

Informe Técnico

Revisión sistemática de impactos ambientales de la salmonicultura

Elaborado por:

Romanet Seguel-Rojas Manquez

Biólogo Marino, mención Oceanografía y Calidad Ambiental.

Magister en Ciencias, mención Oceanografía.

Fecha: 03 septiembre de 2025

Institución: Agrupación Aisén Reserva de Vida

INDICE

INDICE.....	1
Resumen ejecutivo.....	2
1. Introducción.....	3
2. Metodología.....	3
3. Resultados.....	4
3.1 Generalidades.....	4
3.2 Distribución de estudios según tipo de impacto y ecosistema.....	5
3.3 Síntesis cuantitativa de impactos ambientales.....	5
3.4 Análisis espacial y temporal de impactos.....	8
3.5 Limitaciones de los estudios analizados.....	9
4. Discusión.....	9
5. Conclusiones y recomendaciones.....	10
6. Referencias bibliográficas.....	11
7. Anexos.....	14
Anexo 1. Matriz de estudios revisados.....	14
Anexo 2. Literatura gris consultada.....	14
Anexo 3. Tabla de palabras clave utilizadas.....	14

Resumen ejecutivo

Este informe presenta una revisión sistemática sobre los impactos ambientales de la salmonicultura intensiva en ecosistemas marinos y acuáticos asociados, basada en el análisis de 38 estudios científicos relevantes a nivel nacional e internacional.

Los resultados muestran que la salmonicultura intensiva genera impactos significativos sobre los ecosistemas, incluyendo la acumulación de materia orgánica en sedimentos, alteraciones en los ciclos de nutrientes, cambios en la composición y diversidad de comunidades bentónicas y microbianas, y contaminación química derivada del uso de antibióticos, antiparasitarios y otros compuestos asociados a la actividad. Los efectos son más intensos en zonas cercanas a los centros de cultivo y disminuyen con la distancia, mostrando también variaciones temporales que destacan la necesidad de estudios a largo plazo para evaluar tendencias estacionales y acumulativas.

Se identificaron impactos socioambientales, como cambios en la estructura de comunidades de aves acuáticas y problemas asociados a residuos plásticos y contaminantes emergentes. La comparación con pesquerías silvestres indica que la salmonicultura intensiva presenta una huella ambiental considerablemente mayor, reforzando la recomendación de no implementar esta actividad en áreas protegidas o ecosistemas sensibles.

Entre las alternativas para mitigar estos impactos, la Acuicultura Multitrófica Integrada (IMTA) se perfila como una estrategia prometedora, aunque su implementación comercial enfrenta barreras tecnológicas, regulatorias y económicas. La innovación en alimentación del salmón, el desarrollo de cepas resistentes a parásitos y la mejora de sistemas de licenciamiento ambiental son medidas complementarias para avanzar hacia una producción más sostenible.

Finalmente, se destaca que el presente informe se elaboró en un tiempo acotado, por lo que es posible que existan publicaciones científicas relevantes que no fueron incluidas, ya sea porque no fueron identificadas con las palabras clave seleccionadas o porque no aparecieron en las búsquedas realizadas. Esto implica que el análisis refleja la evidencia accesible durante el período definido, sin abarcar la totalidad de la literatura disponible.

Este conocimiento constituye una base para orientar políticas públicas, prácticas industriales y estrategias de manejo ambiental, permitiendo compatibilizar la producción acuícola con la conservación y salud de los ecosistemas, garantizando una salmonicultura más responsable y sostenible en el futuro.

1.Introducción

La salmonicultura intensiva se ha consolidado como una de las principales industrias de la acuicultura global, con gran presencia en países como Noruega, Canadá, Escocia, Nueva Zelanda y Chile. Su rápido crecimiento ha estado acompañado de preocupaciones crecientes respecto a los impactos ambientales en ecosistemas costeros, lacustres y de fiordos, ambientes de alta sensibilidad ecológica y relevancia cultural.

En Chile, segundo productor mundial de salmón, los centros de cultivo se emplazan mayoritariamente en fiordos y canales de las regiones de Los Lagos, Aysén y Magallanes, ambientes caracterizados por su fragilidad ecológica. Estudios recientes en estos y otros territorios han documentado efectos negativos en múltiples dimensiones:

Contaminación química: la acumulación de antibióticos, antiparasitarios y pesticidas ha sido demostrada en sedimentos, organismos y aguas (Higuera-Llanten et al., 2018; Jara et al., 2022; Tucca et al., 2017; Abihssira-García et al., 2022; Millanao et al., 2018; González et al., 2023). Dichos contaminantes generan riesgos de resistencia bacteriana, alteraciones microbianas y bioacumulación en especies no objetivo.

Impactos ecológicos: cambios en la biodiversidad bentónica y epibentónica, así como transformaciones en la estructura de comunidades microbianas y de aves acuáticas (Jiménez et al., 2013; Häussermann et al., 2013; Ortiz & Hamamé, 2023; Baldrich et al., 2024). Estudios metabarcódicos han evidenciado modificaciones en comunidades bacterianas y foraminíferas directamente asociadas al enriquecimiento orgánico bajo las jaulas de cultivo (Pochon et al., 2015; Stoeck et al., 2018; Aranda et al., 2010).

Efectos físicos: la acumulación de residuos plásticos y sólidos provenientes de la industria contribuye a la degradación paisajística y ecológica de fiordos y canales (Hinojosa & Thiel, 2009; Vera & Vergara, 2016).

Interacciones con especies silvestres: reducción de la supervivencia de salmones y truchas silvestres en zonas de coexistencia con cultivos (Ford & Myers, 2008), incremento de aves generalistas alrededor de centros de engorda (Jiménez et al., 2013), y mortalidades de peces de cultivo asociadas a brotes de salpas en ecosistemas alterados (Giesecke et al., 2014).

Dimensiones socioeconómicas y regulatorias: la literatura también ha analizado la eficiencia técnica y el costo ambiental de la producción (Asche et al., 2009), las limitaciones de las certificaciones actuales (Rector et al., 2023), y el rol de los marcos regulatorios y licencias en la reducción de impactos (Osmundsen et al., 2022; Rosendal & Olesen, 2022).

Este informe realiza una revisión sistemática de la evidencia publicada que cumple criterios protocolizados de selección, con el objetivo de sintetizar los principales impactos ambientales reportados, identificar vacíos de conocimiento y aportar al debate sobre la pertinencia de instalar y expandir la salmonicultura hacia áreas de alta sensibilidad ecológica, incluyendo áreas protegidas.

2. Metodología

La revisión sistemática se diseñó bajo los principios del protocolo PRISMA, garantizando transparencia y reproducibilidad en el proceso de búsqueda, selección y análisis de la literatura. Se consultaron bases de datos académicas internacionales relevantes para el área, como **PubMed, Scopus y Google Scholar**, mediante una estrategia de búsqueda que combinó términos relacionados con el impacto ambiental y la salmonicultura. (anexo 3)

El periodo temporal abarcó desde 1990 hasta junio de 2025, cubriendo así tres décadas de investigación que reflejan la evolución y madurez del conocimiento sobre el tema. Se establecieron criterios estrictos de inclusión: únicamente se consideraron estudios primarios, publicados en revistas científicas revisadas por pares, que abordaran impactos ambientales directos de la salmonicultura en ecosistemas acuáticos.

Los criterios de exclusión incluyeron artículos sin acceso al texto completo, aquellos no revisados por pares, duplicados, y publicaciones que no aportaran información sobre impactos ambientales directos. La selección se realizó en etapas sucesivas: primero se eliminaron duplicados, luego se revisaron títulos y resúmenes para filtrar documentos relevantes, y finalmente se llevó a cabo la lectura completa de los textos seleccionados para confirmar su pertinencia.

En total, se analizaron 38 publicaciones científicas publicadas entre 2001 y 2025. De estas, 33 fueron obtenidas mediante la búsqueda sistemática realizada en este estudio, y 6 corresponden a una revisión previa inconclusa, que fueron incorporadas para no perder la información ya sistematizada. Todos los estudios fueron sometidos a los mismos criterios de inclusión y análisis.

Para la extracción de datos se utilizó una matriz en Excel editable, que permitió sistematizar la información sobre autoría, año, título, país, tipo de ecosistema, tipo de impacto, especie afectada, variables medidas, distancia al centro de cultivo y hallazgos principales. Esta matriz facilitó la organización y posterior análisis cuantitativo y cualitativo. (Se adjunta, Anexo 1)

Adicionalmente, se incorporó una revisión complementaria de literatura gris (tesis, informes técnicos) que, aunque no se incluyó en el análisis principal, se consideró para contextualizar hallazgos y sugerir áreas futuras de investigación. (Se adjunta, anexo 2)

3. Resultados

3.1 Generalidades

En total, se revisaron 38 publicaciones científicas relevantes. De ellas, 32 corresponden a la búsqueda sistemática realizada en este estudio y 6 corresponden a trabajos heredados de una revisión previa inconclusa (Jiménez et al., 2013; Pochon et al., 2015; Higuera-Llantén et al., 2018; McMullin et al., 2021; Abihssira-García et al., 2022, Ford & Myers (2008)).

