcelona que los relacionan con el cáncer de vejiga.

Además de los riesgos relacionados con la toxicidad del agua que bebemos, hay riesgos indirectos y menos evidentes que se deben considerar. Por ejemplo, en Australia la salinización de los humedales llevó a la proliferación del mosquito *Aedes camptorhynchus*, que es una especie halófila y el principal vector del virus del río Ross, cuyos síntomas incluyen dolor e hinchazón articular, dolor muscular, fiebre, cansancio y sarpullidos. De manera similar, aunque mucho menos estudiado, la salinización podría llevar a una mayor incidencia de malaria mediante la proliferación de vectores, ya que varias especies de mosquitos transmisores de esta enfermedad tienen preferencia por aguas salobres. Además, los paisajes salinizados, como los que se pueden encontrar en la región del mar de Aral, están asociados con afecciones respiratorias, debido al incremento de partículas en suspensión, y con una mayor incidencia de enfermedades mentales. En general, tenemos poca información sobre los efectos potenciales de la salinización sobre la salud humana, pero hay suficientes evidencias como para pensar que el nivel de riesgo es elevado. En consecuencia, la Organización Mundial de la Salud ha establecido este tema como prioritario para la investigación a nivel mundial.

Consecuencias económicas

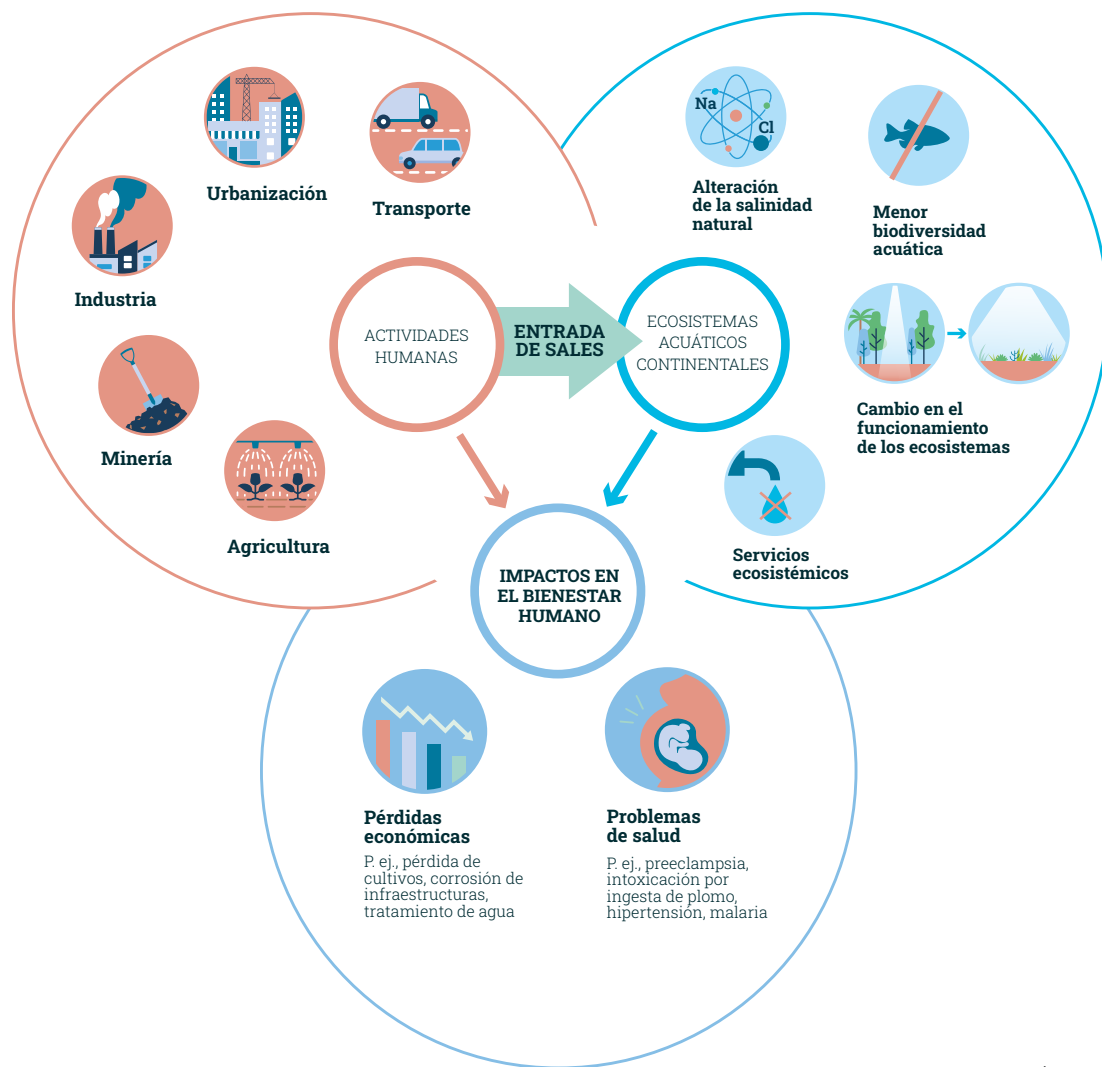
La SEA tiene graves consecuencias económicas que están empezando a ser cuantificadas. Por ejemplo, una revisión reciente sobre los impactos de la intrusión marina en Europa concluyó que sus costes económicos oscilan entre 577 y 610 millones de euros al año (M€) y se prevé que aumenten significativamente con los efectos derivados de la subida del nivel del mar. Uno de los costes económicos más evidentes de la SEA es el asociado a la reparación o reemplazo de infraestructuras dañadas por la corrosión que provocan las sales. Por ejemplo, en Australia se ha estimado un coste anual de 982 millones de dólares australia-

nos (equivalente a 603 M€) destinado a reparar la corrosión de infraestructuras clave para la distribución del agua. También existen costes evidentes relacionados con el tratamiento del agua para consumo humano, ya que la concentración de sales no debería superar el límite de 1 gramo por litro de agua establecido como seguro por la Organización Mundial de la Salud e idealmente debería estar por debajo de 600 miligramos por litro para preservar su palatabilidad. Por ejemplo, en el río Llobregat, a finales de la década de los 2000, se tuvieron que instalar sistemas de desalinización, con un coste de 130 M€, con el fin de eliminar las sales y los sólidos disueltos del agua para que esta fuese apta para el consumo humano. El funcionamiento de estas tecnologías de tratamiento de aguas requiere una enorme cantidad de energía. El sistema de electrodiálisis reversible (EDR) de Aigües Ter Llobregat (ATLL) consume aproximadamente 13 gigavatios hora (GWh) al año, a un coste aproximado de 1,2 M€ al año.

Hay otros costes económicos asociados a la SEA menos visibles pero que podrían llegar a ser importantes. Por ejemplo, los agricultores y ganaderos cercanos a las minas de sal de Sallent (Cataluña) han reportado gastos económicos asociados a la pérdida de cultivos, la muerte del ganado y la necesidad de abastecerse de agua potable (por ejemplo, mediante el uso de camiones cisterna) debido a la salinización del agua de sus pozos. En este sentido es importante mencionar que la salinización del suelo (ligada íntimamente a la SEA) tiene inmensos costes económicos como consecuencia de las reducciones en la productividad de los cultivos. Estimaciones recientes de la Unión Europea calculan una pérdida económica de entre 141 y 483 euros por tonelada producida para cultivos afectados por agua salina (por ejemplo, con conductividad de 4 decisiemens por centímetro). Dicho coste varía según el tipo de práctica agrícola, siendo la agricultura por inundación la más afectada por la salinización, seguida de la agricultura de regadío.



Por último, es importante tener en cuenta costes económicos indirectos asociados con la pérdida de beneficios que se obtienen de la naturaleza (también llamados *servicios ecosistémicos*). En este sentido, los beneficios más intuitivos son los relacionados con la provisión de alimento y agua. En el mar de Aral, la salinización llevó al colapso de las pesquerías, que suponían uno de los principales ingresos económicos de la región a finales de la década de 1950, con una producción anual de 50 000 toneladas que disminuyó a tan solo 5000 toneladas durante la década de 1990. Sin embargo, hay otros muchos beneficios que obtenemos de los ecosistemas acuáticos que se ven afectados por la SEA. Por ejemplo, los ecosistemas de agua dulce juegan un papel relevante en la retención, transformación y transporte de nutrientes y en el control del clima. En este sentido, la salinización altera los ciclos biogeoquímicos por medio de numerosos procesos tales como la desorción de fósforo del sedimento o la reducción en la descomposición de hojarasca y, aunque este es un tema que ha sido poco estudiado, podría conllevar un aumento de la emisión de gases de efecto invernadero desde los ecosistemas acuáticos hacia la atmósfera.

