



UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTÍSIMA CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS

Salmonicultura marina y gestión de la biodiversidad en Cisnes: análisis espacial
y normativo

Por

RENÉ EDUARDO SANTIS RIVAS

MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO PROFESIONAL DE BIÓLOGO MARINO

Supervisora: Rocío Herrera Romero

Profesor patrocinante: Iván Vera Escalona

Concepción, Chile

2026

CONSTANCIA

Esta Memoria de Título corresponde a una Habilitación Profesional ejecutada bajo la modalidad *vía profesionalizante* durante el semestre académico. Se destino parte del tiempo a la resolución del problema principal expuesto en esta Memoria de Título y se complementó con labores adicionales en la institución, las cuales se consignan en el apartado “Habilitación profesional: Práctica profesional”. La práctica profesional se desarrolló bajo la supervisión de Rocío Herrera Romero en la Subsecretaría del Medio Ambiente, contando con el patrocinio de Iván Vera Escalona por parte de la Universidad Católica de la Santísima Concepción.

Dedico esta memoria a mis gatas flora, fauna y fungi, por ser mi compañía a lo largo de mi vida y ser mi gran felicidad.

TABLA DE CONTENIDOS

Resumen	iii
Abstract.....	iv
Acrónimos	v
Introducción.....	1
Biodiversidad marina: definición legal y alcance operativo.....	2
Impulsores directos de pérdida de biodiversidad.....	3
Contaminantes ambientales de la salmonicultura	4
<i>Materia orgánica</i>	5
<i>Pesticidas</i>	6
<i>Antibióticos</i>	6
Calidad de agua marina y salmonicultura.....	6
Expansión de la salmonicultura y desafíos para la gestión ambiental	7
Salmonicultura y Región de Aysén	8
Problemática	14
Problemática General.....	14
Problemáticas Específicas.....	14
Objetivos.....	15
Objetivo General.....	15
Objetivos Específicos	15
Métodos	16
Revisión bibliográfica.....	16
Análisis teleológico de normativa ambiental aplicable a la salmonicultura chilena y su vinculación con impulsores IPBES.....	16
<i>Clasificación de impulsores IPBES</i>	16
<i>Análisis teleológico</i>	17
<i>Proceso de codificación</i>	18
Análisis descriptivo-espacial de centros de salmonicultura	19
<i>Índice de Moran Global y Local</i>	20
Resultados.....	22

Índice de Moran Global e Índice de Moran Local	22
Clasificación y análisis teleológico de instrumentos normativos chilenos aplicables a la salmonicultura.....	23
Discusión	33
Evaluación espacial y normativa de la salmonicultura frente a la pérdida de biodiversidad marina	33
<i>Patrones de aglomeración territorial y concentración espacial de la salmonicultura en la comuna de Cisnes</i>	33
<i>Brechas de la normativa sectorial ante la alta concentración espacial de la actividad salmonera en la comuna de Cisnes</i>	34
Clasificación y análisis teleológico de instrumentos normativos chilenos aplicables a la salmonicultura.....	35
<i>Limitaciones estructurales del marco regulatorio</i>	35
<i>Coherencia del marco regulatorio chileno frente a los impulsores directos de pérdida de biodiversidad del IPBES</i>	37
Implicancias de la evidencia espacial para la toma de decisiones y la gestión institucional	40
Conclusiones.....	42
Referencias bibliográficas	43
Instrumentos legales y reglamentarios	64
Anexo	67
Habilitación profesional: Práctica profesional.....	67

RESUMEN

La salmonicultura en la Región de Aysén se ha expandido como una actividad productiva intensiva en ecosistemas marino-costeros de relevancia para la biodiversidad, impulsada por condiciones ambientales favorables y modificaciones normativas que incentivaron la localización de centros de cultivo. Sin embargo, la regulación sectorial vigente evalúa los impactos a escala individual de centro de cultivo, omitiendo la capacidad de carga y los efectos acumulativos derivados de la concentración espacial de la industria. Bajo la premisa de que la actividad presenta un agrupamiento territorial no aleatorio y que los instrumentos normativos se enfocan en la gobernanza y minimización operativa sin un enfoque ecosistémico integral, este estudio evaluó la gestión ambiental de la biodiversidad marina en la comuna de Cisnes mediante el análisis del marco regulatorio y los patrones de concentración espacial. Metodológicamente, se combinó un análisis espacial mediante el Índice de Moran (Global y Local) con un análisis teleológico de los instrumentos normativos ambientales y sectoriales frente a los impulsores de pérdida de biodiversidad de la IPBES. Los resultados espaciales confirmaron un agrupamiento territorial estadísticamente significativo (Índice de Moran Global $I=0,36$; $Z=22,30$; $p<0,001$), identificando zonas de alta concentración (clusters High-High) en el borde costero de Cisnes. El análisis normativo evidenció el predominio de la Gobernanza y la Minimización de impactos ambientales, con vinculaciones directas orientadas principalmente a la Contaminación y a las Especies exóticas invasoras, frente a una ausencia de instrumentos de Protección y Restauración. Se concluye que el marco regulatorio actual prioriza la habilitación espacial y el manejo de contingencias productivas individuales por sobre la protección ecosistémica, evidenciando la necesidad de incorporar la evaluación de impactos acumulativos en la planificación territorial, para fortalecer una gestión ambiental de la salmonicultura que considere las interacciones entre la actividad, los ecosistemas marinos y sus componentes de biodiversidad a escala territorial.

Palabras clave: Acuicultura intensiva, Autocorrelación espacial, Conservación marina, Marco regulatorio, Patagonia chilena.

ABSTRACT

Salmon aquaculture in the Aysén Region has expanded as an intensive productive activity within marine-coastal ecosystems of high biodiversity relevance, driven by favorable environmental conditions and regulatory changes that have promoted the establishment of aquaculture farming centers. However, the current sectoral regulatory framework assesses environmental impacts primarily at the individual farming center scale, with limited consideration of carrying capacity and the cumulative effects associated with the spatial concentration of the industry. Based on the premise that the activity exhibits non random spatial clustering and that regulatory instruments focus predominantly on governance and operational impact minimization rather than on a comprehensive ecosystem based approach, this study evaluated the environmental management of marine biodiversity associated with salmon aquaculture in the commune of Cisnes through an analysis of the regulatory framework and spatial concentration patterns. Methodologically, spatial analysis using the Global and Local Moran Index was combined with a teleological analysis of environmental and sectoral regulatory instruments in relation to the direct drivers of biodiversity loss identified by IPBES. The spatial analysis confirmed statistically significant spatial clustering (Global Moran Index, $I = 0.36$; $Z = 22.30$; $p < 0.001$), identifying areas of high concentration (High-High clusters) along the coastal zone of Cisnes. The regulatory analysis revealed a predominance of Governance and Environmental impact minimization, with direct linkages primarily addressing Pollution and Invasive alien species, alongside a lack of instruments explicitly focused on Biodiversity Protection and Restoration. Overall, the current regulatory framework prioritizes spatial allocation and the management of individual production related contingencies over ecosystem protection, highlighting the need to incorporate cumulative impact assessment into territorial planning and to strengthen environmental management of salmon aquaculture by considering the interactions between the activity, marine ecosystems, and their biodiversity components at the territorial scale.

Key words: Chilean Patagonia, Intensive aquaculture, Marine conservation, Regulatory framework, Spatial autocorrelation.

ACRÓNIMOS

- AAA: Áreas Apropriadas para el Ejercicio de la Acuicultura
- ACS: Agrupación de Concesiones de Salmónidos / Agrupaciones de Concesiones de Acuicultura
- BCCh: Banco Central de Chile
- BCN: Biblioteca del Congreso Nacional de Chile
- CPS: Caracterización Preliminar de Sitio
- D.S.: Decreto Supremo
- EEI: Especies Exóticas Invasoras
- FAN/FANs: Floraciones de Algas Nocivas
- HH: High-High (Alto-Alto, concentración alta rodeada de concentración alta en análisis espacial)
- HL: High-Low (Alto-Bajo, concentración alta rodeada de concentración baja)
- INFA: Información Ambiental
- IPBES: Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services/Plataforma Intergubernamental de Ciencia y Política sobre Biodiversidad y Servicios Ecosistémicos
- ISA: Virus de la Anemia Infecciosa del Salmón (Infectious Salmon Anemia)
- LH: Low-High (Bajo-Alto, concentración baja rodeada de concentración alta)
- LGPA: Ley General de Pesca y Acuicultura
- LL: Low-Low (Bajo-Bajo, concentración baja rodeada de concentración baja)
- MMA: Ministerio del Medio Ambiente
- MO: Materia Orgánica
- NSCA: Normas Secundarias de Calidad Ambiental
- PNUD: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo
- RAMA: Reglamento Ambiental para la Acuicultura (D.S. N.º 320)
- REPLA: Reglamento sobre Plagas Hidrobiológicas (D.S. N.º 345)
- RESA: Reglamento de Medidas de Protección, Control y Erradicación de Enfermedades de Alto Riesgo para las Especies Hidrobiológicas (D.S. N.º 319)

- SBAP: Servicio de Biodiversidad y Áreas Protegidas
- SEA: Servicio de Evaluación Ambiental
- SEIA: Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental
- SMA: Superintendencia del Medio Ambiente
- SNAP: Sistema Nacional de Áreas Protegidas
- SUBPESCA: Subsecretaría de Pesca y Acuicultura
- WOS: Web of Science

INTRODUCCIÓN

En Chile, la salmonicultura mantiene una alta relevancia económica, destacando como el segundo productor mundial de salmón y un sector fuertemente exportador (Carrasco-Bahamonde & Casellas, 2024; Ceballos-Concha et al., 2025; Retamal et al., 2026). Entre 2010 y 2020 generó USD\$63,6 mil millones en exportaciones y se posicionó como el segundo producto más exportado después del cobre (Olivos et al., 2026). Una parte importante de esta actividad se realiza en la región de Aysén, la que se ubica en el sur de Chile, entre los paralelos 43° - 49° S, y se caracteriza por una geografía altamente fragmentada, dominada por archipiélagos y fiordos, bajo la influencia de un clima templado frío lluvioso (Castillo Levicoy & Pérez Lira, 2019; Sánchez-Jardón et al., 2025; Torrejón et al., 2013).