Este análisis consideró un total de 38 estudios científicos publicados entre 2001 y 2025, los cuales abordan los impactos ambientales de la salmonicultura desde aproximaciones ecológicas, químicas, físicas, parasitarias y socioambientales. La mayoría de los estudios se realizaron en Chile (Baldrich et al., 2024, Häussermann et al., 2013), pero también se incluyen investigaciones de Noruega (Carroll et al., 2003), Canadá (Haya et al., 2001), Reino Unido (Hammer et al., 2022), Nueva Zelanda (McMullin et al., 2021; Pochon et al., 2015) e India (Ingle et al., 2022), evidenciando preocupación global sobre los efectos de esta industria.

Los ecosistemas evaluados abarcan ambientes marinos costeros, fiordos, estuarios, lagos oligotróficos, fondos blandos, zonas lacustres de alta montaña y áreas terrestres vinculadas a la producción de insumos acuícolas (soya, aceite de pescado) (Clawson et al., 2025). Los estudios destacan la influencia de las jaulas de cultivo sobre la composición de comunidades bentónicas y pelágicas, la acumulación de residuos, la presencia de contaminantes persistentes y alteraciones funcionales de los ecosistemas (Pochon et al., 2015; González et al., 2023; Abihssira-García et al., 2022). Más de la mitad utiliza enfoques interdisciplinarios, integrando ecología, oceanografía, biotecnología y ciencias sociales (Jiménez et al., 2013; Rosendal & Olesen, 2011), permitiendo caracterizaciones multifacéticas aunque con desafíos

para comparaciones debido a la heterogeneidad de escalas temporales, espaciales y taxonómicas (Tucca et al., 2017).

3.2 Distribución de estudios según tipo de impacto y ecosistema

Los impactos estudiados pueden agruparse en cinco categorías principales: químicos, ecológicos, físicos, parasitarios y socioambientales. En total, se consideraron 38 estudios (32 sistematizados y 6 heredados), distribuidos en estas cinco categorías principales. La mayoría de los trabajos reporta más de un tipo de impacto, lo que refleja la complejidad de los efectos de la salmonicultura intensiva.

La distribución por ecosistema muestra una clara concentración en fiordos y canales australes de Chile (Ortiz & Hamamé, 2023; Häussermann et al., 2013), en lagos oligotróficos de la Región de la Araucanía (León-Muñoz, 2013) y en ecosistemas marinos abiertos de Noruega, Canadá y Reino Unido (Burridge et al., 2010). También se incluyen estudios que examinan la interacción con ecosistemas terrestres vinculados a la producción de insumos agrícolas para alimento de salmones (Clawson et al., 2025) y enfoques socio-territoriales relacionados con conflictos por uso del espacio costero y su interacción con la pesca artesanal y el turismo (León-Muñoz et al., 2013).

3.3 Síntesis cuantitativa de impactos ambientales

Los estudios revisados muestran una amplia diversidad de impactos ambientales asociados a la salmonicultura, evaluados mediante variables químicas, físicas, biológicas y socioambientales, con un enfoque predominante en ecosistemas marinos bentónicos y fiordos. En total, se consideraron 38 estudios (32 sistematizados y 6 heredados), distribuidos en cinco categorías principales: impactos químicos (11 estudios, 29%), ecológicos (13 estudios, 34%), físicos (3 estudios, 8%), parasitarios (4 estudios, 11%) y socioambientales (7 estudios, 18%).

Impactos químicos:

Se documenta la presencia y acumulación de antibióticos, antiparasitarios, pesticidas y contaminantes persistentes (dioxinas, PCBs, ethoxyquin) en sedimentos, agua y organismos bioindicadores. Higuera-Llantén et al. (2018) evidencian selección de bacterias multirresistentes en salmones tratados con antibióticos, mientras que Abihssira-García et al. (2022) muestran adsorción diferencial de contaminantes en microplásticos cercanos a centros de cultivo. Otros trabajos (Burridge et al., 2010; Tucca et al., 2017; Jara et al., 2022; Haya et al., 2001; González et al., 2023; León-Muñoz et al., 2013; Hooft et al., 2025) reportan acumulación de residuos en sedimentos y riesgo para la fauna bentónica.

Impactos ecológicos:

Trece estudios documentan alteraciones en la composición, diversidad y funcionalidad de comunidades bentónicas, microbianas y avifaunísticas. Pochon et al. (2015) destacan la utilidad del metabarcoding para detectar enriquecimiento orgánico y pérdida de diversidad en foraminíferos; Stoeck et al. (2018) evidencian cambios en microbiomas sedimentarios; Ortiz & Hamamé (2023) muestran distribución diferencial de epifauna bentónica; y Baldrich et al. (2024) reportan heterogeneidad en macroinvertebrados asociados a kelp. Häussermann et al. (2013) documentan una pérdida significativa de biodiversidad megabentónica en el fiordo Comau durante una década, reflejando impactos acumulativos sobre comunidades longevas y sensibles.

Impactos físicos:

Se asocian principalmente a la acumulación de residuos marinos flotantes y a cambios sedimentarios locales. Hinojosa & Thiel (2009) reportan densidades de hasta 250 ítems/km² de residuos plásticos vinculados a la salmonicultura, mientras que Vera & Vergara (2016)

evidencian acumulación de sedimentos bajo jaulas. Hammer et al. (2022) incorporan las emisiones de gases de efecto invernadero en evaluaciones de ciclo de vida de la producción.

Impactos parasitarios:

Cuatro estudios evidencian la proliferación de *Caligus rogercresseyi* y sus efectos en la salud del salmón, incluyendo carga de piojos, expresión génica y respuesta inmune modulada por dietas con inmunoestimulantes (Núñez-Acuña et al., 2015; Cáceres et al., 2024; Valenzuela-Miranda et al., 2024; Rosendal & Olesen, 2022).

Impactos socioambientales:

Siete estudios abordan la interacción entre la salmonicultura, comunidades locales y sistemas regulatorios. Se incluyen percepciones sociales de conflicto y cambios en avifauna (Jiménez et al., 2013; León-Muñoz et al., 2007), así como evaluaciones de gobernanza, eficiencia económica y regulación (Asche et al., 2009; Osmundsen et al., 2022; Ingle et al., 2022; Olesen et al., 2011).

En síntesis, esta evidencia muestra la necesidad de protocolos de monitoreo integrados que incluyan variables químicas, ecológicas, físicas, parasitarias y socioambientales. Los impactos más intensos se concentran en ecosistemas bentónicos y fiordos cercanos a centros de cultivo, disminuyendo gradualmente con la distancia, aunque ciertos efectos —como acumulación de contaminantes o proliferación de parásitos— pueden persistir a lo largo del tiempo. La integración de estrategias de manejo ecosistémico y participación comunitaria se presenta como una vía clave para mitigar los impactos y promover prácticas más sostenibles.

Tipo de Impacto	Nº estudios	%	Principales variables medidas	Ejemplos de estudios
Químicos	11	29%	Antibióticos, antiparasitarios, contaminantes persistentes, eutrofización, adsorción en microplásticos, análisis de ciclo de vida (LCA)	Higuera-Llantén (2018); Jara (2022); Tucca (2017); Abihssira-García (2022); Burridge (2010); Haya (2001); León-Muñoz (2013); González (2023); Hooft (2025)
Ecológicos	13	34%	Diversidad alfa y beta, composición de comunidades, metabolismo microbiano, abundancia de macroinvertebrados, pérdida de biodiversidad megabentónica	Pochon (2015); Stoeck (2018); Ortiz & Hamamé (2023); Baldrich (2024); McMullin (2021); Ford & Myers (2008); Quiroga (2013); Giesecke (2014); Häussermann (2013)
Físicos	3	8%	Acumulación de residuos marinos, sedimentación, emisiones de gases de efecto invernadero (GEI)	Hinojosa & Thiel (2009); Vera & Vergara (2016); Hammer (2022)
Parasitarios	4	11%	Carga de <i>Caligus</i> , expresión génica, resistencia a tratamientos, disbiosis intestinal	Núñez-Acuña (2015); Cáceres (2024); Valenzuela-Miranda (2024); Rosendal & Olesen (2022)
Socioambientales	7	18%	Gobernanza, licenciamiento, conflictos sociales, percepción comunitaria, avifauna, eficiencia económica	Jiménez (2013); León-Muñoz (2007); Asche (2009); Osmundsen (2022); Ingle (2022); Olesen (2011)

Tabla resumen tipos de impactos.

3.4 Análisis espacial y temporal de impactos

El análisis espacial de los impactos ambientales derivados de la salmonicultura revela una clara relación de gradiente en función de la distancia desde los centros de cultivo. Diversos estudios destacan que la intensidad de los efectos disminuye conforme se aleja del centro de cultivo, evidenciando un patrón espacial consistente. Por ejemplo, McMullin et al. (2021) reportaron cambios significativos en comunidades bentónicas hasta 300 m de distancia, mientras que Stoeck et al. (2018) detectaron modificaciones en la diversidad bacteriana sedimentaria que decrecen en sitios más alejados bajo la influencia directa de las jaulas.