Gráfico 7 Causas y consecuencias de la salinización de los ecosistemas acuáticos

ELABORACIÓN PROPIA

dos



El CSIC ante los retos científicos, económicos y de gestión que presenta la salinización

La salinización de los ecosistemas acuáticos continentales es un fenómeno global que tiene consecuencias graves para la biodiversidad, el funcionamiento de los ecosistemas y el bienestar humano. No obstante, la salinización ha sido relativamente poco estudiada si lo comparamos con otras problemáticas ambientales. Por ejemplo, según la Web of Science, una de las principales bases de datos mundiales de referencias bibliográficas de contenido científico relevante para la investigación, en 1980 se publicaron alrededor de 300 artículos científicos sobre contaminación por metales y otros tantos sobre la contaminación por pesticidas, mientras que los artículos sobre salinización no llegaban a 20. En la década de los noventa, tomó mucha relevancia la contaminación por nutrientes, pero los artículos sobre salinización seguían siendo prácticamente inexistentes.

Sin embargo, no ha sido hasta los últimos diez años cuando la salinización ha empezado a aparecer como una línea de investigación de interés y como objeto de estudio en multitud de artículos científicos, pero recibiendo aún mucha menos atención que otras problemáticas ambientales. En este periodo se han publicado alrededor de 70 artículos al año sobre salinización frente a más de 600 relacionados con contaminación por nutrientes. Además, la investigación de este problema ambiental está fragmentada. Principalmente, se ha estudiado en América del Norte, Australia y Europa. Los estudios realizados también tienen una clara parcialidad en función del país donde se desarrollan. Por ejemplo, la contaminación por sal aplicada en carreteras prácticamente solo se ha estudiado en Canadá y Estados Unidos a pesar de que sabemos que ocurre en regiones de Europa como los Alpes o los Pirineos. Igualmente, la contaminación causada por la minería de sal casi exclusivamente se ha estudiado en Europa, aunque sabemos que hay grandes minas de sal en Canadá y diferentes países de Sudamérica.



En suma, nuestro conocimiento sobre la salinización es aún muy limitado. Desde el CSIC se está trabajando para llenar los vacíos de conocimiento existentes en torno a esta problemática ambiental, que podemos considerar como prioritaria. Por ejemplo, la Organización Mundial de la Salud ha identificado los riesgos de la salinización para la salud como una cuestión prioritaria de investigación debido a la falta de información y su potencial para afectar a millones de personas. Existen numerosos retos de investigación que van desde cuestiones fisiológicas sobre cómo los organismos regulan su contenido interno de sales mediante procesos celulares hasta cuestiones relativas a cómo la salinización altera la estructura y funcionamiento de los ecosistemas. También quedan aún muchos campos por explorar sobre su incidencia en el ámbito de salud humana y las consecuencias económicas derivadas de los efectos de la salinización. En este apartado, se muestran algunos de los retos asociados a la salinización a los que el CSIC está contribuyendo de manera significativa.



2.1.

Ampliación de estudios y diseño de estrategias de gestión

EN el contexto de cambio global, derivado de las actividades humanas, los ecosistemas acuáticos continentales están sujetos a estos factores que alteran su estructura y funcionamiento. Las respuestas frente a la combinación de estos factores son más complejas y difíciles de predecir que aquellas generadas por uno solo de ellos. La salinización no está exenta de esta complejidad, dado que abarca un amplio abanico de composiciones químicas y coexiste con otras problemáticas ambientales. Es por ello que aún existen muchas lagunas en el conocimiento sobre sus efectos, especialmente aquellos derivados de la interacción entre la salinización y otros factores ambientales. No obstante, el CSIC cuenta con grupos de referencia internacional sobre el estudio experimental de dichos efectos e interacciones. A continuación, se describen diferentes aspectos de la salinización que son importantes para entender su impacto sobre los organismos, las interacciones alimentarias entre ellos y las comunidades en los ecosistemas acuáticos continentales. Estas consideraciones también son relevantes para el desarrollo de estrategias de gestión que mitiguen estos efectos.

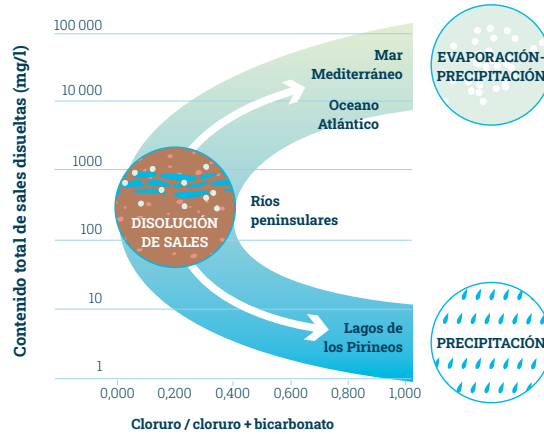
Como se ha indicado en la introducción, la salinización de ecosistemas acuáticos continentales debida a la actividad humana no solo conlleva un incremento en el contenido de sales, sino también una variación en la proporción de distintos iones. Este cambio es relevante, dado que los efectos nocivos de la salinidad sobre los organismos acuáticos dependen tanto del incremento de la salinidad como del tipo de iones que contribuyen a dicha salinidad. Por tanto, la salinización está asociada a una amplia variedad de «cócteles químicos», algunos de ellos de fácil identificación si se tiene en cuenta el origen de su causa. A continuación, se describen brevemente algunos de estos cócteles:

- **Agricultura:** La salinización del agua dulce en zonas agrícolas depende de las características de los suelos que aportan diferentes iones a las aguas de escorrentía. Además, en estas zonas, la aplicación de fertilizantes aporta diferentes iones como sodio, potasio, sulfato y cloruro que también contribuyen a la salinización. También los pesticidas tienen efectos tóxicos sobre los organismos, aunque no catalizan la salinización.

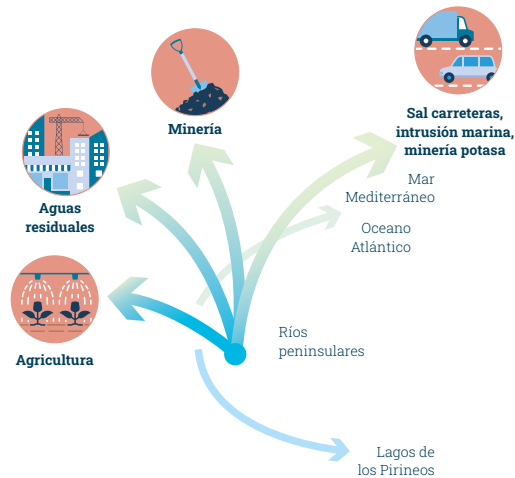
- **Aplicación de sal a las carreteras:** El cloruro de sodio es la sal que más se aplica a las carreteras para prevenir la formación de hielo, aunque también existen prácticas alternativas que usan el cloruro de magnesio o una mezcla de sales con aditivos orgánicos. Además de estas sales, las aguas de escurrimiento de las carreteras contienen compuestos tóxicos, como metales e hidrocarburos derivados de los vehículos, que llegan a los ecosistemas acuáticos receptores.
- **Minería de potasa:** Los efluentes de las minas de potasa suelen estar dominados por cloruro de sodio, pero las concentraciones de potasio y magnesio también pueden ser elevadas. En general, estos efluentes no contienen compuestos tóxicos adicionales, aunque algún estudio ha detectado la presencia de bromuro y la formación de trihalometanos en otros vertidos mineros.
- **Minería de carbón:** Los efluentes de las minas de carbón son ricos en sulfato, carbonato, calcio y magnesio. Estos iones suelen coexistir con otros elementos químicos y metales que se solubilizan por la exposición a las rocas. Además, el cóctel químico de estos vertidos puede caracterizarse por tener un pH ácido y, por tanto, tiene mayor capacidad de movilizar metales.
- **Actividades industriales y urbanas:** Aunque de origen muy diferente (textil, cárnica, metalúrgica, papelera, farmacéutica), los efluentes industriales pueden tener altas concentraciones de sulfato. Estos, además, se combinan con los propios de las actividades urbanas, que contienen una amplia gama de contaminantes, como compuestos orgánicos, productos farmacéuticos, plásticos y metales. Estos vertidos contienen cócteles químicos muy complejos y diversos con diferentes grados de salinidad y toxicidad.