Los centros de salmonicultura establecidos en la Región de Aysén han experimentado una expansión progresiva, favorecida por condiciones ambientales locales, entre ellas una calidad de agua propicia para el cultivo y el aporte de nutrientes proveniente de aguas subantárticas (Buschmann & Fortt, 2005; Niklitschek et al., 2013). Esta expansión se enmarca en el crecimiento sostenido de la industria salmonera, que superó las 100.000 toneladas de producción anual en 1995 y posteriormente extendió su actividad hacia las regiones australes durante el período 2007–2015 (Carrasco-Bahamonde & Casellas, 2024; Hosono et al., 2016). Debido a la expansión de la salmonicultura, los impactos significativos sobre el ambiente han ido creciendo significativamente, principalmente aquellos impactos vinculados al aporte de materia orgánica (MO), la presencia de antibióticos y el incremento de nutrientes, como nitrógeno y fósforo, los cuales actúan como precursores de procesos de eutrofización (Fortt Z et al., 2007; Quiñones et al., 2019; Soto & Norambuena, 2004). Estas alteraciones pueden generar cambios en la estructura y composición de las comunidades bentónicas, por lo que la evaluación de sus efectos sobre los componentes ambientales resulta relevante para analizar la gestión ambiental de esta actividad en ecosistemas australes (Quiñones et al., 2019; Quiroga et al., 2013). En este contexto, la actividad de salmonicultura se encuentra sujeta a instrumentos de evaluación, monitoreo y control ambiental establecidos en la normativa chilena (Ley N.º 19.300; D.S. N.º 40; D.S. N.º 320).

Biodiversidad marina: definición legal y alcance operativo

En el contexto de la presente Memoria de Título, la biodiversidad será entendida conforme a las definiciones establecidas en la Ley N.º 19.300, sobre Bases Generales del Medio Ambiente, y en la Ley N.º 21.600, que crea el Servicio de Biodiversidad y Áreas Protegidas y el Sistema Nacional de Áreas Protegidas. La Ley N.º 19.300 define la biodiversidad o diversidad biológica como “la variabilidad de los organismos vivos, que forman parte de todos los ecosistemas terrestres y acuáticos. Incluye la diversidad dentro de una misma especie, entre especies y entre ecosistemas” (art. 2º, letra a). Por su parte, la Ley N.º 21.600 incorpora una definición más amplia, al establecer que la biodiversidad comprende “la variedad de los organismos vivos que forman parte de todos los ecosistemas terrestres y acuáticos. Incluye la diversidad dentro de una misma especie, entre especies y entre ecosistemas y sus interacciones” (art. 3º, numeral 5).

En concordancia con este marco jurídico, la literatura define a la biodiversidad marina como la variabilidad de los organismos vivos en el medio marino, expresada en la diversidad dentro de las especies, la diversidad entre especies, la composición y diversidad de las comunidades, y la diversidad de ecosistemas, incluyendo las interacciones ecológicas entre organismos y entre estos y su ambiente (Beauchesne et al., 2025; Campagne et al., 2023; Cochrane et al., 2016; Duffy & Stachowicz, 2006; Sala & Knowlton, 2006). En donde, la biodiversidad dentro de una misma especie o biodiversidad intraespecífica incluye componentes genéticos y fenotípicos (Fan et al., 2023; Schielzeth & Wolf, 2021), estas variaciones son ecológicamente relevantes, debido a que modulan la dinámica de las comunidades y el funcionamiento de los ecosistemas y la resiliencia de las especies frente a cambios ambientales (Hughes et al., 2008; Schielzeth & Wolf, 2021). La diversidad entre especies puede fomentar una mayor estabilidad y productividad, así como disminuir la susceptibilidad frente a invasiones de especies exóticas invasoras (Tilman et al., 2014), desempeñando así un factor fundamental para el funcionamiento y la capacidad de resiliencia de los ecosistemas marinos (Keller et al., 2016; Yan et al., 2025). La diversidad de ecosistemas es la variedad de ecosistemas, hábitats y comunidades presentes en un área determinada, considerando las diferencias en su estructura, composición y funcionamiento (Keith et al., 2020; Miyashita et al., 2014). Además, la biodiversidad considera las interacciones entre sus distintos niveles, así como las relaciones interespecíficas, como la competencia, el mutualismo y la depredación, que contribuyen al

funcionamiento de los ecosistemas (Dehling et al., 2022; Gaüzère et al., 2022; Mayor et al., 2024; Vellend & Geber, 2005). A una escala mayor, también comprende los vínculos entre ecosistemas mediante el flujo de organismos, nutrientes y energía, los cuales favorecen su resiliencia y la provisión de servicios ecosistémicos (Jordano, 2026; Miyashita et al., 2014).

La expansión de la salmonicultura en Aysén genera preocupaciones debido a las características del ecosistema receptor, donde la Patagonia chilena alberga una costa con una biodiversidad alta y una red de fiordos y canales con condiciones topográficas e hidrográficas complejas, pueden generar una mayor sensibilidad frente al exceso de contaminantes y otros estresores (Niklitschek et al., 2013; Ortiz-Severín et al., 2024; Soto et al., 2023). Los primeros análisis sobre Aysén advertían que la expansión de la salmonicultura ocurría sobre ecosistemas diversos, heterogéneos y poco estudiados, aumentando el riesgo de afectar componentes sensibles de la biodiversidad (Niklitschek et al., 2013; Quiñones et al., 2019). Más recientemente, evaluaciones ambientales a escala patagónica han identificado una mayor concentración de riesgos ambientales y productivos en zonas donde una alta presión productiva acumulada coincide con una elevada sensibilidad ambiental, particularmente en los fiordos de Aysén (Soto et al., 2023, 2026).

En esta investigación, la biodiversidad marina se aborda considerando la distribución espacial de la actividad salmonicultura y las principales presiones ambientales asociadas a ella, junto con los instrumentos regulatorios y de monitoreo destinados a su protección. En este sentido, la concentración espacial de los centros de cultivo y su relación con las presiones sobre el medio marino constituyen elementos para analizar las implicancias de la actividad sobre la gestión de la biodiversidad.

Impulsores directos de pérdida de biodiversidad

La *Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services* (IPBES), en su *Global Assessment Report on Biodiversity and Ecosystem Services* de 2019, asoció la pérdida de biodiversidad con cinco impulsores directos principales: el Cambio en el uso de la tierra y del mar, la Explotación directa de organismos, el Cambio climático, la Contaminación y las Especies exóticas invasoras (Hald-Mortensen, 2023; Niederman et al., 2025).

En este contexto, la salmonicultura también puede relacionarse con el impulsor de Cambio climático, debido a la exposición de los sistemas de cultivo y ecosistemas marinos asociados a variaciones de temperatura, acidificación, disponibilidad de oxígeno y eventos oceanográficos extremos, entre otros factores que pueden modificar las condiciones ambientales y aumentar la vulnerabilidad de los ecosistemas marinos (Abisha et al., 2022; Reid et al., 2019; Rowley et al., 2024; Soto et al., 2019; Stehfest et al., 2017). El impulsor Cambio en el uso del mar y de las zonas costeras han sido identificados como uno de los principales impulsores de presión sobre la biodiversidad y los ecosistemas marinos a escala global (Jaureguiberry et al., 2022; Watson et al., 2019). En particular, la salmonicultura puede vincularse con este impulsor, dado que su fase marina requiere la ocupación productiva de espacio marino-costero mediante el uso de concesiones y centros de cultivo (Chávez et al., 2019; Niklitschek et al., 2013; Soto et al., 2019). Asimismo, se relaciona con el impulsor de Contaminación, debido al aporte de materia orgánica y nutrientes hacia el medio marino, lo que puede generar cambios en las condiciones fisicoquímicas del sedimento y efectos localizados sobre la biodiversidad bentónica (Buschmann et al., 2006; Gammal et al., 2023; McLaverty et al., 2024; Mulsow et al., 2006; Sanz-Lazaro et al., 2021). Finalmente, también puede asociarse con el impulsor de Especies exóticas invasoras (EEI), debido al escape de salmónidos no nativos desde centros de cultivo, los cuales pueden generar impactos sobre los ecosistemas mediante depredación, competencia por recursos y posible establecimiento (Bravo et al., 2023; Soto et al., 2023).

Contaminantes ambientales de la salmonicultura

La fase marina de la salmonicultura se centra en el crecimiento de individuos juveniles hasta alcanzar su tamaño comercial (Tironi et al., 2010). Esta actividad se caracteriza por operar en un sistema abierto, en el cual se liberan materia orgánica y otros residuos con potencial contaminante hacia el ambiente (Hornick & Buschmann, 2018; Schendel et al., 2004; Wu, 1995). En este sentido, la acuicultura intensiva es reconocida como una fuente de contaminación asociada a la alta densidad de cultivo, el uso de alimento formulado y la aplicación intensiva de compuestos químicos, como antibióticos, antiparasitarios y productos antifouling (Barton, 1997; Bojarski et al., 2020; Dauda et al., 2019; Lulijwa et al., 2020; Zhu et al., 2025).

Materia orgánica

Los residuos orgánicos generados por la salmonicultura tienden a depositarse bajo las jaulas o permanecer suspendidos en la columna de agua (Adams et al., 2020; Salazar & Saldana, 2007). Estos residuos provienen principalmente de alimentos no consumidos, fecas y excreciones, liberando nutrientes como Nitrógeno (N) y Fósforo (P) en formas fácilmente asimilables por el fitoplancton (Gianella et al., 2023). Sin embargo, estos no suelen ser evidentes en la columna de agua debido a procesos de dilución y hidrodinámica local, manifestándose principalmente en los sedimentos y en cambios en la estructura de la comunidad (Herrera et al., 2018; Soto & Norambuena, 2004).

En Chile, estudios realizados en centros de cultivo han evidenciado efectos del enriquecimiento orgánico principalmente sobre los sedimentos y las comunidades bentónicas (Herrera et al., 2018; Soto & Norambuena, 2004). En este contexto, la materia orgánica derivada de la actividad acuícola favorece la formación y acumulación de agregados marinos en áreas circundantes a los centros de cultivo, los cuales pueden ser colonizados por bacterias y otros microorganismos heterótrofos de importancia sanitaria, como *Pseudomonas* spp y *Vibrio* spp (Poirier et al., 2020). A su vez, el enriquecimiento por nutrientes derivados de la salmonicultura podría asociarse con el desarrollo de procesos de eutrofización, favoreciendo florecimientos algales, condiciones hipóxicas y el deterioro de los ecosistemas marinos asociados a la actividad salmonera en Chile (Mardones et al., 2023; Soto, León-Muñoz, et al., 2021).

En el fondo marino bajo las jaulas de cultivo, la acumulación de alimento no consumido y fecas incrementa la carga orgánica bentónica, lo que puede alterar las comunidades bacterianas locales al favorecer la proliferación de bacterias anaeróbicas asociadas a condiciones anóxicas y contribuir a la reducción de la diversidad bacteriana del ambiente bentónico (Dowle et al., 2015; Hornick & Buschmann, 2018; Johansen et al., 2024; W. Zhang et al., 2008). Estas alteraciones pueden persistir hasta 35 meses posterior al término de las actividades acuícolas (Verhoeven et al., 2018). Además, en el aguas superficiales asociadas a centros de cultivo en Chile se ha registrado una mayor frecuencia de colonias bacterianas aeróbicas resistentes a antibióticos (Ortiz-Severín et al., 2024).