En cuanto a contaminantes químicos, Jara et al. (2022) demostraron que antibióticos como la flumequina se concentran en sedimentos cercanos a los centros, con una disminución progresiva a mayor distancia, lo que coincide con la detección de pesticidas antiparasitarios en sedimentos próximos a jaulas (Tucca et al., 2017).

Desde una perspectiva temporal, pocos estudios han realizado seguimientos prolongados, aunque la evidencia existente muestra que ciertos impactos, especialmente los relacionados con contaminantes químicos, pérdida de biodiversidad y acumulación de residuos, pueden persistir meses o incluso años tras la instalación o retiro de centros de cultivo. Häussermann et al. (2013) documentaron una disminución sostenida de especies megabentónicas en el fiordo Comau durante una década de observación.

También se han registrado procesos de recuperación ambiental, aunque lentos y dependientes de condiciones locales como la hidrodinámica y la capacidad de dispersión de contaminantes. Quiroga et al. (2013) encontraron que los fiordos con actividad salmonera podían alcanzar estados ecológicos aceptables, aunque con desequilibrios que requieren monitoreo constante.

Finalmente, la evaluación temporal de impactos biológicos, como la proliferación de parásitos o la alteración del microbioma, señala fluctuaciones estacionales y respuestas dependientes de la gestión sanitaria y alimentaria (Valenzuela-Miranda et al., 2024; Núñez-Acuña et al., 2015).

En resumen, la evidencia disponible destaca la importancia de considerar el espacio y el tiempo para comprender plenamente la extensión y duración de los impactos de la salmonicultura, lo que es fundamental para diseñar estrategias de monitoreo y mitigación efectivas.

3.5 Resultados en contexto socioambiental

La evidencia revisada indica que los impactos de la salmonicultura no solo se manifiestan en variables físicas, químicas y biológicas, sino que también tienen dimensiones sociales y culturales relevantes. Los principales hallazgos son:

- **Percepción de conflictos y afectación a comunidades locales:** En diversas localidades, la presencia de centros de cultivo ha generado tensiones relacionadas con el uso del borde costero, la competencia con la pesca artesanal y la preocupación por la salud ambiental. La percepción social de impacto es mayor en comunidades que dependen directamente de los recursos marinos (Jiménez et al., 2013; León-Muñoz et al., 2007).
- **Alteraciones en avifauna y fauna asociada:** La presencia de estructuras de cultivo y residuos orgánicos modifica la disponibilidad de hábitats para aves y otras especies, afectando la biodiversidad local y pudiendo repercutir en actividades de observación y turismo (Jiménez et al., 2013; Ortiz & Hamamé, 2023).
- **Interacciones con la pesca artesanal y recursos locales:** Los impactos sobre comunidades bentónicas y la proliferación de parásitos repercuten en la calidad de

recursos pesqueros cercanos, generando preocupación en pescadores locales y afectando la percepción de sostenibilidad de la actividad (Núñez-Acuña et al., 2015).

- **Gobernanza y regulación:** Varios estudios (Asche et al., 2009; Osmundsen et al., 2022; Ingle et al., 2022; Olesen et al., 2011) señalan la necesidad de fortalecer los marcos regulatorios y la fiscalización ambiental, dado que la acumulación de impactos supera en ocasiones la capacidad de gestión vigente.

Estos resultados subrayan la importancia de considerar la dimensión social y cultural al evaluar la sostenibilidad de la salmonicultura, así como la necesidad de estrategias de participación comunitaria y comunicación efectiva de riesgos y mitigaciones.

3.5 Limitaciones de los estudios analizados

La revisión de la literatura evidenció varias limitaciones que deben considerarse al interpretar los resultados:

- **Cobertura geográfica limitada:** Muchos estudios se concentran en zonas específicas de fiordos y estuarios, lo que dificulta generalizar los hallazgos a otros sectores con características ambientales distintas.
- **Temporalidad de los estudios:** Existen pocos trabajos con seguimientos de largo plazo; la mayoría analiza impactos en periodos cortos (meses), lo que limita la comprensión de efectos acumulativos y de recuperación del ecosistema.
- **Heterogeneidad metodológica:** Los estudios emplean distintas técnicas de muestreo, variables y criterios de análisis, dificultando comparaciones directas entre ellos.
- **Falta de integración interdisciplinaria:** Aunque algunos trabajos consideran aspectos químicos, biológicos y físicos, son pocos los que integran dimensiones sociales, económicas y culturales en un análisis holístico.
- **Datos sobre impactos acumulativos:** Se cuenta con información limitada sobre la interacción entre distintos impactos (químicos, parasitarios, ecológicos, socioambientales), lo que impide evaluar sinérgicamente los riesgos ecosistémicos.

Estas limitaciones sugieren la necesidad de implementar monitoreos integrales, de largo plazo y con enfoque ecosistémico, que incorporen variables ambientales, biológicas y socioeconómicas, con el fin de apoyar una gestión más informada y sostenible de la salmonicultura.

4. Discusión

Los resultados de este estudio corroboran y amplían la evidencia científica sobre los límites ecológicos asociados a la salmonicultura intensiva, evidenciando impactos significativos en los ciclos de nutrientes, la calidad del agua y la salud integral de los ecosistemas acuáticos.

Los 38 estudios analizados muestran que el uso prolongado de sistemas unitróficos genera acumulación de materia orgánica en sedimentos y alteraciones en los perfiles de nutrientes, afectando los procesos microbianos que regulan la disponibilidad y reciclaje de nutrientes, con repercusiones en la productividad y equilibrio ecológico local.

La integración de especies filtradoras, algas y organismos detritívoros mediante esquemas de Acuicultura Multitrófica Integrada (IMTA) se identifica como una estrategia prometedora para mitigar estos impactos, favoreciendo un uso más eficiente y equilibrado de los recursos. Sin embargo, su implementación enfrenta barreras tecnológicas, normativas y culturales que limitan su adopción a escala comercial y regional.

Los estudios comparativos revisados evidencian que la salmonicultura intensiva presenta una huella ambiental considerablemente mayor que otras actividades acuícolas o pesquerías reguladas, incluyendo impactos sobre biodiversidad, contaminación de sedimentos y agua, y externalidades químicas. Esta constatación subraya la urgencia de replantear los sistemas productivos acuícolas en áreas protegidas, donde los efectos negativos pueden ser irreversibles para ecosistemas sensibles.

En este contexto, resulta pertinente aplicar dos principios ampliamente reconocidos en la política ambiental: el principio de prevención, que obliga a evitar impactos cuando estos ya han sido identificados en la literatura científica, y el principio de precaución, que exige adoptar medidas de resguardo incluso en escenarios de incertidumbre científica para prevenir daños graves o irreversibles. Ambos principios refuerzan la incompatibilidad de la salmonicultura intensiva con los objetivos de conservación de las áreas protegidas, donde la fragilidad ecosistémica y la acumulación de impactos descrita en la literatura revisada exigen priorizar la protección ambiental por sobre la expansión productiva.

Adicionalmente, la consideración de variables como el índice de conversión alimenticia (FCR) y los efectos de toxicidad marina en los análisis de ciclo de vida permite una evaluación ambiental más completa, abordando tanto impactos directos como externalidades asociadas.

Se debe destacar que este informe se realizó en un tiempo limitado, por lo que es posible que existan publicaciones científicas relevantes que no se incluyeron, ya sea porque no fueron encontradas mediante las palabras clave seleccionadas o porque no aparecieron en las búsquedas disponibles. Esto no implica que se haya revisado toda la información existente, sino que se analizó la evidencia accesible en el período definido para el estudio.

5. Conclusiones y recomendaciones

El análisis de los 38 estudios evidencia que la salmonicultura intensiva tiene impactos significativos en la biodiversidad, calidad ambiental y dinámica química de los ecosistemas acuáticos, reforzando la recomendación de **no implementar esta actividad en áreas protegidas, ni ecosistemas sensibles**.

Esta recomendación se alinea con los marcos internacionales de gestión ambiental, en particular con el principio de prevención y el principio de precaución, que establecen la obligación de evitar actividades de alto riesgo ecológico en zonas donde los efectos negativos ya han sido constatados o no existe certeza suficiente sobre su control.

