



Ciencia para
las Políticas
Públicas

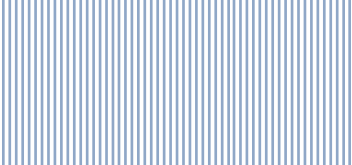
**Políticas para conseguir que
la acuicultura se convierta
en un motor estratégico para
la seguridad alimentaria y el
desarrollo sostenible**

Coordinado por:
Alberto Falcó • Antonio Figueras



CSIC
CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

SCIENCE  POLICY



Ciencia para las Políticas Públicas



Informe de transferencia
de conocimiento



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
Correo: science4policy@csic.es

NIPO: 155-26-019-5
e-NIPO: 155-26-020-8
Depósito legal: M-6921-2026

Edición no venal

Coordinadores:
Alberto Falcó
Antonio Figueras

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

Edición:
Marta García Gonzalo
Caja Alta Edición y Comunicación

Ilustraciones:
Freepress Coop

Diseño y maquetación:
David Pamplona Roche

Imagen de portada: Mejillón *Mytilus galloprovincialis* en su medio natural, molusco bivalvo propio del mar Mediterráneo y de las costas atlánticas del sur de Europa y del norte de África. Es la especie de mejillón más cultivada a nivel mundial, con especial relevancia en la acuicultura española y europea. Fuente: Manuel García Blanco (IIM, CSIC)

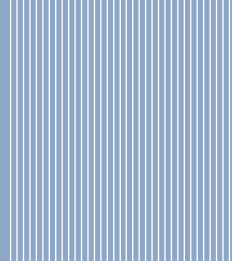
Cómo citar este informe: Falcó, A., & Antonio Figueras, A. [2026]. *Políticas para conseguir que la acuicultura se convierta en un motor estratégico para la seguridad alimentaria y el desarrollo sostenible*. CSIC.

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 informe *Políticas para conseguir que la acuicultura se convierta en un motor estratégico para la seguridad alimentaria y el desarrollo sostenible*, de la colección Ciencia para las Políticas Públicas, se presenta como un documento dirigido a Administraciones y a la sociedad en general. Así, explica el papel de la acuicultura como una herramienta clave para avanzar hacia sistemas alimentarios sostenibles, capaces de aumentar la producción de alimentos de alto valor nutricional sin intensificar la presión sobre los ecosistemas. El informe analiza su contribución a la seguridad alimentaria en un contexto de crecimiento demográfico, cambio climático y tensiones económicas, e identifica los principales desafíos para su desarrollo responsable. Por último, recoge algunas de las líneas de innovación más destacadas del organismo orientadas a impulsar una acuicultura sostenible y apoyar la toma de decisiones públicas.

ÍNDICE

uno

|||||

Retos de la acuicultura en el actual panorama de la seguridad alimentaria

- 1.1. Introducción
- 1.2. La acuicultura y los retos para su expansión sostenible

dos

|||||

Evidencia científica generada por el CSIC en materia de acuicultura sostenible y su implementación práctica

- 2.1. Aportaciones a la planificación, la ordenación, la transparencia y la coordinación de múltiples actores
- 2.2. Contribuciones clave para rediseñar la estructura productiva del sector de cara al futuro
- 2.3. Acciones en la transformación industrial de la acuicultura
- 2.4. Influencia en las preferencias y comportamientos sobre el consumo
- 2.5. Marco organizativo y de infraestructuras para la investigación acuícola del CSIC

tres

|||||

Conclusiones y recomendaciones

cuatro

|||||

Listado de centros

cinco

|||||

Para saber más



Doradas (*Sparus aurata*) en cultivo durante la ingesta de pienso en la que se aprecia la conducta alimentaria y la interacción grupal bajo condiciones controladas. Fuente: Grupo de Nutrigenómica y Biología Integrativa de Peces. (IATS, CSIC)

UNO



Retos de la acuicultura en el actual panorama de la seguridad alimentaria



En esta sección, tras introducir la situación de la acuicultura, se explican las ventajas y los retos de este ámbito y se ofrece una serie de datos al respecto, tanto nacionales como internacionales.



Mariscadores a pie en Punta Areño (A Coruña). / MANUEL GARCÍA BLANCO (IIM, CSIC)

11.

Introducción

ESTE apartado inicial presenta el futuro de la seguridad alimentaria, el papel que desempeña la acuicultura en la transición hacia sistemas alimentarios sostenibles y los retos a los que se enfrenta.

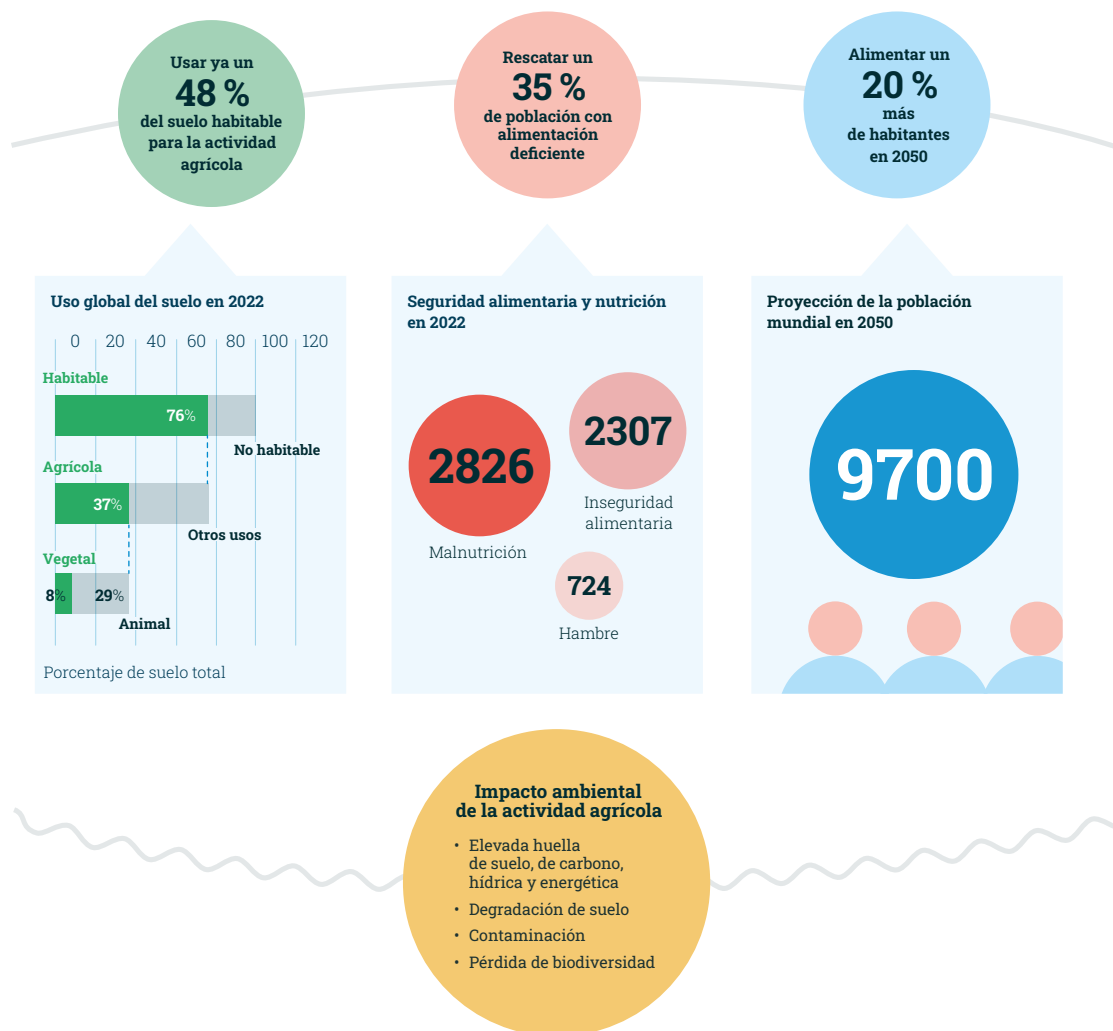
El futuro de la seguridad alimentaria: entre la demanda creciente y los límites planetarios

Aunque con una tasa de crecimiento decreciente, la población humana global continúa aumentando con rapidez. Según la Organización de las Naciones Unidas (ONU), a finales de 2022 esta alcanzó los 8000 millones de habitantes y se estima que llegará a alrededor de 9700 millones para 2050, lo que planteará retos considerables para satisfacer sus necesidades básicas. Entre ellos, la presión sobre la seguridad alimentaria global suscita una gran preocupación. Ya en 2022, se identificaron deficiencias alimentarias de diversa gravedad en al menos un 35 % de la población mundial, lo que pone de manifiesto que la producción y la distribución de alimentos actuales resultan insuficientes e ineficientes, y se teme que el crecimiento poblacional proyectado agrave esta situación.

Para garantizar la seguridad alimentaria de una población cada vez más numerosa, es preciso que la producción agrícola global crezca en las próximas décadas. Sin embargo, los análisis prospectivos de organismos internacionales indican que, aunque la producción de alimentos seguirá aumentando, no se conseguirá satisfacer la demanda prevista con las tendencias de crecimiento actuales. De hecho, se han observado señales de desaceleración en algunos sectores agropecuarios en los últimos tiempos. Asimismo, factores como la degradación de suelos, la escasez hídrica y el impacto del cambio climático amenazan con frenar aún más el ritmo productivo.

Además, la actividad agrícola ya ocupa la mitad de las tierras habitables del planeta y constituye el principal factor de destrucción de bosques tropicales (debido al cultivo de soja, palma aceitera y pastos para la ganadería). Utiliza cerca del 70 % del agua dulce extraída a nivel mundial y es responsable de aproximadamente un tercio de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI), incluyendo el dióxido de carbono (CO₂).

Figura 1 La seguridad alimentaria: entre la demanda creciente y los límites planetarios



Fuente: elaboración propia a partir de United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2022). World Population Prospects 2022: Summary of Results. UN DESA/POP/2022/TR/NO. 3; FAO, FIDA, OMS, PMA y UNICEF. 2024. El estado de la seguridad alimentaria y la nutrición en el mundo 2024: Financiación para acabar con el hambre, la inseguridad alimentaria y la malnutrición en todas sus formas. Roma; FAO. 2024. World Food and Agriculture - Statistical Yearbook 2024. Rome; FAO. 2024. Bases de datos FAOSTAT.

Estas tendencias configuran un escenario de intensa presión productiva, pero también una oportunidad para avanzar hacia modelos más eficientes y sostenibles, en los que la diversificación de las fuentes de proteína será clave.

Transición hacia sistemas alimentarios sostenibles: el papel estratégico de la acuicultura

A la luz de los datos descritos, cerrar la brecha alimentaria requerirá transformaciones profundas en los sistemas de producción y un consumo orientado a modelos más eficientes y respetuosos con el medioambiente. Según los expertos, este cambio de paradigma exigirá, en concreto, un conjunto simultáneo de medidas articulado en torno a los siguientes ejes principales:

- Evitar que los cultivos alimentarios compitan por el mismo espacio agrícola con cultivos destinados a otros fines, como los biocombustibles, o con otras actividades, como los servicios o el entretenimiento.
- Reducir pérdidas y desperdicios de alimentos a lo largo de la cadena. En la actualidad, este problema representa aproximadamente una cuarta parte de la producción total.
- Promover dietas más saludables y de menor impacto ambiental, frenando, en especial, el aumento proyectado del consumo de carne roja, cuya producción es particularmente poco sostenible.
- Aumentar la producción primaria de manera responsable, es decir, sin expandir la frontera agrícola e intensificando los sistemas de manera sostenible.

En este sentido, se pone de manifiesto que el desafío de garantizar la seguridad alimentaria requiere un avance coordinado e integral tanto en el ámbito productivo (oferta) como en el del consumo (demanda). Por un lado, resultará fundamental impulsar innovaciones tecnológicas y de gestión que optimicen los rendimientos y la eficiencia de los sistemas de producción, así como estrategias orientadas a minimizar las pérdidas y los desperdicios a lo largo de toda la cadena de valor. Por otro lado, se de-

berá fomentar patrones de consumo más equilibrados y sostenibles, que reduzcan la presión sobre los ecosistemas y favorezcan un uso más racional de los recursos disponibles. Estas mejoras no solo deberán implementarse en los sectores productivos tradicionales, sino también en el desarrollo y aprovechamiento de fuentes alimentarias emergentes, de alta eficiencia y actualmente subutilizadas.

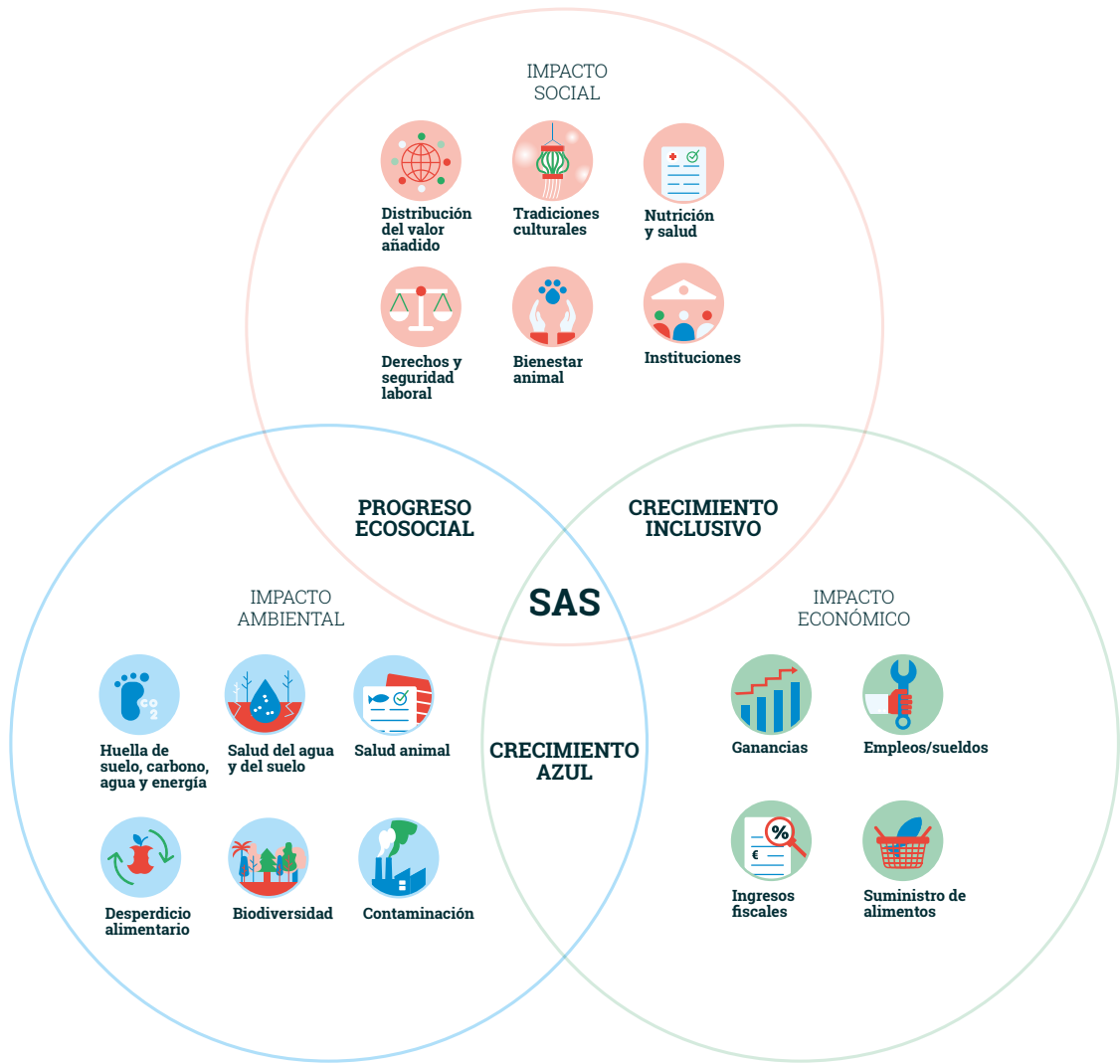
En este contexto, todas las líneas de intervención convergen de manera estratégica en la acuicultura, un sector que combina eficiencia en el uso de recursos, sostenibilidad ambiental y capacidad para generar alimentos de alto valor nutricional. La acuicultura se consolida como una de las alternativas más prometedoras para incrementar la disponibilidad de alimentos de manera sostenible, sobre todo en lo que respecta a la producción de proteínas de origen animal de alta calidad. Además, presenta un amplio margen de crecimiento y mejora, tanto en términos tecnológicos como de gestión, lo que refuerza su potencial para contribuir de forma decisiva a la seguridad alimentaria global mediante el desarrollo de **sistemas acuícolas sostenibles (SAS)**.

Retos para la acuicultura sostenible y necesidad de políticas públicas

No obstante, un rápido crecimiento del sector, junto con los efectos del cambio climático sobre él, plantea retos de envergadura que suponen una seria amenaza para su sostenibilidad. De hecho, en su reciente expansión e intensificación, la acuicultura se está desarrollando ocasionalmente de forma precipitada, generando problemas con importantes repercusiones socioeconómicas, ambientales, sanitarias y éticas. Estos problemas son diversos y, a menudo, interdependientes; abarcan todo el sistema productivo y, por tanto, afectan a un amplio espectro de la sociedad, como Administraciones, productores, operarios, consumidores y ciudadanos. Además, el cambio climático puede actuar como generador, catalizador o agravante de muchos de ellos.



Figura 2 Sistemas acuícolas sostenibles [SAS]



Fuente: elaboración propia a partir de sistemas alimentarios sostenibles de FAO (2014), *Sustainable food value chain development - Guiding principles*, Rome.