Pesticidas

La industria salmonera ha utilizado ampliamente pesticidas antiparasitarios no específicos para el control de infecciones parasitarias, los cuales son administrados en well-boats o pellets (Poley et al., 2013; Urbina et al., 2019). Entre los efectos ambientales asociados a estos compuestos se describen la inhibición de la productividad primaria, la bioacumulación en crustáceos con posibles efectos sobre su supervivencia incluso a bajas concentraciones y alteraciones en la captación de amonio por comunidades microbianas (Rain-Franco et al., 2018; Tucca et al., 2014; Valdés-Castro & Fernandez, 2021; Willis & Ling, 2003), además de resistencia a pesticidas (Núñez-Acuña et al., 2023) y efectos directos sobre la salud del cultivo y de trabajadores (Buchmann, 2022).

Antibióticos

Otro grupo de compuestos altamente utilizados en salmonicultura corresponde a los antibióticos, empleados en la prevención y tratamiento de enfermedades bacterianas, lo que ha posicionado a Chile entre los países con mayor consumo de antibióticos en salmonicultura; donde el 95% de los antibióticos es aplicado durante la fase marina (Lozano-Muñoz et al., 2021; Miranda et al., 2018). Entre los antibióticos más utilizados en Chile se encuentran la oxitetraciclina, el ácido oxolínico y el florfenicol (Avendaño-Herrera et al., 2023; Buschmann et al., 2012). Esto genera preocupaciones para el consumidor final de los productos debido a la selección y dispersión de bacterias resistentes a antibióticos, con potenciales implicancias ambientales y sanitarias (Chen et al., 2020; Salgado-Caxito et al., 2022).

En Chile, el uso de antibióticos en la salmonicultura se ha asociado con una mayor prevalencia de resistencia antimicrobiana en bacterias ambientales (Ortiz-Severín et al., 2024), mientras que sus residuos pueden persistir en el ambiente y ser detectados en la fauna marina hasta 75 días después del tratamiento (Niklitschek et al., 2013).

Calidad de agua marina y salmonicultura

La calidad del agua marina se constituye a partir de la interacción de componentes físicos como temperatura, salinidad, corrientes y mezcla vertical; químicos como saturación de oxígeno, pH y contenido de materia orgánica; y biológicos como fitoplancton y bacterias recicladoras de nutrientes, donde los niveles de nitrógeno y fósforo suelen ser más bajos en

condiciones naturales y varían principalmente por aportes de ríos, afloramiento y lluvia (Johansson et al., 2007; Ong & Ransangan, 2018; Watson et al., 2019; X. Zhang et al., 2020).

Los efectos de la salmonicultura sobre la calidad del agua dependerán del nivel de producción, la densidad de cultivo, la descarga de nutrientes como nitrógeno y fósforo, y las condiciones físicas y ambientales del área donde se desarrolla la actividad (Campuzano et al., 2013; Estay & Chávez, 2017; Quiñones et al., 2019). En este contexto la fase marina del ciclo productivo se caracteriza por el crecimiento intensivo de juveniles que demandan grandes cantidades de alimento (Tironi et al., 2010).

Los organismos marinos funcionan como bioindicadores dada su capacidad de bioacumular contaminantes, lo que los hace relevantes para el análisis de la calidad del agua (Hansen et al., 2022). En particular las comunidades macrobentónicas reflejan gradientes ambientales naturales mediante cambios en su composición y diversidad comunitaria en ausencia de enriquecimiento orgánico localizado (Duque et al., 2022; W. Zhang et al., 2023), por lo que también son utilizadas como indicadores de impacto de la salmonicultura al evidenciar enriquecimiento orgánico y alteraciones ecológicas en los sedimentos (Quiroga et al., 2013).

Expansión de la salmonicultura y desafíos para la gestión ambiental

La salmonicultura chilena ha experimentado una expansión progresiva hacia los fiordos y canales patagónicos australes, atravesando distintas fases desde 1973, pasando de una función de integración territorial, hasta establecerse como un motor de crecimiento económico y, posteriormente, a una etapa de expansión hacia las regiones australes tras la crisis del virus ISA (2007–2015) (Bachmann-Vargas et al., 2021; Carrasco-Bahamonde & Casellas, 2024; Soto & Norambuena, 2004). En el caso de Aysén, esto se ha traducido en una expansión de la ocupación del espacio marino-costero destinada al desarrollo de la fase marina de engorda en balsas jaula (Bachmann-Vargas et al., 2021; Soto, Chávez, et al., 2021).

Esta expansión se desarrolla en ecosistemas caracterizados por una alta biodiversidad, baja intervención antrópica y una compleja configuración de fiordos y canales interconectados (Buschmann et al., 2006; Friedlander et al., 2021; Niklitschek et al., 2013). La creciente ocupación de estos espacios ha generado presiones ambientales y sanitarias, cuya magnitud

puede verse influida por la distribución y concentración espacial de los centros de cultivo. Este desarrollo también ha impulsado reformas regulatorias orientadas a fortalecer el control y la gestión ambiental de la actividad (Bachmann-Vargas et al., 2021; Engler, 2024; Iizuka & Katz, 2015; Quiñones et al., 2019).

En este contexto, la distribución y concentración espacial de los centros de cultivo adquieren relevancia ambiental, ya que múltiples instalaciones pueden coexistir en sistemas marinos interconectados, generando presiones que trascienden la escala individual (Gentry et al., 2017; Price et al., 2015; Quiñones et al., 2019). La evidencia indica que los efectos de la acuicultura pueden trascender el entorno inmediato de una concesión, propagándose a través del sistema receptor y redistribuyendo parte de sus desechos (Keeley et al., 2019; Legrand et al., 2024; Simone & Vopel, 2024). Por ello, una gestión ambiental basada únicamente en el seguimiento sitio por sitio puede resultar insuficiente para abordar la acumulación de biomasa, nutrientes, enfermedades y otras presiones en cuerpos de agua compartidos (Quiñones et al., 2019; Weitzman & Filgueira, 2020). Este problema cobra especial relevancia en territorios con alta ocupación del espacio marino-costero, donde la planificación espacial y la estimación de la capacidad de carga son herramientas clave para compatibilizar la salmonicultura con la protección de la biodiversidad marina y otros usos del mar (Bath et al., 2023; Petrosillo et al., 2023).

Salmonicultura y Región de Aysén

Si bien la salmonicultura en Chile tiene su origen a inicios del Siglo XX, no fue sino posterior a las reformas de la década de 1970 modificó los patrones de producción en las áreas donde se instalaron las primeras industrias acuícolas que comenzó formalmente el rápido desarrollo de la salmonicultura (Bravo et al., 2023; Carrasco-Bahamonde & Casellas, 2024). Este rápido desarrollo ha generado desafíos significativos, enfrentando a la sociedad civil a nuevos desafíos socioeconómicos asociados al aumento de la demanda laboral, la llegada de nueva población y competencia con otras actividades productivas (O’Ryan & Pereira, 2015). Esto cobra gran importancia en la Región de Aysén, la cual ha experimentado una expansión de la industria en las zonas costeras, integrándose en las cadenas globales de suministro de alimentos (Bachmann-Vargas et al., 2021). Este proceso se ha intensificado desde la promulgación de la “Política Nacional de Uso de Borde Costero” de 1994, la cual estableció la

zonificación de áreas costeras para distintos usos, incluyendo acuicultura, turismo y conservación (Molinet et al., 2014). Como resultado, la salmonicultura se ha posicionado como el principal impulsor socioeconómico de la región (Campuzano et al., 2013), aunque con efectos ambientales potencialmente adversos (Montero et al., 2022). La comuna de Cisnes figura entre las más vulnerables al cambio climático dentro del sector acuícola, debido a su alta sensibilidad económica y dependencia laboral de la actividad (Soto et al., 2019). Además constituye la comuna costera de Chile que percibe mayores ingresos municipales por concesiones de salmonicultura (Bachmann-Vargas et al., 2021). Para avanzar en esta dirección, se realizó esta Memoria de Título, enmarcada en el proyecto “Caracterización de patrones de consumo y producción no sostenibles para mejorar las políticas que fortalezcan la biodiversidad y los servicios ecosistémicos”, implementado por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) y el Ministerio del Medio Ambiente (MMA), y administrado por el Departamento de Economía Ambiental de la División de Información y Economía Ambiental de la Subsecretaría del Medio Ambiente. En este marco, la salmonicultura de la Región de Aysén se analizó como un caso de producción intensiva en ecosistemas australes, cuya expansión territorial plantea desafíos para la gestión ambiental y la biodiversidad marina. Bajo un enfoque integral, se consideraron las presiones ecológicas derivadas de la actividad productiva en la comuna de Cisnes, así como los factores regulatorios y territoriales que inciden en su localización. En particular, la localización y concentración espacial de centros de cultivo puede incidir en la distribución de presiones ambientales sobre el medio marino y sus componentes, por lo que su análisis permite vincular la expansión productiva con desafíos de gestión ambiental, biodiversidad marina y producción sostenible.

TABLA 1

Instrumentos normativos ambientales de aplicación general y sectorial con incidencia en la salmonicultura.

Instrumento normativo	Año	Objeto	Componente regulado	Relación con la investigación	Alcance normativo
Bases Generales del Medio Ambiente (Ley N° 19.300)	1994	Establecer las bases generales del medio ambiente y los instrumentos de gestión ambiental	Medio ambiente, recursos naturales, instrumentos de gestión ambiental	Establece marco general para la evaluación y gestión ambiental de proyectos de salmonicultura en ecosistemas marinos. Establece las Normas Secundarias de Calidad Ambiental (NSCA).	Marco normativo, la regulación específica de la acuicultura corresponde a normativa sectorial
Crea el Ministerio, el Servicio de Evaluación Ambiental y la Superintendencia del Medio Ambiente (Ley N° 20.417)	2010	Crea el Ministerio del Medio Ambiente (MMA), el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA) y la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA)	Institucionalidad ambiental	Determina las instituciones responsables de las políticas públicas evaluación y fiscalización ambiental de proyectos de salmonicultura	No establece estándares ambientales específicos
Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (D.S. N°40, MMA)	2012	Regular el funcionamiento del SEIA	Procedimiento de evaluación ambiental de proyectos y actividades	Define el mecanismo mediante el cual proyectos de salmonicultura son evaluados respecto de sus impactos ambientales y sobre la biodiversidad	Regula el procedimiento de evaluación ambiental. La regulación operativa de la actividad acuícola corresponde a la normativa sectorial
Ley Marco de Cambio Climático (Ley N° 21.455)	2022	Establecer un marco jurídico para enfrentar el cambio climático	Mitigación, adaptación, instrumentos de gestión climática y emisiones de gases de efecto invernadero	Incorpora la adaptación al cambio climático en sectores productivos, incluyendo pesca y acuicultura mediante planes sectoriales (Artículo 9)	Establece obligaciones e instrumentos de gestión climática de carácter general; su aplicación sectorial depende de planes e instrumentos específicos
Crea el Servicio de Biodiversidad y Áreas Protegidas y el Sistema Nacional de Áreas Protegidas (Ley N° 21.600)	2023	Crear el Servicio de Biodiversidad y Áreas Protegidas (SBAP) y establecer instrumentos para la conservación de la biodiversidad	Biodiversidad, ecosistemas, especies nativas, áreas protegidas y sitios prioritarios para la conservación	Incorpora instrumentos de conservación relevantes para el análisis de la biodiversidad marina y costera	Regula la gestión y conservación de la biodiversidad y de áreas protegidas. Su aplicación sectorial se articula con otros instrumentos ambientales y sectoriales