Gráfico 8 Contenido y composición de sales en ecosistemas acuáticos y factores naturales y antrópicos que influyen en la salinidad del agua

Distribución de ecosistemas acuáticos en función de su salinidad natural y factores que la determinan



Proyección de cambios en la composición salina del agua de los ecosistemas acuáticos debidos a diferentes actividades humanas



En atención a esta amplia diversidad de cócteles químicos causantes de la salinización, buena parte de la investigación se ha centrado en examinar experimentalmente el efecto del incremento de la salinidad derivada del cloruro de sodio (NaCl) sobre diferentes aspectos de los organismos acuáticos. Desde el CSIC se pone de manifiesto que el efecto de la salinidad sobre los organismos puede estar modulado por las condiciones físico-químicas del agua de los ecosistemas acuáticos. En concreto, la tolerancia de los organismos de agua dulce a la salinidad es mayor a menor temperatura y mayor dureza (concentración elevada de carbonato cálcico) del agua. Del mismo modo, la salinidad tiene poco efecto en aguas de pH ácido (valores inferiores a 7), mientras que en aguas de pH alcalino (valores superiores a 7) el efecto se incrementa. No obstante, es de esperar que cada cóctel químico tenga sus efectos específicos sobre los organismos y las comunidades de los ecosistemas receptores. También hay evidencias de que su efecto puede ser diferente si los aportes ocurren de modo agudo (es decir, durante un período breve y, normalmente, con concentraciones elevadas de sales) o crónico (es decir, durante un período largo de tiempo y, normalmente, con concentraciones bajas de sales), siendo estos los que causan las alteraciones más significativas.

Los efectos indirectos de la salinización sobre los ecosistemas acuáticos

La salinización puede provocar cambios en la concentración de otros compuestos químicos, que a su vez afectan a los organismos y ecosistemas acuáticos. En este sentido, la salinización no solo causa efectos directos sobre los organismos acuáticos, sino también indirectos. Por ejemplo, personal investigador del CSIC ha demostrado que el incremento de sales favorece el aumento de la alcalinidad del agua, que a su vez modifica la disponibilidad de materia orgánica, nitrógeno y fósforo, y los procesos biogeoquímicos asociados a estos elementos. Este fenómeno ha sido descrito como el *síndrome de la salinización*.

Aparte de este fenómeno, se ha observado que una mayor concentración de sales conlleva cambios que indirectamente pueden mitigar los efectos derivados de otras problemáticas ambientales, como la reducción de la toxicidad de los metales sobre los organismos. Pero también pueden intensificarlos, como la movilización de metales pesados en las aguas de escorrentía que terminan llegando a los ecosistemas acuáticos procedentes de las sales que se usan en las carreteras para facilitar el deshielo.

Otros efectos indirectos derivados de la salinización se han observado en ríos que discurren por zonas agrícolas, en donde la toxicidad de algunos pesticidas se intensifica en condiciones de elevada salinidad, aunque diversos estudios muestran que este fenómeno no es generalizado. El incremento de sales también puede favorecer los problemas derivados de la eutrofización (el enriquecimiento excesivo en nutrientes) de los ecosistemas acuáticos. Los iones salinos pueden movilizar el nitrógeno orgánico, el amonio y el fosfato adsorbido al sedimento del lecho fluvial. El aumento de nitrógeno y de fósforo puede causar un exceso de producción algal que provoque un descenso de la disponibilidad de oxígeno, sobre todo durante la noche, afectando negativamente a los macroinvertebrados y peces. Además, el predominio de estos dos elementos químicos, junto con un desequilibrio en la proporción de ambos, puede derivar en un crecimiento excesivo de cianobacterias. La producción de niveles elevados de cianotoxinas tiene consecuencias negativas sobre las comunidades acuáticas, las aves e incluso la población humana. Un caso paradigmático de este efecto indirecto de consecuencias medioambientalmente devastadoras es el de catástrofe del río Oder de 2022, descrito en la primera parte de este informe.

Estos ejemplos ponen de manifiesto la importancia de abordar los problemas de la salinización desde un punto de vista amplio que vaya más allá del efecto directo que los iones salinos pueden tener sobre los organismos acuáticos y sus ecosistemas. Para ello es imprescindible realizar estudios interdisciplinarios que incorporen perspectivas diferentes sobre el mismo problema.

Esta aproximación ha de permitir anticipar impactos a diferentes niveles (químicos, geológicos, biológicos) y abordar respuestas ecosistémicas complejas.

Efectos derivados de la interacción entre salinización y otras problemáticas ambientales

La salinización suele ocurrir junto con muchas otras alteraciones derivadas de la actividad humana (por ejemplo, eutrofización, contaminación por metales, aportes de sólidos en suspensión y cambio climático). Es importante conocer si existe una interacción entre los distintos factores involucrados en estas problemáticas ambientales y, en caso afirmativo, saber qué tipo de efecto produce para anticipar sus consecuencias sobre la estructura y la función de los ecosistemas acuáticos. La actuación recíproca de los factores puede causar efectos aditivos (equivalentes a la suma de los efectos de cada factor por separado), o bien un efecto superior (sinergismo) o inferior (antagonismo) al causado por la suma del efecto de cada factor.

Un equipo de investigación, con representación del CSIC, realizó una compilación de estudios experimentales enfocados a examinar los efectos de la salinidad y de cómo varían cuando esta se combina con otros factores involucrados en problemáticas ambientales (temperatura, nutrientes, metales, pesticidas, dióxido de carbono, hipoxia, sulfato o pH). El estudio indicó que, entre los factores examinados, la salinidad era el que mostraba el efecto negativo más elevado sobre los organismos. Este resultado pone en evidencia la necesidad de incrementar los esfuerzos de gestión para mitigar el problema de la salinización. Además, se observó que la mayoría de estudios realizados se han centrado en la interacción de la salinidad con la temperatura del agua o con los compuestos tóxicos. La combinación de salinidad y temperatura mayormente causa efectos aditivos (54 % de las 105 respuestas examinadas) sobre invertebrados y algas. Por el contrario, la interacción entre la salinidad y los compuestos tóxicos produce efectos antagónicos básicamente sobre vertebrados.



Existe menos información con relación a la interacción entre la salinidad y otros factores considerados de estrés, aunque algunas combinaciones ocurren comúnmente en nuestro país (como en ríos receptores de efluentes de estaciones depuradoras de aguas residuales o afectados por sequía o abstracción de agua) y merecerían ser investigadas con más detalle. El caso de los ríos receptores de efluentes de estaciones depuradoras de aguas residuales es un ejemplo paradigmático del estudio de efectos derivados de múltiples factores de estrés (por ejemplo, conjuntamente ocurre un incremento de salinidad, temperatura, materia orgánica, nutrientes, contaminantes emergentes y patógenos). Aunque es una situación compleja y difícil de abordar de manera experimental, sería muy interesante determinar si existe una jerarquía entre factores en función de los efectos que causan, para poder gestionar esta problemática de manera más efectiva. En el CSIC se han investigado los efectos de

la salinidad en combinación con concentraciones elevadas de nutrientes. Este estudio muestra que la alta proporción de sales afecta a las comunidades microbianas del biofilm, a la composición de los productores primarios (dominio de cianobacterias frente a diatomeas y algas filamentosas) y a la riqueza y diversidad de macroinvertebrados. No obstante, este efecto disminuye en condiciones de elevadas concentraciones de nutrientes (interacción antagónica). Otra investigación, centrada en evaluar los efectos derivados de la sequía estudió la interacción entre la salinidad, la velocidad del agua y la turbidez. En este estudio se observó que la salinidad puede favorecer la resistencia de los organismos frente a la desecación, sin embargo, la aridez puede reducir la resistencia de los organismos a la salinidad. De todos modos, se necesitan más estudios experimentales para detallar más estas respuestas y ver si son consistentes entre ríos con características diferentes.

22.

Trabajo en torno al impacto ecológico

LA salinización de los ecosistemas acuáticos tiene un enorme impacto ecológico y afecta a los diferentes niveles de organización, desde los individuos a los ecosistemas, así como a procesos ecológicos clave y a las interacciones entre organismos. Los efectos sobre la biodiversidad son múltiples; afectan de forma directa a la supervivencia de organismos y favorecen la dispersión y el establecimiento de especies invasoras, una de las principales causas de pérdida de biodiversidad a nivel mundial. La salinización también puede tener efectos no letales (es decir, cambios en la condición biológica sin causar la muerte inmediata), que pueden afectar significativamente a la salud, el comportamiento, el crecimiento, la reproducción y la capacidad para sobrevivir a largo plazo de los organismos acuáticos. Desde el CSIC se está trabajando en todas estas direcciones.