En definitiva, la evolución histórica y las cifras contundentes de crecimiento acuícola transmiten confianza en su enorme potencial, pero este nuevo panorama productivo también conlleva desafíos emergentes que deberán identificarse y abordarse cuanto antes. La reacción temprana permitirá implementar medidas de forma más eficiente y evitar impactos. Esto significa que el futuro del suministro global de productos acuícolas dependerá en gran medida de la capacidad y agilidad para expandir la acuicultura de manera sostenible. Al respecto, organismos internacionales como la FAO impulsan iniciativas de **transformación azul** para promover prácticas acuícolas más sostenibles y resilientes. Las mejoras tecnológicas y científicas, las regulaciones y los controles ambientales más estrictos, así como la adopción de mejores prácticas pueden mitigar muchos de los efectos negativos. Por ello, dadas la complejidad y la magnitud de la situación, que exige intervenciones integrales, se enfatiza la necesidad urgente de promover políticas públicas y de cooperación internacional que faciliten un contexto de negociación entre todas las partes implicadas para marcar las directrices a seguir a corto plazo.



Granja marina para la cría de lubinas,
doradas y corvinas en el Mediterráneo
(AVRAMAR, El Campello, Alicante).
GRUPO DE PATOLOGÍA DE PECES (IATS, CSIC)



Conceptos «azules» clave de la gestión sostenible de los recursos hídricos y acuícolas

Sostenibilidad azul: aplicación del concepto de desarrollo sostenible al mundo acuático. Implica que todas las actividades humanas en recursos hídricos se realicen cuidando los ecosistemas acuáticos.

Economía azul: modelo económico que promueve el uso responsable de los recursos hídricos para generar crecimiento y empleo sin dañar los ecosistemas. Incluye sectores como pesca, acuicultura, turismo costero y energías marinas, integrando desarrollo económico y protección ambiental.

Crecimiento azul: estrategia de desarrollo sostenible enfocada en los sectores vinculados a los recursos hídricos con el objetivo de aprovechar su potencial económico de manera responsable con el medio ambiente.

Bioeconomía azul: modelo de economía que aprovecha los recursos biológicos acuáticos (peces, algas, microorganismos marinos, etc.) de forma innovadora y sostenible para obtener alimentos, energía, medicinas y otros productos útiles.

Innovación azul: se refiere a las nuevas ideas, tecnologías y soluciones aplicadas al sector de los recursos hídricos para resolver desafíos de forma sostenible. Estas innovaciones ayudan a aumentar la eficiencia y reducir el impacto ambiental, beneficiando tanto a la economía como al medio ambiente.

Transformación azul: iniciativa global impulsada por la FAO para mejorar y hacer más sostenible la pesca y la acuicultura en todo el mundo. Busca armonizar la productividad con el cuidado del medio ambiente, adoptando prácticas responsables que aumenten la producción de alimentos acuáticos sin agotar los recursos naturales.

Revolución azul: término que describe la gran expansión y modernización de la acuicultura a nivel mundial para producir más alimentos de origen acuático. Es comparable a la «revolución verde» en la agricultura.

12.

La acuicultura y los retos para su expansión sostenible

EN este apartado se reflexiona, en primer lugar, acerca de las ventajas de la expansión de la acuicultura sostenible: entre otras, la revolución azul y la contribución de este sistema a la sociedad. Asimismo, tras presentar una serie de datos tanto internacionales como relativos a España, se abordan los retos actuales en este ámbito.

Ventajas de la expansión de una acuicultura sostenible

Entre las ventajas que presenta la expansión de un modelo de acuicultura sostenible, destacan, por un lado, la revolución azul (entendida como el aumento, en los últimos años, de los productos procedentes de la acuicultura) y, por otro, las contribuciones a la comunidad —en relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)—.

Revolución azul

La acuicultura es la producción controlada de organismos acuáticos, que incluye tanto animales (principalmente peces, moluscos y crustáceos) como algas. A diferencia de la pesca extractiva, basada en la captura de poblaciones silvestres, la acuicultura se desarrolla en entornos gestionados que permiten controlar la alimentación, los ciclos de vida y la sanidad de las especies cultivadas. En 2022, la producción acuícola de animales superó por primera vez en volumen a la pesca (94,4 Mt frente a 91 Mt), lo que refleja el auge de la acuicultura y su papel clave en el suministro de alimentos, ya que alrededor del 89 % de su producción se destina al consumo humano directo.

Este crecimiento sin precedentes de la acuicultura ha resultado fundamental a la hora de disminuir la presión de la pesca extractiva sobre los caladeros silvestres, al mismo tiempo que satisface la creciente demanda mundial de proteína animal en general y de organismos acuáticos en particular. El notable incremento de estos alimentos en la dieta global se evidencia en su consumo per cápita, que prácticamente se ha duplicado en seis décadas. Así, la acuicultura se ha convertido en la vía más eficaz para abastecer de alimentos de alto valor nutricional: no solo aportan proteínas de elevada calidad, sino que además son ricos en micronutrientes

Debido a su gran diversidad de grupos animales (principalmente peces, crustáceos y moluscos), que comprende más de 700 especies cultivadas y, por tanto, una notable variedad de sistemas de producción, el impacto ambiental de la acuicultura se caracteriza por su gran heterogeneidad. Considerada en conjunto, sus tasas de conversión alimenticia resultan mejores que las de cualquier carne terrestre, mientras que sus emisiones y consumos energéticos se sitúan en rangos similares a los de aves y porcino. La huella hídrica es el parámetro más variable, con valores que van desde niveles muy bajos (la acuicultura marina no hace uso directo de agua dulce) hasta otros que se aproximan a los del vacuno, en función de la especie y el sistema de producción.

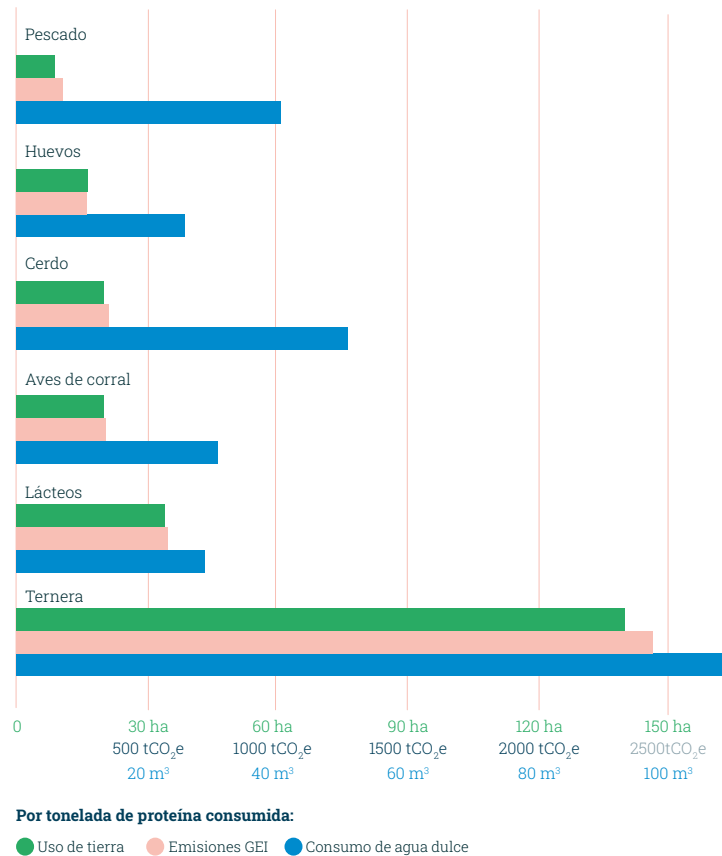
En este marco, los moluscos destacan de manera sobresaliente: no requieren pienso porque se alimentan filtrando fitoplancton del medio, lo que elimina la huella asociada a la producción de insumos; además, su huella de carbono, hídrica y energética es casi despreciable. Esta combinación explica por qué se considera la fuente de proteína animal más sostenible. Por su parte, los peces de cultivo también presentan resultados globales notables, al alcanzar niveles de eficiencia similares o inferiores a los de la avicultura (la carne terrestre más eficiente). Incluso los crustáceos, pese a mostrar huellas de carbono y energéticas más altas, mantienen una tasa de conversión alimenticia muy baja (alrededor de 1,6 kilos de alimento por kilo producido).

Contribuciones de la acuicultura sostenible a la comunidad

El desarrollo e implementación de sistemas acuícolas sostenibles se enmarca en el enfoque de «Una sola salud» (*One Health*) e implica garantizar la salud de los organismos acuáticos y sus hábitats para mejorar la nutrición humana, mantener la biodiversidad y prevenir riesgos sanitarios. Desde esta perspectiva, se evidencia el carácter transversal y multidimensional de la acuicultura, cuya incidencia se extiende de manera integrada a los ámbitos productivo, social y ambiental.



Figura 4 Huella ambiental de la producción animal



Fuente: elaboración propia basada en ¿Cuáles son las tendencias en el consumo de proteínas y por qué importan? de WRI (2016), *Shifting Diets for a Sustainable Food Future*, Washington, DC.

Por estas razones, la acuicultura sostenible también se ha consolidado como un pilar estratégico para avanzar hacia los ODS de la Agenda 2030 de las Naciones Unidas (2015) al contribuir, de forma directa o indirecta, a todos ellos y, especialmente, al ODS 1 (Fin de la pobreza), el ODS 2 (Hambre cero), el ODS 8 (Trabajo decente y crecimiento económico), el ODS 12 (Producción y consumo responsables), el ODS 14 (Vida submarina) y el ODS 15 (Vida de ecosistemas terrestres).

Figura 5 Una acuicultura sostenible contribuye al enfoque «Una sola salud» y a la consecución de ODS de la Agenda 2030 de Naciones Unidas



ELABORACIÓN PROPIA

El Marco Estratégico 2022-2031 de la FAO proporciona el marco institucional y estratégico para apoyar la consecución de los ODS, así como para implementar su Programa «La transformación azul» (2021) dirigido a impulsar a escala global la intensificación y expansión sostenible del sector, basada en la seguridad alimentaria, la nutrición y la distribución equitativa de beneficios. De forma complementaria, las Directrices Estratégicas para una Acuicultura de la UE Sostenible y Competitiva 2021-2030 (CE, 2021), que adapta el Pacto Verde Europeo a la acuicultura e integra la estrategia «De la granja a la mesa», promueven un sistema acuícola resiliente en la UE, con menor dependencia de importaciones, generador de valor socioeconómico y capaz de garantizar alimentos acuáticos seguros y sostenibles.

Estas iniciativas y directrices se ven apoyadas en el ámbito nacional por las memorias de sostenibilidad sectorial publicadas por la Asociación Empresarial de Acuicultura de España (APROMAR).

Cifras de la acuicultura animal

En este apartado se resumen los datos más relevantes sobre la producción acuícola a nivel mundial y en España. También se explica el consumo de estos productos en nuestro país y su papel en el comercio exterior. Se toma como referencia 2022 por su relevancia en el sector, así como por ser el año más reciente con datos ampliamente actualizados y publicados. Estas estimaciones proceden de instituciones como el Eurostat y la FAO a nivel global (datos notificados por los Estados miembros), y del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA) y de la APROMAR a nivel nacional (datos primarios), todo ello salvo indicación en contrario.

Algunos datos desde un punto de vista comparado a nivel global y regional

Desde los modestos niveles de mediados del siglo xx, la producción ha crecido exponencialmente, triplicándose desde el año 2000 hasta alcanzar en 2022 cifras sin precedentes. Este año, según la FAO, la producción global de acuicultura superó

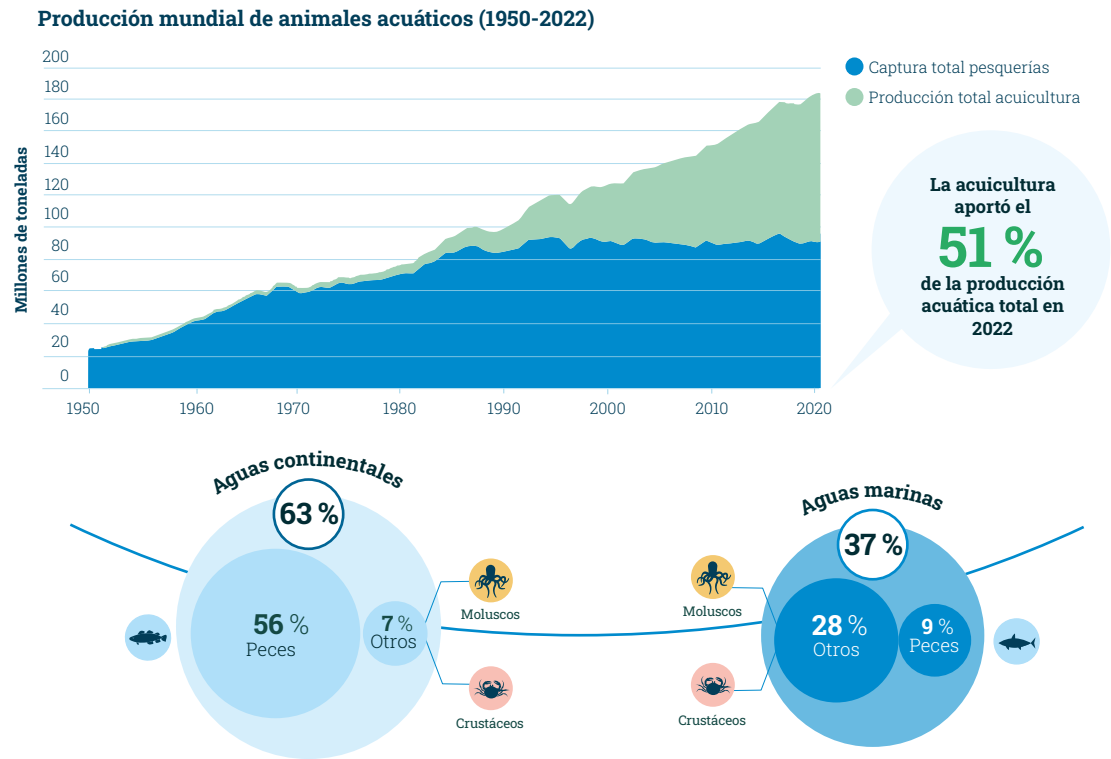
por primera vez a la pesca de captura y alcanzó un nivel récord de 130,9 Mt, con un valor también récord de 313 000 millones de dólares. La producción global de animales acuáticos procedentes de la acuicultura se estimó en aproximadamente 94,4 Mt, lo que representó alrededor del 51 % de la producción mundial total de animales acuáticos, superando por primera vez a la pesca de captura en este apartado. Este crecimiento también se reflejó en el consumo mundial per cápita, que en 2022 alcanzó 20,7 kilos por persona (la cifra más alta registrada), frente a los 9,1 kilos en 1961.

La FAO también reporta que la mayor parte de la acuicultura mundial de animales proviene de aguas continentales (dulces o salobres), como ríos, lagos, embalses, estanques y estuarios. En 2022 esta representó el 62,6 % de la producción mundial, mientras que la acuicultura marina o costera aportó el 37,4 % restante. No obstante, el sistema de producción predominante varía según el país, que suele especializarse en un tipo concreto. Por ejemplo, entre los principales productores, China y la mayoría de los países asiáticos desarrollan su acuicultura principalmente en sistemas continentales, mientras que Noruega y Chile la realizan casi exclusivamente en el mar.

Por continentes, Asia domina la acuicultura mundial con una amplia ventaja, concentrando cerca del 88 % de la producción global de animales acuáticos (83,4 Mt). Le siguen muy por detrás América Latina y el Caribe (4,6 %) y Europa (3,7 %). África aportó el 2,4 % y Norteamérica el 0,6 %, mientras que Oceanía apenas contribuyó con el 0,2 %. Esta marcada polarización, junto con la preeminencia de Asia, también se refleja en la distribución de la producción por países. Según la FAO, 10 países concentran la mayor parte de la producción acuícola mundial, cerca del 90 %. China destaca ampliamente como líder global con una producción de unos 52,9 Mt, equivalente al 56 % del total. El resto de principales productores son, en orden descendente de volumen: Indonesia, India, Vietnam, Bangladés, Filipinas, Corea del Sur, Noruega, Egipto y Chile.

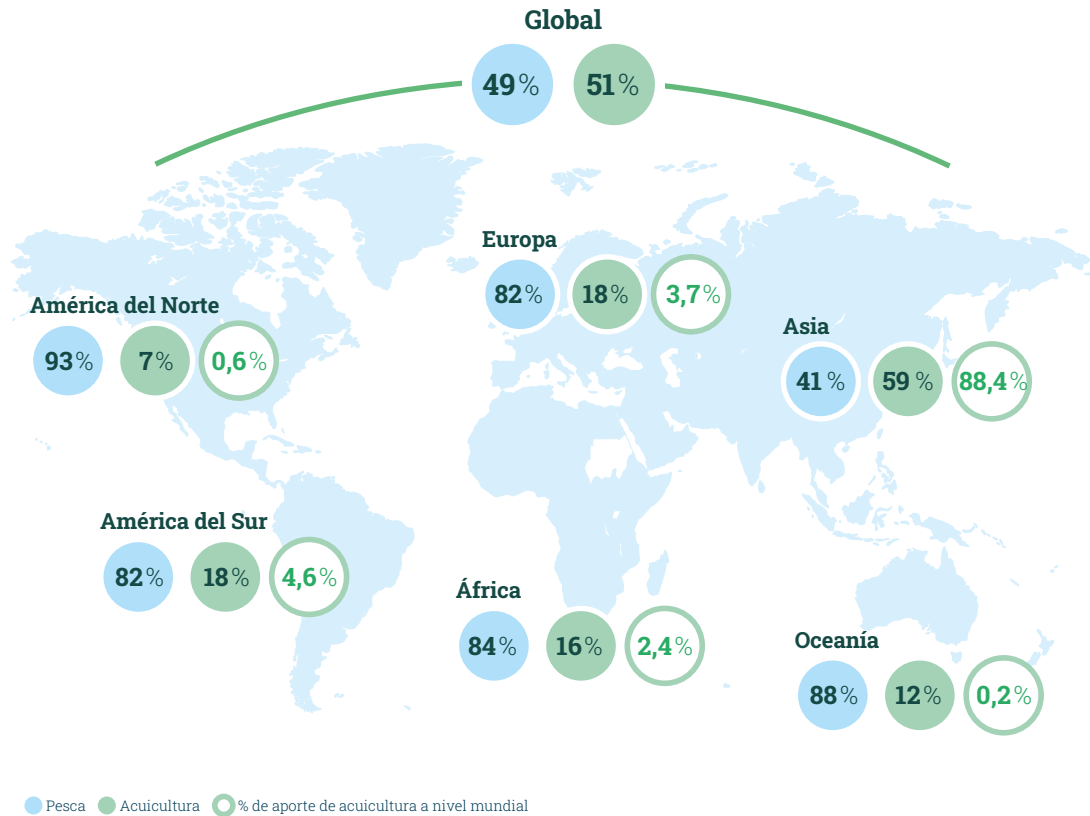


Figura 6 Producción acuícola mundial de animales en 2022



Fuente: elaboración propia a partir de sistemas alimentarios sostenibles de FAO (2024), *El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2024 - La transformación azul en acción*, Roma.