Se recomienda:

- Fortalecer normativas ambientales basadas en evidencia científica actualizada.
- Implementar sistemas de monitoreo integrales y participativos.
- Promover investigaciones sobre especies emergentes en acuicultura y resistencia microbiana.
- Incorporar enfoques de gestión adaptativa y colaborativa que integren actores sociales, científicos y reguladores

6. Referencias bibliográficas

1. Abihssira-García, I., Horgen, F. D., & Lie, Ø. (2022). Distinct polymer-dependent sorption of persistent pollutants associated with Atlantic salmon farming to microplastics. *Marine Pollution Bulletin*, 178, 113794. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113794>
2. Aranda, C., Paredes, J., Valenzuela, C., Lam, P., & Guillou, L. (2010). 16S rRNA gene-based molecular analysis of mat-forming and accompanying bacteria covering organically-enriched marine sediments underlying a salmon farm in Southern Chile (Calbuco Island). *Revista Chilena de Historia Natural*, 83(2), 203–216. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-65382010000200006>
3. Asche, F., Roll, K. H., & Tveteras, S. (2009). Economic inefficiency and environmental impact: An application to aquaculture production. *Journal of Environmental Economics and Management*, 58(1), 91–100. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2008.10.003>
4. Baldrich, M., Olivares, M., & Quiñones, R. (2024). The giant kelp holdfasts macroinvertebrate assemblages: Towards benthic management and conservation using alpha and beta diversity in Northern Patagonia. *Regional Studies in Marine Science*, 69, 103896. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2024.103896>
5. BurrIDGE, L. E., Weis, J. S., Cabello, F., Pizarro, J., & Bostick, K. (2010). Chemical use in salmon aquaculture: A review of current practices and possible environmental effects. *Aquaculture*, 306(1–4), 7–23. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2010.05.020>
6. Cáceres, G., Yáñez, J. M., & Lhorente, J. P. (2024). Meta-analysis of GWAS for sea lice load in Atlantic salmon. *Aquaculture*, 802, 740543. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2024.740543>
7. Carroll, M. L., Cochrane, S., Fieler, R., Velvin, R., & White, P. (2003). Organic enrichment of sediments from salmon farming in Norway: Environmental factors, management practices, and monitoring techniques. *Aquaculture*, 218(1–4), 1–24. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(03\)00475-7](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(03)00475-7)
8. Clawson, D., Martínez, J., & Smith, L. (2025). Continued transitions from fish meal and oil in aquafeeds require close attention to habitat impact trade-offs. *Current Research in Sustainable Science*, 6, 100457. <https://doi.org/10.1016/j.crsus.2025.100457>
9. Ford, J. S., & Myers, R. A. (2008). A global assessment of salmon aquaculture impacts on wild salmonids. *PLoS Biology*, 6(2), e33. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0060033>
10. González, A., Marín, R., & Soto, D. (2023). Effects of ethoxyquin on metabolism and composition of active marine microbial communities. *Aquaculture*, 815, 739345. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2023.739345>
11. Giesecke, R., Clement, A., Garcés-Vargas, J., Mardones, J. I., González, H. E., Caputo, L., & Castro, L. (2014). Massive salp outbreaks in the inner sea of Chiloé Island (Southern Chile): Possible causes and ecological consequences. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 42(3), 435–446. <https://doi.org/10.3856/vol42-issue3-fulltext-10>
12. Haya, K., BurrIDGE, L. E., & Chang, B. D. (2001). Environmental impact of chemical wastes produced by the salmon aquaculture industry. *Journal of Marine Systems*, 26(1–4), 371–387. <https://doi.org/10.1006/jmsc.2000.1034>
13. Hammer, M., White, C., & Johnson, P. (2022). Reducing carbon emissions in aquaculture: Using Carbon Disclosures to identify unbalanced mitigation strategies. *Environmental Impact Assessment Review*, 94, 106816. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2022.106816>
14. Häussermann, V., Försterra, G., Melzer, R. R., & Meyer, R. (2013). Gradual changes of benthic biodiversity in Comau Fjord, Chilean Patagonia – Lateral observations over a decade of taxonomic research. *Spixiana*, 36(2), 161–171.
15. Higuera-Llanten, A., Romero, J., & Espejo, R. T. (2018). Extended antibiotic treatment in salmon farms select multiresistant gut bacteria with a high prevalence of antibiotic resistance genes. *PLoS ONE*, 13(8), e0203641. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0203641>

16. Hinojosa, I. A., & Thiel, M. (2009). Floating marine debris in fjords, gulfs and channels of southern Chile. *Marine Pollution Bulletin*, 58(6), 341–350. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2008.10.020>
17. Hooft, P., Smith, K., & Johansson, M. (2025). Environmental impacts of the filamentous fungi *Paecilomyces variotii* (PEKILO®) as a novel protein source in feeds for Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Aquaculture*, 556, 741779. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2024.741779>
18. Ingle, R., Singh, A., & Kumar, S. (2022). Integration of multitrophic aquaculture approach with marine energy projects for management and restoration of coastal ecosystems of India. *Ecological Engineering*, 182, 106525. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106525>
19. Jara, C., Ortiz, X., & Sepúlveda, P. (2022). Water-sediment partitioning of flumequine and florfenicol, two antibiotics used in salmon aquaculture in Chile. *Marine Pollution Bulletin*, 178, 113480. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113480>
20. Jiménez, J., Lara, A., & López, R. (2013). Effects of exotic fish farms on bird communities in lake and marine ecosystems. *Naturwissenschaften*, 100(5), 467–477. <https://doi.org/10.1007/s00114-013-1076-8>
21. León-Muñoz, J., Valdés, A., & Soto, D. (2013). The combined impact of land use change and aquaculture on sediment and water quality in oligotrophic Lake Rupanco (North Patagonia, Chile). *Journal of Environmental Management*, 129, 290–298. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.05.008>
22. McMullin, R., Forrest, B., & Hewitt, J. (2021). A quantitative analysis of organic matter inputs to soft sediment communities surrounding salmon farms in Marlborough Sounds, NZ. *Science of The Total Environment*, 781, 145146. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145146>
23. Millanao, A. R., Barrientos-Schaffeld, C., Siegel-Tike, C. D., Tomova, A., Ivanova, L., Godfrey, H. P., Dölz, H. J., Buschmann, A. H., & Cabello, F. C. (2018). Resistencia a los antimicrobianos en Chile y el paradigma de Una Salud: manejando los riesgos para la salud pública humana y animal resultante del uso de antimicrobianos en la acuicultura del salmón y en medicina. *Revista Médica de Chile*, 146(3), 345–362. <http://dx.doi.org/10.4067/s0716-10182018000300299>
24. Núñez-Acuña, G., Gallardo-Escárate, C., & Valenzuela-Muñoz, V. (2015). Transcriptome immunomodulation of in-feed additives in Atlantic salmon (*Salmo salar*) infested with sea lice *Caligus rogercresseyi*. *Fish & Shellfish Immunology*, 44(2), 525–534. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2015.09.009>
25. Olesen, I., Myhr, A. I., & Rosendal, G. K. (2011). *Sustainable aquaculture: Are we getting there? Ethical perspectives on salmon farming*. Springer.
26. Osmundsen, T. C., Olsen, R., Gauteplass, H., & Asche, F. (2022). Aquaculture policy: Designing licenses for environmental regulation. *Marine Policy*, 140, 104978. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2022.104978>
27. Ortiz, P., & Hamamé, M. (2023). Distribución de las comunidades epibentónicas y caracterización de hábitats en el fiordo Puyuhuapi, Patagonia Norte. *Anales del Instituto de la Patagonia*, 51(1), 13–31. <http://dx.doi.org/10.22352/aip202250013>
28. Pochon, X., Pawlowski, J., Zaninetti, L., & Mitchelmore, C. (2015). Accurate assessment of the impact of salmon farming on benthic sediment enrichment using foraminiferal metabarcoding. *Marine Pollution Bulletin*, 91(1), 56–67. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.08.022>
29. Quiñones, R. A., Fuentes, M., Montes, R. M., & Valenzuela, C. (2019). Environmental issues in Chilean salmon farming: A review. *Reviews in Aquaculture*, 11(2), 241–261. <https://doi.org/10.1111/raq.12367>
30. Quiroga, E., Hernández, C., & Pérez, E. (2013). Classification of the ecological quality of the Aysen and Baker Fjords (Patagonia, Chile) using biotic indices. *Marine Pollution Bulletin*, 74(1), 288–297. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.11.041>

31. Rector, J., Filgueira, R., & Grant, J. (2023). From farm sustainability to ecosystem sustainability: Exploring the limitations of farm-applied aquaculture eco-certification schemes. *Journal of Environmental Management*, 333, 117869. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117869>
32. Rosendal, G. K., & Olesen, I. (2022). Overcoming barriers to breeding for increased lice resistance in farmed Atlantic salmon: A case study from Norway. *Aquaculture*, 551, 737574. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.737574>
33. Sickander, C., & Filgueira, R. (2022). Factors affecting IMTA (integrated multi-trophic aquaculture) implementation on Atlantic salmon (*Salmo salar*) farms. *Aquaculture*, 552, 738716. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2022.738716>
34. Stoeck, T., Behnke, A., Christen, R., & Rapp, H. T. (2018). Environmental DNA metabarcoding of benthic bacterial communities indicates the benthic footprint of salmon aquaculture. *Marine Pollution Bulletin*, 127(1–2), 139–149. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.11.065>
35. Tucça, F., Lienlaf, M., & Espejo, R. (2017). Occurrence of antiparasitic pesticides in sediments near salmon farms in northern Chilean Patagonia. *Marine Pollution Bulletin*, 116(1–2), 222–230. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.11.041>
36. Valenzuela-Miranda, D., Gallardo-Escárate, C., & Rozas-Serri, M. (2024). The Atlantic salmon microbiome infected with the sea louse *Caligus rogercresseyi* reveals tissue-specific functional dysbiosis. *Aquaculture*, 802, 740328. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2023.740328>
37. Vera, R., & Vergara, A. M. (2016). Efectos del lavado in situ de redes en sedimentos asociados a la acuicultura en el sur de Chile. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 44(3), 567–578. <https://doi.org/10.4067/S0718-19572016000300003>
38. Ziegler, S., & Hilborn, R. (2023). Fished or farmed: Life cycle impacts of salmon consumer decisions and opportunities for reducing impacts. *Science of The Total Environment*, 872, 158591. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158591>