Impactos sobre diferentes grupos de organismos acuáticos

La salinización del agua afecta a una amplia variedad de organismos acuáticos, desde microorganismos, como bacterias y algas, hasta macroorganismos, como macroinvertebrados, peces, mamíferos y plantas acuáticas. Cuando aumenta la salinidad en ecosistemas de agua dulce, a menudo desaparecen las especies más sensibles, conocidas como *estenohalinas*, que solo pueden sobrevivir en un rango de proporción de sales muy limitado, a diferencia de lo que ocurre con las *eurihalinas*, que pueden adaptarse a una gama más amplia. En el CSIC, la investigación sobre la salinización abarca todos los grupos principales de especies que habitan los ecosistemas acuáticos continentales.

Las **comunidades microbianas** son fundamentales para el funcionamiento de los ecosistemas acuáticos. Los microorganismos regulan el ciclo de nutrientes, descomponen materia orgánica, participan en la producción primaria, controlan gases de efecto invernadero, purifican el agua y sostienen la red alimentaria, contribuyendo significativamente a la resiliencia y estabilidad de estos ecosistemas. Investigaciones del CSIC han demostrado cambios en la actividad microbiana de sedimentos de humedales costeros afectados por salinización, pasando de estar dominados por bacterias heterotróficas a estarlo por arqueas, lo que

indica cambios fundamentales en las funciones del ecosistema microbiano, con potenciales implicaciones a nivel de descomposición de materia orgánica y la producción de gases de efecto invernadero.

El **fitoplancton** es un grupo de algas diminutas que viven en el agua y tienen como función primaria la fotosíntesis, produciendo oxígeno y convirtiendo dióxido de carbono en materia orgánica. Esta biomasa forma la base de la red alimentaria en los ecosistemas acuáticos y es consumida por una variedad de organismos, que incluyen zooplancton, otros invertebrados y peces pequeños. Desde el CSIC, se ha comprobado que aumentos de concentración de cloruro por encima de 500 miligramos por litro provocan importantes reducciones en la biomasa del fitoplancton. Se cree que, probablemente, este problema es debido a los efectos tóxicos directos en la regulación del agua y la asimilación de nutrientes de las algas. Por ejemplo, si agregamos demasiada sal a un estanque, las algas pueden tener problemas para mantener su equilibrio de agua y sustancias de las que se nutre. Esto es como si una persona tratara de beber agua salada; su cuerpo tendría dificultades para mantenerse hidratado y absorber los nutrientes necesarios. Con lo cual, el exceso de sales no solo afecta a las algas, sino también a todo el ecosistema acuático que depende de ellas.

El **zooplancton** son pequeños animales (en su mayoría crustáceos) que viven en el agua y actúan como un eslabón intermedio en la red alimentaria acuática. Por un lado, se alimentan del fitoplancton, controlando así la producción primaria, y, al mismo tiempo, son consumidos por peces pequeños, larvas de peces e invertebrados. Esta transferencia de energía es esencial para la supervivencia de muchas especies acuáticas. Estudios del CSIC han demostrado que el aumento de la concentración de cloruro derivado de actividades humanas conlleva una reducción drástica en la biomasa y tamaño corporal promedio del zooplancton, con importantes consecuencias para la red alimentaria.

Los **macroinvertebrados** actúan como indicadores de la calidad del agua, reciclan nutrientes, forman parte crucial de la red alimentaria y contribuyen a la estabilidad y resiliencia del ecosiste-

ma. Un estudio experimental liderado por el CSIC ha demostrado que concentraciones de 3000 miligramos por litro pueden causar disminuciones significativas en la riqueza y diversidad de macroinvertebrados. Estos resultados son cruciales para establecer los umbrales críticos de concentración de la sal y nutrientes en ecosistemas fluviales, fijar mejores indicadores y desarrollar planes de protección de ambientes acuáticos frente a la salinización.

Las **aves acuáticas** son componentes esenciales en sus ecosistemas y cumplen numerosas funciones clave, como la dispersión de organismos, uno de los principales servicios ecosistémicos que ofrecen a la sociedad, como demuestran numerosas investigaciones de diversos grupos del CSIC. Además, son excelentes bioindicadoras de cambios ambientales y muy útiles para la conservación de otros grupos taxonómicos en tanto en cuanto sirven de paraguas protectores de la biodiversidad. Es decir, si conservamos las aves acuáticas podemos asumir que estamos protegiendo una gran parte de la biodiversidad. Sin embargo, el cambio climático y el aumento de la salinidad están afectando significativamente a las aves acuáticas en los humedales mediterráneos; por un lado, a través de la disminución de plantas acuáticas e invertebrados, y por otro afectando a su fisiología. El aumento de la salinidad es un importante motivo de estrés para las aves, que deben excretar el exceso de sal cuando ingieren agua al alimentarse, lo que, como ya se dijo en la sección 1, supone un coste energético considerable. Además, un exceso de sal puede aumentar la deshidratación y afectar a la impermeabilidad de las plumas. La investigación del CSIC ha demostrado que la salinidad es el factor más importante que influye en la distribución de estas aves.

Impactos sobre las interacciones entre organismos y las redes tróficas

La salinización afecta al funcionamiento de los ecosistemas al alterar las interacciones entre los organismos acuáticos. Por ejemplo, si la salinidad reduce las poblaciones de algas y plantas acuáticas, los invertebrados y peces que dependen de ellas también se verán afectados. Esto, a su vez, afectará a las aves y otros animales que se alimentan de peces. Estos cambios pueden llevar a una disminución de la biodiversidad y a la pérdida de

```
graph BT; A[Microorganismos] --> B[Microalgas]; B --> C[Consumidores Primarios]; C --> D[Consumidores Secundarios]; D --> E[Consumidores Terciarios]; E --> A;
```

DESCOMPONEDORES

- ↓ Menor almacenamiento de carbono
- ↓ Menor capacidad de eliminar nitrógeno del agua

PRODUCTORES PRIMARIOS

- ↓ Reducción de la biomasa de microalgas

CONSUMIDORES PRIMARIOS

- ↓ Reducción de la biomasa de microcrustáceos
- ↓ Disminución de la eclosión de huevos

CONSUMIDORES SECUNDARIOS

- ↓ Reducción del crecimiento y supervivencia de peces
- ↓ Reducción del crecimiento y riqueza y diversidad de macroinvertebrados

CONSUMIDORES TERCIARIOS

- ↑ Aumento de la deshidratación
- ↓ Reducción de la impermeabilidad de sus plumas

ELABORACIÓN PROPIA



servicios ecosistémicos importantes como la calidad del agua y la recreación. Detectar estos efectos en ambientes naturales es complicado, ya que los estudios de campo no siempre pueden aislar la salinidad de otros factores. Sin embargo, el uso de sistemas experimentales, como mesocosmos, permite su estudio en condiciones controladas. Así, en el CSIC se investiga la salinización de los ambientes acuáticos en riberas o charcas experimentales. Por ejemplo, estudios en España han probado que el aumento de la salinidad afecta las dinámicas depredador-presa, alterando la abundancia y riqueza de invertebrados herbívoros, y, a su vez, la biomasa de algas. Estas investigaciones ilustran que, incluso sin mortalidad inmediata, la salinidad puede inducir un estrés significativo en los depredadores o las presas, lo que podría llevar a cambios ecológicos a largo plazo.

La desaparición de especies debido a la salinización y a la modificación de las interacciones tróficas afecta al equilibrio de los ecosistemas acuáticos. Es necesario estudiar los efectos de la salinización en múltiples niveles tróficos para comprender cómo las respuestas de los organismos acuáticos están interconectadas. Este enfoque integral permite desarrollar estrategias más efectivas para proteger y gestionar estos ecosistemas frente a los desafíos del cambio ambiental. El CSIC lidera varios proyectos que evalúan los efectos de la salinización en toda la red trófica acuática, incluyendo microorganismos, algas, crustáceos y otros invertebrados. Se ha documentado que los ecosistemas acuáticos pueden sufrir cambios irreversibles cuando se modifican las interacciones tróficas. Por ejemplo, en lagos someros contaminados por nutrientes se han registrado cambios de una fase de agua clara dominada por plantas acuáticas a otra de aguas turbias dominada por floraciones masivas de algas. Esto se debía principalmente a la pérdida de pulgas de agua, pequeños crustáceos que se alimentan de algas. Una vez que el cambio de fase ocurre, es muy difícil revertirlo, debido a los efectos en cascada que activa, de ahí que no baste simplemente con reducir las concentraciones de nutrientes. Esta nueva fase de aguas turbias supone una merma de la biodiversidad y una pérdida de servicios ecosistémicos, tales como el acceso al agua potable y el valor recreacional, ya mencionados. Algunos estudios sugieren

que la salinidad podría causar cambios de fase similares, ya que especies clave como la pulga de agua son muy sensibles a la salinidad. Anticipar dichos cambios es vital en un contexto de escasez de agua y cambio climático, que intensificará la salinización.