Instrumento normativo	Año	Objeto	Componente regulado	Relación con la investigación	Alcance normativo
Ley General de Pesca y Acuicultura (Ley N° 18.892 /D.S. N° 430/ Ley N°20.434)	1991/1992/2010	Regulación de la pesca y acuicultura Conservación y uso sustentable de los recursos hidrobiológicos	Regula recursos hidrobiológicos, concesiones acuícolas, Áreas Apropriadadas para el Ejercicio de la Acuicultura (AAA), Agrupación de Concesiones de Salmónidos (ACS), Información Ambiental (INFA) y sanitaria de centros de cultivo	Marco normativo de salmonicultura, regula los emplazamientos y operación de concesiones acuícolas Modificaciones introducen instrumentos para la gestión ambiental y sanitaria, fortaleciendo el monitoreo ambiental, la planificación espacial y el control de riesgos asociados a la acuicultura	Regula el ejercicio de la actividad pesquera y acuícola, así como el régimen de concesiones y administración de recursos hidrobiológicos
Reglamento de Concesiones y Autorizaciones de Acuicultura (D.S. N°290)	1993	Regula el otorgamiento, modificación, transferencia y término de concesiones acuícolas	Concesiones acuícolas. Espacio destinado para el ejercicio de la actividad (marítimo y costero), requisitos técnicos y administrativo para la instalación y operación	Marco jurídico-administrativo que establece condiciones de emplazamiento de centros de cultivo	Regula el régimen administrativo y tramitación de las concesiones acuícolas
Reglamento de Medidas de Protección, Control y Erradicación de Enfermedades de Alto Riesgo para las Especies Hidrobiológica (D.S. N° 319)	2001	Establece medidas de protección, control y erradicación de enfermedades de alto riesgos en especies hidrobiológicas cultivadas	Sanidad de especies cultivadas, bioseguridad, vigilancia epidemiológica y contingencias sanitarias	Incorpora medidas de bioseguridad aplicables a la operación de centros de cultivo	Regula los aspectos sanitarios de la acuicultura

Instrumento normativo	Año	Objeto	Componente regulado	Relación con la investigación	Alcance normativo
Reglamento Ambiental para la Acuicultura (D.S. N° 320)	2001	El Reglamento Ambiental para la Acuicultura (RAMA) Establece medidas de protección ambiental para que las actividades acuícolas operen en parámetros compatibles con la capacidad de los cuerpos de agua	Calidad ambiental de cuerpos de agua, sedimentos, residuos, mortalidades, escapes de recursos exóticos, elaboración de informe ambiental (INFA) de periodos determinados, planes de contingencia, condiciones aeróbicas/anaeróbicas y operación de centros de cultivo	Establece los principales mecanismos de seguimiento ambiental de la salmonicultura mediante la evaluación periódica de las condiciones ambientales del centro de cultivo, incluyendo sedimentos y comunidades bentónicas	Aplicación específica a actividades acuícolas, regula el seguimiento y control ambiental de los centros de acuicultura conforme a la Ley General de Pesca y Acuicultura (LGPA). No regula de manera integral impactos ecosistémicos acumulativos fuera del área de influencia directa de los centros de cultivo
Reglamento sobre Plagas Hidrobiológicas (D.S. N° 345)	2006	Establece medidas para prevenir la introducción de especies plaga hidrobiológicas, aislarlas, controlar su propagación y buscar su erradicación.	Traslados de organismos; efluentes de plantas y centros de cultivo; artes y embarcaciones; declaración de áreas en categorías de plaga, riesgo de plaga y Floraciones de Algas Nocivas (FAN)	Define conceptos clave para estudios de dispersión de especies exóticas invasivas (EEI) y FAN Establece programas de vigilancia y muestreo (Art. 11)	Se centra en la prevención y control de plagas hidrobiológicas
Reglamento de control en línea de parámetros ambientales de las agrupaciones de concesiones de acuicultura (D.S. N°1)	2021	Establece requisitos, condiciones y el marco operativo para la implementación del sistema de monitoreo y control en línea de los parámetros ambientales, meteorológicos y oceanográficos en concesiones acuícolas	Regula la instalación de estaciones bases, sistemas de monitoreo, plataforma de datos y planes de monitoreo integrado Recopilación, recepción y transmisión de variables oceanográficas (temperatura, conductividad/salinidad, presión, oxígeno disuelto, pH, turbidez, fluorescencia y corrientes) y meteorológicas (temperatura, presión atmosférica, viento, precipitación y radiación solar)	Primer instrumento de monitoreo continuo de variables oceanográficas y meteorológicas para Agrupación de Concesiones de Salmónidos (ACS)	Aplicable solo a titulares de concesiones acuícolas que formen parte de una ACS. Las obligaciones se cumplen por ACS, pudiendo suscribirse un plan de monitoreo integrado que agrupe a varios titulares de la misma ACS

Instrumento normativo	Año	Objeto	Componente regulado	Relación con la investigación	Alcance normativo
Modifica la Ley General de Pesca y Acuicultura, con el objeto de exigir a los titulares de Concesiones de Acuicultura medidas para evitar o reducir el depósito de desechos inorgánicos y orgánicos (Ley N° 21.410)	2022	Exige a titulares de concesiones adoptar medidas para evitar o reducir el depósito de desechos orgánicos e inorgánicos en el fondo marino	Prohíbe depósito de desechos inorgánicos en fondos de la concesión y obliga al retiro de estos en caso de existir Presentar plan de recuperación y plan de investigación del fondo marino Establece infracciones y suspensión de operaciones	Complementa el D.S. N° 320 (RAMA), introduce obligaciones de recuperación e investigación del fondo marino	Aplica solo a desechos acumulados en el fondo de concesión acuícola, no incluyendo a residuos dispersados por las corrientes

PROBLEMÁTICA

Problemática General

La expansión de la salmonicultura en la Región de Aysén ha incrementado la ocupación del espacio marino-costero mediante la instalación de centros de cultivo en ecosistemas de relevancia para la biodiversidad. Si bien la normativa ambiental y sectorial, como la Ley N.º 19.300, la Ley N.º 20.417 y la Ley General de Pesca y Acuicultura, contempla variados instrumentos de evaluación, monitoreo y fiscalización como el D.S. N.º 40, D.S. N.º 320 y D.S. N.º 1., estos se orientan principalmente al seguimiento de impactos a escala de centro de cultivo, sin incluir los efectos fuera del área de influencia del proyecto. Por lo anterior, persisten desafíos para abordar efectos ambientales que se manifiestan por la concentración de múltiples centros de cultivo en un mismo espacio marino-costero y por la interacción de sus presiones sobre el ecosistema, como los impactos acumulativos y la consideración de la capacidad de carga de los cuerpos de agua.

Problemáticas Específicas

- Falta de gestión ambiental orientada a la concentración espacial de la salmonicultura y distribución territorial de las presiones ambientales.
- Limitaciones de los instrumentos regulatorios y de monitoreo para abordar impactos acumulativos sobre la biodiversidad marina.
- Incorporación limitada de criterios ecosistémicos como la capacidad de carga en la gestión ambiental de la actividad.

OBJETIVOS

Objetivo General

Evaluar la gestión ambiental de la biodiversidad marina asociada a la salmonicultura en la comuna de Cisnes, mediante el análisis del marco regulatorio vigente y de los patrones de concentración espacial de los centros de cultivo.

Objetivos Específicos

- O1: Caracterizar los patrones de distribución y concentración espacial de los centros de cultivo de salmónidos en la comuna de Cisnes.
- O2: Analizar la contribución de los instrumentos regulatorios y de monitoreo ambiental aplicables a la salmonicultura para la protección de la biodiversidad marina.
- O3: Analizar las implicancias de la concentración espacial de centros de cultivo para la gestión ambiental de la biodiversidad marina considerando el marco regulatorio vigente.

MÉTODOS

Revisión bibliográfica

Para el desarrollo de esta Memoria de Título, se documentó el estado del arte en dos ámbitos principales: el marco normativo y la literatura científica de referencia.

En primer lugar, la recopilación y análisis del marco normativo ambiental y sectorial aplicable a la salmonicultura se realizó mediante la revisión de cuerpos legales y reglamentarios en plataformas institucionales oficiales. Para ello, la búsqueda se focalizó exclusivamente en la Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (BCN), seleccionando cuerpos normativos como leyes, y decretos supremos (D.S.).

En segundo lugar, la revisión bibliográfica de antecedentes científicos referentes a los componentes ambientales, los ecosistemas marinos y la gestión ambiental de la industria salmonera se llevó a cabo utilizando las bases de datos Web of Science (WOS), SciELO y Google Académico. Para la selección la literatura especializada, se realizaron búsquedas mediante el empleo de términos y palabras clave específicas, tanto en español como en inglés: acuicultura, salmonicultura, IPBES, gestión ambiental, biodiversidad marina, impactos ambientales, autocorrelación espacial, capacidad de carga, contaminación marina, cambio climático, especies exóticas invasoras y cambio del uso del mar.

Análisis teleológico de normativa ambiental aplicable a la salmonicultura chilena y su vinculación con impulsores IPBES

Clasificación de impulsores IPBES

La clasificación inicial se estructuró a partir de los cinco impulsores directos de pérdida de biodiversidad definidos por la IPBES (2019): cambio en el uso de la tierra y del mar, explotación directa de organismos, cambio climático, contaminación y especies exóticas invasoras.

Análisis gráfico de la cobertura normativa frente a los impulsores IPBES

Para sintetizar y visualizar la cobertura de los instrumentos normativos aplicables a la salmonicultura frente a los impulsores directos de pérdida de biodiversidad definidos por la IPBES,

se construyó un gráfico tipo radar (Figura 3) utilizando Microsoft Excel. Este gráfico permitió representar simultáneamente múltiples dimensiones y comparar el alcance de cada instrumento normativo frente a cada impulsor de pérdida de biodiversidad.