7. Anexos

Anexo 1. Matriz de estudios revisados

Anexo 2. Literatura gris consultada

Anexo 3. Tabla de palabras clave utilizadas

ANEXO 1 Matriz de estudios revisados									
Nº	Autor/a (Año)	Título del estudio	País	Tipo de ecosistema	Tipo de impacto	Variable medida	Especie afectada	Distancia al centro de cultivo	Hallazgos principales
1	Higuera-Llantén et al. (2018)	Extended antibiotic treatment in salmon farms select multiresistant gut bacteria with a high prevalence of antibiotic resistance genes	Chile-Cupquelián	No especifica	En la microbiota de peces, resistencia	resistencia a antibióticos	Salmo salar	en 4 centros	uso elevado de antibióticos genera resistencia
2	McMullin et al. (2021)	A quantitative analysis of organic matter inputs to soft sediment communities surrounding salmon farms in Marlborough Sounds, NZ	Nueva Zelanda	Marino – fondos blandos	Enriquecimiento orgánico / Alteración trófica	Ácidos grasos, isótopos estables, biomasa, nivel trófico, asimilación de MO	Comunidad bentónica	0 a 300 m	Cambio en la composición de comunidades de fondos blandos
3	Jiménez et al. (2013)	Effects of exotic fish farms on bird communities in lake and marine ecosystems	Chile	Lacustre y marino-costero	Cambio en la estructura de comunidades de aves	Riqueza de especies, abundancia, composición, gremios tróficos	Aves acuáticas (gaviotas, cormoranes, buitres)	Sitios pareados (salmonera/control)	Aumento en la abundancia de aves generalistas en sitios con salmoneras, sin cambios en riqueza; comunidades se simplifican y dominan especies oportunistas.
4	Pochon et al. (2015)	Accurate assessment of the impact of salmon farming on benthic sediment enrichment using foraminiferal metabarcoding	Nueva Zelanda	Marino – fondos blandos (sedimento bentónico)	Enriquecimiento orgánico del sedimento	Diversidad y abundancia de foraminíferos vía eDNA/eRNA (metabarcoding); correlación con índices tradicionales	Foraminíferos bentónicos (12 taxones potenciales como bioindicadores)	Gradiente desde centros de cultivo (distancias específicas no detalladas en el resumen)	Foraminíferos (taxón de protozoos marinos) detectados por eRNA muestran alta correlación con índices tradicionales; identifican 12 taxones útiles como bioindicadores de enriquecimiento.
5	Ford & Myers (2008)	A Global Assessment of Salmon Aquaculture Impacts on Wild Salmonids	Escocia, Irlanda, Canadá Atlántico y Pacífico	Marino – costero y de fiordo	Disminución de supervivencia de salmones silvestres	Supervivencia y abundancia de salmones silvestres en relación con presencia de centros de cultivo	Salmones del Atlántico, trucha maraña, salmón rosado, chum y coho	Comparación zonas con y sin salmoneras	La salmonicultura reduce significativamente la supervivencia de salmones y truchas silvestres, con efectos mayores al 50% en varios casos.
6	Abihssira-García et al. (2022)	Distinct polymer-dependent sorption of persistent pollutants associated with Atlantic salmon farming to microplastics	Noruega (estudio en contexto de salmónica cultura noruega)	Marino – zonas de influencia de centros de cultivo	Contaminación química / vectorización por microplásticos	Adsorción de dioxinas y PCBs en distintos polímeros (PET, PVC, HDPE, PP); bioacumulación en moluscos	Mejillones (como bioindicadores indirectos)	3 meses de exposición cercana a centros de cultivo	Contaminantes persistentes de salmonicultura se adsorben diferencialmente según tipo de microplástico; riesgo químico polimérico-dependiente.
7	Jara et al. (2022)	Water-sediment partitioning of flumequine and florfenicol, two antibiotics used in salmon aquaculture in Chile	Chile	Marino (fiordo)	Químico	Partición agua-sedimento de antibióticos	No aplica	No aplica	Flumequine (antibiótico) se adsorbe más al sedimento que florfenicol; su acumulación puede ser mayor en ecosistemas marinos.
2	Tucca et al. (2017)	Occurrence of antiparasitic pesticides in sediments near salmon farms in northern Chilean Patagonia	Chile (Patagonia)	Sedimentos marinos costeros	Contaminación química	Concentración de antiparasitarios (EB, DI, TE, CP) en sedimentos (ng/g)	Benthic invertebrates*	Cercano a jaulas de cultivo	Se detectaron pesticidas antiparasitarios; niveles de cypermethrin representan riesgo para organismos bentónicos locales.
		Environmental impacts of the filamentous fungi Paecilomyces variotii (PEKILQ®) as a novel protein source in feeds for Atlantic salmon (Salmo salar)	No específico ado (probable mente Noruega/Europa)	Salmonicultura acuícola	Impacto químico y físico	Emissiones GHG, residuos nitrogenados y minerales en efluentes, uso de proteína alternativa	Salmo salar	No aplica	Sustitución parcial de proteína con P. variotii reduce emisiones y residuos, favoreciendo sostenibilidad en alimentación. Evaluación de balance ambiental en dietas (huella de carbono, nutrientes en efluentes) más que impactos directos en fiordos
3	Hooft et al. (2025)	Classification of the ecological quality of the Aysen and Baker Fjords (Patagonia, Chile) using biotic indices	Chile (Patagonia)	Fiordos marinos costeros	Impacto ecológico	Índices bióticos (AMBI)	Comunidades bentónicas	Aysén: zona con salmonicultura; Baker: fuera de concesiones	Estado ecológico bueno en Aysén (con salmonicultura) y alto pero desequilibrado en Baker; relación con actividad y entradas fluviales
4	Quiruga et al. (2013)								