Impactos sobre la biodiversidad a través de especies invasoras

Las especies invasoras representan una de las mayores amenazas a la biodiversidad global, comprometiendo el funcionamiento, la estructura y la estabilidad de los ecosistemas. Además, tienen efectos devastadores en los servicios ecosistémicos y el bienestar humano, con importantes consecuencias económicas y de salud pública.

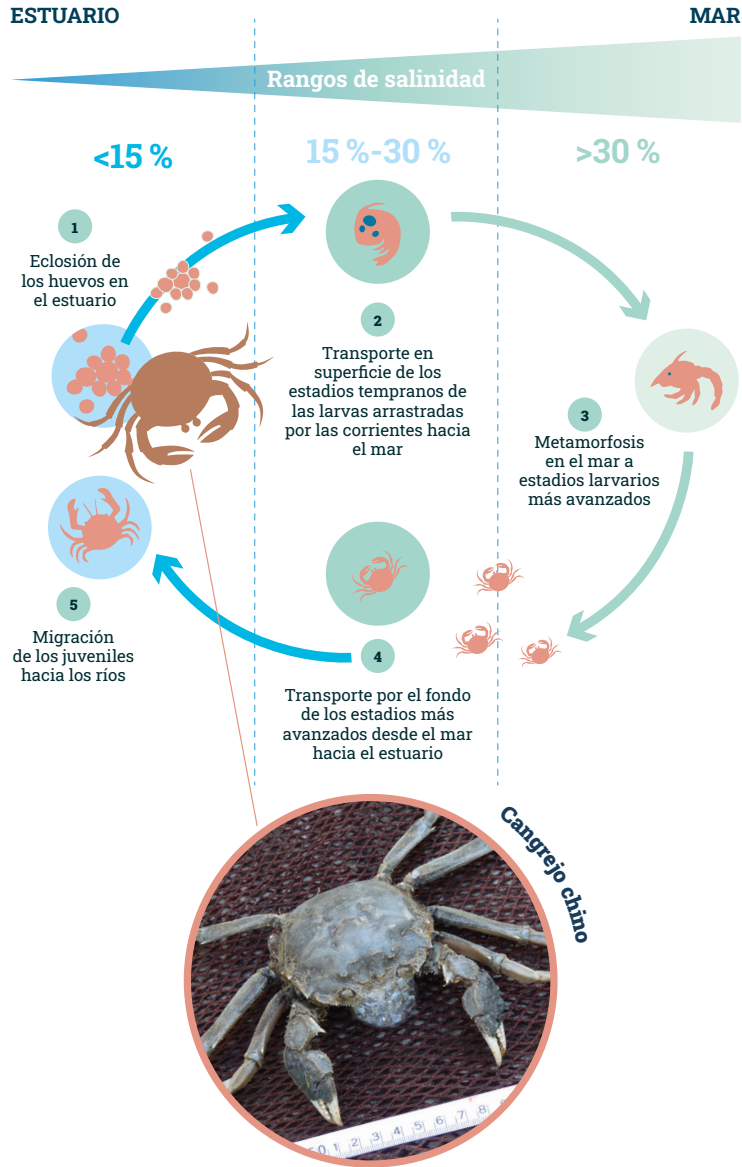
Existen numerosos ejemplos que muestran cómo la salinización está promoviendo la expansión de especies exóticas. El caso del mar de Aral es uno de los ejemplos más conocidos sobre cómo el aumento de salinidad llevó a un reemplazo de las especies nativas de peces por exóticas invasoras antes de su completa desecación. Aunque el efecto de la salinización en el éxito invasor depende de la especie y del contexto, se puede predecir en cierta medida qué condiciones, características de historia de vida o vías de introducción pueden ser más propicias para el establecimiento y expansión ante un incremento de salinidad del medio. Por ejemplo, el agua de lastre (aquella que se utiliza para estabilizar los barcos) es la principal vía de introducción de especies en aguas costeras en todo el mundo. Esta vía es de especial importancia en España al concentrar hasta un 10 % del tráfico marítimo internacional, y es particularmente vulnerable a experimentar una intensificación en la entrada de especies bajo escenarios de salinización. Si bien solo una pequeña parte de los organismos transportados puede instalarse en aguas dulces, el aumento de la salinidad de estos ecosistemas podría incrementar la probabilidad de supervivencia y establecimiento. Por otro lado, las especies de agua salobre, las eurihalinas (con un amplio rango de tolerancia a la salinidad) o las diádromas (especies migratorias que pasan por medios de diferente salinidad a lo largo de su ciclo de vida), también son candidatas a ampliar sus rangos

de distribución ante un escenario de salinización. En este sentido, se debería priorizar la vigilancia de estas especies y vías de introducción. A continuación, se citan algunos ejemplos de especies invasoras de alta preocupación en España, que reúnen una o varias de las características mencionadas.

Cangrejo chino (*Eriocheir sinensis*). Se trata de una de las cien especies invasoras más dañinas del mundo y se encuentra entre las veinte peores de España (GEIB, Grupo Especialista en Invasiones Biológicas). Originaria de las costas de Asia oriental, se detectó por primera vez en el norte de Europa a principios del siglo pasado, y desde entonces se ha expandido por toda la costa Atlántica, llegando hasta Portugal (río Tajo) y España (Vigo, País Vasco y cuenca del Guadalquivir). Aunque su principal vía de entrada es el agua de lastre o adhesión al casco de los barcos, en España también se ha introducido voluntariamente a través del comercio ilegal, al ser un producto muy popular en el mercado de comida asiática.

El cangrejo chino es una especie migratoria. Los adultos se desplazan en otoño-invierno desde los ríos al mar, donde se reproducen. Por su parte, las larvas y jóvenes migran hacia los ríos en primavera, donde terminan de desarrollarse hasta el estado adulto. En este proceso, las larvas sufren cambios ontogenéticos en su óptimo de salinidad y muestran una buena tolerancia (entre el 15 ‰ y 30 ‰) en los estadios más tempranos. En las fases intermedias son más dependientes de salinidades mayores (de más del 30 ‰); mientras que en las más avanzadas muestran mayor tolerancia a bajas salinidades (de menos del 15 ‰).

Gráfico 10 Efecto de la salinidad en el desarrollo larval del cangrejo chino



Elaboración propia. Foto cangrejo chino: JUAN GARCÍA DE LOMAS

El paso al estadio adulto puede ocurrir a lo largo de todo el rango de salinidad. En el estuario del Guadalquivir, la presencia de cangrejo chino ha sido objeto de importante preocupación, ya que se detectó una población muy abundante en la dársena del puerto de Sevilla hace una década. Ello ha motivado acciones de control mediante nasas de fondo, especialmente durante su migración aguas abajo (otoño-invierno), limitando su llegada al mar y, por tanto, su reproducción. Sin embargo, el aumento de salinidad en el estuario podría facilitar que esta especie se reproduzca aguas arriba, complicando las acciones de control. Desde el CSIC, en colaboración con diferentes confederaciones hidrográficas, se está trabajando en acciones de monitoreo. Actualmente (2024), existe una campaña en la cuenca del Segura en busca de cangrejo chino y otras especies invasoras (cangrejo rojo americano, cangrejo señal, cangrejo mármol, cangrejo azul y cangrejo australiano). Por parte de la Infraestructura Científico-Técnica Singular de Doñana (ICTS-RBD), perteneciente a la Estación Biológica de Doñana (EBD, CSIC), también se realiza una monitorización a largo plazo de las comunidades acuáticas en las que se presta especial atención a la aparición del cangrejo chino, entre otras especies invasoras.