Figura 7 Distribución de la producción acuática mundial de animales en 2022



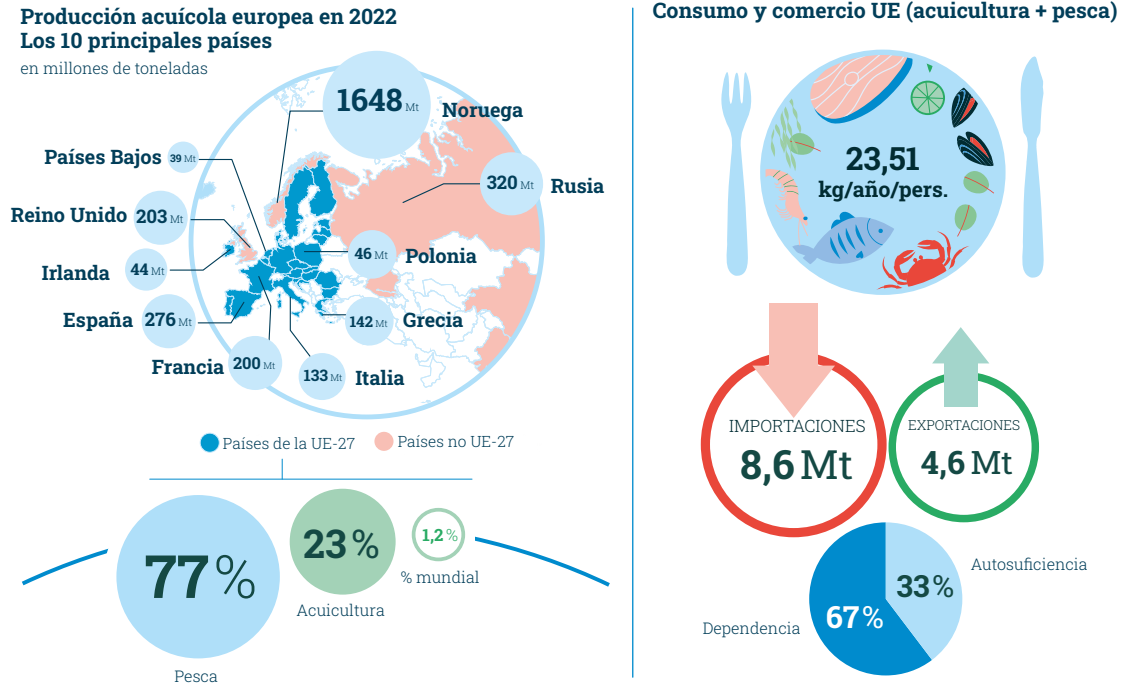
Fuente: elaboración propia a partir de sistemas alimentarios sostenibles de FAO (2024), *El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2024 - La transformación azul en acción*, Roma.



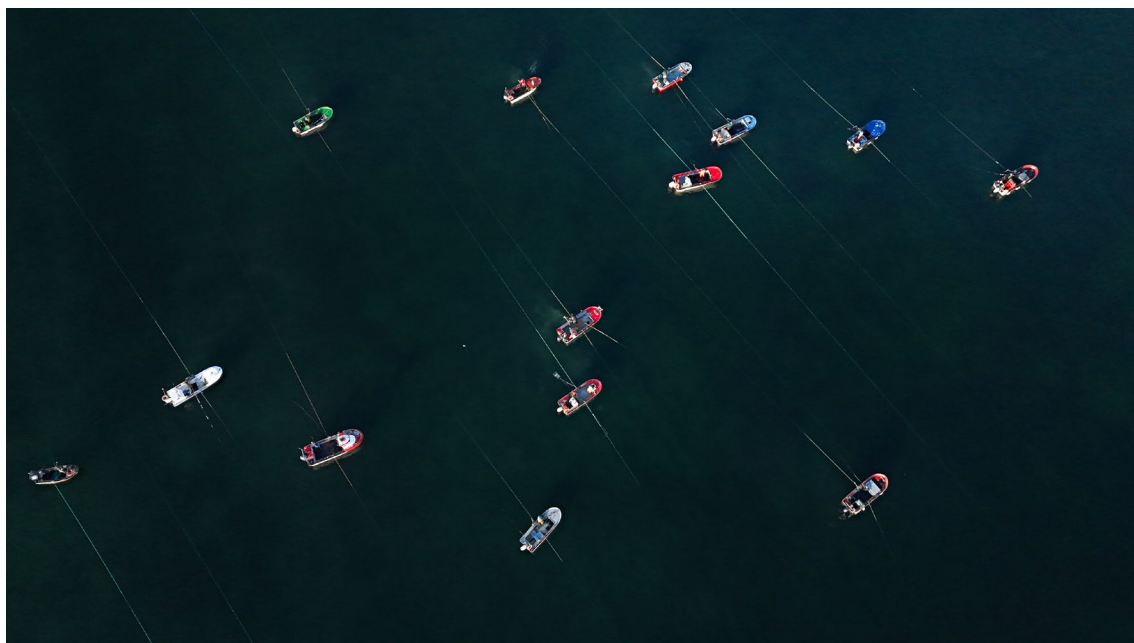
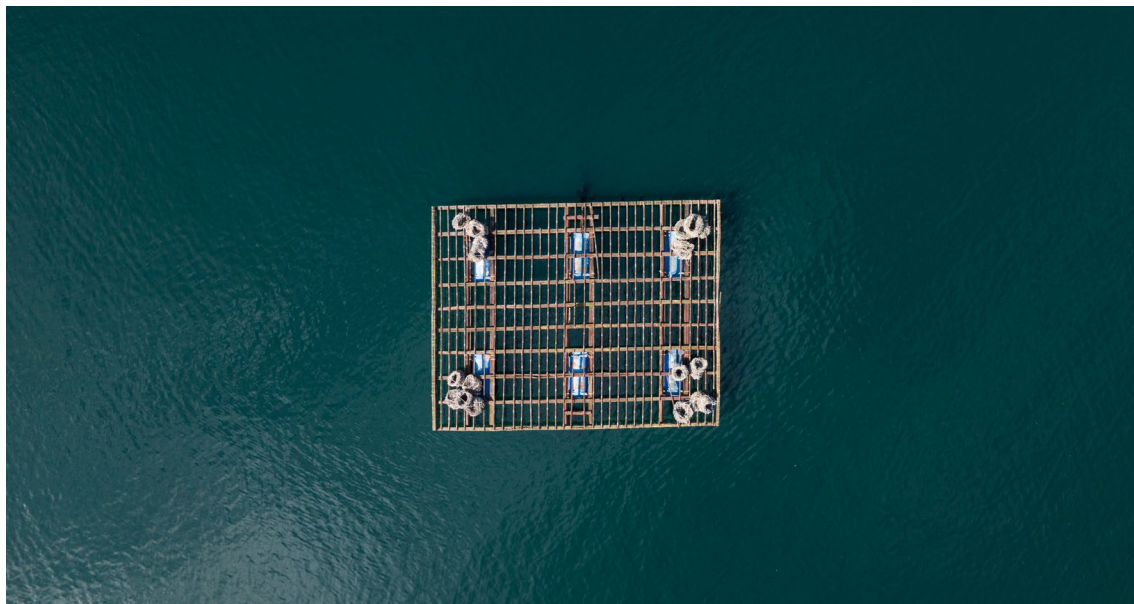
En cuanto a Europa, pese a su bajo peso relativo, mantiene una producción notable, principalmente gracias a la contribución de Noruega (octavo productor mundial). Del total europeo, la Unión Europea (UE) contribuye con un porcentaje modesto, de alrededor de 1,2 % del volumen mundial, siendo España, Francia, Grecia e Italia sus mayores productores en orden de volumen. En la UE, la producción acuícola se concentra en las costas del Mediterráneo y Atlántico, luego es principalmente marina (75,9 %). España, líder en volumen, se especializa en producción de mejillón y peces marinos: produce cerca del 70 % de los mejillones de la UE en el Atlántico y cría una cantidad notable de lubina y dorada en el Mediterráneo. Francia destaca en ostras y mejillones, Italia en otros bivalvos y Grecia domina la producción de dorada y lubina. En contraposición con la tendencia global, conviene subrayar que la pesca concentra el 76,5 % de la producción acuática de la UE, frente al 23,5 % que aporta la acuicultura, un sector que además lleva cerca de 30 años sin crecimiento.

A pesar de su producción moderada y estancada, la UE constituye el mayor mercado importador mundial de pescado y marisco, debido a su alta demanda interna (consumo per cápita de 23,51 kilos al año, según el Observatorio Europeo del Mercado de los Productos de la Pesca y de la Acuicultura –EUMOFA–) y a su producción limitada. En términos de volumen, la UE importó unos 8,55 Mt de productos acuáticos en 2022, frente a solo 4,6 Mt producidos internamente (entre acuicultura y pesca), lo que se tradujo en una tasa de autosuficiencia de apenas el 33 % y, por tanto, una elevada dependencia de proveedores externos. Los principales países abastecedores de la UE en términos de valor incluyeron a Noruega, China, Ecuador y Marruecos, entre otros. Los productos de acuicultura más importados por Europa suelen ser pescados de cultivo de alto consumo, como salmón atlántico, langostinos tropicales, panga y especies del Mediterráneo (lubina y dorada) que la UE no alcanza a producir en cantidad suficiente. Esta fuerte demanda importadora posiciona a la UE como un mercado atractivo para los exportadores globales de productos acuícolas.

Figura 8 Producción acuícola europea en 2022



Fuente: elaboración propia a partir de sistemas alimentarios sostenibles de FAO (2024), *El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2024 - La transformación azul en acción*, Roma. Datos de consumo aparente extraídos de EUMOFA (2023), *El mercado pesquero de la UE - Edición 2023*, Luxemburgo.



Imágenes aéreas de una batea de mejillón (arriba) y de mariscadores a pie (abajo) en la Ría de Vigo (Pontevedra). / MANUEL GARCÍA BLANCO (IIM, CSIC)

Desaceleración de la acuicultura animal en España tras 2018

El volumen de la producción acuícola solo representa el 25 % de la producción acuática nacional y lleva alrededor de 25 años estancado, reproduciendo el mismo desequilibrio observado en la UE. Aunque la acuicultura española experimentó un ciclo de crecimiento sostenido hasta mediados de la década de 2010, alcanzando un pico histórico en 2018, para posteriormente estabilizarse y mostrar un leve retroceso. La evolución histórica refleja que, tras el final del ciclo expansivo, la producción de mejillón disminuyó, mientras que la de peces se mantuvo o creció ligeramente, lo que pone de relieve el gran peso relativo de los moluscos en el total nacional. Las causas exactas están bajo investigación, pero se observan correlaciones que apuntan a que este subsector se ha visto afectado por la variabilidad ambiental en las rías gallegas, marcada por episodios de floraciones algales nocivas (FAN), alteraciones en la salinidad y en la disponibilidad de fitoplancton, así como por cambios en los patrones de afloramiento costero.

Estas condiciones reducen la productividad biológica y obligan a paralizar temporalmente la actividad mediante cierres sanitarios preventivos, lo que también afecta al empleo. Según el MAPA, y así reflejado en el informe de APROMAR «La Acuicultura en España 2024», el sector acuícola nacional generó 5 878 unidades de trabajo anual (UTA) distribuidas entre 10 253 personas en 2022. Estas cifras suponen un 2,73 % más y un 9,77 % menos que en 2021, respectivamente. En el desagregado por género se muestra que aproximadamente un 30 % de empleados correspondió a mujeres. Este componente laboral, y especialmente la participación femenina en determinadas fases, constituye un factor clave de sostenibilidad social en un sector agrícola.

La escasa diversificación productiva constituye un factor limitante para la proyección acuícola nacional. Las especies dominantes (mejillón, lubina, trucha y dorada) concentran más del 90 % del volumen total, con escasa incorporación de nuevas especies o de productos de mayor valor añadido, lo que disminuye la resiliencia del sector frente a fluctuaciones ambientales o comerciales. Sin embargo, esta desaceleración no responde solo a este factor, sino también a la convergencia de condicionantes ambientales, estructurales, regulatorios y de mercado que, como

se verá más adelante, restringen la capacidad de crecimiento del sector a nivel global, especialmente en lo relativo a la productividad acuícola nacional. A pesar de ello, existe optimismo por iniciativas de introducción, reintroducción y potenciación del cultivo de otras especies como el rodaballo y el lenguado (Galicia), la corvina y la seriola (Valencia y Murcia), y el langostino (Castilla y León), así como el besugo, la anguila, la tenca, esturiones, ostras y almejas.

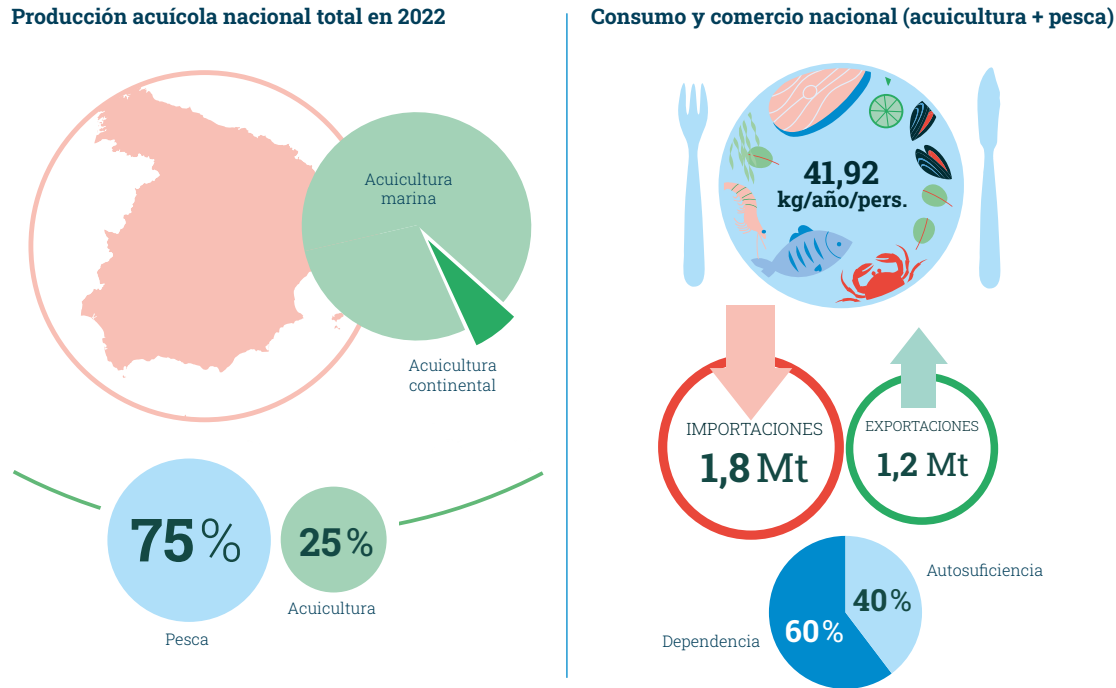
Consumo nacional y comercio exterior de productos del mar

El mercado español, aunque tradicionalmente de alto consumo, muestra signos de saturación y transformación en los hábitos alimentarios. El consumo aparente de pescado y marisco en España ha descendido de forma sostenida durante la última década, debido a cambios en las pautas de consumo, en la percepción de los precios y en la competencia con otras proteínas, hasta 41,92 kilos al año en 2022 según EUMOFA.

Resulta llamativo que, a pesar de haber reducido su demanda interna y de ser el principal productor acuícola de la UE, la limitada diversificación productiva y la concentración en pocas especies hacen que España dependa en gran medida de las importaciones para abastecerse. En 2022, cerca del 60 % del pescado y marisco consumido en el país procedió del exterior, lo que refleja una tasa de autosuficiencia cercana al 40 % y una marcada dependencia estructural del comercio exterior. El análisis del consumo doméstico aparente de animales acuáticos en 2022 muestra que los productos más demandados fueron los siguientes: mejillón (principalmente de acuicultura local), cefalópodos (calamar, sepia y pulpo, procedentes de la pesca local y, sobre todo, importada), merluza (pesca local e importada), atún (en su mayor parte en conserva; pesca local e importada), salmón atlántico (acuicultura importada), lubina (acuicultura local y, mayoritariamente, importada) y dorada (acuicultura local y, principalmente, importada).

Para cubrir este déficit estructural, las importaciones españolas de productos pesqueros ascendieron en 2022 a alrededor de 1,8 Mt, con un valor cercano a 9 100 M€, procedentes de una amplia gama de orígenes, entre ellos China, Francia, Grecia, Ma-

Figura 9 Producción acuícola nacional total en 2022



Fuente: elaboración propia a partir de sistemas alimentarios sostenibles de FAO (2024), *El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2024 - La transformación azul en acción*, Roma. Datos de consumo aparente extraídos de EUMOFA (2023), *El mercado pesquero de la UE - Edición 2023*, Luxemburgo.

rruecos, Namibia, Noruega, Portugal y Turquía. Asimismo, se importaron productos congelados y elaborados (principalmente filetes y conservas) para abastecer la industria conservera gallega y andaluza, que reexporta parte de su producción al mercado comunitario. En sentido inverso, las exportaciones españolas de productos pesqueros alcanzaron cerca de 1,2 Mt, con un valor total aproximado de 5485 M€. Predominaron los productos de origen local y de alto volumen, principalmente moluscos (mejillones, almejas y navajas), así como el pescado fresco, congelado o en conserva, en especial merluza, atún, rodaballo, lubina y dorada, destinados sobre todo a mercados de la UE.