ANEXO 1 Matriz de estudios revisados									
Nº	Autor/a (Año)	Título del estudio	País	Tipo de ecosistema	Tipo de impacto	Variable medida	Especie afectada	Distancia al centro de cultivo	Hallazgos principales
		The giant kelp holdfasts macroinvertebrate assemblages: Towards benthic management and conservation using alpha and beta diversity in Northern Patagonia	Chile (Chiloé)	Ecosistema marino bentónico	Impacto ecológico	Diversidad alfa y beta, composición macroinvertebrados	Macroinvertebrados bentónicos	No especificado	Alta heterogeneidad biológica y variabilidad espacial de comunidades bentónicas; influencia del tamaño del holdfast y sitio de muestreo
5	Baldrich et al. (2024)	The combined impact of land use change and aquaculture on sediment and water quality in oligotrophic Lake Rupanco (North Patagonia, Chile)	Chile (Patagonia Norte)	Lago oligotrófico de agua dulce	Impacto químico	Concentración de nitrógeno total en agua y sedimentos	No especificado	Varias cuencas con salmonicultura	Salmonicultura y cambio uso suelo aumentan carga de nitrógeno en sedimentos y agua; impactos combinados relevantes para gestión ambiental
6	León-Muñoz et al. (2013)	Chemical use in salmon aquaculture: A review of current practices and possible environmental effects	Noruega, Chile, UK, Canadá	Marino costero	Contaminación química	Uso de antibióticos, antiparasitarios, antifoulings, desinfectantes	General (ecosistema)	No aplica (revisión)	Revisión de uso de químicos en los 4 principales países productores. Chile muestra menor transparencia en la entrega de datos. Se identifican posibles efectos sobre organismos no blanco, resistencia bacteriana, acumulación en sedimentos.
7	Burridge et al. (2010)		Global (con foco en salmón del Atlántico)					No aplica (estudio modela impactos por región, no por centro puntual)	Sustituir harina/aceite de pescado por insumos agrícolas (como soja) reduce presión sobre peces pelágicos pero aumenta impacto en biodiversidad terrestre. Impactos dispersos globalmente pero con efectos acumulativos.
8	Clawson et al. (2025)	Continued transitions from fish meal and oil in aquafeeds require close attention to habitat impact trade-offs	No específico ado (posblem ente Europa)	Marino y terrestre	Pérdida de hábitat por insumos de alimentación	Pérdida de hábitat a escala espacial	54.628 especies terrestres y marinas (no específica especies individuales)	Muestras tomadas desde bajo las jaulas hacia sitios de referencia alejados	Cambios estructurales en comunidades bacterianas a lo largo del gradiente de impacto. Deitaproteobacteria predominan bajo jaulas; Gammaproteobacteria en sitios alejados. Correlación significativa con indicadores de macrofauna. Se propone eDNA como herramienta eficiente para monitoreo ambiental.
9	Stoeck et al. (2018)	Environmental DNA metabarcoding of benthic bacterial communities indicates the benthic footprint of salmon aquaculture	Chile (Patagonia)	Marino, bentónico	Ecológico	Diversidad alfa y beta de comunidades bacterianas (eDNA)	Bacterias del sedimento (ej. Deitaproteobacteria, Gammaproteobacteria)	No cuantificada por distancia, pero sí por región (norte/sur del área de estudio)	Residuos marinos flotantes alcanzan hasta 250 Items/km²; 80% son plásticos (bolsas, fragmentos, plumaviti). La mayor parte proviene de la acuicultura (salmonicultura y mitilicultura). Mayor concentración en la zona norte, donde se concentra el cultivo.
10	Hinojosa & Thiel (2009)	Floating marine debris in fjords, gulfs and channels of southern Chile	Chile (Patagonia)	Marino – fiordos, canales y golfos	Físico	Densidad, composición y origen de residuos marinos flotantes	No aplica directamente (impacto en fauna mencionado en general, no específico)	No cuantificada por distancia, pero sí por región (norte/sur del área de estudio)	La ineficiencia técnica es un factor clave en el aumento de impactos ambientales; mayor uso de insumos contaminantes y aumento de costos.
11	Asche, Røll & Tveteras (2009)	Economic inefficiency and environmental impact: An application to aquaculture production	Noruega	Marino	Económico / Ambiental indirecto	Eficiencia técnica y asignativa	Salmón del Atlántico	No aplica	Analiza el diseño y evolución de tres tipos de licencias ambientales para salmonicultura, destacando la atención a riesgos ambientales y estímulo a innovaciones tecnológicas, pero identifica también altos costos administrativos y procesos largos con poca transparencia.
	Osmundsen, Olsen, Gauteplass & Asche (2022)	Aquaculture policy: Designing licenses for environmental regulation	Noruega	Marino - acuicultura	Político-regulatorio	Diseño y efectividad de licencias	Salmón	No aplica	El artículo analiza factores que limitan el desarrollo de salmones genéticamente resistentes a piojos; indica que la falta de incentivos de mercado y políticas adecuadas impiden avances que podrían reducir impactos ambientales negativos asociados al piojo.
13	Rosendal & Olesen (2022)	Overcoming barriers to breeding for increased lice resistance in farmed Atlantic salmon: A case study from Norway	Noruega	Marino	Ambiental (salud del cultivo)	Resistencias genéticas al piojo	Salmo salar (atlántico)	No aplica	
	González et al. (2023)	Effects of ethoxyquin on metabolism and composition of active marine microbial communities	Chile	Marino costero	Químico, ecológico	Metabolismo microbiano, composición comunitaria, respiración, actividad enzimática, preferencias de sustratos	Microorganismos marinos	Áreas con y sin salmonicultura (Achoa, Collumo Bay)	Ethoxyquin (antioxidante) altera metabolismo y composición microbiana; impactos distintos en zonas con y sin influencia salmoneira; potencial alteración en degradación de materia orgánica

ANEXO 1 Matriz de estudios revisados									
Nº	Autor/a (Año)	Título del estudio	País	Tipo de ecosistema	Tipo de impacto	Variable medida	Especie afectada	Distancia al centro de cultivo	Hallazgos principales
15	Valenzuela-Miranda et al. (2024)	The Atlantic salmon microbiome infected with the sea louse Caligus rogercresseyi reveals tissue-specific functional dysbiosis	No aplica (no específico a país, enfoque general en salmónico cultura)	Marino (acuicultura de salmón)	Ecológico (microbioma y efectos del parásito)	Diversidad y funcionalidad del microbioma en piel y gut	Salmo salar	No aplica	Parásito Caligus altera diversidad y funcionalidad del microbioma, favoreciendo bacterias oportunistas y afectando salud del salmón
16	Sickander & Figueira (2022)	Factors affecting IMTA (integrated multi-trophic aquaculture) implementation on Atlantic Salmon (Salmo salar) farms	No específico (revisión global, enfoque en salmónico cultura)	Marino (acuicultura salmónera)	Ecológico / Gestión ambiental	Aplicación y mitigación del impacto mediante IMTA	Salmo salar	No aplica	Revisión sistemática + encuesta industria. IMTA teóricamente viable pero con problemas para implementación comercial y mitigación efectiva. Barreras económicas y falta de apoyo gubernamental.
17	Ingle et al. (2022)	Integration of multitrophic aquaculture approach with marine energy projects for management and restoration of coastal ecosystems of India	India	Costero marino	Ecológico / Gestión ambiental	Propuesta y evaluación de IMTA como mitigación de impactos de proyectos energéticos marinos	No específico (IMTA especies variadas)	No aplica	IMTA puede mitigar impactos negativos de proyectos energéticos marinos (eólica, mareomotriz), pero existen desafíos regulatorios, sociales y ecológicos. Aunque el estudio aplica IMTA en contexto energético, sus hallazgos son extrapolables a la acuicultura multitrófica como mitigación ambiental
18	Hammer et al. (2022)	Reducing carbon emissions in aquaculture: Using Carbon Disclosures to identify unbalanced mitigation strategies	Reino Unido (Escocia)	Acuático marino, salmónicultura	Químico (emisiones de gases de efecto invernadero)	Emisiones GHG (Scope 1, 2 y 3) y estrategias de mitigación	Salmo salar	No aplica	Identifica desbalance en mitigación de emisiones de carbono en la salmónicultura escocesa. Scope 3 representa mayor parte de emisiones; áreas de mejora en estrategias de reducción. Incluye emisiones Scope 3 (transporte, insumos, cadenas asociadas)
19	Rector, Filgueira & Grant (2023)	From farm sustainability to ecosystem sustainability: Exploring the limitations of farm-applied aquaculture eco-certification schemes	No específico ado*	Ecosistemas marinos y costeros	Impactos ecológicos	Evaluación de eco-certificación, manejo de impactos ecosistémicos	Salmón (implícito)	No aplica (enfoque ecosistémico)	Eco-certificación mejora sostenibilidad a nivel de granja, pero limita visión ecosistémica. Se recomienda incorporar herramientas para evaluar impactos a escala amplia y aumentar transparencia.
20	Cáceres et al. (2024)	Meta-analysis of GWAS for sea lice load in Atlantic salmon	Noruega	Acuicultura marina	Parasitismo (sea lice)	Carga de piojos (conteo, densidad, log densidad)	Salmo salar (salmón atlántico)	No especificado	Identificación de dos regiones genómicas (ss3 y ssa12) asociadas fuertemente con la carga de piojos; genes candidatos relacionados con reparación de tejidos, modificación citosquelética y respuesta. Impacto ambiental indirecto: menor uso de químicos por resistencia genéticaimmune; la carga de piojos es un rasgo poligénico.
21	Núñez-Acuña et al. (2015)	Transcriptome immunomodulation of in-feed additives in Atlantic salmon Salmo salar infested with sea lice Caligus rogercresseyi	Chile	Acuicultura marina	Parasitismo y respuesta inmune	Expresión génica (transcriptoma) en piel y riñón anterior	Salmo salar (salmón atlántico)	No especificado	Inmunoestimulantes en la dieta modulan genes de respuesta inmune y metabolismo; variabilidad mayor en riñón; genes defensivos como citocromo p450 y serpinas disminuyen en infestados.
22	Ziegler & Hilborn (2023)	Fished or farmed: Life cycle impacts of salmon consumer decisions and opportunities for reducing impacts	Estados Unidos, Noruega, Alaska	Acuático (marino y costero)	Emisiones de gases efecto invernadero, eutrofización marina, ecotoxicidad marina, uso de suelo	Emisiones GEI, eutrofización, ecotoxicidad, uso de suelo, fish in-fish out ratio	Salmón silvestre (Alaska) y cultivado (Noruega)	Mercados en Europa y Estados Unidos	Productos congelados de salmón silvestre (sockeye y pink) tienen menor impacto ambiental que el salmón cultivado. Los impactos de salmón cultivado son mayores en emisiones, uso de suelo y eutrofización. Mejora de cadena de suministro puede reducir emisiones hasta un 40-50%.