Se sabe que el cangrejo chino tiene un enorme impacto ecológico, económico y de salud. Afecta a la biodiversidad de invertebrados, macrófitos, algas y peces a través de la predación y competencia, contribuyendo a su extinción local. Altera los márgenes de los ríos a través de su actividad excavadora, favoreciendo la erosión. No solo preocupa el impacto ecológico, sino los enormes costos económicos asociados. Debido a su elevada densidad, ocasiona daños en las cañerías, sobre todo durante la migración, en instalaciones de acuicultura, en las pesquerías, alimentándose de especies de importancia comercial, etc. Aunque en España aún no existen estudios al respecto, en países como Alemania, donde se detectó por primera vez la especie, se han estimado pérdidas anuales de 80 millones de euros. Según un estudio de un equipo internacional de científicos de España, Estados Unidos, Alemania, Reino Unido, República Checa, Italia y Francia, con la participación de personal investigador de la

Estación Biológica de Doñana, han estimado en 271 millones de dólares los costes para la erradicación de las especies invasoras de cangrejos, aunque dichos costes están muy subestimados. A nivel de salud, el cangrejo chino es hospedador intermedio del parásito pulmonar *Paragonimus westermani* (trematodo conocido como *duela pulmonar*), cuyo hospedador final son los mamíferos, incluido el ser humano. La infección, provocada por el consumo de cangrejos crudos o escasamente cocinados, ocasiona paragonimiasis, una enfermedad pulmonar que puede llegar a ser grave; también se han reportado reacciones alérgicas y trastornos del sistema nervioso central. Además de lo anterior, el consumo del cangrejo puede afectar a la salud humana debido a su tolerancia a altos índices de contaminación y bioacumulación de grandes cantidades de contaminantes; esto, junto con el escaso control de calidad que existe, hacen del cangrejo chino un producto poco apto para el consumo.

Gambusia o pez mosquito (*Gambusia holbrooki*). Al igual que el cangrejo chino, la gambusia es una de las cien especies invasoras más dañinas del mundo. Es originaria de la costa atlántica de Estados Unidos y se introdujo deliberadamente en España en los años veinte para el control de los mosquitos vectores de la malaria, desde donde se expandió por toda Europa. En España es una de las especies de peces de agua dulce más ampliamente representada, sobre todo en el levante y el suroeste de la península ibérica y en la cuenca del Ebro. A pesar de que la gambusia es un pez de agua dulce, es capaz de sobrevivir en un amplio rango de salinidades y presenta su óptimo desarrollo en aguas oligohalinas (entre 0,5 ‰ y 5 ‰, ligeramente por encima de lo que se considera agua dulce, menos de 0,5 ‰) o mesohalinas (entre 5 ‰ y 18 ‰). Además de su tolerancia a la salinidad, esta especie es capaz de sobrevivir en ambientes degradados y contaminados. Por otro lado, investigaciones del CSIC ponen de manifiesto la baja susceptibilidad a los parásitos, uno de los principales mecanismos que explican el éxito competitivo de las especies invasoras (hipótesis de liberación del enemigo).



El impacto ecológico de la gambusia en las comunidades nativas es enorme y afecta profundamente al funcionamiento del ecosistema a través de efectos cascada causados por la depredación y la competencia con las especies nativas. Este pez, de apenas seis centímetros de longitud, está provocando la extinción de numerosas especies de peces nativos, como el fartet, su congénere el salinete (*A. baeticus*), el samarugo (*Valencia hispánica*) o el espinoso (*Gasterosteus aculeatus*). Además, la gambusia depreda sobre los huevos y las larvas de anfibios, provocando el declive de sus poblaciones, como han mostrado investigaciones del CSIC para el caso del tritón pigmeo (*Triturus pygmaeus*), especie endémica de la península ibérica. También depreda larvas de insecto y organismos del zooplancton, favoreciendo la proliferación de fitoplancton, el aumento de la turbidez y la reducción del oxígeno del agua. De esta forma contribuye a la eutrofización, uno de los mayores problemas de contaminación que sufren los ecosistemas acuáticos en todo el mundo.



2.3.

Evaluaciones relacionadas con la salud humana

COMO se ha explicado en la sección 1, es crucial comprender los riesgos potenciales de la salinización de ecosistemas acuáticos continentales para la salud humana. En este contexto, el CSIC puede jugar un papel clave dado que sus investigaciones abordan un amplio abanico de disciplinas y a menudo se combinan para evaluar diferentes aspectos relacionados con la salud humana. Uno de los ejemplos más conocidos con relación a las consecuencias de la salinización es el de la presencia de **polvos salinos** en la atmósfera. La contaminación del aire es un grave problema de salud que causa, según la OMS, unos tres millones de muertes cada año, principalmente en grandes urbes, donde la población está expuesta a las emisiones de partículas y gases por parte de los automóviles y la industria. Una fuente de contaminación del aire es la presencia de polvos salinos. Estas partículas son originadas por la desecación de cuerpos de agua y la exposición de precipitados de sal a los agentes atmosféricos (lluvia, viento, etc.), lo que facilita la resuspensión y el transporte atmosférico de las partículas salinas y la exposición de la población a estas partículas. Los iones de sal y los metales traza se movilizan juntos en el polvo salino y contribuyen a la contaminación atmosférica. Por ejemplo, en el mar de Aral el transporte y la deposición atmosférica de polvo salino y contaminantes asociados ha causado enfermedades respiratorias y cáncer de esófago y garganta, afectando así la salud en la población en las zonas expuestas. Además, se han identificado diversas enfermedades como anemia, diarreas, disfunción tubular renal y altos niveles de contaminantes orgánicos persistentes en niños de la región. El CSIC desarrolla y lidera investigaciones novedosas para identificar los mecanismos fisiológicos relacionados con la exposición a polvos desérticos (por ejemplo, del Sahara) y su relación con problemas de insuficiencia cardíaca como una de las causas más importantes de problemas de salud humana en la península ibérica.



Además, actualmente el CSIC está liderando investigaciones sobre los efectos de la intrusión salina en el ecosistema del río Gambia y las comunidades locales que dependen de la calidad del agua de este río como recurso hidrológico para su subsistencia. En este contexto se plantean numerosos retos para evaluar los efectos de la salinización para la salud. Por ejemplo, la mayoría de las poblaciones a lo largo del río son rurales y se abastecen directamente del agua de los pozos. Si estos pozos se salinizan, el agua disponible para el consumo pasa a tener un alto contenido de sales. Esto tiene consecuencias para la salud. Por ejemplo, como ya se dijo, las mujeres embarazadas corren el riesgo grave de desarrollar preeclampsia y pueden morir a causa de esta enfermedad. Gambia es, además, un país con una elevada incidencia de malaria, enfermedad transmitida por mosquitos que pasan la primera parte de su vida dentro del agua en forma de larvas. Aunque las especies predominantes en Gambia son de agua dulce, algunas especies presentes en países vecinos tienen preferencia por aguas salobres. Por tanto, la distribución y abundancia de los mosquitos transmisores de la malaria podría verse afectada por un incremento de salinización de las aguas continentales debido a la intrusión salina.

2.4.

La problemática de la salinización para la economía

EXISTE poca información acerca de los costes económicos asociados a la problemática de la salinización. Desde el CSIC se están liderando investigaciones en algunos aspectos clave. Por ejemplo, la extracción de agua para agricultura o consumo humano en zonas costeras potencia la intrusión del agua de mar, ya explicada en la sección 1. Este proceso tiene consecuencias económicas graves. Primero, la reducción de la calidad y cantidad de agua disponible en estos acuíferos para el consumo causa un aumento del precio del agua. Esto condiciona el acceso a este recurso al estatus económico. Segundo, los costes de remediación del problema son muchas veces insostenibles. Estas medidas incluyen reducir el bombeo de agua subterránea (lo que supone un menor abastecimiento para consumo humano), la recarga artificial de acuíferos y la reubicación y reducción de pozos. Estudios recientes del CSIC han demostrado que la intensificación de la agricultura en invernaderos en zonas áridas de la península está provocando la degradación de los recursos hídricos. La sobreexplotación de acuíferos y la intrusión marina son consecuencias directas de esta práctica, lo que está comprometiendo la calidad del agua y los ecosistemas costeros. Como consecuencia de estos cambios, se han verificado pérdidas de biodiversidad y aumentos de emisiones de carbono. La intensificación de la producción agrícola genera una aún mayor dependencia y vulnerabilidad a la calidad de los recursos hídricos, creando un ciclo vicioso. El mismo estudio ha revelado que, en algunos casos, la salinización de acuíferos provoca reducciones de más de un tercio de la capacidad de extracción de agua (ejemplo, la comarca de Campo de Dalías, en la sierra de Gádor), con costes económicos asociados a la pérdida de productividad agrícola.