Entre los productos con mayor déficit comercial destacan la merluza (por su elevada demanda interna), el salmón (por la fuerte dependencia externa y el déficit estructural), los cefalópodos, los langostinos y las gambas tropicales, y la lubina y la dorada (por su alta demanda interna). En cambio, los saldos positivos se concentran en el mejillón (gracias a la sólida base productiva nacional), el atún rojo fresco y congelado (de pesca y acuicultura) y otros túnidos, y, en menor medida, en la sardina, ambos, especialmente en conserva, donde la industria genera superávits en valor. En consecuencia, el balance comercial pesquero español resultó netamente negativo tanto en volumen como en valor, con un déficit cercano a 600 000 t y más de 3600 M€.

Retos para la sostenibilidad futura de la acuicultura animal

La sostenibilidad de la acuicultura animal se dirime en un terreno complejo donde convergen presiones ecológicas, sanitarias, regulatorias, financieras y sociales. Aunque estas tensiones son globales, adquieren matices propios en la UE y, especialmente, en España debido a su estructura productiva. En este sentido, el mercado europeo se sustenta en una fuerte dependencia exterior de pescado y marisco. La UE y, en particular, España combinan un consumo per cápita elevado con una producción limitada, lo que ha convertido a la UE en el mayor importador mundial. Esta asimetría entre la base productiva, la pauta de consumo y la apertura comercial amplifica los riesgos aguas arriba y aguas abajo de la cadena (impacto acumulativo). La lectura por fases del ciclo productivo permite ordenar los riesgos sin perder de vista sus interdependencias.

Planificación y diseño

El litoral europeo y español se encuentra cada vez más congestionado, lo que genera **dificultades para su ordenación**. El turismo, la pesca, la conservación, las energías renovables marinas y el transporte compiten por un espacio regulado por normas que no siempre están alineadas entre las Administraciones. Los plazos de tramitación y renovación de concesiones resultan largos

La **estructura empresarial y su capital humano** también importan. En la UE y en España predominan las pequeñas y medianas explotaciones con una integración vertical limitada. La atomización dificulta el acceso a financiación competitiva, limita la capacidad de contratar coberturas de seguro adecuadas y reduce el poder de negociación con proveedores de insumos y con la distribución. El marco regulatorio evoluciona con rapidez y se compone de múltiples capas. Las granjas interactúan con la normativa ambiental, sanitaria, laboral, de ordenación del espacio marítimo y de información al consumidor. La falta de sincronía entre los niveles europeo, estatal y autonómico genera incertidumbre jurídica y multiplica los reportes de sostenibilidad, taxonomía financiera, certificación y auditoría con elementos redundantes y solapados que, además, requieren recursos especializados. Esta incertidumbre regulatoria y de mercado desalienta las inversiones de larga maduración, como los sistemas de recirculación y la modernización de instalaciones.

La falta de relevo generacional y la escasez de personal técnico cualificado añaden fricción operativa. La exposición a trabajos al aire libre y en mar abierto incrementa los riesgos laborales y los costes asociados de prevención y seguros, integrándose en la dimensión «Una sola salud». En este sentido, conviene vigilar y establecer protocolos de seguridad ante posibles episodios de zoonosis (enfermedades que se transmiten de animales a humanos) y de zoonosis inversa, aunque en la acuicultura estos riesgos resultan actualmente más limitados.

Producción

El talón de Aquiles de gran parte de la piscicultura intensiva es la **dependencia de insumos** externos de precio volátil. La harina y el aceite de pescado siguen constituyendo ingredientes críticos para especies marinas carnívoras y omnívoras de alto valor. Su oferta se ve limitada por las cuotas de captura y la variabilidad climática en las pesquerías pelágicas que abastecen a esta industria. Cuando la biomasa disponible disminuye debido a eventos oceánicos, los precios de los insumos se encarecen abruptamente y erosionan los márgenes en jaulas marinas y en sistemas de recirculación.



A este escenario se suma un aspecto central para la sostenibilidad: la ratio *fish in: fish out* (FIFO), que mide cuántos kilos de pescado silvestre se requieren para producir un kilo de pescado cultivado. Una ratio FIFO elevada indica una fuerte dependencia de recursos marinos limitados y una mayor presión sobre las pesquerías silvestres. Por el contrario, reducir esta ratio mejora la eficiencia en el uso de materias primas y contribuye a la resiliencia productiva frente a perturbaciones inesperadas y exógenas (*shocks*) en la disponibilidad y el precio. La sustitución por fuentes vegetales o microbianas no elimina por completo el riesgo de mercado: compite con cadenas agroalimentarias humanas y pecuarias, añade incertidumbres nutricionales por antinutrientes y perfiles de aminoácidos y está expuesta a *shocks* de cosecha, a restricciones comerciales y a primas de sostenibilidad.

Imagen magnificada de una hembra y un macho de *Artemia* (*Artemia sp.*) en la posición típica previa a la copulación. Fuente: Grupo de Especies Auxiliares en Acuicultura, Larvicultura y Ecotoxicología / (IATS, CSIC)

La **energía y la huella operativa** se han convertido en variables críticas. El proceso productivo requiere electricidad y combustibles para bombeo, aireación, oxigenación, desplazamientos y cámaras frigoríficas. Los picos de precios de la electricidad y de los combustibles alteran la estructura de costes de los sistemas. Las granjas mediterráneas que trabajan con densidades altas y periodos cálidos resultan especialmente vulnerables. La volatilidad energética se transmite al coste del frío en primera venta y a la logística, y presiona la viabilidad de especies cuyo precio de mercado se fija en un tablero global, donde compiten productores extracomunitarios con estructuras de coste diferentes. En la UE, el coste energético actúa desde 2021 como un factor adicional de presión, con efectos visibles en los balances de dorada y de lubina. En España, las cuentas de explotaciones mediterráneas son especialmente sensibles a las subidas del precio del pienso y de la electricidad, debido a la intensidad energética de la aireación, el bombeo y la refrigeración.

El **suministro de alevines y su diversidad** también condicionan la estabilidad productiva. La concentración de criaderos en pocas manos para ciertas especies y la dependencia de un número reducido de líneas genéticas con bajo grado de domesticación elevan los riesgos de consanguinidad y reducen la capacidad de respuesta frente a patógenos emergentes. Asimismo, la producción de alevines de peces marinos exige criaderos con control fino de fotoperiodo, temperatura y calidad del agua. La estacionalidad reproductiva, la sensibilidad larvaria y las tasas de deformidad generan mermas que encarecen la reposición. España, además, mantiene un segmento singular en atún rojo, clave por su valor unitario, cuyo engorde se basa en capturas y cuotas que pueden variar debido a decisiones internacionales y a condiciones oceanográficas, lo que introduce una fuente adicional de incertidumbre estructural en la disponibilidad de juveniles. En los moluscos, la producción de semilla natural y de cría larvaria se encuentra condicionada por la calidad del agua, por eventos de mortalidad masiva asociados a picos térmicos y por patógenos específicos de los bivalvos.



Este aumento del uso de antibióticos plantea preocupaciones sanitarias, ambientales y económicas relevantes y debe analizarse desde el enfoque de «Una sola salud», que reconoce la resistencia antimicrobiana como una amenaza que trasciende las fronteras entre la salud humana, animal y ambiental. El uso excesivo de antibióticos en acuicultura favorece la selección de bacterias resistentes que pueden diseminarse en ambientes acuáticos y transferirse a otros organismos, incluidos los seres humanos. Además, la detección de residuos en productos exportados puede ocasionar rechazos comerciales y pérdidas económicas, así como deteriorar la reputación sanitaria de los países productores.

El **cambio climático** y, en concreto, el calentamiento progresivo y la mayor frecuencia de olas de calor marinas provocan interrupciones en la alimentación, reducen el oxígeno disuelto y aumentan la mortalidad y el estrés fisiológico en peces y moluscos. La **calidad ambiental** también se ve afectada por la acidificación



de las aguas y las descargas continentales, que modifican la química del carbonato, dificultando la calcificación en bivalvos y reduciendo la productividad fitoplanctónica que sostiene su crecimiento. En estuarios y lagunas litorales, la intensificación de episodios anóxicos por eutrofización, junto con eventos extremos de tormenta y arrastre de sedimentos, incrementa los escapes y las roturas estructurales, lo que compromete la seguridad de las instalaciones y las tasas de supervivencia.

Estos procesos resultan especialmente relevantes en las rías gallegas, donde los cambios observados en los patrones de afloramiento y salinidad pueden afectar la productividad natural que alimenta al mejillón y prolongar las restricciones sanitarias por biotoxinas, con repercusiones directas en el empleo y la liquidez de las explotaciones. En aguas continentales, la sequía y la competencia por los derechos de uso reducen los caudales disponibles, concentran efluentes y aumentan la carga orgánica, lo que

Granja marina para la cría de lubinas, doradas y corvinas en el Mediterráneo (AVRAMAR, El Campello, Alicante). / GRUPO DE PATOLOGÍA DE PECES (IATS, CSIC)

obliga a reforzar los sistemas de depuración y encarece su operación para cumplir con la normativa ambiental.

A estos factores se suma el riesgo creciente de contaminación difusa y de nuevos **contaminantes** emergentes. Los vertidos agrícolas, urbanos e industriales incorporan nutrientes, metales pesados, hidrocarburos, microplásticos y residuos farmacéuticos a las aguas costeras y continentales, deteriorando su calidad química y biológica. Estos contaminantes alteran la microbiota acuática, provocan la bioacumulación de toxinas y comprometen la salud inmunológica, metabólica y reproductiva de los organismos cultivados. En los bivalvos filtradores, la acumulación de compuestos persistentes reduce la eficiencia de filtración, deteriora la calidad comercial y genera riesgos alimentarios que pueden derivar en cierres sanitarios. En el caso de los peces, la exposición prolongada a metales y a disruptores endocrinos afecta el crecimiento y la función endocrina. El aumento de contaminantes emergentes, como fármacos veterinarios, hormonas sintéticas y productos de cuidado personal, añade incertidumbre regulatoria y sanitaria, ya que sus efectos combinados aún no están completamente evaluados ni controlados.

En zonas próximas a emisarios y desembocaduras urbanas, la mezcla de nutrientes y microcontaminantes favorece la proliferación algal nociva, incrementando los riesgos toxicológicos y sanitarios. La interacción entre el cambio climático y la contaminación genera efectos sinérgicos: las temperaturas elevadas y los bajos niveles de oxígeno potencian la toxicidad y aceleran la bioacumulación de numerosos compuestos, agravando su impacto ecológico y sanitario. La acumulación de residuos químicos en los tejidos de organismos cultivados plantea riesgos para la inocuidad alimentaria y la salud humana, reforzando la vinculación directa entre la sostenibilidad del sector y el enfoque «Una sola salud».

El **bienestar animal** en el sector acuícola se enfrenta a presiones regulatorias, científicas y sociales cada vez más intensas, que incrementan el control sobre densidades, manejo, ayuno, transporte y sacrificio. Este endurecimiento normativo genera costes operativos, tensiones en la gestión diaria y riesgo de incumpli-



miento, especialmente en las instalaciones con recursos limitados. Los animales sometidos a estrés térmico, manipulación excesiva o hacinamiento presentan mayor mortalidad, inmunosupresión y pérdida de eficiencia alimentaria, lo que incrementa la vulnerabilidad sanitaria. La variabilidad de criterios entre marcos normativos y certificaciones añade inseguridad jurídica y desigualdad competitiva. La creciente sensibilidad social ante el sufrimiento animal amplifica los riesgos reputacionales y comerciales, ya que los incidentes de mala gestión o deficiencias en el aturdimiento pueden derivar en la pérdida de confianza del consumidor, así como en sanciones o restricciones de mercado.

También debe vigilarse el **impacto ambiental y ecológico** directo de la acuicultura. Esta ejerce presiones sobre los ecosistemas acuáticos, en especial en zonas costeras densamente pobladas y en cuencas con baja capacidad de renovación. En los sistemas marinos y estuarinos, la acumulación de materia orgánica procedente de heces, restos de pienso y bioincrustaciones provoca el enriquecimiento de nutrientes, la pérdida de biodiversidad bentónica, la reducción del oxígeno en el fondo y un mayor riesgo de anoxia. Estos procesos favorecen la eutrofización, las floraciones algales y el deterioro de la calidad del agua, con efectos tanto en las especies cultivadas como en las comunidades naturales circundantes.

Por su parte, en los sistemas continentales, el uso intensivo y la renovación constante del agua ejercen presión sobre los recursos hídricos locales. La competencia por el agua de riego, el turismo y el abastecimiento urbano agrava la escasez, al tiempo que la reducción de los caudales ecológicos altera el equilibrio de ríos, lagunas y embalses. De forma común a ambos entornos, los efluentes con nutrientes, fármacos, biocidas (el impacto específico de los antibióticos ya ha sido tratado anteriormente) y materia orgánica modifican la composición microbiana del medio acuático y favorecen la aparición de resistencias bacterianas y de procesos de eutrofización. Estas alteraciones afectan a la calidad del agua, incrementan la carga orgánica y reducen la capacidad de resiliencia de los ecosistemas, sobre todo en zonas con escasa renovación o alta densidad productiva.

Los escapes de peces cultivados constituyen un problema ambiental recurrente. Los fallos en estructuras, los temporales o los ataques de depredadores marinos provocan liberaciones accidentales que alteran el equilibrio ecológico. Estos eventos favorecen las interacciones genéticas con poblaciones silvestres, la competencia por recursos, la transmisión de patógenos y el desplazamiento de especies locales, con consecuencias difíciles de revertir en los sistemas abiertos. En los cultivos de moluscos, la proliferación de bioincrustantes y depredadores oportunistas eleva los costes y reduce la productividad, además de alterar el equilibrio ecológico de los sustratos.

Por otro lado, la proximidad de explotaciones a áreas protegidas, hábitats sensibles y corredores migratorios incrementa los requisitos de control ambiental y complica la obtención y la renovación de licencias. La expansión de la actividad acuícola debe evitar repetir errores como la destrucción de manglares para la camaronicultura en Asia.

Procesamiento y distribución

La industria de **procesado y transformación** afronta una difícil combinación de calidad, seguridad y costes en un entorno de alta perecibilidad. El principal desafío reside en la variabilidad de calibres y de composición de la materia prima, derivada de condiciones ambientales y de cambios en la alimentación, lo que complica la estandarización de cortes, rendimientos y etiquetado. Los costes energéticos presionan a las plantas de fileteado, cocido y congelado, que dependen de una cadena de frío estable. La normativa sobre contaminantes y trazabilidad exige laboratorios y sistemas de control rigurosos, cargas que afectan con mayor intensidad a las pymes. En los bivalvos, la gestión de lotes y la depuración se interrumpen debido a cierres sanitarios, lo que genera sobrecostes y pérdidas por caducidad. En España, el sector conservero, que depende de la materia prima importada, sufre el impacto de las interrupciones logísticas, los cambios arancelarios y la escasez de insumos, con efectos en la capacidad industrial y en la valorización del subproducto nacional.

El **empaquetado y el envasado** plantean retos económicos y ambientales crecientes. La restricción del plástico de un solo uso y la presión por reducir la huella ambiental impulsan el uso de materiales reciclables o biodegradables, a menudo más costosos y con limitaciones técnicas. Las tendencias hacia envases unitarios y porciones individuales responden a nuevos hábitos de consumo, pero incrementan el uso total de material y la generación de residuos. Esto agrava los conflictos entre sostenibilidad y conveniencia y dificulta el reciclaje debido a la diversidad de formatos y materiales compuestos. La demanda de envases personalizados o con trazabilidad digital añade complejidad operativa y costes tecnológicos. Los transformadores pequeños tienen dificultades para cumplir con los requisitos de la gran distribución, que exige certificaciones ambientales y auditorías constantes. La necesidad de reducir el impacto sin comprometer la seguridad ni la vida útil se consolida como uno de los mayores desafíos de sostenibilidad del sector transformador.

En la fase de **almacenamiento**, la capacidad frigorífica y su coste determinan la resiliencia de la cadena. Las tensiones recientes en los precios de la electricidad han encarecido la conservación, sobre todo en nodos interiores, alejados de los puertos. La transición regulatoria en refrigerantes obliga a renovar los equipos hacia gases de bajo potencial de calentamiento, lo que implica inversiones que muchos operadores posponen a costa de un mayor riesgo de averías. La estacionalidad de la producción y de la demanda turística en España genera picos de ocupación que elevan las tarifas y obligan a algunos productores a aceptar ventas con descuentos para evitar mermas. El riesgo de interrupción de la cadena de frío por olas de calor o por cortes eléctricos se traduce en pérdidas inmediatas y en litigios por responsabilidad.

En la **comercialización**, el poder de negociación se concentra en pocas cadenas minoristas y plataformas mayoristas. Las exigencias de múltiples certificaciones, auditorías, especificaciones de formato y presentación, así como de condiciones de pago dilatas, imponen costes financieros que las pequeñas y medianas empresas soportan con dificultad. Los requisitos de trazabilidad

avanzada y de comunicación de la huella ambiental incrementan la carga administrativa. La presión de la oferta importada de productos estandarizados limita la traslación de costes a precios. La industria local debe competir con esta corriente constante, que condiciona la fijación de precios y la rotación en el lineal. En el canal Horeca (cadena de suministro que conecta a productores y distribuidores con establecimientos de hostelería, restauración y *catering*), clave para productos de mayor valor, la recuperación pospandemia ha sido desigual, lo que complica la planificación de ventas y la inversión en marcas.