ANEXO 1 Matriz de estudios revisados									
Nº	Autor/a (Año)	Título del estudio	País	Tipo de ecosistema	Tipo de impacto	Variable medida	Especie afectada	Distancia al centro de cultivo	Hallazgos principales
		Gradual changes of benthic biodiversity in Comau Fjord, Chilean Patagonia – lateral observations over a decade of taxonomic research Chile (Patagonia)	Chile (Patagonia)	Marino – bentónico Fiordo marino costero (Comau)	Cambio en biodiversidad bentónica IMPACTO ECOLÓGICO	Abundancia y diversidad de megabentos (fotografías y fauna de decápodos)	Megabentos variados, decápodos	Sitio clave en Comau Fjord (no especifica distancia a centros cultivo) Local (Comau Fjord, 10 años)	Disminución significativa en la abundancia de especies megabentónicas y cambios en comunidades durante una década, asociados a la actividad acuícola y pesquera.
23	Häussermann et al. (2013)	Distribución de las comunidades epibentónicas y caracterización de hábitats en el fiordo Puyuhuapi, Patagonia Norte	Chile	Fiordo marino-bentónico	Impacto ecológico (referencial, en contexto de salmonicultura)	Riqueza y composición de comunidades epibentónicas (filinaciones ROV; relación con hábitat: profundidad, inclinación, sustrato)	Epifauna bentónica (suspensívoros dominantes)	No especificado (gradiente espacial en el fiordo)	Alta biodiversidad epibentónica, distribución determinada por características del hábitat; suspensívoros cumplen funciones ecosistémicas clave; información útil para monitoreo en fiordos con presencia de salmonicultura
24	(2023*) Ortiz, P. & Hamamé, M.	Resistencia a los antimicrobianos en Chile y el paradigma de Una Salud: manejando los riesgos para la salud pública humana y animal resultante del uso de antimicrobianos en la acuicultura del salmón y en medicina	Chile	Marino costero, fiordos	Químico / Ecológico / Salud pública	Residuos de antimicrobianos en sedimentos y agua; genes de resistencia en bacterias	Peces silvestres; microbiota ambiental y humana	Hasta 8 km	95% de antibióticos importados usados en salmonicultura; residuos detectados hasta 8 km; selección de bacterias multirresistentes con genes móviles; riesgo de transferencia a patógenos humanos; disminución de diversidad marina y riesgo de FANS. Floraciones algales nocivas (FANS)
25	Millanao, A. R., Barrientos-Schaffeld, C., Siegel-Tike, C. D., Tomova, A., Ivanova, L., Godfrey, H. P., Dóiz, H. J., Buschmann, A. H., & Cabello, F. C. (2018 aprox. *)		Chile	Marino costero					
26	(2016) Vera, R. & Vergara, A. M.	Efectos del lavado in situ de redes en sedimentos asociados a la acuicultura en el sur de Chile	Chile	Marino costero (fiordos, Región de Los Lagos)	Físico-químico (sedimentación, materia orgánica)	Tasa de sedimentación, materia orgánica particulada en agua y sedimento	No aplica (efecto ecosistémico, no especie puntual)	Sitios adyacentes a salmoneras (Pichagua, Alao Sur, otro)	El lavado in situ modifica la sedimentación: en Pichagua disminuye tras el lavado, en Alao Sur aumenta. Impacto localizado pero relevante para manejo ambiental.
27	Giesecke, R., Clement, A., Garcés-Vargas, J., Mardones, J.I., González, H.E., Caputo, L. & Castro, L. (2014)	Massive salp outbreaks in the inner sea of Chiloé Island (Southern Chile): possible causes and ecological consequences	Chile	Marino-costero (mar interior de Chiloé)	Biológico y productivo (proliferaciones masivas, mortalidad de salmones)	Abundancia de salpas, clorofila-a, fitoplancton, TSM, corrientes oceánicas	Salmón de cultivo (Oncorhynchus spp.)	Inmediata (salpas concentradas en jaulas)	Brotes de salpas alcanzaron hasta 654.000 ind m ⁻³ , redujeron clorofila-a de 13,8 a <4 mg/m ³ , causaron mortalidad de salmones; las balsas-jaula favorecieron la persistencia del fenómeno.
28	Aranda, C., Paredes, J., Valenzuela, C., Lam, P. & Guillou, L. (2010)	16S rRNA gene-based molecular analysis of mat-forming and accompanying bacteria covering organically-enriched marine sediments underlying a salmon farm in Southern Chile (Cabuco Island)	Chile	Sedimentos marinos bajo salmonera	Enriquecimiento orgánico / anoxia	Secuencias 16S rRNA, composición bacteriana	Beggiatoa spp. y bacterias asociadas	0 m (bajo balsas) vs. 360 m afuera	Presencia de tapetes bacterianos de Beggiatoa spp. solo bajo influencia; coexistencia con bacterias sulfato-reductoras; evidencia de ciclo de azufre intenso en sedimentos impactados por salmonicultura
29	Quiñones, R.A., Fuentes, M., Montes, R.M. et al. (2019)	Environmental issues in Chilean salmon farming: a review	Chile	Marino-costero	Múltiples: orgánicos, químicos, biológicos	Síntesis de variables de calidad de agua, bentos y biota pelágica reportadas en estudios previos	Varias (peces cultivados, fauna bentónica, comunidades fitoplanctónicas y zooplanctónicas)	Variable según estudio revisado	Revisión exhaustiva de los impactos ambientales asociados a la salmonicultura en Chile, incluyendo enriquecimiento orgánico, pérdida de biodiversidad bentónica, interacciones con especies silvestres y vacíos de conocimiento. Revisión sistemática/bibliográfica
	Hayas, K., Burridge, L.E. & Chang, B.D. (2001)	Environmental impact of chemical wastes produced by the salmon aquaculture industry	Canadá (contexto Atlántico Norte)	Marino costero (fiordos, zonas de cultivo de salmón del Atlántico)	Químico (residuos de fármacos, pesticidas y otros productos usados en salmonicultura)	Residuos químicos, toxicidad, persistencia ambiental, riesgo ecológico	Salmones de cultivo, fauna bentónica y comunidades acuáticas asociadas	No aplica (revisión de estudios empíricos con distintas escalas espaciales)	Los químicos utilizados en salmonicultura (antibióticos, antiparasitarios, desinfectantes) pueden acumularse en sedimentos y organismos, generando efectos tóxicos en fauna no objetivo y contribuyendo a la resistencia bacteriana. Requiere regulación y monitoreo ambiental estricto.

ANEXO 1 Matriz de estudios revisados									
Nº	Autor/a (Año)	Título del estudio	País	Tipo de ecosistema	Tipo de impacto	Variable medida	Especie afectada	Distancia al centro de cultivo	Hallazgos principales
31	Carroll, M.L., Cochtrane, S., Fjeler, R., Veivin, R. & White, P. (2003)	Organic enrichment of sediments from salmon farming in Norway: environmental factors, management practices, and monitoring techniques	Noruega	Marino costero (fiordos noruegos)	Orgánico (acumulación de carbono y nutrientes en sedimentos)	Enriquecimiento orgánico, oxígeno disuelto, macrofauna bentónica, indicadores biológicos de calidad ambiental	Comunidades bentónicas (invertebrados) en zonas bajo y alrededor de los centros de cultivo	Gradiente espacial desde directamente bajo las jaulas hasta áreas de referencia alejadas	El enriquecimiento orgánico de los sedimentos bajo centros de cultivo de salmón depende de factores ambientales locales (corrientes, profundidad) y de prácticas de manejo. Se recomienda el uso de bioindicadores bentónicos y monitoreo adaptativo para prevenir impactos severos y mejorar la sostenibilidad de la industria.
32	Olesen, Myhr & Rosendal (2011)	Sustainable Aquaculture: Are We Getting There? Ethical Perspectives on Salmon Farming	N/D	Marino/costal (general)	Físico, ecológico	Contaminación, escapes, sostenibilidad ambiental	Salmón	N/D	Discute impactos ambientales de escapes y contaminación, calidad ambiental, y sostenibilidad; enfoque ético y socioeconómico complementario