En un contexto de reservas de agua dulce críticamente bajas, un problema especialmente preocupante en algunas regiones de España, las plantas desalinizadoras aparecen como una posible solución técnica para abastecer de agua a la población. Sin embargo, desalar agua para consumo humano es significativamente más caro que potabilizar agua dulce natural de acuíferos, ríos o lagos. Por ejemplo, se estima que el uso de agua desalada para actividades agrícolas tendría un coste casi diez veces mayor que el uso de agua procedente de acuíferos. El proceso de desalación implica un pretratamiento, la ósmosis inversa y el postratamiento con el fin de garantizar la calidad del agua para diferentes usos. Aunque costosa, el agua desalada es una alternativa necesaria debido a los bajos niveles de los embalses y las prolongadas sequías que están afectando regiones productivas de España, como Cataluña, Andalucía y la cuenca del Segura. El problema añadido es que las plantas desalinizadoras no solo producen agua dulce, sino que también, como ya se avanzaba en la sección 1, generan salmuera como producto residual. El CSIC ha estudiado los efectos ambientales de las salmueras de alta salinidad descargadas desde las plantas desalinizadoras sobre praderas marinas, como las de *Posidonia oceanica*, especie endémica del Mediterráneo y de gran importancia ecológica, que han mostrado una gran vulnerabilidad a este tipo de vertidos resultantes de plantas de desalación. La pérdida de estos delicados ecosistemas tiene profundas repercusiones económicas en las pesquerías locales, ya que las praderas de posidonia son viveros de peces y fuentes de fertilizantes naturales, pero tiene consecuencias también en términos de almacenamiento de carbono, como se señala en la Estrategia Nacional de Descarbonización a Largo Plazo.

tres



Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones



En términos generales, las aguas de los ecosistemas acuáticos continentales tienen un contenido relativamente bajo de sales y una amplia variabilidad en la proporción relativa de distintos iones salinos. Estas sales provienen principalmente de la mineralización y disolución de las rocas, y del drenaje y escorrentía de los suelos. Los organismos que habitan estos ecosistemas (insectos, anfibios, peces, etc.) están adaptados a estas condiciones naturales de salinidad. En las últimas décadas, ha habido una creciente evidencia científica del aumento de la concentración de sales en los ecosistemas acuáticos continentales como consecuencia de las actividades humanas. El CSIC ha contribuido significativamente a mostrar estas tendencias, identificar las causas y evaluar los efectos, sobre todo biológicos y ecológicos, derivados de este incremento.



Se ha demostrado que este incremento de sales en las aguas continentales es una problemática ambiental global derivada de una gran variedad de actividades (por ejemplo, la agricultura, la minería, el transporte y la urbanización). En España, se ha estimado que un 28 % de la red hidrográfica de nuestro país está salinizada. Sin embargo, la distribución espacial de la problemática no es homogénea, ya que depende de dónde se localizan las actividades que la causan. Además, cada una de estas actividades genera un tipo de sales diferente, lo que puede también provocar diferentes tipos de impactos sobre la biodiversidad, el funcionamiento de los ecosistemas y el bienestar humano.



La salinización conlleva una reducción de la biodiversidad acuática, ya que la mayoría de las especies no toleran rangos de salinidad elevados. Al mismo tiempo, muchas especies invasoras pueden verse favorecidas por la salinización y aumentar su distribución, contribuyendo a la pérdida de especies nativas. Esta pérdida de biodiversidad puede tener consecuencias severas para la estabilidad y funcionamiento de los ecosistemas. Por ejemplo, la pérdida de crustáceos puede favorecer la proliferación de algas (algunas de las cuales pueden producir toxinas), con la consecuente reducción en la calidad del agua y mortalidad masiva de peces. Además, los cambios en la estructura del ecosistema producidos por la salinización (como las alteraciones en los ciclos biogeoquímicos del sedimento y la pérdida de hábitats clave) pueden tener consecuencias inesperadas, como un aumento de la emisión de gases de efecto invernadero hacia la atmósfera.



Estos cambios estructurales afectan el bienestar humano debido a la pérdida de beneficios obtenidos de los ecosistemas acuáticos (por ejemplo, provisión de comida, alimentos y materias primas, regulación del clima y usos recreacionales). Al mismo tiempo, la salinización conlleva riesgos elevados para la salud humana, ya que la ingesta de sales aumenta el riesgo de preeclampsia y enfermedades cardiovasculares. Además, existen efectos indirectos sobre la salud, como afecciones respiratorias asociadas al polvo salino y el aumento en la incidencia de patógenos asociado a cambios

en la distribución de vectores. Por otro lado, la interacción de la sal con otros compuestos en la red de abastecimiento de agua puede llevar a la ingesta de sustancias tóxicas o el aumento en la incidencia de cáncer. Por último, la salinización de los ecosistemas acuáticos continentales tiene importantes costes económicos asociados a la corrosión de las infraestructuras, el tratamiento del agua para consumo humano o la pérdida de productividad de los cultivos, entre otros.



Podemos concluir, por tanto, que la salinización de los ecosistemas acuáticos es una amenaza grave y urgente que tenemos que abordar mediante políticas públicas y la implementación de medidas de gestión adecuadas. Más aún cuando está previsto que el cambio climático y el incremento en la demanda de agua amplifiquen este problema. Por ejemplo, el incremento de temperatura asociado al cambio climático intensificará la evaporación del agua y la concentración de sales. También se espera una mayor frecuencia de eventos hidrológicos extremos, que pueden contribuir a acrecentar el aporte de sales de los ecosistemas terrestres a los acuáticos de manera aguda durante episodios de lluvias intensas y a concentrar el contenido de sales gradualmente durante los periodos de sequías. Además, debemos tener presente que la disponibilidad de agua potable es uno de los mayores retos a los que se enfrenta nuestra sociedad en este siglo, y esto no depende únicamente de la cantidad de agua, sino también de su calidad. La salinización va más allá del aumento de salinidad; está asociada a cambios en las proporciones de distintos iones (cócteles químicos) y a la presencia de com-

puestos tóxicos adicionales como metales pesados derivados de las actividades agrícolas e industriales, que pueden ser altamente nocivos para los organismos. Además, tiene el potencial de interaccionar de forma aditiva, sinérgica o antagónica con otros compuestos químicos o factores de estrés, como la eutrofización o el cambio climático.



La salinización afecta a los diferentes niveles de organización ecológica —individuos, comunidades o ecosistemas—, a procesos ecológicos clave y a las interacciones entre organismos. Daña gravemente la biodiversidad, promoviendo la dispersión y establecimiento de especies invasoras, con efectos devastadores en los servicios ecosistémicos y el bienestar humano. Desde un punto de vista de salud, la salinización conlleva importantes problemas asociados al polvo salino, que contribuye de forma decisiva a la contaminación atmosférica y causa enfermedades cardiorrespiratorias y otras patologías. Además, afecta a la epidemiología de enfermedades graves, modificando el área de distribución de los vectores que las transmiten. Por otro lado, la salinización lleva asociadas graves consecuencias económicas derivadas de la reducción de la calidad y cantidad de agua (pérdidas de la producción agrícola y de los recursos pesqueros, costos de potabilización del agua, etc.).

Por tanto, es fundamental abordar el problema de la salinización desde una perspectiva interdisciplinar, amplia e integradora, teniendo en cuenta toda su complejidad, para poder anticipar los impactos y establecer medidas adecuadas de gestión.

Recomendaciones de política pública

Para la gestión política y técnica de las Administraciones:



La legislación actual en torno a la salinización de ecosistemas acuáticos continentales en España está centrada en el agua para consumo humano y la agricultura (por ejemplo, a través del Real Decreto 140/2003). Adicionalmente, el Real Decreto 665/2023 establece un límite de conductividad para la declaración de aguas contaminadas no aptas para la agricultura. Sin embargo, la legislación existente es insuficiente e inadecuada, ya que no garantiza la protección de los ecosistemas y su biodiversidad. De hecho, la salinización está completamente ausente de la mayoría de las normas y estrategias ambientales, y ha sido omitida en planes estratégicos como el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático del Gobierno de España.