La **disposición de residuos** y subproductos constituye un eslabón crítico y costoso. La elevada perecibilidad de descartes y mermas obliga a realizar retiradas rápidas con gestores autorizados, cuyo coste ha aumentado debido al consumo de energía y a los requisitos ambientales. En el caso de los bivalvos, la cáscara concentra volumen y costes de transporte; su acumulación cerca de zonas productivas genera problemas de olores y vectores si la retirada se retrasa. La presión regulatoria sobre plásticos y envases de un solo uso transfiere costes al productor y al transformador en forma de rediseño de formatos, tasas e inversiones en materiales alternativos. Las obligaciones de trazabilidad de los subproductos destinados a la alimentación animal o a otras industrias requieren sistemas de control que resultan onerosos para las pequeñas plantas. En depuración y efluentes, los límites a nutrientes y materia orgánica se endurecen y requieren inversiones en equipos y personal técnico para cumplir con los permisos y las inspecciones más frecuentes.

La cadena de frío depende de una red **logística** cada vez más congestionada en corredores clave y vulnerable a huelgas, al alza de los precios del combustible y a los cuellos de botella portuarios. Las exportaciones dentro de la UE están sujetas a unos controles de calidad y a una documentación creciente que ralentizan los tránsitos y exigen recursos administrativos. La exigencia de entregas frecuentes y de volúmenes consolidados, típica de la gran distribución, reduce la viabilidad de pequeños operadores alejados de centros logísticos.

El diagrama ilustra el ciclo de la cadena de valor de la acuicultura, dividido en cuatro etapas numeradas:

- Planificación y diseño**: Representado por un icono con un libro, un gráfico de barras, un pez y un símbolo de reciclaje.
- Producción**: Representado por un icono con peces y líneas de conexión que indican interacciones.
- Procesamiento y distribución**: Representado por un icono de un camión rojo transportando un pez.
- Consumo**: Representado por un icono de un carrito de compras con un pez.

Las flechas indican un flujo continuo: Planificación y diseño → Producción → Procesamiento y distribución → Consumo → Planificación y diseño.

Debajo de cada etapa se listan los factores clave:

- 1**
 - Dificultades de ordenación y regulación
 - Conciliación social y aceptación pública
 - Estructuración empresarial
 - Atracción y capacitación de capital humano
- 2**
 - Dependencia de insumos
 - Estabilidad de suministro de semilla de calidad
 - Calidad de afluentes y efluentes hídricos
 - Preservación de sanidad y bienestar animal
 - Control de huella operativa
- 3**
 - Estandarización de procesado y transformación
 - Empaquetado y envasado funcionales y ecorresponsables
 - Almacenamiento y transporte sostenibles
 - Preservación de calidad e inocuidad del producto
 - Comercialización equilibrada y responsable
 - Trazabilidad clara, transparente y verificable
 - Reducción y reutilización eficiente de residuos (economía circular)
- 4**
 - Percepción del consumidor
 - Cambios de hábitos alimentarios (consumo de conveniencia)
 - Precios competitivos

SCIENCE  POLICY | 49

Consumo

La demanda se está transformando debido a factores demográficos, económicos y culturales. En España, el consumo aparente de productos acuáticos se ha reducido en un contexto de inflación alimentaria que favorece sustituciones hacia proteínas más baratas y de preparación sencilla. Persisten percepciones negativas sobre la acuicultura que penalizan ciertas especies y orígenes, incluidas las dudas sobre el bienestar, el uso de antibióticos, los impactos locales y la calidad organoléptica. Los mensajes mixtos sobre salud pública, desde las alertas por mercurio en grupos de riesgo hasta el debate sobre microplásticos, tienden a reducir la frecuencia de compra en los hogares sensibles. Al mismo tiempo, la cocina doméstica pierde peso frente a los productos listos para consumir, lo que exige una oferta de conveniencia que no todas las cadenas locales pueden ofrecer a precios competitivos. La polarización entre segmentos premium y básicos reduce el espacio intermedio, con consecuencias directas para las especies mediterráneas de precio medio.

dos



Evidencia científica generada por el CSIC en materia de acuicultura sostenible y su implementación práctica



La Sección II profundiza en las acciones del CSIC relativas a la acuicultura sostenible. En primer lugar, se describen las aportaciones en materia de espacio, la aceptación de la acuicultura y la cooperación con compañías acuícolas. A continuación, se detallan las contribuciones de esta institución para rediseñar la estructura productiva, con referencia a los insumos y materias primas, los costes energéticos, etc. En tercer lugar, se explican las acciones realizadas en torno a la transformación industrial de la acuicultura. También se desarrolla la influencia en el consumo y, por último, el marco organizativo y de infraestructuras del CISC relativo a este ámbito.



Pez cebra (*Danio rerio*), organismo modelo de referencia en investigación biológica y biomédica, especialmente relevante para estudios experimentales con peces.
LABORATORIO DE NEUROCOMPORTAMIENTO EN PECES (IATS, CSIC)

21.

Aportaciones a la planificación, la ordenación, la transparencia y la coordinación de múltiples actores

ENTRE las múltiples aportaciones del CSIC en el ámbito de la acuicultura destacan los sistemas de elección de emplazamientos óptimos, los esfuerzos por lograr la aceptación de la acuicultura y la cooperación con empresas del sector.

Espacio, ordenación y licencias

Frente a la problemática de la limitación espacial, la comunidad científica ofrece herramientas de gestión basadas en la modelización y en datos ambientales para guiar la toma de decisiones de zonificación. En efecto, el CSIC ha desarrollado capacidades de monitorización y simulación que ayudan a seleccionar los emplazamientos óptimos para la acuicultura, minimizando las interferencias con otras actividades. Mediante técnicas avanzadas (ADN ambiental, teledetección con drones, modelos oceanográficos, etc.) se evalúa la idoneidad de las áreas y se previenen los conflictos entre sectores, contribuyendo a una ordenación sostenible del litoral.

En este contexto, el CSIC lidera iniciativas internacionales de planificación marítima orientadas a la acuicultura. Un ejemplo reciente es el proyecto MEDIGREEN, que integra la acuicultura y otras actividades, como las pesquerías, y energías renovables *offshore* (es decir, instaladas en alta mar, fuera de la costa) en el diseño de espacios marítimos más sostenibles en el Mediterráneo. Este proyecto involucra a Administraciones y expertos de varios países para consensuar directrices comunes, lo que evidencia el papel central del CSIC en la generación de conocimiento para la planificación estratégica. En conjunto, estas iniciativas reflejan cómo la investigación del CSIC aporta soluciones concretas para la planificación territorial y la gestión sostenible del espacio marino.

Aceptación social y conflictos territoriales

Asimismo, el CSIC ha contribuido activamente, tanto mediante estudios socioecológicos como a través de programas de divulgación y formación, a demostrar con datos objetivos que la acuicultura puede coexistir con un entorno saludable. Por ejemplo, los investigadores del CSIC analizan la interacción entre las

El CSIC apoya estos objetivos mediante la colaboración estrecha con la industria acuícola y a través de programas formativos especializados. De hecho, cuenta con una larga tradición de cooperación con empresas del sector, actuando como puente para llevar los avances científicos al terreno productivo. Esta colaboración ha permitido implementar mejoras tecnológicas (por ejemplo, nuevos piensos y sensores ambientales) incluso en granjas de menor escala, elevando su eficiencia operativa. Asimismo, desde los centros del CSIC se han organizado cursos y talleres dirigidos a profesionales y gestores públicos en materia acuícola. Estas actividades formativas contribuyen a capacitar al capital humano, a difundir buenas prácticas y a armonizar los protocolos sanitarios y de manejo, aspectos cruciales para reforzar la profesionalización del sector.

En el plano de la investigación aplicada, varias de sus iniciativas han generado soluciones que pueden escalar a nivel de empresa: desde sistemas de monitorización digital del cultivo (por ejemplo, dispositivos inteligentes para el seguimiento individual de peces en granja) hasta estudios para optimizar la productividad sin requerir grandes inversiones (como mejoras en la alimentación o en el control de patologías). Todo ello proporciona a las pymes acuícolas herramientas basadas en evidencia que mejoran su gestión, reducen los riesgos laborales y ambientales y, en definitiva, aumentan su resiliencia. En paralelo, la incorporación del Instituto Español de Oceanografía (IEO) al CSIC ha aportado capacidades adicionales en gestión de recursos, lo que permite abordar de manera más integral la dimensión socioempresarial.

22.

Contribuciones clave para rediseñar la estructura productiva del sector de cara al futuro

EN cuanto a las contribuciones destacadas para rediseñar la estructura productiva del sector, se encuentran, entre otras, la dependencia de insumos y materias primas, los costes energéticos y la huella operativa, así como la dependencia de alevines y cuellos de botella genéticos.

Dependencia de insumos y materias primas

El CSIC ha realizado importantes contribuciones de forma continua en la nutrición de especies acuícolas, con numerosos proyectos enfocados en sustituir ingredientes marinos por otros de origen terrestre o en nuevas biomásas. Por ejemplo, los científicos del CSIC demostraron que resulta factible cultivar peces carnívoros, como la dorada mediterránea, con piensos con un contenido muy reducido de harina y aceite de pescado (inferior al 7,5 %), sin que esto afecte a su crecimiento, estado de salud o valor nutricional del filete, siempre que dichas dietas se optimicen con ciertos ácidos grasos y otros suplementos naturales. Estos estudios pioneros a escala piloto evidenciaron conversiones alimenticias prácticamente ideales, lo que supone un salto notable en la reducción de la ratio FIFO.

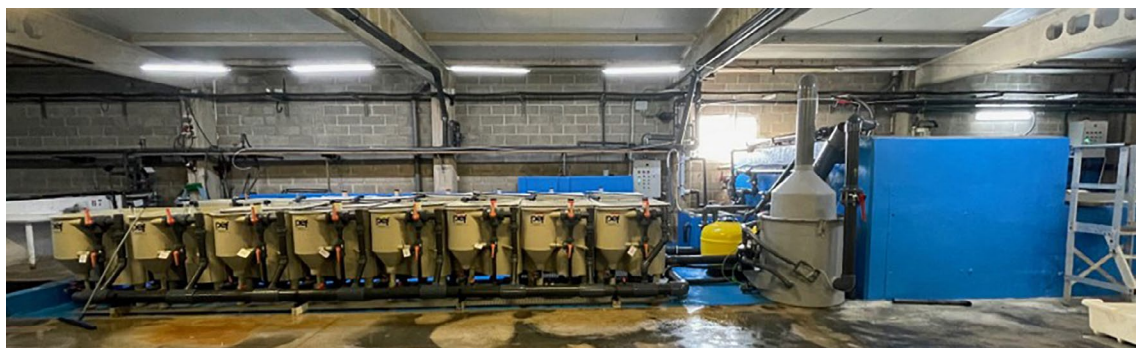
En paralelo, se han evaluado ingredientes emergentes para piensos acuícolas, como harinas de insectos, proteínas microbianas y cultivos de microalgas, con el objetivo de aprovechar materias primas de bajo impacto. Un caso destacado es el proyecto europeo Sustain Feed (coordinado por el CSIC entre 2021 y 2023), que desarrolló formulaciones de pienso para especies marinas empleando subproductos agrícolas (como harinas derivadas de residuos de cereales o legumbres) y microalgas cultivadas con CO₂ residual, minimizando la competencia con los alimentos de consumo humano. Los resultados de Sustain Feed han demostrado que estos ingredientes alternativos pueden sustituir con éxito a la proteína de pescado, al tiempo que reducen la huella de carbono del alimento gracias al reciclaje de nutrientes agrícolas. Asimismo, otros grupos han trabajado en el aprovechamiento de la biomasa microalgal para la alimentación larvaria, optimizando su producción mediante técnicas innovadoras.

cultivadas: el CSIC ha publicado trabajos de caracterización de enzimas desaturasas y vías de síntesis de ácidos grasos omega-3 en peces e invertebrados marinos, conocimiento que permite seleccionar mejor las materias grasas alternativas (como aceites vegetales enriquecidos o fermentados microbianos) para mantener el perfil nutritivo del pescado de cultivo.

Costes energéticos y huella operativa

El CSIC ha contribuido en varios frentes a generar evidencia para apoyar la transición energética y reducir la huella operativa de la acuicultura. Por un lado, sus ingenieros e investigadores han evaluado el desempeño energético de diferentes tecnologías acuícolas, por ejemplo, sistemas de recirculación en acuicultura —*recirculating aquaculture systems* (RAS)— frente a estanques abiertos, cuantificando los ahorros potenciales de agua y energía. Por otro lado, el CSIC participa en proyectos de multiuso del espacio marino que combinan la acuicultura con energías renovables *offshore*. Un ejemplo es AquaWind, una iniciativa europea en la que colaboran centros del CSIC para probar una plataforma flotante que integra aerogeneradores eólicos con jaulas de engorde de peces en mar abierto. Esta aproximación innovadora busca aprovechar infraestructuras compartidas: la energía eléctrica producida podría cubrir las necesidades de la granja y de los sistemas de monitoreo, mientras que la instalación conjunta optimiza el espacio y reduce los costes globales. Además, al concentrar actividades en un solo emplazamiento, disminuye la huella de carbono logística y se promueve una coexistencia armónica con beneficios ambientales.

De manera paralela, otras investigaciones del CSIC se han centrado en la selección genética de ejemplares más eficientes en conversión del alimento. Con ello, al igual que con las mejoras en los piensos descritas anteriormente, se reduce indirectamente la energía invertida en la producción. Un logro notable en esta línea fue la obtención de peces que crecen significativamente más (hasta un 60 % de peso) con la misma ración alimenticia, gracias a modificaciones metabólicas sin incrementar la deposición de grasa. Si bien estos resultados provienen de estudios experimentales (con el pez cebra como modelo), apuntan a que la



(Arriba) Módulo RAS para estudios de cultivos multitróficos. Indoor: elementos de tratamiento del agua + 6 tanques de 1,5 m³ para peces, 18 bandejas de 1 m² para invertebrados bentónicos, 1 tanque de 8 m³ para filtradores. Outdoor: invernadero de 64 m² para cultivo de microalgas (10 bolsas de 400 L + pasteurizador), macroalgas o halófitas (6 tanques de 1 m³). (Abajo) Módulo RAS para estudios de nutrición de peces. / GRUPO DE ACUICULTURA MULTITRÓFICA, NUTRICIÓN Y DIVERSIFICACIÓN (AQUAMIND). PLANTA EXPERIMENTAL DE CULTIVOS MARINOS «EL BOCAL». CENTRO OCEANOGRÁFICO DE SANTANDER (IEQ, CSIC)

mejora genética y nutricional puede lograr una producción más eficiente que aproveche mejor la energía contenida incorporada en el pienso.

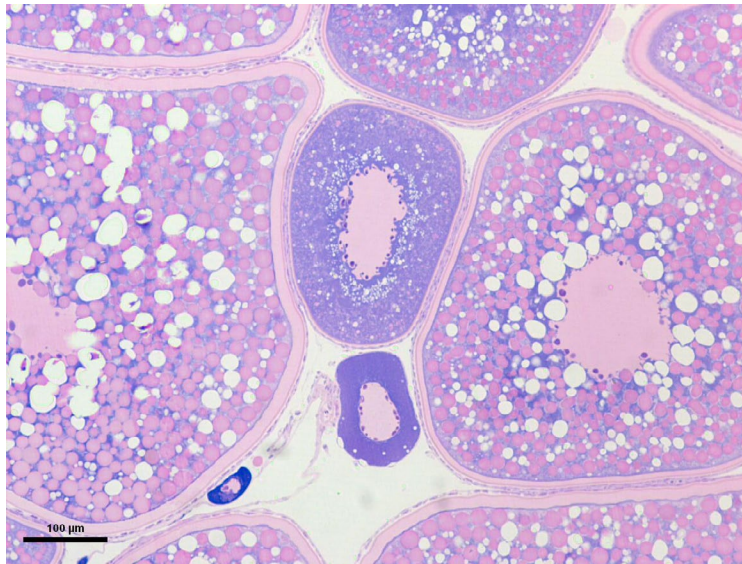
Por otro lado, la incorporación del CSIC en iniciativas de eficiencia energética industrial ha facilitado la transferencia de soluciones al sector acuícola: por ejemplo, las técnicas de refrigeración más sostenibles desarrolladas en otros ámbitos agroalimentarios (por centros del CSIC especializados en tecnología de alimentos) se están adaptando a la conservación de productos pesqueros y acuícolas, con nuevos refrigerantes de bajo potencial de calentamiento atmosférico (PCA) y sistemas de frío solar.

Dependencia de alevines y cuellos de botella genéticos

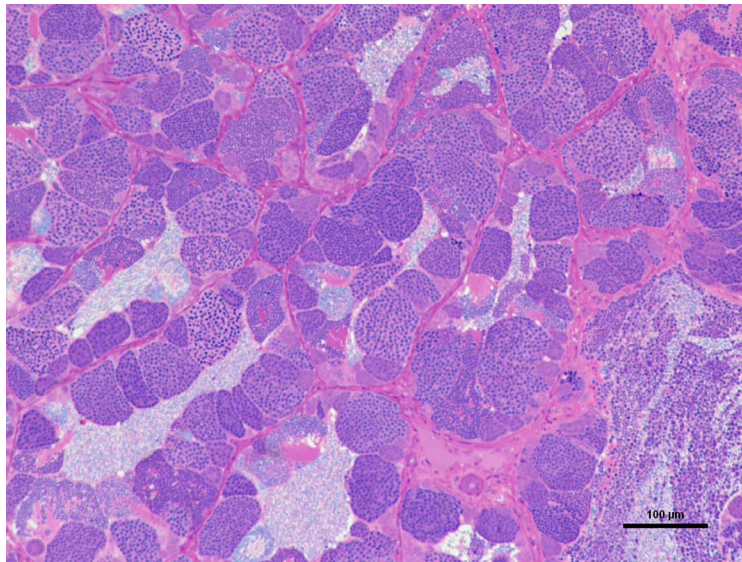
El CSIC ha sido protagonista durante la última década de avances fundamentales en el cierre de ciclos biológicos, la reproducción controlada y la mejora genética de especies acuícolas. Un ejemplo es el hito histórico de la domesticación del atún rojo por el IEO, ahora parte del CSIC. Este logro demuestra la posibilidad de producir juveniles de atún sin depender exclusivamente de capturas silvestres, lo que supone un avance de enorme relevancia estratégica para reducir la incertidumbre en el suministro de alevines de esta especie de alto valor. Desde entonces, el CSIC ha continuado perfeccionando las técnicas de cría de atún y otras especies migratorias, incluyendo el control del fotoperiodo y de la temperatura para inducir desoves fuera de la época natural, así como la optimización del cultivo larvario en condiciones terrestres.