A cada uno de los 12 instrumentos analizados (Tabla 1) se le asignó un puntaje, en una escala de 0 a 10, en base al análisis teleológico desarrollado previamente (Tabla 3). La puntuación representa una valoración del nivel de cobertura normativa frente a cada impulsor, y no una medida de la efectividad ambiental real del instrumento, en aquellos casos en que un instrumento abordó más de un impulsor, se asignaron puntajes independientes para cada eje, reflejando su cobertura normativa diferencial frente a cada impulsor. La asignación de puntajes se realizó con base en la evidencia recopilada en el análisis teleológico (Tabla 3) y fue validada mediante revisión cruzada con la literatura y los objetos formales de cada norma. Los puntajes se definieron según la siguiente escala:

Puntaje	Criterio
0	No aborda el impulsor, ni siquiera de forma indirecta.
1-3	Aborda el impulsor de forma indirecta o marginal, mediante menciones generales o mecanismos de alcance limitado.
4-6	Aborda el impulsor mediante mecanismos específicos, pero con un alcance limitado, por ejemplo, restringido al ámbito bentónico, sanitario, de concesión o de proyecto individual.
7-9	Aborda el impulsor mediante mecanismos robustos, con obligaciones específicas y/o instrumentos de prevención, monitoreo o control de mayor alcance.
10	Aborda el impulsor de manera integral, mediante obligaciones específicas articuladas con estándares, monitoreo, fiscalización y mecanismos de corrección, con un alcance territorial o ecosistémico.

Análisis teleológico

Para examinar la articulación entre la normativa ambiental aplicable a la salmonicultura y los impulsores directos de pérdida de biodiversidad definidos por la IPBES, se adoptó el enfoque de análisis teleológico propuesto por Öhlinger y Lehner (2025), las cuales establecen que la evaluación de un instrumento legal debe ir más allá de la mención explícita o literal de ciertos conceptos, interpretando las normas a la luz de sus fines, objetivos normativos y resultados esperados (*telos*).

Aunque el trabajo de Öhlinger y Lehner (2025) fue desarrollado originalmente para evaluar la alineación entre las políticas del “Pacto Verde Europeo” y la evidencia científica sobre biodiversidad establecido por IPBES, el procedimiento interpretativo resulta plenamente transferible al marco regulatorio chileno. Esto se debe a que la metodología opera de forma independiente de la jurisdicción o del contexto geográfico específico, al centrarse en la función sustantiva y en el alcance real de los instrumentos jurídicos.

En el contexto de esta investigación, el análisis teleológico se estructuró a través de tres dimensiones de evaluación para cada cuerpo normativo seleccionado:

- Objeto formal: Corresponde a la finalidad expresamente declarada en el texto legal (por ejemplo, en el artículo que define su objeto).
- Propósito (telos): Refleja el objetivo operativo real y el alcance práctico de las obligaciones, mecanismos e instrumentos que la norma establece.
- Evaluación teleológica: Representa el análisis crítico que contrasta la intención declarada del instrumento con su efectividad real para prevenir, mitigar o controlar el impulsor directo de pérdida de biodiversidad al que se vincula.

A través de este enfoque, fue posible analizar el grado de alineación del marco regulatorio de la salmonicultura en Chile frente a los impulsores directos de pérdida de biodiversidad definidos por la IPBES, contrastando su propósito formal con sus mecanismos operativos.

Proceso de codificación

La identificación de las categorías de motivadores de política y su vinculación con los impulsores de la IPBES se llevó a cabo mediante un procedimiento de codificación temática, tomando como base la clasificación conceptual desarrollada por Öhlinger y Lehner (2025). A partir de este esquema, se adaptaron las definiciones operativas de cada categoría con el fin de reflejar con precisión la naturaleza de los instrumentos jurídicos del marco regulatorio chileno y los impactos específicos de la salmonicultura sobre los ecosistemas marinos.

De este modo, los instrumentos normativos analizados se codificaron bajo las siguientes categorías de motivadores de política:

- **Gobernanza:** Instrumentos orientados a la creación de institucionalidad, definición de competencias administrativas y establecimiento de marcos generales de gestión ambiental, sin regular directamente los impactos operativos de la actividad productiva.
- **Protección:** Instrumentos orientados al resguardo de áreas geográficas, especies o ecosistemas marinos mediante mecanismos formales de conservación y preservación.
- **Apoyo:** Instrumentos que proveen información, generan sistemas de monitoreo o establecen procedimientos que facilitan la gestión ambiental, sin imponer por sí mismos obligaciones sustantivas de reducción de impacto.
- **Minimización:** Instrumentos orientados a prevenir, reducir, controlar o mitigar las presiones e impactos ambientales directos derivados del ejercicio de la actividad acuícola.
- **Restauración:** Instrumentos orientados a la recuperación, rehabilitación o remediación de ecosistemas, fondos marinos o componentes ambientales deteriorados por el desarrollo de la actividad.

A diferencia del marco original de Öhlinger y Lehner (2025), el cual contempla la categoría de Financiamiento para normativas que redirigen flujos de capital o incentivos económicos hacia la biodiversidad, esta categoría fue excluida del análisis final debido a que no se identificaron instrumentos jurídicos de esa índole dentro del conjunto de leyes y reglamentos seleccionados para la salmonicultura en Chile.

Análisis descriptivo-espacial de centros de salmonicultura

La metodología de análisis espacial se basó en la construcción de una base de datos georreferenciada de centros de salmonicultura, a partir de la capa "Concesiones de acuicultura" (2025), correspondiente a una cobertura vectorial de alcance nacional que incluye concesiones otorgadas y/o en trámite. Esta capa contenía un total de 4.738 registros para todo el país, de los cuales se seleccionaron únicamente aquellos centros localizados en la comuna de Cisnes, lo que resultó en un total de 386 centros de cultivo para el área de estudio. La base de datos no permitió distinguir entre concesiones otorgadas o en trámite y aquellas que se encontraban operativas durante 2025, por lo que el análisis representa la distribución de los registros contenidos en la capa y no necesariamente la distribución de centros en operación. El análisis correspondió exclusivamente a una evaluación espacial de la distribución de los registros para el año 2025, sin

considerar su evolución temporal. Las capas base utilizadas para la delimitación territorial y el análisis espacial fueron obtenidas desde el Geoportal de Chile y el Geoportal de SUBPESCA.

La información georreferenciada fue procesada mediante el programa QGIS versión 3.44.10, donde se descargó el complemento Spatial Analysis Toolbox para el posterior análisis espacial. El análisis se realizó mediante el Índice de Moran Local, con el objetivo de evaluar la existencia de autocorrelación espacial en la distribución de los centros de cultivo y determinar si esta presenta patrones agrupados, dispersos o aleatorios. Complementariamente, se aplicó el análisis LISA (Local Indicators of Spatial Association) utilizando el Índice de Moran Local para identificar agrupaciones espaciales locales o zonas de concentración (hotspots) de centros salmonicultores, permitiendo reconocer sectores con potenciales presiones ambientales sobre el medio marino.

Índice de Moran Global y Local

El análisis espacial se basó en una cuadrícula regular para evitar el sesgo asociado a la inclusión de áreas terrestres o zonas marinas no aptas para la acuicultura. Se definió un área de estudio mediante un buffer de 5 km alrededor de cada centro de cultivo, disolviendo los polígonos resultantes para obtener una superficie continua. Sobre esta área se superpuso una cuadrícula de celdas de 5 km × 5 km y se contabilizó el número de centros por celda (variable: NUMPOINTS). La resolución espacial de 5 km se seleccionó por su aproximación a la distancia mínima de 3 millas náuticas ($\approx 5,56$ km) establecida en el Reglamento de medidas de protección, control y erradicación de enfermedades de alto riesgo para las especies hidrobiológica (RESA) (D.S. N° 319) entre determinadas concesiones salmonicultoras, permitiendo analizar la distribución espacial de la actividad a una escala territorial consistente con un criterio regulatorio relevante para la industria.

Se calculó el Índice de Moran Global utilizando el complemento Spatial Analysis Toolbox de QGIS, con el criterio de vecindad Queen contiguity. Este índice varía entre -1 y $+1$, donde valores cercanos a $+1$ indican autocorrelación espacial positiva (aglomeración de centros con valores similares entre si), valores cercanos a -1 indican autocorrelación negativa (dispersión), y valores próximos a 0 sugieren ausencia de autocorrelación espacial (patrón aleatorio). De este modo, el índice permite evaluar si la distribución espacial de los centros de cultivo se ajusta a un patrón aleatorio o presenta un grado de agrupamiento estadísticamente significativo. Para complementar el análisis global e identificar la localización específica de los clusters espaciales

(High-High, Low-Low, High-Low, Low-High), se aplicó el análisis Índice de Moran Local sobre la misma capa y con el mismo criterio de vecindad.

RESULTADOS

Índice de Moran Global e Índice de Moran Local

El Índice de Moran Global fue de $I = 0,36$, con un estadígrafo de prueba $Z = 22,30$ ($p < 0,001$). Dado que el valor observado difiere significativamente del esperado bajo la hipótesis nula de ausencia de autocorrelación espacial, se rechaza la hipótesis de aleatoriedad y se concluye que los centros de cultivo presentan un patrón de agrupamiento espacial estadísticamente significativo.

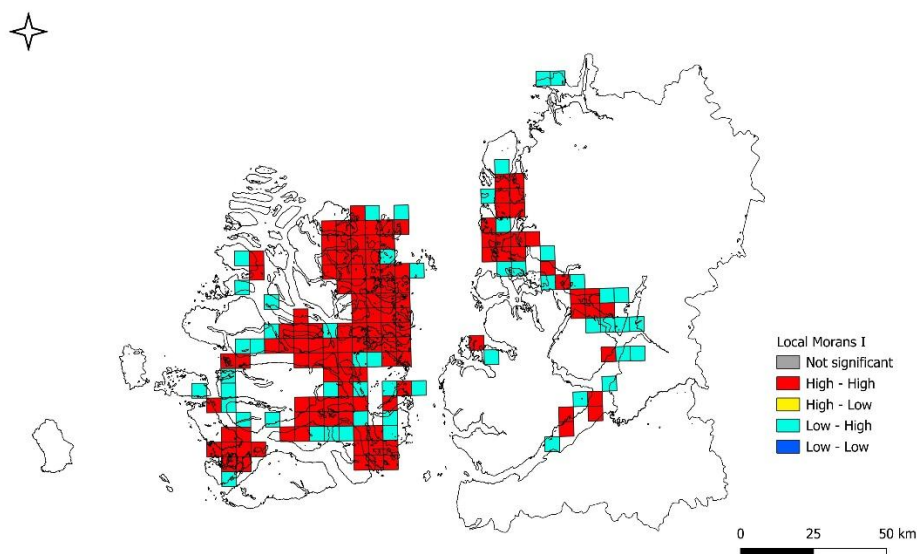


FIGURA 1

Mapa de clusters del Índice de Moran Local para centros de salmonicultura en la comuna de Cisnes.

Con el análisis del Índice de Moran Local, se evaluó la autocorrelación espacial de los centros de cultivo en la comuna de Cisnes. Se identificaron dos tipos de asociación espacial estadísticamente significativa en la comuna de Cisnes: High-High (HH) y Low-High (LH) (Figura 1). Las celdas clasificadas como HH corresponden a sectores con una alta concentración de centros de cultivo rodeados por celdas de similar concentración, evidenciando un agrupamiento espacial local significativo. Las celdas LH representan valores atípicos, donde áreas con baja concentración se encuentran rodeadas por sectores de alta concentración. No se detectaron agrupamientos

estadísticamente significativos de tipo Low-Low (LL) ni High-Low (HL) y el resto de las celdas no presentó una autocorrelación espacial local significativa.