		ANEXO 2 Literatura gris.				
Nº	Autor/a (Año)	Tipo de documento	Título	País / Contexto	Tema principal	Tipo de aporte
1	Bachmann-Vargas et al. (2021)	Artículo revisado	Re-framing salmon aquaculture in the aftermath of the ISAV crisis	Chile	Gobernanza post-ISAV	Análisis discursivo y político
2	Abhssira-García (2023)	Tesis de maestría	Un ciclo de vida mortal...	Noruega / Chile	Modelo de negocios salmoneero	Enfoque histórico-crítico
3	Salgado et al. (2015)	Artículo revisado	Stakeholder perceptions of the impacts from salmon aquaculture	Chile (Patagonia)	Percepción social	Opinión de actores / escenario
4	Barton et al. (2023)	Artículo revisado	Neostuctural innovation and directionality in Chilean salmon aquaculture	Chile	Política e innovación	Análisis del modelo productivo
5	Barton & Fløysand (2010)	Artículo académico (revisión)	The political ecology of Chilean salmon aquaculture, 1982–2010: A trajectory from economic development to global sustainability	Chile / Contexto social y económico	Desarrollo socioeconómico y gobernanza en salmónicultura chilena	Análisis político-ecológico, evolución histórica y retos de gobernanza
6	Carrasco-Bahamonde & Casallas (2024)	Artículo académico (open access)	Evolving blue development discourses and policies: Salmon farming industry and regional making in Chile	Chile / Políticas y discursos	Análisis de narrativas y políticas de salmónicultura en Chile, fases históricas y desafíos	Análisis crítico de políticas, discurso y gobernanza
7	Gudbrandsdottir et al. (2025)	Artículo académico (revisión)	Towards a systems perspective in policy design: An analysis of how the endogenous feedback structure of the Norwegian salmon aquaculture industry impacts policy outcomes	Noruega / Política y gestión	Dinámica de sistemas y políticas en salmónicultura noruega	Análisis sistémico de la industria y su respuesta a políticas
8	Billi et al. (2022)	Artículo académico (revisión)	Learning from crises? The long and winding road of the salmon industry in Chiloé Island, Chile	Chile / Gobernanza y crisis	Análisis de aprendizaje y desempeño de la salmónicultura en Chiloé	Evaluación crítica de conducta y gobernanza sectorial
9	Barrena, Bush & Lamers (2024)	Artículo académico (open access)	Countering salmon farming expansion: Network-making power in a nomadic marine space	Chile / Región de Magallanes	Resistencia indígena y políticas marinas	Análisis socio-político de resistencias y territorialidad
10	Anbelyth-Evans et al. (2024)	Artículo académico (open access)	From a Brown to a blue economy in Chile	Chile / Economía marina	Transición económica y participación marina	Análisis socioambiental y propuestas participativas
11	Colocarú et al. (2024)	Artículo académico (open access)	A flexible policy instrument to encourage externality abatement technologies in salmon aquaculture	Noruega / Políticas regulatorias	Instrumento regulatorio para innovación tecnológica	Propuesta de subsidios dinámicos para mitigar impactos
12	Thompson-Saud et al. (2018)	Artículo científico	Marine environmental issues in the mass media: Insights from television, newspaper and internet searches in Chile	Chile	Difusión mediática de temas ambientales marinos	Análisis de comunicación y percepción pública
13	Condie et al. (2023)	Artículo científico	Polarised perspectives in salmon aquaculture warrant a targeted long-term approach to communication	Australia	Conflictos y comunicación en acuicultura	Conceptual / análisis de percepción
14	Watson et al. (2022)	Artículo científico	‘Offshore’ salmon aquaculture and identifying the needs for environmental regulation	Escocia / Comparado	Regulación ambiental de acuicultura offshore	Conceptual y de gobernanza
15	Rector, Figueira & Grant (2024)	Artículo académico conceptual	The role of salmon aquaculture eco-certification in corporate social responsibility and the delivery of ecosystem services and disservices	Global (empresas salmoneeras líderes)	Eco-certificación, responsabilidad social empresarial, servicios/diservicios ecosistémicos	Marco conceptual y análisis de estrategias corporativas
16	Miller, J.C. (2018)	Artículo académico con enfoque geográfico-crítico	No fish, no mail: Industrial fish produce new subjectivities in Southern Chile	Chiloé, Región de Los Lagos, Chile	Impacto territorial y simbólico de la salmónicultura	Análisis crítico desde geografía y teoría del ensamblaje: vínculos entre economía salmoneera y urbanismo neoliberal
17	Trueman, Figueira & Fanning (2022)	Artículo académico	Transparency and communication in Norwegian and Nova Scotian Atlantic salmon aquaculture industries	Noruega y Nueva Escocia, Canadá	Transparencia, comunicación y licencia social para operar (SL.O) en la salmónicultura	Análisis comparativo de percepciones de stakeholders, aporta marco sobre gobernanza y legitimidad social
18	Barton (1997)	Artículo científico	Environment, sustainability and regulation in commercial aquaculture: The case of Chilean salmonid production	Chile	Sustentabilidad y regulación en salmónicultura	Conceptual / de gobernanza
19	Lozano-Muñoz et al. (2021)	Revisión / Perspectiva	Antimicrobial resistance in Chilean maime-farmed salmon: Improving food safety through One Health	Chile	Uso de antibióticos en salmónicultura y resistencia antimicrobiana	Marco contextual, revisión conceptual desde enfoque One Health
20	Beatriz Eugenia Cid Aguayo & José Barriga (2016)	Artículo académico	Behind certification and regulatory processes: Contributions to a political history of the Chilean salmon farming	Chile	Regulación y certificación en la salmónicultura chilena	Análisis político-social

21	Jeremy Ableyth-Evans et al. (2020)	Artículo académico	Toward marine democracy in Chile: Examining aquaculture ecological impacts through common property local ecological knowledge	Chile	Gobernanza marina, impactos ecológicos y saber local en acuicultura	Análisis socio-ecológico y gobernanza
22	Lauren Watson et al. (2022)	Artículo académico	'Offshore' salmon aquaculture and identifying the needs for environmental regulation	Escocia (estudio de caso)	Regulación y definición de acuicultura offshore	Revisión y análisis normativo
23	Norris, A. (2017)	Comentario / Opinión	Application of genomics in salmon aquaculture breeding programs by Ashle Norris: Who knows where the genomic revolution will lead us?	Global / Noruega	Mejoramiento genético en salmón de cultivo mediante genómica	Reflexión / proyección teórica sin datos
24	Swanson, H. A. (2015)	Artículo científico (etnográfico)	Shadow ecologies of conservation: Co-production of salmon landscapes in Hokkaido, Japan, and southern Chile	Japón / Chile	Impacto ecológico del comercio transnacional de salmón y co-producción de paisajes conservacionistas	Análisis político-ecológico, etnografía comparativa
25	McGhee, C., Falconer, L., & Telfer, T. (2019)	Artículo científico	What does 'beyond compliance' look like for the Scottish salmon aquaculture industry?	Escocia / Industria salmonera	Gestión ambiental más allá del cumplimiento regulatorio en la acuicultura de salmón	Estudio cualitativo con entrevistas y revisión documental sobre desafíos, prácticas y oportunidades para el sector
26	Galland & McDaniels (2008)	Artículo científico / análisis de políticas	Are new industry policies precautionary? The case of salmon aquaculture siting policy in British Columbia	Canadá (Columbia Británica)	Políticas públicas y regulación en salmonicultura	Análisis conceptual y crítico de políticas regulatorias
27	Kessling et al. (2017)	Artículo científico	Who cares about dirty beaches? Evaluating environmental awareness and action on coastal litter in Chile	Chile (varias regiones y Rapa Nui)	Percepción ambiental y gestión de basura costera	Evaluación sociocultural y ambiental sobre contaminación costera
28	Barrett, Caniggia & Read (2002)	Artículo científico	"There are More Vets than Doctors in Chiloe": Social and Community Impact of the Globalization of Aquaculture in Chile	Chile (Chiloé)	Impactos sociales y comunitarios	Análisis social y económico
29	Ospina Peraila et al. (2015)	Artículo científico	Extraterritorial Investments, Environmental Crisis, and Collective Action in Latin America	Latinoamérica (Chiloé, O'Higgins, Tarja)	Inversiones extraterritoriales y crisis ambiental	Análisis socioambiental y territorial
30	Jalili Kolavani & Mather (2025)	Artículo científico	Regulating a 'fish out of place': A global assessment of farmed salmon escape policies and frameworks	Global, 14 regiones de producción	Políticas regulatorias sobre escapes de salmón	Evaluación global de marcos regulatorios y tecnologías
31	Martin et al. (2021)	Artículo científico (lit. gris)	'Landing' salmon aquaculture: Ecologes, infrastructures and the promise of sustainability	Canadá (análisis global)	Transición marino-terrestre	Infraestructural / Socioambiental
32	Arancibia et al. (2022)	Informe técnico	Incompatibilidad de la Salmonicultura con la Reserva Nacional Kawésqar	Chile / Región de Magallanes y Antártica	Conservación ecosistémica y legal	Análisis ecosistémico y legal
33	Selfield et al (2025)	Artículo científico	The southern river otter, huihin Lontra provocax (Thomas, 1908) and the marine otter, chungungo Lontra felina (Molina, 1782) (Mustelidae: Lutrinae) in the Southern Patagonian fjord and channel system: distribution and conservation problems	Chile aysen	distribución y problemas de conservación de El huihin y chungungo en el sistema de fiordos y canales patagónicos.	Análisis
34	Vásquez-Quipeyvana, W., Inga, M.: Betalieu-Pallardel, I. (2022)	Artículo técnico / Revisión	Inteligencia artificial en acuicultura: fundamentos, aplicaciones y perspectivas futuras	Perú	Acuicultura e inteligencia artificial (optimización de procesos, diagnóstico, calidad de agua, gestión)	Revisión de aplicaciones de IA y propuestas de futuro
35	Buschmann, A. H., Stead, R. A., Hernández-González, M. C., Pereda, S. V., Paredes, J. E. & Maldonado, M. A. (2013)	Foro académico / artículo de opinión científica	Un análisis crítico sobre el uso de macroalgas como base para una acuicultura sustentable	Chile	Regulaciones, diversificación acuícola, IMTA	Análisis crítico y propuesta conceptual para acuicultura sustentable
36	Celis, J., Sandoval, M. & Zagel, E. (2009)	Comunicación científica	Actividad respiratoria de microorganismos en un suelo patagónico enmendado con lodos salmonícolas	Chile, Patagonia	Manejo de residuos de salmonicultura (lodos)	Ensayo experimental en laboratorio sobre la incorporación de lodos en suelos degradados
37	Ganga, F.A. & Aliendrez, E. (2007)	Artículo académico (ciencias sociales)	Análisis teórico del sindicalismo en la región de Los Lagos - Chile, desde una perspectiva de género. Situación de la Industria salmonera	Chile, Región de Los Lagos	Sindicalismo, género y trabajo en la salmonicultura	Contexto social y laboral: discusión sobre participación femenina en sindicatos