Además del caso emblemático del atún, los institutos de acuicultura del CSIC han logrado enormes avances en la reproducción de peces marinos y moluscos. Por ejemplo, se ha estudiado la regulación hormonal de la gametogénesis en la dorada y la lubina, lo que ha permitido desarrollar métodos para inducir la maduración sexual en cautiverio y sincronizar la producción de huevos de calidad. Estos conocimientos se han transferido a criaderos comerciales, lo que ha mejorado la producción nacional de alevines.

Para evitar la consanguinidad y aumentar la resiliencia genética, el CSIC ha impulsado la creación de núcleos de selección y programas de mejora. En colaboración con asociaciones sectoriales, los investigadores del CSIC han identificado marcadores genéticos de interés (relacionados con el crecimiento, la eficiencia nutricional o la resistencia a enfermedades) en especies como la dorada. De hecho, se ha demostrado la viabilidad de seleccionar genéticamente ejemplares de dorada con mayor resistencia a un parásito intestinal (*Enteromyxum leei*), mediante el análisis comparativo entre familias con distinta susceptibilidad al patógeno. Esta línea sienta las bases para incorporar criterios sanitarios en los programas de selección, lo que, a largo plazo, reduce la dependencia de los tratamientos.



Imágenes de cortes histológicos de tejido gonadal de lubina (*Dicentrarchus labrax*), teñidos con hematoxilina-eosina y observados al microscopio óptico. La imagen superior corresponde a una hembra en vitelogénesis avanzada, y la inferior a un macho maduro. GRUPO DE FISIOLÓGÍA DE LA REPRODUCCIÓN DE PECES (IATS, CSIC)



Asimismo, la identificación, por parte del CSIC, de proteínas moleculares protectoras en las mucosas de peces constituye otro aporte relevante. El descubrimiento reciente de seis proteínas previamente desconocidas en dorada, con funciones de protección de sus mucosas, abre la puerta a mejoras en la nutrición de los reproductores y a la selección de linajes con mucosas más resistentes a las infecciones, lo que fortalecería la salud de las futuras generaciones de alevines.

En cuanto a asegurar la disponibilidad de semillas de moluscos, el CSIC desempeña un papel clave como Laboratorio Nacional de Referencia (LNR) en enfermedades de bivalvos, vigilando brotes de patógenos que diezman larvas y proponiendo medidas de manejo para garantizar la reposición en viveros. Finalmente, también es destacable la labor en criopreservación: los grupos de investigación han trabajado en técnicas de congelación de gametos y larvas de peces planos, con el objetivo de crear bancos de germoplasma que permitan disponer de *stock* genético en cualquier momento.

Sanidad animal y resistencia antimicrobiana

La sanidad de los cultivos acuícolas constituye un pilar de su sostenibilidad. Las soluciones científicas se centran en el enfoque «Una sola salud»: prevenir y controlar las patologías de los animales acuáticos de forma integrada, reduciendo al mínimo el uso de antimicrobianos mediante vacunas, probióticos, inmunostimulantes, mejoras de manejo y vigilancia epidemiológica.

En este frente, la contribución del CSIC ha sido prolífica. Diversos institutos han desarrollado vacunas experimentales y métodos de diagnóstico temprano para las principales enfermedades en peces y moluscos. Por ejemplo, en el marco del proyecto europeo ParaFishControl, los investigadores del CSIC demostraron la eficacia de la inmunización pasiva contra el parásito *Enteromyxum leei* en la dorada. Mediante la transferencia de anticuerpos desde ejemplares resistentes a otros susceptibles lograron frenar de forma significativa el avance de esta enfermedad intestinal que carece de tratamiento comercial. Este resultado evidencia que fomentar la respuesta inmunitaria específica puede proteger a los peces sin recurrir a antibióticos. Asimismo, se han identifica-



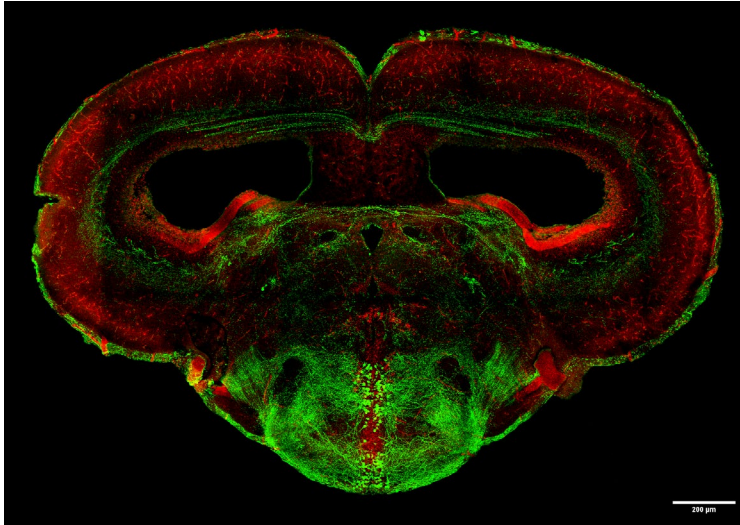
Acuarios experimentales de laboratorio para trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*), una de las especies de salmónidos más relevantes en la acuicultura continental europea. Las instalaciones están destinadas al estudio de los factores inmunológicos que modulan la respuesta de esta especie ante enfermedades infecciosas, vacunas o dietas experimentales. / GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN INMUNOLOGÍA Y PATOLOGÍA DE LOS PECES (INIA, CSIC)

Por otro lado, las capacidades del CSIC como laboratorio de referencia apoyan las políticas sanitarias: monitorea toxinas y patógenos en moluscos bivalvos en Galicia, aportando datos para decidir cierres sanitarios oportunos y evitar riesgos para los consumidores. Igualmente, desarrolla sistemas de alerta temprana de FAN mediante modelos y redes de sensores, lo que ayuda a prevenir mortalidades masivas y a evitar crisis de salud pública. En este punto cabe destacar que el CSIC ha adoptado plenamente el paradigma «Una sola salud», liderando en 2023 la elaboración de un informe integrador sobre la resistencia antimicrobiana en entornos acuáticos, en colaboración con la Agencia Española de Medicamentos y Productos Sanitarios (AEMPS), que recomienda prácticas basadas en evidencia para el uso responsable de antibióticos en acuicultura.

En cuanto a los contaminantes, las investigaciones del CSIC han iluminado su impacto y su intervención en varios frentes. Un estudio internacional liderado por el CSIC reveló la alta incidencia de microplásticos ingeridos en peces silvestres del Mediterráneo, lo que evidenció que la presencia de microplásticos en la cadena trófica no es exclusiva de sistemas acuícolas, sino que se trata de un problema ambiental general. Este tipo de hallazgos respalda la necesidad de políticas globales para reducir el uso de plásticos. Específicamente en el ámbito de la acuicultura, el CSIC coordina desde 2021 el proyecto MicroplastiX para evaluar el impacto de los microplásticos en instalaciones acuícolas y en alimentos marinos, con la participación de Administraciones pesqueras.

Otro contaminante emergente bajo estudio son los productos farmacéuticos: el CSIC ha llevado a cabo ensayos de exposición crónica de peces a residuos de fármacos presentes en efluentes, evaluando sus efectos subletales sobre la fisiología; estos datos aportan base científica para regular los vertidos y establecer límites seguros en aguas de cultivo. Al mismo tiempo, el CSIC ha reforzado la monitorización del mercurio y otros metales pesados en especies acuícolas marinas, integrándose en programas nacionales que garantizan que los niveles de mercurio en pescado de crianza se mantengan por debajo de los umbrales alimentarios.

Finalmente, la investigación sobre soluciones naturales también ha resultado relevante: se ha comprobado que ciertos cultivos integrados pueden biorremediar el medio, como las macroalgas y las halófitas, que absorben nutrientes y metales de aguas eutrofizadas. El CSIC puso a prueba, en estuarios andaluces, la plantación de algas asociada a jaulas de engorde de dorada y observó una disminución de amonio y fosfato en el entorno inmediato, gracias a su absorción.



Corte histológico del cerebro de pez cebra en el que dos proteínas vinculadas al sistema nervioso se encuentran marcadas fluorescentemente en rojo y verde, lo que permite su visualización y análisis mediante microscopía de fluorescencia. / LABORATORIO DE NEUROCOMPORTAMIENTO EN PECES (IATS, CSIC)

Bienestar animal

El bienestar de los animales acuáticos cultivados constituye otro ámbito en el que el CSIC se ha posicionado a la vanguardia, generando conocimiento y capacitación. Los investigadores del CSIC han documentado, por ejemplo, que las mejoras en las condiciones de cultivo (como evitar una sobrealimentación que cause obesidad) repercuten de forma positiva en la salud cognitiva de los peces: en el pez cebra se observó que individuos con dietas equilibradas recuerdan mejor los estímulos aprendidos que los obesos por sobrealimentación, lo que sugiere que un buen estado fisiológico mejora el bienestar y el comportamiento de los animales. Este tipo de hallazgos refuerza la importancia de las prácticas de alimentación adecuadas.

Sin embargo, la contribución más visible del CSIC al bienestar acuícola ha consistido en la difusión de buenas prácticas y en la asistencia técnica a autoridades y empresas para implementar estándares más altos. Las iniciativas como estas, lideradas por el CSIC, no solo capacitan a profesionales, sino que también demuestran el compromiso institucional con un enfoque ético en la producción acuática. Asimismo, los investigadores del CSIC han asesorado en la redacción de guías y normativas. Por ejemplo, una serie de expertos del CSIC colaboraron con el MAPA en la identificación de indicadores de estrés en peces que podrían incorporarse en futuras regulaciones sobre el bienestar animal.

Al mismo tiempo, la ciencia del bienestar produce beneficios colaterales: el CSIC ha comprobado que las mejoras en el bienestar suelen asociarse con mejoras productivas. Un estudio comparativo en la dorada halló que reducir las densidades y proporcionar periodos de oscuridad controlada conlleva una disminución de los marcadores de estrés crónico, lo que a su vez reduce la mortalidad y mejora la conversión alimenticia. Este tipo de evidencia resulta crucial para convencer al sector de que el bienestar no solo constituye un imperativo legal o moral, sino que también aporta resiliencia económica.

Adicionalmente, la investigación en bienestar ha explorado nuevos dispositivos: el desarrollo del sensor FishBit Biologger constituye un ejemplo de tecnología *wearable* para peces que monitorea en tiempo real su actividad y frecuencia respiratoria; así, permite detectar signos de malestar de forma no invasiva. Estos desarrollos, patentados y probados en truchas y lubinas, ofrecen a las granjas una herramienta innovadora para monitorear de forma continua el bienestar animal y reaccionar ante eventuales problemas (como la hipoxia, la hiperactividad por estrés, etc.).



FishBit Biologger, implantado externamente en el opérculo para el registro preciso y no invasivo de la frecuencia respiratoria y de la actividad física de peces en condiciones experimentales. / GRUPO DE NUTRIGENÓMICA Y BIOLOGÍA INTEGRATIVA DE PECES (IATS, CSIC)

Mitigación del impacto ambiental y ecológico de las prácticas acuícolas

Si bien la acuicultura resulta, en general, una forma eficiente de producir proteína animal, su expansión debe gestionarse para evitar impactos ambientales significativos en los ecosistemas acuáticos. Los problemas potenciales incluyen la eutrofización y la contaminación del fondo por residuos orgánicos de piensos y heces, la propagación de patógenos o de genes a poblaciones silvestres a través de escapes, la introducción de especies exóticas o la afectación de hábitats sensibles. Las soluciones científicas apuntan a una acuicultura de «cero residuos» y perfectamente integrada en el entorno: sistemas de cultivo con emisiones controladas o valorizadas, planes de contingencia ante escapes, mejoras genéticas para evitar la reproducción de fugitivos y estudios de capacidad de carga ecológica para fijar límites de producción en cada entorno.

En este ámbito, el CSIC ha generado un amplio corpus de evidencia que permite avanzar en esas direcciones. Una de las soluciones más eficaces que ha impulsado es la **acuicultura multitrófica integrada** (AMTI) —en inglés, *integrated multi-trophic aquaculture* (IMTA)—, un modelo de cultivo que combina peces, moluscos filtradores, algas y otros organismos bioasimiladores. Este enfoque permite aprovechar los residuos de una especie como recurso para otra, de modo que se reducen la carga orgánica y los nutrientes disueltos en el entorno. Las investigaciones del CSIC han demostrado que los cultivos multiespecíficos contribuyen a mejorar la calidad del agua hasta en un 40 %, al tiempo que generan productos adicionales de alto valor (por ejemplo, poliquetos y algas ricos en ácidos grasos omega-3). Estas evidencias ofrecen una base sólida para políticas que promuevan la implantación de sistemas IMTA en zonas costeras y plataformas *offshore*, incentivando modelos productivos más sostenibles y circulares.

Un ejemplo son los progresos en el cultivo de poliquetos marinos a partir de efluentes de peces, lo que demuestra que estos gusanos pueden crecer alimentándose de los residuos y, al mismo tiempo, sirven como fuente de ácidos grasos omega-3 para la alimentación acuícola. Este hallazgo cierra un ciclo virtuoso: reduce la carga orgánica vertida al medioambiente y genera un insumo nutricional rico en ácidos grasos omega-3, reduciendo la necesidad de pescar para obtenerlos. De igual modo, se han estudiado las tasas de filtración de mejillones situados aguas abajo de jaulas de lubina, lo que confirma la posibilidad de eliminar parte de las partículas en suspensión derivadas del alimento no consumido, contribuyendo a mantener la calidad del agua. Esta investigación respalda las recomendaciones de implantar cultivos multiespecíficos donde sea posible, una medida que las autoridades pueden incentivar con base empírica sólida.

En cuanto a la huella de residuos sólidos, el CSIC también ha brindado soluciones: se han desarrollado procesos de valorización de los subproductos generados por la acuicultura y la pesca, transformando los desechos potenciales en nuevos productos. Los investigadores del CSIC han patentado técnicas de biorrefinería para extraer compuestos de interés industrial a partir de

restos de pescado y marisco. De las pieles se extrae colágeno; de las vísceras, enzimas hidrolíticas; de los cartilagos, condroitín sulfato; de los caparazones, quitina para biopolímeros, etc. Estas aplicaciones no solo generan valor económico, sino que también reducen la cantidad de residuos que terminarían en vertederos o en el medioambiente.

En el caso particular de las conchas de moluscos (ostras, mejillones, etc.), respecto al voluminoso residuo que suele acumularse, el CSIC ha explorado su empleo como materia prima de carbonato cálcico para piensos de aves y fertilizantes agrícolas, cerrando el ciclo de este subproducto.

Otro tema ambiental sensible es la cuestión de los escapes de peces cultivados y la interacción genética con las poblaciones autóctonas. El CSIC ha abordado este asunto mediante estudios genéticos de poblaciones: por ejemplo, se analizaron, mediante marcadores moleculares, las lubinas salvajes y de piscifactoría en el litoral andaluz y se detectó que la contribución genética de ejemplares escapados era aún baja, pero podía incrementarse sin medidas de control. A raíz de estos resultados, se propone el establecimiento de protocolos de contención (como redes de doble malla o monitoreo postormentas) y el desarrollo de peces triploides estériles en ciertos cultivos, para lo cual el CSIC también ha investigado métodos de inducción de triploidia en dorada, con altas tasas de supervivencia larvaria.

Por otro lado, la cercanía de algunas granjas a áreas ecológicamente sensibles genera la necesidad de evaluaciones de impacto rigurosas. Aquí, la aportación del CSIC es clara: la revista *Scientia Marina* (editada por el CSIC) publicó en 2018 un estudio aplicado en el que se implementaba por primera vez el plan de monitorización ambiental para granjas marinas propuesto por la Junta Nacional Asesora de Cultivos Marinos (JACUMAR), en el que se incluían indicadores bentónicos, columna de agua y biota. Este tipo de ensayos traslada a la práctica las recomendaciones científicas, afinando las metodologías de seguimiento ambiental que hoy son obligatorias en las concesiones.

2.3.

Acciones en la transformación industrial de la acuicultura

La participación del CSIC en la transformación industrial de la acuicultura se configura en torno al procesamiento, empaquetado, almacenamiento, comercialización, disposición, logística y transporte.

Procesamiento

La transformación industrial de los productos de la acuicultura enfrenta diversos retos, como la variabilidad en el tamaño y la calidad de la materia prima, la alta perecibilidad, los exigentes estándares sanitarios y la necesidad de maximizar el aprovechamiento. Para responder a estos desafíos, las soluciones técnico-científicas se orientan a innovar en técnicas de procesamiento que mejoren la eficiencia, estandaricen la calidad y reduzcan las mermas. Una línea importante consiste en el desarrollo de nuevos productos alimentarios a partir de pescado de crianza, sobre todo en formatos de conveniencia (filetes listos para cocinar, conservas, precocinados, etc.) que amplíen la oferta al consumidor moderno.

En este aspecto, el CSIC ha aportado evidencia muy útil. Se han creado y evaluado procesos para transformar partes de pescado que antes se descartaban (como recortes o ejemplares pequeños o de bajo calibre) en alimentos procesados de valor agregado, como hamburguesas, *nuggets* o patés marinos. Estos nuevos productos cumplen con las garantías de trazabilidad y de seguridad alimentaria y se han testado para preservar su valor nutricional. Asimismo, el CSIC ha transferido protocolos óptimos para el fileteado y la refrigeración de especies cultivadas. Un caso exitoso es la cooperación con empresas procesadoras de dorada, donde se optimizó la técnica de *supercooling* (refrigeración por debajo de 0 °C sin congelación completa), lo que permitiría prolongar la vida útil del filete fresco varios días más que con métodos convencionales. En paralelo, la investigación en metabolómica del CSIC ha contribuido a comprender los cambios bioquímicos *post mortem* en el pescado cultivado, identificando indicadores específicos de frescura. Esta evidencia ha permitido desarrollar sensores rápidos de calidad (basados en compuestos volátiles) que ahora se están incorporando en cadenas de producción para monitorizar lotes en tiempo real.