Clasificación y análisis teleológico de instrumentos normativos chilenos aplicables a la salmonicultura

Para el análisis de los instrumentos normativos aplicables a la salmonicultura chilena se utilizaron las categorías definidas en la metodología y se vincularon con los cinco impulsores de pérdida de biodiversidad identificados por IPBES (Tabla 2).

TABLA 2

Instrumentos normativos del marco regulatorio chileno aplicable a la salmonicultura, categorizados según motivadores de política y vinculados con los impulsores IPBES de pérdida de biodiversidad.

Instrumento normativo	Categoría	Impulsor IPBES
Bases Generales del Medio Ambiente (Ley N° 19.300)	Gobernanza	Todos (indirecto)
Crea el Ministerio, el Servicio de Evaluación Ambiental y la Superintendencia del Medio Ambiente (Ley N° 20.417)	Gobernanza	Todos (indirecto)
Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (D.S. N°40, MMA)	Apoyo	Todos (indirecto)
Ley Marco de Cambio Climático (Ley N° 21.455)	Gobernanza	Cambio climático
Servicio de Biodiversidad y Áreas Protegidas y el Sistema Nacional de Áreas Protegidas (Ley N° 21.600)	Gobernanza Protección	Cambio de uso del mar Especies exóticas invasoras
Ley General de Pesca y Acuicultura (Ley N° 18.892 /D.S. N° 430/ Ley N°20.434)	Gobernanza Minimización	Cambio de uso del mar Explotación directa de organismos
Reglamento de Concesiones Y Autorizaciones de Acuicultura (D.S. N°290)	Gobernanza	Cambio de uso del mar
Reglamento de Medidas de Protección, Control y erradicación De Enfermedades De Alto Riesgo Para Las Especies Hidrobiológicas (D.S. N° 319)	Minimización	Contaminación Especies exóticas invasoras
Reglamento Ambiental para la Acuicultura (D.S. N° 320)	Minimización	Contaminación Especies exóticas invasoras
Reglamento sobre Plagas Hidrobiológicas (D.S. N° 345)	Minimización	Especies exóticas invasoras
Reglamento de control en línea de parámetros ambientales de las agrupaciones de concesiones de acuicultura (D.S. N°1)	Apoyo	Contaminación

Instrumento normativo	Categoría	Impulsor IPBES
Modifica la Ley General de Pesca y Acuicultura, con el objeto de exigir a los titulares de Concesiones de Acuicultura medidas para evitar o reducir el depósito de desechos inorgánicos y orgánicos (Ley N° 21.410)	Minimización Restauración	Contaminación

El análisis de los 12 instrumentos normativos seleccionados (Tabla 2) evidencia un dominio de las categorías de Gobernanza (n=6) y Minimización (n=5), frente a una representación marginal de Apoyo (n=2), Protección (n=1) y Restauración (n=1) y la ausencia de la categoría Financiamiento.

Respecto de los impulsores IPBES, al considerar tanto los instrumentos que los abordan de manera directa como aquellos que lo hacen de forma indirecta (Ley N° 19.300, Ley N° 20.417 y D.S. N° 40), la tabla muestra que los impulsores Contaminación y Especies exóticas invasoras cuentan con el mayor número de instrumentos asociados (n=7), seguidos por Cambio de uso del mar (n=5). Los impulsores Explotación directa de organismos y Cambio climático cuentan con la menor cantidad de instrumentos, con 4 asociados cada uno.

Sin considerar los instrumentos que se vinculan de forma indirecta, el número de instrumentos que abordan directamente cada impulsor es el siguiente: Contaminación (n=4), Especies exóticas invasoras (n=4), Cambio de uso del mar (n=3), Explotación directa de organismos (n=1) y Cambio climático (n=1).

Para el análisis teleológico de cada instrumento (Tabla 3), se identificó su objeto formal (declarado en el artículo que establece su finalidad), su propósito real (telos) y una evaluación teleológica que contrasta el diseño normativo con el fin que persigue.

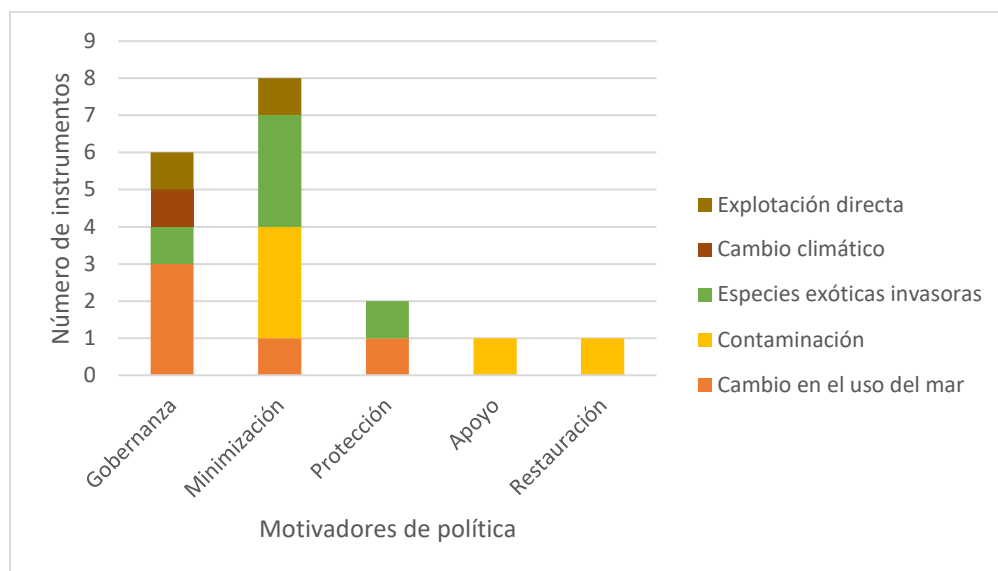


FIGURA 2

Distribución de las categorías de motivadores de política según los impulsores directos de pérdida de biodiversidad de la IPBES en la normativa ambiental y sectorial de la salmonicultura. Las barras representan la frecuencia de vinculaciones directas identificadas para cada categoría normativa (n=18 vinculaciones totales).

Debido a que algunos cuerpos legales abordan simultáneamente más de un impulsor de IPBES (Tabla 2), los 12 instrumentos generan un total de 18 vinculaciones directas (Figura 2). En este contexto, la categoría Minimización concentra la mayor frecuencia de vinculaciones (n=8), focalizándose operacionalmente en Contaminación (n=3) y Especies exóticas invasoras (n=3). Por su parte, la Gobernanza (n=6) se orienta principalmente al Cambio en el uso del mar (n=3). Esto evidencia un diseño normativo centrado fundamentalmente en la administración del espacio y el control operativo del riesgo, por sobre la conservación de la biodiversidad o restauración de los ecosistemas.

TABLA 3

Análisis teleológico de instrumentos normativos aplicables a la salmonicultura.

Instrumento normativo	Objeto formal	Propósito (telos)	Evaluación teleológica
Bases Generales del Medio Ambiente (Ley N° 19.300)	Art. 1°: "El derecho a vivir en un medio ambiente libre de contaminación, la protección del medio ambiente, la preservación de la naturaleza y la conservación del patrimonio ambiental..."	Crea un marco general habilitante para la evaluación de impacto ambiental (SEIA), normas de calidad y otros instrumentos de gestión, sin regular directamente las causas de pérdida de biodiversidad.	Su propósito es habilitar para la gobernanza, no regular directamente los impulsores IPBES. La efectividad dependerá de reglamentos y normas secundarias.
Crea el Ministerio, el Servicio de Evaluación Ambiental y la Superintendencia del Medio Ambiente (Ley N° 20.417)	Art. 1°: "Créase la Superintendencia del Medio Ambiente..." Art. 69°: "Créase el Ministerio del Medio Ambiente..." Art. 80°: "Créase el Servicio de Evaluación Ambiental..."	Dota al Estado de la capacidad técnica y fiscalizadora para la gestión ambiental mediante la creación del MMA, SEA y SMA.	Es un instrumento de gobernanza, cuyo propósito es la creación de instituciones, no aborda impulsores IPBES directamente.
Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (D.S. N°40, MMA)	Art. 1°: "El presente Reglamento establece las disposiciones por las cuales se regirá el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental..."	Establecer un procedimiento estandarizado para la evaluación de proyectos/actividades previo a su ejecución.	Instrumento de apoyo y diagnóstico. No fija estándares ni metas de reducción de impulsores IPBES.
Ley Marco de Cambio Climático (Ley N° 21.455)	Art. 1°: "La presente ley tiene por objeto hacer frente a los desafíos que presenta el cambio climático, transitar hacia un desarrollo bajo en emisiones de gases de efecto invernadero y otros forzantes climáticos, hasta alcanzar y mantener la neutralidad de emisiones de gases de efecto invernadero al año 2050..."	Crea un marco estratégico interministerial, obligando a todos los sectores a la adaptación y mitigación del cambio climático, mediante la Estrategia Climática de Largo Plazo (Art. 5) y Planes Sectoriales de Adaptación al Cambio Climático (art. 9).	Instrumento de gobernanza con potencial transformador. Su efectividad dependerá de la publicación y aplicación de los Planes Sectoriales de Adaptación al Cambio Climático.

Instrumento normativo	Objeto formal	Propósito (telos)	Evaluación teleológica
Servicio de Biodiversidad y Áreas Protegidas y el Sistema Nacional de Áreas Protegidas (Ley N° 21.600)	Art. 1°: "La presente ley tiene por objeto la conservación de la diversidad biológica y la protección del patrimonio natural del país, a través de la preservación, restauración y uso sustentable de genes, especies y ecosistemas." Art. 4°: "Créase el Servicio de Biodiversidad y Áreas Protegidas..." Art. 53°: "Créase el Sistema Nacional de Áreas Protegidas..."	Unifica la gestión de la biodiversidad mediante institucionalidad especializada: SBAP y SNAP. Dotando al estado de capacidad técnica y de gestión para la conservación.	Instrumento de protección y gobernanza con potencial transformador. Su propósito es la conservación y la institucionalidad, pero su aplicación en la salmonicultura (concesiones en áreas protegidas) dependerá de la categoría del área protegida, sus objetos de protección, los instrumentos de gestión aplicables y el grado de implementación de los respectivos planes de manejo.
Ley General de Pesca y Acuicultura (Ley N° 18.892 /D.S. N° 430/ Ley N°20.434)	Art. 1°: "A las disposiciones de esta ley quedará sometida la preservación de los recursos hidrobiológicos, y toda actividad pesquera extractiva, de acuicultura y de investigación se realice en aguas terrestres, playa de mar, aguas interiores, mar territorial o zona económica exclusiva..."	Regula y ordena el desarrollo pesquero y acuícola mediante concesiones, áreas de manejo, medidas sanitarias, ambientales y mitigación de escapes de ejemplares exóticos en cultivo.	Instrumento de gobernanza con enfoque de minimización y no de prevención ecológica. Falta de criterios ecosistémicos al definir las Áreas Apropriadas para el Ejercicio de la Acuicultura (AAA). Regulación de escape de EEI desde centros de cultivo se limita al control operativo y sanción, sin evaluación de impacto trófico y ecológico acumulativo sobre biodiversidad nativa.
Reglamento de Concesiones y Autorizaciones de Acuicultura (D.S. N°290)	Art. 3: "La concesión de acuicultura tienen por objeto la realización de actividades de cultivo en el área concedida, respecto de la especie o grupo de especies hidrobiológicas indicadas en las resoluciones que las otorgan, y permiten a sus titulares el desarrollo de sus actividades, sin más limitaciones que las expresamente establecidas en la ley y sus reglamentos."	Administrar el espacio marítimo para la acuicultura, definiendo las clases de concesiones, derechos de uso y goce sobre el borde costero para la producción industrial.	Instrumento de gobernanza, de carácter procedimental y administrativo. No incorpora como criterio para el otorgamiento o renovación de concesiones acuícolas la evaluación de pérdida de biodiversidad, remitiendo estas consideraciones a otros instrumentos sectoriales y ambientales.