Los límites de conductividad para garantizar el estado ecológico de las masas de agua (ríos, lagos, humedales, etc.) han sido establecidos en el contexto de la directiva marco del agua. Sin embargo, no está claro a partir de qué criterios se han establecido estos límites, que están generalmente por encima de los valores que podríamos considerar seguros para la biodiversidad y el funcionamiento de los ecosistemas de acuerdo con las evidencias científicas que tenemos. Se hace necesaria, por tanto, una revisión de la legislación y regulación normativa existente, y el desarrollo de estrategias e instrumentos de monitoreo adecuados. Para ello proponemos seguir los siguientes pasos:

1. Adopción de decisiones a partir de la evidencia científica y el conocimiento más actualizado posible. Garantizar que los valores de referencia se basen en la mejor ciencia disponible y en la mejor comprensión de los costes y beneficios. La participación de las partes interesadas (por ejemplo, gestores, empresas y agricultores) es crucial para garantizar que los acuerdos se implementen y se cumplan. Este proceso debe estructurarse para promover la comunicación y el aprendizaje social entre los diferentes grupos de interés, a fin de garantizar que los resultados científicos sean comprensibles para los formuladores de políticas, las partes interesadas afectadas y el resto de la sociedad. La integración sólida de conocimientos de las ciencias naturales y sociales ayudará a todas las partes a comprender los riesgos y las oportunidades de las diferentes opciones de protección y restauración existentes. Dado que las evidencias científicas se irán acumulando y nuestro conocimiento sobre la salinización incrementará, el desarrollo de estándares y acuerdos de gobernanza requerirá un enfoque iterativo a lo largo del tiempo.
2. Caracterización de las masas de agua (ecosistemas acuáticos) a los que se aplicarán las normas. Las concentraciones iónicas y la composición del agua dulce varían de forma natural debido a la geología subyacente, la proximidad al océano y la hidro-

logía. Así, la protección de la biodiversidad (adaptada a la salinidad natural de cada masa de agua) requerirá límites específicos basados en la salinidad que podemos encontrar en condiciones naturales.

3. Caracterización de la composición iónica (es decir, concentraciones de iones específicos y sus proporciones) de las aguas salinizadas asociadas con cada una de las actividades humanas que contribuyen a la salinización. Además, se debe evaluar para cada actividad el potencial técnico existente para reducir la cantidad de sal generada, así como los posibles beneficios sociales y económicos asociados con dicha reducción.

4. Cuantificación de los efectos potenciales de cada clase de efluente salino en la región e identificación de los umbrales para sus efectos tóxicos. La cuantificación de las relaciones entre los organismos acuáticos y la salinidad a partir de estudios científicos permite identificar especies vulnerables que pueden ser usadas en ensayos de laboratorio y programas de monitoreo. Al igual que con otros contaminantes, se deben combinar bioensayos de laboratorio (por ejemplo, pruebas de concentración letal 50) con experimentos de mesocosmos y estudios de campo para cuantificar la toxicidad de diferentes iones (sodio, potasio, cloruro, sulfato, etc.) para un conjunto representativo de especies (por ejemplo, peces, anfibios e insectos acuáticos).

Para las empresas y el sector privado:



Paralelamente al desarrollo de políticas y medidas de política pública, existen diferentes soluciones técnicas para mitigar los impactos de la salinización que pueden ser implementadas en diferentes contextos. A continuación, detallamos algunas opciones o estrategias que pueden seguir los actores privados en diferentes sectores de actividad:

1. Agricultura. Para rebajar la salinización asociada a la agricultura se aconseja el empleo de técnicas de riego más eficientes (por ejemplo, riego por goteo), que solo proporcionan la cantidad de agua que cada cultivo necesita, así como la reducción del uso de fertilizantes. Si no se puede prevenir la salinización, plantar cultivos tolerantes al estrés salino puede ser una buena estrategia de adaptación para asegurar el suministro de alimentos.

- generar impactos ecológicos adversos. Por ejemplo, la arena podría reducir la diversidad de hábitats en el lecho del río y el jugo de remolacha podría promover la eutrofización.

Para la sociedad:



Más allá de las actuaciones de las autoridades públicas y los actores privados, la actividad y las formas de vida del ser humano también tienen y pueden tener un gran potencial en el abordaje de la salinidad como un gran problema ambiental.



En cierto modo, la situación respecto a la salinización guarda similitudes con el cambio climático. El clima también cambia de manera natural, y esto ha servido a numerosos sectores públicos y privados como excusa para negar que el ser humano haya producido un cambio climático asociado con la emisión de gases invernadero a la atmósfera. Es por ello que debe haber un reconocimiento social en relación con este problema.



En el caso de la salinización, el incremento de la salinidad derivada de las actividades humanas ha sido probado en numerosas ocasiones de manera irrefutable, con múltiples evidencias científicas sólidas. Aun así, la salinización está lejos de ser percibida por la sociedad como un problema ambiental derivado de la acción humana. En este contexto, desde el CSIC, hacemos un llamamiento a la sociedad para llevar la salinización de los ecosistemas acuáticos continentales al debate público, considerando los riesgos que supone para el bienestar social y la salud pública, y proponiendo soluciones que nazcan desde el consenso social.

cuatro

|||||

Listado de centros

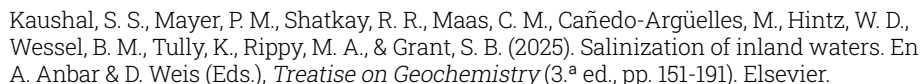
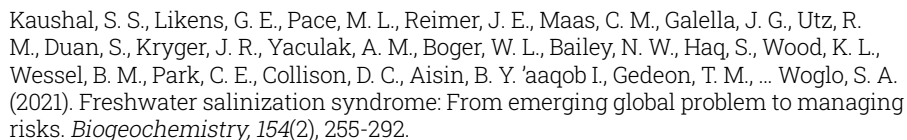
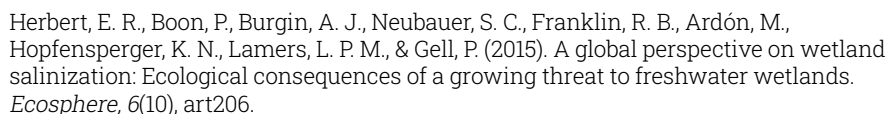
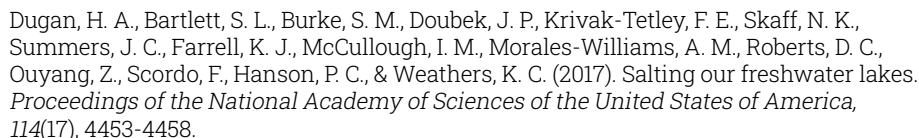
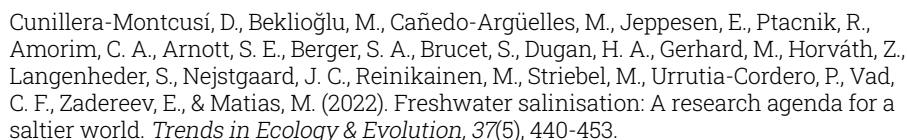
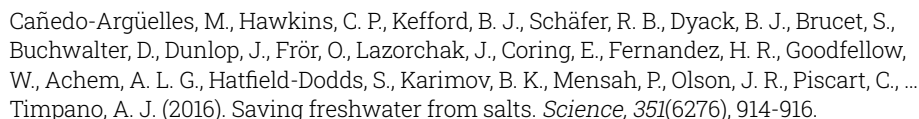


CENTRO	PÁGINA WEB	CORREO ELECTRÓNICO
Centro de Estudios Avanzados de Blanes [CEAB, CSIC]	www.ceab.csic.es	direccion.ceab@csic.es
Estación Biológica de Doñana [EBD, CSIC]	www.ebd.csic.es	direccion.ebd@csic.es
Estación Experimental de Aula Dei [EEAD, CSIC]	www.eead.csic.es	direccion.eead@csic.es
Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua [IDAEA, CSIC]	www.idaea.csic.es	direccion.idaea@csic.es
Instituto de Productos Naturales y Agrobiología [IPNA, CSIC]	www.ipna.csic.es	direccion.ipna@csic.es
Museo Nacional de Ciencias Naturales [MNCN, CSIC]	www.mncn.csic.es	direccion.mncn@csic.es

cinco



Para saber más

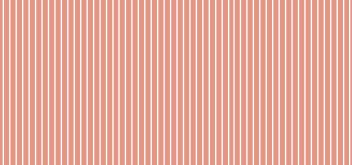




Maas, C. M., Kaushal, S. S., Rippey, M. A., Mayer, P. M., Grant, S. B., Shatkay, R. R., Malin, J. T., Bhide, S. V., Vikesland, P., Krauss, L., Reimer, J. E., & Yaculak, A. M. (2023). Freshwater salinization syndrome limits management efforts to improve water quality. *Frontiers in Environmental Science*, 11.



Melles, S. J., Cañedo-Argüelles, M., & Derry, A. M. (2023). Documenting the impacts of increasing salinity in freshwater and coastal ecosystems: Introduction to the special issue. *Limnology and Oceanography Letters*, 8(1), 1-7.



Ciencia para las Políticas Públicas



Informe de transferencia
de conocimiento



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE CIENCIA, INNOVACIÓN
Y UNIVERSIDADES



CSIC
CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

EDITORIAL
CSIC

SCIENCE  POLICY