Otro aporte relevante es el esfuerzo en mejorar la depuración de moluscos bivalvos: los centros del CSIC han probado sistemas de depuración en circuito cerrado con luz ultravioleta (UV) y biofiltros, logrando reducir la carga microbiana y de toxinas en mejillones y almejas en tiempos más cortos, lo que puede ayudar a la industria transformadora a asegurar la inocuidad en episodios de contaminación moderada.

Empaquetado

El sector acuícola transformador se ve empujado a reducir el uso de plásticos de un solo uso y a adoptar envases más sostenibles, en línea con las normativas ambientales y la demanda social, sin menoscabar la vida útil ni la seguridad de los alimentos. Este equilibrio entre sostenibilidad y funcionalidad en el empaquetado requiere avances científico-tecnológicos en nuevos materiales y en sistemas de envasado inteligente. El CSIC, a través de sus institutos de ciencia de materiales y de alimentos, ha investigado opciones que ya se están transfiriendo a la industria pesquero-acuícola.

Un logro notable consiste en la obtención de biopolímeros a partir de residuos marinos, como la quitina y el quitosano, extraídos de exoesqueletos de crustáceos y de conchas de sepia, polímeros naturales con los que se han formulado recubrimientos comestibles y películas biodegradables. Estos materiales, al derivarse de subproductos de la pesca y la acuicultura, ofrecen una solución de economía circular doblemente beneficiosa: reducen los desechos y proporcionan un empaque biodegradable que puede incorporarse al compost tras su uso.

Los ensayos piloto han demostrado que las películas a base de quitosano con extractos antioxidantes prolongan la frescura de los filetes de pescado en atmósfera modificada, al retrasar la oxidación lipídica. Esta tecnología está lista para el escalado e interés a las empresas conserveras que colaboran en proyectos con el CSIC.

Otra línea de evidencia generada es la de los envases activos: se han desarrollado etiquetas con sensores de temperatura-tiempo que permiten verificar si se rompió la cadena de frío en productos pesqueros envasados. Dichas etiquetas inteligentes, probadas en lotes de trucha y mejillón, cambian de color ante desviaciones térmicas, lo que aporta confianza tanto al distribuidor como al consumidor. Estos avances se alinean con las exigencias crecientes de trazabilidad digital señaladas en el diagnóstico sectorial.

Almacenamiento

El CSIC ha brindado apoyo científico en este terreno mediante estudios de estabilidad de los productos y evaluaciones tecnológicas. Por ejemplo, se ha evaluado la estabilidad de la dorada eviscerada almacenada en hielo bajo distintas condiciones: normal, enriquecida con ozono o con aditivos naturales en el hielo. Se halló que el uso de hielo ozonizado extendía el periodo de calidad aceptable del pescado en dos días adicionales, al reducir la carga microbiana superficial y sin generar residuos químicos. Esto ofrece una solución práctica que ya se ha probado en plantas de almacenamiento portuarias.

Asimismo, el CSIC ha asesorado en la transición obligatoria hacia refrigerantes de bajo potencial de calentamiento atmosférico: a través de su red de institutos, difundió entre operadores del sector información independiente sobre alternativas al freón (por ejemplo, amoníaco o CO₂ subcrítico) y sus requisitos de seguridad, lo que facilitó la toma de decisiones para renovar cámaras frigoríficas.

Por otro lado, la modelización matemática por parte de ingenieros del CSIC de los ciclos de oferta y demanda en la acuicultura española ha permitido sugerir mejoras en la gestión del almacenamiento. Un análisis de series temporales de producción acuícola (proyecto apoyado por la Secretaría General de Pesca) mostró la conveniencia de desarrollar capacidad de frío adicional en los meses de sobreproducción de mejillón para evitar saturar el mercado y las pérdidas por caducidad, lo que avaló la inversión pública destinada a aumentar la capacidad frigorífica en ciertas lonjas gallegas.

Por otra parte, la investigación socioeconómica del CSIC ha analizado las preferencias del consumidor español en materia de productos del mar. En 2018, un estudio del CSIC reveló que un segmento significativo de consumidores valora positivamente las etiquetas de producción sostenible y bienestar animal en pescados de cultivo, y se muestra incluso dispuesto a pagar un pequeño sobreprecio. Este tipo de evidencia apoya las iniciativas de diferenciación del producto acuícola español mediante sellos públicos (por ejemplo, una ecoetiqueta nacional de «Acuicultura Sostenible Certificada»), cuyo desarrollo se sugiere en el Plan Estratégico 2030 y que el CSIC podría avalar técnicamente.

En cuanto a la diversificación de canales, el CSIC ha participado en iniciativas orientadas a analizar nuevas formas de presentación y comercialización de productos pesqueros y acuícolas. Un ejemplo es *La pescadería del futuro*, un proyecto de I+D+i coordinado por el CSIC que desarrolla y evalúa prototipos de formatos, sistemas de trazabilidad y estrategias de comunicación para mejorar la experiencia del consumidor y reforzar la sostenibilidad del producto. Aunque explora modelos innovadores de interacción con el mercado, no constituye una plataforma de venta directa, sino un entorno experimental para generar evidencia aplicable al sector.

Por último, el CSIC ha contribuido a cuantificar el impacto de la competencia internacional. Un informe de 2022 comparó la estructura de costes de producción de la dorada en España con la de Turquía y descubrió que la diferencia en el precio de venta se explica en gran medida por costes energéticos y laborales más altos en España, pero con la contrapartida de mejor calidad. Este informe sugiere que comunicar esa calidad diferenciada y optimizar ciertos costes son claves para que la industria nacional compita con las importaciones, información que ya utiliza la Administración en mesas de negociación comunitarias a la hora de defender estándares equitativos.

Disposición

La gestión de residuos y subproductos a lo largo de la cadena acuícola constituye un eslabón crítico para la sostenibilidad ambiental y económica, pero conlleva costes elevados y retos

fabricar tablas y perfiles plásticos, informando a las autoridades de que es viable establecer una red de puntos de acopio y reciclaje específicos para el sector.

Por otro lado, la investigación del CSIC también ha evaluado el impacto de normativas recientes sobre el plástico de un solo uso en la acuicultura. Un estudio de modelización regulatoria analizó escenarios de aumento de costes derivados de la sustitución de envases y recomendó incentivos fiscales temporales para facilitar la transición a materiales biodegradables en pymes acuícolas, una recomendación que puede ser considerada por los legisladores.

Logística y transporte

El transporte de los productos acuícolas desde los centros de producción hasta los mercados finales constituye el último tramo crítico de la cadena de valor, con desafíos de eficiencia, costes y huella ambiental. Los cuellos de botella logísticos, la congestión en corredores clave y la dependencia de combustibles fósiles encarecen y dificultan la competitividad, en especial para operadores pequeños alejados de los grandes centros de consumo. Para mejorar esta situación, las soluciones incluyen optimizar las rutas y la consolidación de cargas mediante herramientas digitales, adoptar vehículos y sistemas de frío más ecológicos (por ejemplo, camiones eléctricos o con refrigeración por absorción) y desarrollar centros logísticos especializados en productos pesqueros y acuícolas.

Si bien la logística resulta un campo principalmente empresarial, el CSIC ha contribuido con análisis e innovaciones que respaldan decisiones. Por ejemplo, se han utilizado técnicas de georreferenciación para mapear la distribución de las granjas acuícolas en España y los principales flujos de transporte hacia los mercados mayoristas, identificando oportunidades de consolidación. Se detectó que en ciertas regiones (por ejemplo, Murcia y Almería) múltiples productores pequeños enviaban camiones semivacíos a los mismos mercados centrales de Madrid o Barcelona. A partir de este hallazgo, se recomendó la creación de cooperativas logísticas o plataformas de carga compartida en origen, con estimaciones de ahorro de hasta un 15 % en costes de transporte y

reducción de emisiones asociadas. Esta evidencia puede incentivar políticas de apoyo a la agrupación de oferta para mejorar la logística (por ejemplo, subvencionar *hubs* frigoríficos regionales).

Además, el CSIC participa en un proyecto de economía azul que estudia la viabilidad de rutas marítimas de corta distancia para distribuir pescado canario (incluyendo el cultivo de seriola y medregal) a la España peninsular, como alternativa parcialmente descarbonizada al transporte aéreo. Los resultados iniciales indican que emplear buques con contenedores refrigerados y mejorar la coordinación con la acuicultura local para un embarque inmediato tras la cosecha permitirían abastecer a la península con producto canario en un tiempo estimado de entre 48 y 60 horas, manteniendo la calidad, a un coste menor y con una menor huella de carbono que el avión. Este tipo de estudios, respaldados por el CSIC, ofrece a las autoridades portuarias y al sector naviero opciones concretas para integrar la acuicultura en las autopistas del mar. También cabe mencionar que los desarrollos en envases activos y sensores mencionados contribuyen a la logística al permitir verificar el mantenimiento de la cadena de frío durante el transporte internacional, algo que el CSIC probó con éxito en envíos exportados de lubina a Italia.

Finalmente, el análisis de las políticas del CSIC sugiere que la digitalización puede mejorar mucho la logística. Un informe conjunto del CSIC y la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) de 2021 evaluó sistemas de trazabilidad basados en *blockchain* combinados con internet de las cosas (*Internet of Things*, IoT) en camiones frigoríficos para monitorizar en tiempo real la localización y la temperatura de cada lote. Los resultados mostraron que su implantación reduciría las pérdidas por incidencias en un 5 % y facilitaría el cumplimiento de los requisitos aduaneros de exportación. Estos datos se están considerando en el diseño de programas piloto de logística 4.0 promovidos por el Ministerio de Industria y Turismo.

2.4.

Influencia en las preferencias y comportamientos sobre el consumo

La etapa de consumo de los productos acuáticos cierra el círculo de la sostenibilidad, ya que las preferencias y los comportamientos de los consumidores influyen en toda la cadena de suministro previa. En los últimos años se han observado cambios en España, como una ligera caída del consumo doméstico de pescado, motivada en parte por factores económicos y por percepciones de ciertos riesgos (por ejemplo, la presencia de mercurio o microplásticos), al mismo tiempo que crece la demanda de productos listos para consumir y con garantías de bienestar animal y sostenibilidad. Abordar estos desafíos requiere acciones basadas en evidencia para fortalecer la confianza del consumidor en la acuicultura y adaptar la oferta a sus necesidades nutricionales y de conveniencia.

El CSIC ha contribuido de manera significativa a ampliar el conocimiento sobre los beneficios de los alimentos acuáticos y a desmentir mitos que podrían frenar su consumo. Por ejemplo, los estudios nutricionales han confirmado que los peces de crianza en sistemas bien gestionados mantienen perfiles de ácidos grasos omega-3 comparables a los de sus equivalentes silvestres, en especial cuando se emplean piensos optimizados con aceites vegetales enriquecidos en omega-3. Estos resultados, publicados en revistas de alimentación, sirven para tranquilizar al público sobre el valor nutricional del pescado de acuicultura. Asimismo, las investigaciones toxicológicas del CSIC han mostrado que, gracias a la legislación europea estricta, los niveles de contaminantes como el metilmercurio resultan sistemáticamente más bajos en peces cultivados (por ejemplo, doradas y lubinas) que en grandes peces silvestres, debido a que provienen de aguas y piensos controlados. Este tipo de evidencia desmonta ideas erróneas y apoya campañas sanitarias que recomiendan el consumo de productos acuícolas seguros. Con el objetivo de difundir este conocimiento, el CSIC ha elaborado materiales divulgativos.

Por otro lado, la respuesta a las preocupaciones de ciertos consumidores sobre el bienestar animal también se sustenta en la evidencia aportada por el CSIC. Las mejoras en el bienestar, como el aturdimiento previo al sacrificio del atún rojo, ya se aplican de

El diagrama ilustra el proceso de transición hacia los Sistemas Acuícolas Sostenibles (SAS) a través de cuatro etapas principales:

- 1. FACTORES PROMOTORES:** Incluye Geopolítico, Demografía y Medioambiente.
- 2. PRESIONES ADVERSAS:** Incluye Cambio climático, Contaminación e Intensificación productiva.
- 3. CIENCIA PARA LAS POLÍTICAS PÚBLICAS:** Incluye Administraciones, Empresas y asociaciones, Ciencia y tecnología, y Política y regulación.
- 4. IMPACTO:** Incluye Salud y bienestar animal, Eficiencia productiva, Calidad ambiental y alimentaria, y Efecto socioeconómico y cultural.

Las **ACTIVIDADES DE SISTEMAS ACUÍCOLAS** se sitúan en el centro, conectando las etapas 1 y 2 con la etapa 4. El resultado final es el logro de los **SISTEMAS ACUÍCOLAS SOSTENIBLES (SAS)**.

86 |  **CSIC**



Por último, la dimensión educativa es fundamental para influir en los patrones de consumo. Conscientes de ello, varios centros del CSIC participan activamente en el Observatorio Español de Acuicultura (OESA), promovido por el MAPA, aportando información rigurosa que alimenta campañas como «Descubre la acuicultura», dirigidas al público general. En dichas campañas se han incorporado infografías y datos proporcionados por el CSIC que explican, por ejemplo, cómo la acuicultura contribuye a aliviar la presión sobre las pesquerías salvajes o cómo se garantiza la calidad del agua en las granjas modernas, mensajes cruciales para ganar la confianza del consumidor informado.

2.5.

Marco organizativo y de infraestructuras para la investigación acuícola del CSIC

En cuanto a las estructuras organizativas de colaboración en investigación acuícola del CSIC destacan, por un lado, las **Plataformas Temáticas Interdisciplinares (PTI)** y, por otro, las **Conexiones CSIC**. Asimismo, entre las **infraestructuras europeas de investigación** en este ámbito cabe mencionar, entre otras, a GenoPHenix-RI.

Estructuras organizativas de colaboración en investigación acuícola del CSIC

Las **PTI** constituyen un instrumento finalista de investigación e innovación, creado por el CSIC, para abordar retos multidisciplinares de alto impacto científico, económico y social. Integradas por grupos de investigación de la institución, también están abiertas a la participación de empresas, otras instituciones y agentes sociales. Desde su creación en 2018, esta iniciativa se ha consolidado en varias Plataformas y se han definido nuevas PTI extendidas (PTI+) que fomentan desarrollos con perspectivas de comercialización. Los ámbitos de actuación de estas estructuras resultan amplios y, por tanto, son varias PTI las que abordan alguna de las problemáticas importantes asociadas a la acuicultura, cada una desde su particular área de actuación.

La **PTI SosEcoCir**, diseñada con el objetivo de favorecer el desarrollo sostenible a través de modelos productivos circulares y responsables, es la única que incluye explícitamente la acuicultura entre sus áreas temáticas principales, en concreto, la «Agricultura y Acuicultura sostenibles», actuando sobre las interacciones entre la acuicultura-medioambiente y la ecotoxicología acuática.

Por su parte, la **PTI Oceans+** está dirigida al conocimiento científico sobre el estado ambiental del medio marino en regiones oceánicas nacionales y su respuesta al cambio climático, para fundamentar la toma de decisiones sobre su gestión. Comprende así una amplia estructura de disciplinas como la biogeoquímica marina, la oceanografía biológica, física, química y operacional, la interacción atmósfera-océano, la contaminación marina, el cambio climático, las tecnologías marinas avanzadas y la economía ambiental, cuyos avances pueden resultar de gran utilidad para la acuicultura *offshore*.

- La **Conexión Biología Computacional y Bioinformática (BCB)** tiene por objeto el procesamiento, análisis, modelado e interpretación de datos biológicos. En el área acuícola, estas investigaciones abarcan la integración de datos ómicos, bioquímicos, fisiológicos, comportamentales, poblacionales y ambientales para, por ejemplo, el fenotipado de amplio espectro para la mejora de las actividades operativas o de los programas de selección genética.
- La **Conexión Microbioma** se enriquece de las disciplinas de las Conexiones mencionadas, junto con la microbiología, para unificar y potenciar el conocimiento y los recursos sobre los microbiomas (los microorganismos que habitan en los macroorganismos y en el medioambiente) con el objetivo de contribuir, en el caso de la acuicultura, a la mejora de la salud animal y ambiental, así como de la producción agroalimentaria.
- La **Conexión Resistencia Antimicrobianos (AMR)** va un paso más allá en este contexto: tiene como misión principal reunir el conocimiento existente en torno a soluciones innovadoras con el fin de combatir la resistencia a los antibióticos y garantizar su eficacia futura, lo que en acuicultura, esto comprende la evaluación del uso de antibióticos, la transferencia de resistencias y la búsqueda de alternativas sostenibles.

Infraestructuras europeas de investigación acuícola con participación del CSIC

Los **proyectos europeos de infraestructuras de investigación**, ya que combinan la integración de redes de instalaciones con programas de acceso transnacional (Transnational Access, TNA) para optimizar su uso a escala europea. En el marco de Horizonte 2020 (H2020), este tipo de actividades se financiaban a través de las acciones **Infrastructure for Integrating and Opening Research Infrastructures (INFRAIA)**, mientras que en Horizonte Europa (HE) se articulan principalmente mediante las acciones **Provision of Research Infrastructure Services (INFRA-SERV)**. Su objetivo general consiste en desarrollar un tejido de infraestructuras científicas de alta calidad en Europa y asegurar su uso óptimo por parte de la comunidad investigadora.