Instrumento normativo	Objeto formal	Propósito (telos)	Evaluación teleológica
Reglamento de Medidas de Protección, Control y Erradicación de Enfermedades de Alto Riesgo para las Especies Hidrobiológicas (D.S. N° 319)	Título I, art. 1: “El presente reglamento establece las medidas de protección y control para evitar la introducción de enfermedades de alto riesgo que afectan a las especies hidrobiológicas, sea que provengan de la actividad de cultivo con cualquier finalidad o en su estado silvestre, aislar su presencia en caso de que éstas ocurran, evitar su propagación y propender a su erradicación.”	Controlar enfermedades en cultivos mediante medidas sanitarias, vigilancia epidemiológica y barreras sanitarias.	Minimización con enfoque sanitario, no ecológico de forma directa. Su propósito es la protección de los cultivos, mediante la prevención, control y erradicación de enfermedades de alto riesgo en la acuicultura. Sus medidas pueden generar beneficios ambientales indirectos, pero la conservación de la biodiversidad y de los ecosistemas marinos no constituye un objetivo del reglamento. Aborda de manera indirecta el consumo de antibióticos mediante indicadores, pero sin considerar sus efectos sobre el ambiente marino.
Reglamento Ambiental para la Acuicultura (D.S. N° 320) (RAMA)	Art. 1°: "Las disposiciones del presente Reglamento se aplicarán a todo tipo de actividad de acuicultura..."	Establece medidas de protección ambiental para que los establecimientos operen en niveles compatibles con la capacidad de carga de los cuerpos de agua, utilizando como instrumentos la Caracterización Preliminar de Sitio (CPS) y la Información Ambiental (INFA) (art. 3) Regula los escapes, pérdidas o desprendimientos de recursos hidrobiológicos como contingencias ambientales, estableciendo obligaciones de recaptura, notificación y reporte (art. 6).	Minimización parcial. El RAMA concentra sus mecanismos de control ambiental en los impactos bentónicos mediante indicadores asociados al sedimento. No incorpora criterios para la evaluación de efectos acumulativos sobre la columna de agua (eutrofización, antibióticos, etc), ni contempla la evaluación de impactos acumulativos al existir centros de cultivos circundantes en un área. Aunque el artículo 6° regula los escapes de especies exóticas mediante obligaciones de recaptura, notificación y reporte, no incorpora criterios para evaluar los efectos ecológicos de dichos escapes sobre la biodiversidad o el funcionamiento de los ecosistemas acuáticos.

Instrumento normativo	Objeto formal	Propósito (telos)	Evaluación teleológica
Reglamento sobre Plagas Hidrobiológicas (D.S. N° 345) (REPLA)	Art. 1°: "El presente reglamento tiene por objeto establecer las medidas de protección y control para evitar la introducción de especies que constituyan plagas hidrobiológicas, aislar su presencia, evitar su propagación y propender a su erradicación... No se considerarán plagas aquellas especies que sean objeto de una medida de administración pesquera, se encuentren amparadas por alguna categoría de protección oficial..."	Control de plagas hidrobiológicas definidas en el reglamento como especies que no son objeto de cultivo o administración pesquera y cuya proliferación puede ocasionar prejuicios.	Minimización con enfoque en control sanitario-productivo. El REPLA se orienta al control de plagas hidrobiológicas que puedan afectar a la producción acuícola. No constituye un instrumento destinado a regular escapes de salmónidos cultivados.
Reglamento de Control en Línea de Parámetros Ambientales de las Agrupaciones de Concesiones de Acuicultura (D.S. N°1)	Art. 1: "El presente reglamento establece los requisitos y condiciones del sistema de monitoreo o control en línea de los parámetros ambientales de las agrupaciones de concesiones, lo que comprenderá los componentes necesarios para la recopilación de las variables de interés, la recepción y transmisión de dichas variables, el almacenamiento y procesamiento de la información."	Establecer sistema permanente de monitoreo y control en línea de los parámetros ambientales de las Agrupaciones de Concesiones de Acuicultura (ACS), mediante la recopilación, transmisión, almacenamiento y procesamiento de información ambiental, con el propósito de fortalecer el seguimiento y fiscalización de las condiciones ambientales de las ACS.	Instrumento de apoyo sin capacidad de respuesta. Su propósito principal es el monitoreo continuo de las condiciones ambientales de las ACS, pero no establece umbrales de alerta ni medidas correctivas. Reglamento no vincula el monitoreo con mecanismos de gestión ambiental enfocados a la prevención o mitigación de daños a la biodiversidad.

Instrumento normativo	Objeto formal	Propósito (telos)	Evaluación teleológica
Modifica la Ley General de Pesca y Acuicultura, con el objeto de exigir a los titulares de Concesiones de Acuicultura medidas para evitar o reducir el depósito de desechos inorgánicos y orgánicos (Ley N° 21.410)	Art. 74 bis: " El titular de la concesión de acuicultura o quien tenga un derecho sobre dicha concesión para el ejercicio de la actividad en ella deberá adoptar las medidas para evitar el depósito de desechos inorgánicos en el fondo de la concesión." Artículo 74 ter: "El titular de la concesión de acuicultura o quien tenga un derecho sobre dicha concesión para el ejercicio de la actividad en ella deberá adoptar las medidas para evitar o reducir, según corresponda, conforme lo disponga el reglamento, el depósito de desechos orgánicos en el fondo de la concesión. Para tales efectos, deberá presentar un plan de recuperación y un plan de investigación del fondo marino en el área de la concesión"	Prevenir, corregir y mitigar impactos ambientales acumulativos generados por actividad acuícola sobre el fondo marino, mediante la eliminación de desechos inorgánicos, reducción de acumulación de desechos orgánicos e implementación de medidas de restauración e investigación del fondo marino.	Minimización y restauración focalizada. Su propósito es correctivo, sin embargo, su alcance se centra solo en impactos bentónicos dentro de la concesión, sin considerar la dispersión de contaminantes fuera del área de influencia del proyecto.

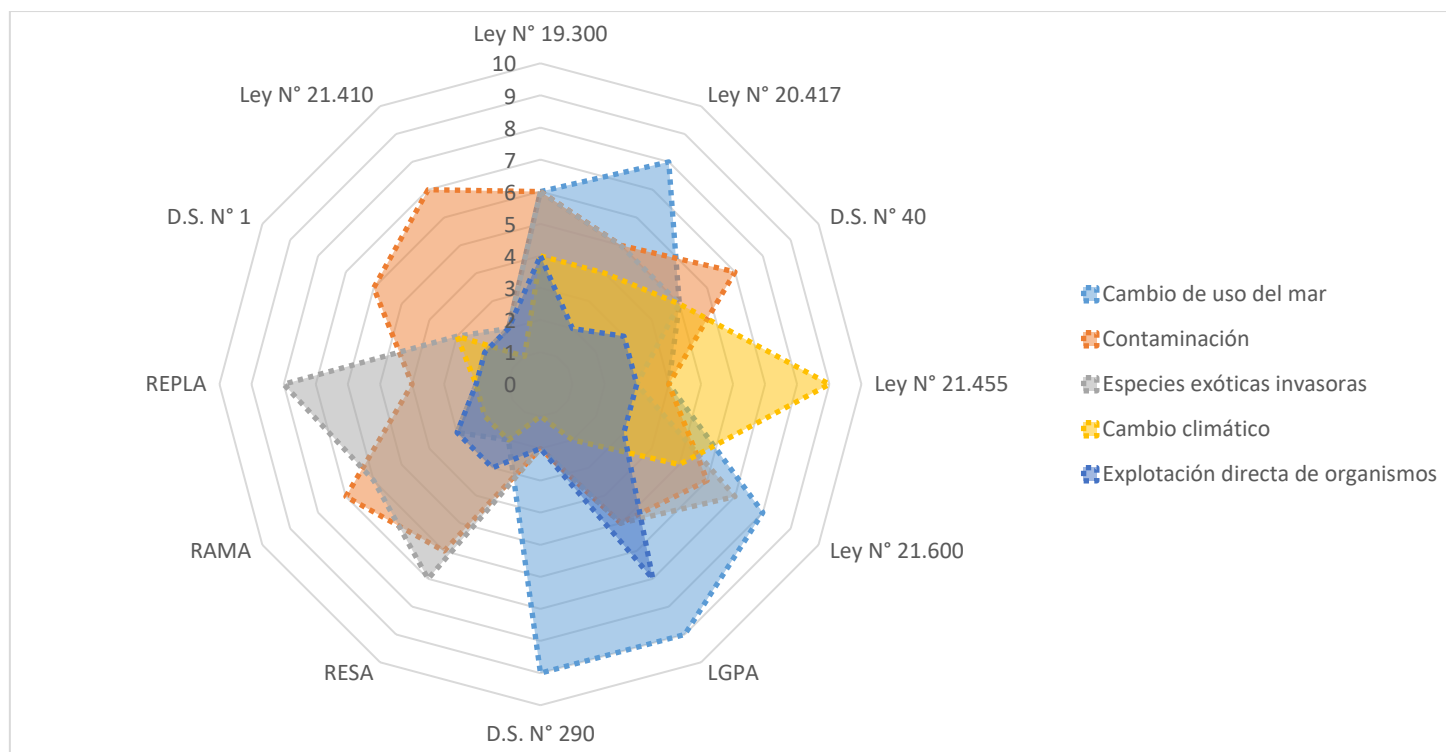


FIGURA 3

Gráfico radar de la cobertura normativa de los instrumentos aplicables a la salmonicultura frente a los impulsores directos de pérdida de biodiversidad de IPBES. Cada eje representa un impulsor IPBES. Cada línea poligonal corresponde a un instrumento normativo: la Ley N° 19.300 (Bases Generales del Medio Ambiente), la Ley N° 20.417 (creación del MMA, SEA y SMA), el D.S. N° 40 (Reglamento del SEIA), la Ley N° 21.455 (Ley Marco de Cambio Climático), la Ley N° 21.600 (Servicio de Biodiversidad y Áreas Protegidas), la Ley N° 18.892/D.S. N° 430 (Ley General de Pesca y Acuicultura), el D.S. N° 290 (Reglamento de Concesiones y Autorizaciones de Acuicultura), el D.S. N° 319 (RESA, medidas sanitarias para enfermedades de alto riesgo), el D.S.