Para impulsar una acuicultura sostenible basada en ciencia e innovación, la UE ha financiado proyectos desde el Séptimo Programa Marco (FP7) como **AQUAEXCEL** (FP7, 2011-2015), **AQUAEXCEL2020** (H2020, 2015-2020), **AQUAEXCEL3.0** (H2020, 2020-2025) y el más reciente **AQUASERV** (HE, 2024-2029), enfocados en potenciar la investigación y el desarrollo tecnológico en este ámbito. Estos proyectos han coordinado y coordinan decenas de instalaciones de investigación en acuicultura (como centros experimentales y laboratorios especializados) en múltiples países de Europa, estableciendo procedimientos comunes y redes de colaboración. Gracias a ellos, cientos de científicos han podido realizar estudios punteros aprovechando instalaciones únicas a las que de otro modo no tendrían acceso y han logrado avances muy relevantes en aspectos como mejoras en la alimentación y el bienestar de los peces, nuevos métodos contra patologías y reducción del impacto ambiental de la acuicultura. Además, la estrecha interacción fomentada entre ciencia e industria ha acelerado la transferencia de resultados al sector productivo, traduciéndose en innovaciones aplicadas en las granjas acuícolas.

España, a través del CSIC, ha desempeñado un papel destacado en esta serie de proyectos. Sus centros de referencia, como el Instituto de Acuicultura Torre de la Sal (IATS) y el Instituto de Investigaciones Marinas (IIM) son socios clave, al aportar instalaciones de primer nivel (como tanques experimentales o laboratorios especializados) y experiencia en nutrición, reproducción, patología, comportamiento o genética de especies acuáticas. Los equipos del CSIC no solo abrieron sus puertas a investigadores de toda Europa, sino que también lideraron desarrollos tecnológicos innovadores y coordinaron actividades de formación y divulgación.

Mientras que estos proyectos son mecanismos de financiación temporales bajo los programas marco de la UE, diseñados para financiar actividades concretas dentro de infraestructuras asociadas bajo un paraguas temático, también existen **infraestructuras de investigación paneuropeas** que operan para lograr los objetivos marcados por la política común de investigación e innovación dentro del Espacio Europeo de Investigación (EEI) —en inglés, European Research Area (ERA)—. Así, la UE y sus Estados miembros han establecido marcos específicos para coordinar esfuerzos y recursos, dando lugar a instrumentos

clave como el **Foro Estratégico Europeo sobre Infraestructuras de Investigación (ESFRI)** y el **Consortio de Infraestructuras de Investigación Europeas (ERIC)**, que representan dos funciones secuenciales distintas dentro del ciclo de vida de una infraestructura científica compartida. El primero se centra en la planificación estratégica y la identificación de necesidades, mientras que el segundo proporciona el marco legal necesario para su implementación y operación real, por lo que a menudo las ESFRI buscan y eventualmente obtienen el estatus legal de ERIC para abordar una temática concreta.

Ninguna de las ESFRI y ERIC existentes aborda directamente la investigación en acuicultura, aunque algunas sí lo hacen de forma indirecta o en aspectos tangenciales, y todas cuentan con la participación del CSIC. Estas incluyen la Infraestructura Europea de Investigación Consorciada para el programa internacional Argo (**Euro-Argo ERIC**, 2014), que obtiene información oceánica mediante boyas sumergibles y se complementa con el Observatorio Europeo Multidisciplinar de los Fondos Marinos y de la Columna de Agua (**EMSO ERIC**, establecido en 2016), que emplea una red de estaciones submarinas para recopilar datos continuos sobre variables fisicoquímicas oceánicas esenciales. De manera complementaria, la Infraestructura Europea Integrada de Investigación Socio-Ecológica de Ecosistemas y Zona Crítica Terrestre (**eLTER RI**, ESFRI, 2018) integra el estudio de ecosistemas terrestres, de agua dulce y de zonas de transición, analizando los efectos del cambio climático y otros factores globales. En conjunto, estos datos pueden resultar muy valiosos para la industria acuícola, por ejemplo, en la planificación del espacio acuático, la selección óptima de emplazamientos para granjas acuícolas, la mitigación de riesgos asociados a eventos extremos y la validación de nuevas tecnologías y sensores en condiciones reales. Por su parte, la Infraestructura Virtual Europea de Ciencia y Tecnología para la Investigación sobre la Biodiversidad y los Ecosistemas (**LifeWatch ERIC**, 2017) ofrece acceso a servicios y datos sobre biodiversidad y ecosistemas para investigación y modelización ecológica. Esto facilita el análisis de la biodiversidad acuática y de los vectores de enfermedades, proporcionando herramientas que apoyan la investigación en pesca y acuicultura, la conservación de los recursos genéticos y la optimización de los sistemas de producción.

tres



Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

|||||

La acuicultura se consolida como un componente esencial de la seguridad alimentaria y nutricional global. Aporta proteína de alta calidad con una huella ambiental, hídrica y territorial generalmente inferior a la de la ganadería terrestre. Sin embargo, su desarrollo sostenible exige abordar las limitaciones relacionadas con los insumos, la energía, la bioseguridad y la gobernanza. Integrar los principios de «Una sola salud» permitirá equilibrar la productividad, la salud animal y el bienestar ambiental en un marco de sostenibilidad y resiliencia frente al cambio climático.

|||||

La acuicultura española enfrenta riesgos derivados de su escasa diversificación y del estancamiento observado desde el año 2018. Incrementar la variedad de especies y sistemas productivos, junto con el impulso a la investigación aplicada, reforzará su resiliencia ante *shocks* de mercado y ambientales. Las infraestructuras científicas y tecnológicas del CSIC constituyen un soporte esencial para este proceso.

|||||

La ordenación espacial y los procedimientos administrativos fragmentados limitan el crecimiento del sector. La integración de la acuicultura en la planificación espacial marina y la simplificación de las licencias resultan esenciales. La coexistencia con otras actividades costeras, como las energías renovables marinas o la conservación, puede generar sinergias si se aplican criterios de zonificación científicos y se promueve la acuicultura multitrófica integrada.

|||||

La dependencia de la harina y el aceite de pescado, la energía y la importación de alevines condicionan la sostenibilidad económica y ambiental del sector. La transición hacia piensos alternativos, el uso de subproductos y de proteínas más sostenibles, y la mejora de la eficiencia de conversión alimentaria son pasos clave.

|||||

Los riesgos sanitarios y las pérdidas por patógenos o FAN siguen siendo elevados. La prevención mediante bioseguridad integral, vacunación, probióticos y herramientas genómicas se ha mostrado más eficaz que la respuesta reactiva.

|||||

El cambio climático multiplica los episodios de mortalidad, los cierres sanitarios y las pérdidas de productividad. Los sistemas de alerta temprana, la selección de cepas tolerantes, la diversificación de especies y el rediseño de calendarios y densidades de cultivo constituyen herramientas prioritarias para la adaptación.

|||||

La sostenibilidad ambiental exige un enfoque circular en el sector: control de efluentes, valorización de residuos, biorremediación con algas y bivalvos y aprovechamiento energético de subproductos.

|||||

La cadena de frío, el procesado y la logística siguen siendo puntos críticos en términos de costes y huella de carbono. Las mejoras en la eficiencia energética, los refrigerantes de bajo potencial de calentamiento, los envases biodegradables y la distribución cooperativa pueden reducir las pérdidas en la posproducción y mejorar la competitividad.

|||||

La aceptación social de la acuicultura depende de la transparencia, la trazabilidad y la percepción de sostenibilidad. Para ello, la integración entre ciencia, política y empresa debe consolidarse como eje estructural.

Recomendaciones

Para la gestión política:

|||||

Basar la ordenación espacial de la acuicultura en criterios científicos y en datos integrados que consideren simultáneamente la competencia con otros usos del mar, la presencia de áreas protegidas y la dinámica ambiental del litoral. Resulta necesario desarrollar mapas de aptitud que incorporen información sobre calidad química y microbiológica del agua, temperatura, corrientes, oleaje, descargas continentales y frecuencia de eventos extremos, integrados en sistemas de información geográfica interoperables.

|||||

Esta planificación debe coordinarse entre Administraciones nacionales, autonómicas y locales y alinearse con la Directiva de Ordenación del Espacio Marítimo de la UE. Su aplicación permitiría designar zonas prioritarias, minimizar los conflictos con la pesca, el turismo o las energías renovables y favorecer el uso múltiple del espacio marino. Una planificación espacial transparente y basada en evidencia fortalecerá la sostenibilidad ecológica, la eficiencia económica y la aceptación social de la acuicultura.

|||||

Implantar un marco de criterios unificados y transparentes para los trámites de concesión y renovación de licencias, con plazos máximos garantizados y procedimientos digitalizados. Ha de complementarse con evaluaciones ambientales basadas en la capacidad de carga y con mapas de aptitud elaborados a partir de datos oceanográficos y biológicos. Esta simplificación mejoraría la seguridad jurídica y reduciría los costes administrativos, lo que facilitaría la inversión y la modernización de las explotaciones.

|||||

Crear un sistema estatal de información acuícola, interoperable y de acceso abierto, que permitiría integrar datos sobre producción, calidad del agua, sanidad, bienestar animal y condiciones oceanográficas. Con el apoyo del CSIC y en colaboración con otros organismos, como Puertos del Estado y la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), este sistema podría ofrecer alertas tempranas ante eventos marinos extremos, brotes infecciosos, floraciones algales o anoxia, facilitando la toma de decisiones basadas en evidencia y mejorando la coordinación entre las Administraciones.

Establecer un programa nacional de adaptación al cambio climático en acuicultura, con medidas de prevención frente a las olas de calor marinas, protocolos de manejo adaptados, incentivos a la eficiencia energética y líneas de I+D para el desarrollo de cepas tolerantes al estrés térmico y salino. El desarrollo de modelos predictivos de riesgo y la implementación de sistemas de observación en tiempo real son fundamentales para minimizar los daños y garantizar la continuidad productiva. Integrar la observación oceanográfica, la predicción y la gestión adaptativa en las políticas acuícolas permitirá mitigar los daños y asegurar la continuidad de la producción. Este programa también debería incluir instrumentos financieros para asegurar a las pequeñas y medianas explotaciones frente a las pérdidas asociadas a eventos extremos.

Reducir la dependencia de la harina y el aceite de pescado mediante políticas de estímulo a la investigación, la validación y la comercialización de piensos alternativos basados en algas, insectos o proteínas microbianas. Los incentivos fiscales o las compras públicas innovadoras pueden acelerar su adopción. Además, un sello de certificación de «pienso circular» auditado facilitaría la comunicación transparente con el consumidor y fortalecería la reputación del producto nacional.

Impulsar un plan integral de bioseguridad y de uso responsable de antimicrobianos. La autorización ágil de vacunas y probióticos, la vigilancia genómica de patógenos y la creación de un sistema de notificación nacional contribuirían tanto a reducir los brotes como a reforzar la seguridad alimentaria. El fortalecimiento de los laboratorios de referencia y la formación técnica del personal son piezas fundamentales de este esfuerzo.

Fomentar una práctica acuícola circular mediante límites de carga e incentivos económicos vinculados a la reducción de emisiones y al reciclaje de nutrientes. Resulta recomendable promover la acuicultura multitrófica integrada y la localización conjunta con energías renovables marinas. Los mecanismos de apoyo financiero y las subastas que valoren los servicios ecosistémicos (como la captura de carbono o la biofiltración) facilitarían su implementación. Estas sinergias pueden convertir la acuicultura en una aliada activa de la transición ecológica.

Modernizar la cadena de frío y procesado, con incentivos a la eficiencia energética y a la innovación en envases sostenibles, reduciría significativamente la huella de carbono del sector. Los programas de apoyo a cooperativas logísticas y los centros de frío compartidos mejorarían la rentabilidad y reducirían la pérdida de producto. Estas inversiones generarían beneficios ambientales y económicos a largo plazo.

|||||

Desarrollar una estrategia nacional de diversificación de especies y de sistemas de cultivo permitiría reducir la vulnerabilidad del sector frente a las fluctuaciones ambientales y de mercado. Las ayudas a proyectos piloto de nuevas especies, la mejora genética y el cierre de ciclos biológicos resultan elementos esenciales a la hora de ampliar la base productiva y fortalecer la soberanía alimentaria acuática.

|||||

Reforzar la trazabilidad y el etiquetado transparente mediante información verificable sobre el origen, el bienestar, el uso de antibióticos y la huella ambiental, lo que aumentaría la confianza del consumidor. La incorporación de tecnologías digitales, como la *blockchain* o los códigos QR verificables, fortalecería la reputación del producto nacional y alinearía la acuicultura española con los estándares internacionales más exigentes.

Para las empresas:

|||||

Integrar prácticas de economía circular y de acuicultura multitrófica para transformar los residuos en recursos y mejorar la rentabilidad ambiental y económica. Incorporar macroalgas o bivalvos en sistemas de policultivo reduce los efluentes y puede generar coproductos de alto valor, como biopolímeros o ingredientes nutracéuticos, lo que fortalece la sostenibilidad y la imagen del producto. Integrar criterios de sostenibilidad en los envases (biopolímeros, materiales reciclables, etc.) y aprovechar subproductos como fuentes de colágeno, aceites o harinas para la alimentación funcional también contribuye a la economía circular del sector. La innovación tecnológica y la colaboración intersectorial resultan palancas determinantes.

|||||

Transitar hacia piensos sostenibles y una gestión eficiente de los insumos, una medida clave para la sostenibilidad: la reformulación de dietas con proteínas alternativas y aceites enriquecidos, junto con la digitalización del seguimiento alimentario, mejora el factor de conversión y reduce los costes. Por su parte, la colaboración con centros de investigación impulsa la innovación y la competitividad.

Llevar a cabo la diferenciación de producto mediante certificaciones de sostenibilidad, bienestar animal y trazabilidad digital, pues refuerza la confianza del consumidor y abre nuevas oportunidades de mercado. La comunicación transparente acerca la acuicultura sostenible a los hábitos alimentarios modernos.

Aplicar tecnologías de procesamiento suave, conservación en frío eficiente, envasado activo (que prolonga su vida útil o mantiene su calidad) y envasado inteligente (que monitoriza, registra o comunica el estado del alimento y las condiciones de su entorno) permite mantener la calidad nutricional y prolongar la vida útil sin recurrir a aditivos artificiales. Esta estrategia refuerza la competitividad, estimula la innovación y responde a la creciente demanda de alimentos saludables, accesibles y sostenibles.

Para la sociedad:

|||||

Participar en los procesos de planificación del litoral y en el diálogo sobre los usos del espacio marino permite construir confianza y reducir conflictos. Fomentar la educación ambiental y la divulgación basada en evidencia fortalece la aceptación social de la acuicultura y su papel en la transición ecológica. La educación y la divulgación basadas en evidencia deben acompañar el crecimiento del sector.

|||||

Contribuir a la observación del medio marino mediante ciencia ciudadana y redes de seguimiento puede mejorar la detección temprana de anomalías, floraciones o varamientos. Involucrar a las comunidades costeras en redes de seguimiento ambiental refuerza la conciencia sobre los impactos del cambio climático y los antropogénicos, así como sobre el valor de la acuicultura sostenible.

|||||

Ejercer un consumo informado y responsable es determinante para impulsar un cambio real hacia sistemas alimentarios sostenibles. Al respecto, la sociedad puede desempeñar un papel activo al elegir productos acuícolas certificados por sostenibilidad, bienestar animal y origen transparente. Favorecer el consumo de especies locales y de temporada reduce la huella de transporte y estimula las economías costeras sostenibles.

|||||

Reducir el desperdicio alimentario, tanto en el hogar como en la restauración, disminuye las presiones sobre la producción y los ecosistemas marinos. Al mismo tiempo, comprender el valor nutricional del pescado de cultivo ayuda a desterrar percepciones erróneas y a reconocer su contribución a la salud humana y a la seguridad alimentaria. La educación alimentaria, la información clara en el etiquetado y la confianza en la ciencia resultan claves a la hora de consolidar una cultura de consumo consciente que refuerce la resiliencia ambiental y social del sistema acuícola. Una sociedad informada y comprometida es esencial para que la acuicultura forme parte de la transición ecológica y alimentaria de España.

cuatro



Listado de centros



CENTRO	PÁGINA WEB	CORREO ELECTRÓNICO
Instituto de Acuicultura Torre de la Sal (IATS, CSIC)	http://www.iats.csic.es/	direccion.iats@csic.es
Instituto de Agroquímica y Tecnología de Alimentos (IATA, CSIC)	http://www.iata.csic.es/	direccion.iata@csic.es
Instituto de Ciencias del Mar (ICM, CSIC)	http://www.icm.csic.es/	direccion.icm@csic.es
Instituto de Ciencias Marinas de Andalucía (ICMAN, CSIC)	http://www.icman.csic.es/	direccion.icman@csic.es
Instituto Español de Oceanografía (IEO, CSIC)	http://www.ieo.es/	director@ieo.csic.es
Instituto de Investigaciones Marinas (IIM, CSIC)	http://www.iim.csic.es/	direccion.iim@csic.es
Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA, CSIC)	https://www.inia.es/	direccion.inia@csic.es

cinco



Para saber más



Asociación Empresarial de Acuicultura de España (APROMAR). 2024.
La Acuicultura en España 2024.



Consejo Económico y Social (CES). 2023. Informe 03/2023 sobre La pesca,
la acuicultura y la industria transformadora en España. Retos para su
sostenibilidad. Madrid.



EUMOFA. 2023. El mercado pesquero de la UE – Edición 2023. Luxemburgo.



FAO. 2024. *El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2024.*
La transformación azul en acción. Roma.



FAO. 2024. World Food and Agriculture – Statistical Yearbook 2024. Rome.



World Bank Group. 2025. Harnessing the Waters: A Trillion Dollar Investment
Opportunity in Sustainable Aquaculture - Volume I and II. Washington, D.C.

Este informe hace referencia a algunos aspectos que se analizan con mayor detalle en los siguientes informes S4P ya publicados:



La resistencia de las bacterias a los antibióticos



Nutrición sostenible y saludable



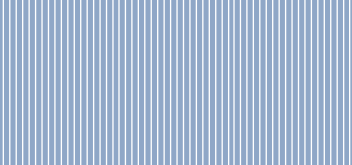
Producir alimentos sin agotar el planeta



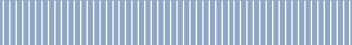
Recursos marinos vivos - Transformando la gestión para un océano resiliente



Riesgos y amenazas de los eventos marinos extremos



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