N° 320 (RAMA, Reglamento Ambiental para la Acuicultura), el D.S. N° 345 (REPLA, Reglamento sobre Plagas Hidrobiológicas) y el D.S. N° 1 (monitoreo en línea de parámetros ambientales en ACS).

El gráfico radar (Figura 3) muestra la cobertura normativa de los 12 instrumentos frente a los cinco impulsores IPBES. En el impulsor Cambio de uso del mar, los puntajes más altos corresponden a la LGPA y al D.S. N° 290 (9 cada uno), seguidos por la Ley N° 20.417 y la Ley N° 21.600 (8). En Contaminación, destacan el D.S. N° 40, el RAMA y la Ley N° 21.410 (7), junto al RESA y la Ley N° 21.600 (6). Para impulsor Especies exóticas invasoras, el REPLA (8) y el RESA (7) presentan los mayores puntajes. El Cambio climático muestra una cobertura dominada por la Ley N° 21.455 (9), con el resto de los instrumentos entre 1 y 5. Finalmente, En el impulsor Explotación directa de organismos, la LGPA destaca con 7 puntos, mientras que el resto de los instrumentos se ubica entre 2 y 4. En conjunto, los impulsores Contaminación y Especies exóticas invasoras, concentran la mayor cobertura normativa y están asociados a múltiples instrumentos sectoriales, mientras que Cambio climático y Explotación directa presentan una cobertura reducida y concentrada en pocos cuerpos normativos.

DISCUSIÓN

Evaluación espacial y normativa de la salmonicultura frente a la pérdida de biodiversidad marina

Patrones de aglomeración territorial y concentración espacial de la salmonicultura en la comuna de Cisnes

En la comuna de Cisnes, el Índice de Moran Global evidenció un patrón de agrupamiento espacial estadísticamente significativo de los centros de salmonicultura ($I = 0,36$; $Z = 22,30$). En la planificación espacial de la acuicultura marina, la incorporación de medidas de autocorrelación espacial aporta una lectura objetiva del patrón territorial, reduciendo la incertidumbre y brindando un enfoque empírico basado en datos para la interpretación de las decisiones de emplazamiento (Jossart et al., 2020). Este resultado es consistente con la literatura que describe una autocorrelación espacial y una tendencia histórica en la concentración de la acuicultura en el sur Austral de Chile. Asimismo, coincide con estudios que señalan que las decisiones de localización de centros acuícolas responden, en gran medida, a factores institucionales, cambios regulatorios y a la proximidad entre centros con cultivos similares, más que a una distribución homogénea en el territorio (Baquedano et al., 2025; Engler, 2024; Estay & Chávez, 2017; Naylor et al., 2023).

A escala local, la ausencia de clusters Low-Low y High-Low en el Índice de Moran Local sugiere que, en la comuna de los Cisnes, la distribución de los centros de salmonicultura no configura áreas periféricas de baja densidad ni transiciones espaciales marcadas entre sectores intensamente ocupados y sectores escasamente utilizados. Este resultado es consistente con evidencia que describe un desarrollo territorial de la acuicultura chilena basado en enclaves geográficos y alta concentración comunal, donde las concesiones tienden a agruparse en zonas específicas del espacio costero (Estay & Chávez, 2017).

Este patrón se puede vincular con el marco institucional del ordenamiento costero, como “La Política Nacional de Uso del Borde Costero” de 1994 que buscó ordenar las actividades litorales mediante la zonificación (Molinet et al., 2014) y desde mediados de los noventa se establecieron las Áreas Apropriadadas para el Ejercicio de la Acuicultura (AAA) como el principal instrumento sectorial para la localización de concesiones en áreas oficialmente designadas para la actividad

acuícola, donde en la Región de Aysen el proceso de planificación costera surgió como respuesta a la expansión acelerada de la salmonicultura; esto refuerza la idea de que la concentración de concesiones no responde solo a ventajas naturales del sitio de emplazamiento del proyecto, sino también a decisiones regulatorias acumuladas y a un marco de planificación fragmentado y con oportunidades para integrar criterios ecosistémicos (Engler, 2024; Santelices, 2024).

Adicionalmente, la relevancia económica alcanzada por la actividad en la comuna de Cisnes, la cual registra los mayores ingresos anuales derivados de la salmonicultura en comparación con comunas pares, probablemente ha consolidado dicha persistencia espacial y su incidencia en los cambios territoriales locales (Bachmann-Vargas et al., 2021; Ceballos-Concha et al., 2025).

En síntesis, los resultados obtenidos evidencian una concentración espacial estadísticamente significativa de los centros de cultivo en la comuna de Cisnes para el período representado en este estudio. La presencia de agrupamientos High-High permite identificar sectores donde la intensidad de ocupación acuícola es espacialmente elevada y donde, por tanto, resulta pertinente considerar una escala territorial de gestión ambiental. No obstante, debido a que el análisis se realizó sobre una base espacial correspondiente al año 2025 y no incorporó una comparación temporal, estos resultados no permiten determinar la trayectoria histórica de dicha concentración ni establecer si los patrones observados corresponden a un proceso reciente, persistente o creciente en el tiempo. Las referencias a la evolución histórica de la ocupación acuícola deben entenderse, por tanto, como antecedentes provenientes de la literatura y no como resultados directamente demostrados por el análisis espacial desarrollado en esta investigación.

Brechas de la normativa sectorial ante la alta concentración espacial de la actividad salmonera en la comuna de Cisnes

La aglomeración espacial de centros de cultivo observada en la comuna de Cisnes (Figura 1) constituye una demostración de las limitaciones estructurales del marco normativo vigente. Como se detalla en la Tabla 2, la predominancia de instrumentos clasificados bajo la categoría gobernanza (p. ejem. D.S. N° 290) y apoyo (p. ejem. D.S. N°40), se encuentran orientados a la administración y evaluación de proyectos de forma individual, lo que ha facilitado administrativamente una alta concentración espacial de la salmonicultura. Al abordar el impulsor cambio de uso del mar sin integrar criterios como la capacidad de carga, la normativa promueve una ocupación territorial que omite la evaluación de impactos acumulativos (Niklitschek et al., 2013; Quiñones et al., 2019).

Asimismo, la clasificación basada en motivadores de política (Tabla 2) evidencia la escasez de normativa orientada a la protección y restauración de la biodiversidad marina, consolidando un modelo de gestión casi exclusivo en la minimización operativa. Normativas como el Reglamento Ambiental para la Acuicultura (D.S. N° 320) y la Ley N° 21.410 abordan el impulsor de contaminación restringiendo sus mecanismos de control al depósito de residuos bentónicos en el área específica de la concesión. De manera análoga, el control del impulsor de especies exóticas invasoras mediante los reglamentos sanitarios (D.S. N° 319) y de plagas (D.S. N° 345) operan bajo una lógica de contingencia y bioseguridad, pero no incorporando criterios para la protección de la biodiversidad.

En ecosistemas con alta concentración productiva como Cisnes, este enfoque de minimización plantea desafíos para la gestión de las descargas químicas, orgánicas y tróficas que pueden interactuar en áreas circundantes. En consecuencia, el patrón territorial observado en la comuna de Cisnes sugiere que un marco regulatorio estructurado sobre la habilitación espacial (gobernanza) y el control individual de contingencias (minimización) puede presentar limitaciones frente a la expansión intensiva de la industria. Si bien el SEIA incorpora actualmente criterios metodológicos para la consideración de impactos acumulativos y sinérgicos, estos se aplican en el marco de la evaluación ambiental de proyectos y no sustituyen necesariamente una gestión territorial integrada de la actividad acuícola. Esta articulación limitada entre los instrumentos vigentes y los impulsores de pérdida de biodiversidad de la IPBES plantea la necesidad de avanzar hacia políticas de gestión ambiental que incorporen de manera más explícita la evaluación de impactos acumulativos en el ordenamiento territorial acuícola.

Clasificación y análisis teleológico de instrumentos normativos chilenos aplicables a la salmonicultura

Limitaciones estructurales del marco regulatorio

El análisis de los instrumentos regulatorios aplicables a la salmonicultura (Tabla 2) evidencia que el marco normativo se estructura mayoritariamente en torno a la gobernanza institucional y la minimización operativa a escala de proyecto, sin evidenciar, desde su diseño normativo, mecanismos suficientes para asegurar una protección ecosistémica integral. Estas estructuras de gobernanza son necesarias, pero insuficientes debido a su carácter fragmentado, reactivo y

sectorial, donde han sido modificadas en respuesta a crisis sanitarias y productivas, antes que para establecer límites ecológicos de carácter preventivo (Bachmann-Vargas et al., 2021; Bustos-Gallardo & Irarrázaval, 2022; Engler, 2024; Falconer et al., 2023).

En conjunto, las Tablas 1, 2 y 3 muestran que el marco regulatorio aplicable a la salmonicultura comprende instrumentos de distinta naturaleza y alcance, que abarcan desde la habilitación y administración del espacio marino, hasta la evaluación ambiental, el control sanitario y el monitoreo de las condiciones ambientales. La clasificación según motivadores de política evidencia una predominancia de instrumentos asociados a la gobernanza y la minimización, mientras que el análisis teleológico permite observar que una parte importante de estas normas fue diseñada para ordenar la actividad, controlar riesgos operacionales o corregir impactos específicos, más que para abordar de manera integral los impulsores de pérdida de biodiversidad a escala ecosistémica. En este sentido, las tres tablas permiten complementar la identificación de los instrumentos con una evaluación de su orientación y alcance, evidenciando una articulación parcial entre la regulación de la actividad y una gestión integral de la biodiversidad marina.

La institucionalidad ambiental y sanitaria de la salmonicultura ha fortalecido la coordinación administrativa, la vigilancia y la reorganización productiva (especialmente con posterioridad a la crisis del virus ISA) mediante la creación de las ACS (Ley N.º 20.434), el establecimiento de medidas de manejo sanitario por área (D.S. N.º 319) y el fortalecimiento de las medidas de control sanitario y de bioseguridad (Ley N.º 20.434 y D.S. N.º 319). No obstante, este fortalecimiento se ha orientado principalmente a asegurar la continuidad productiva y al manejo del riesgo operativo de la actividad (Bachmann-Vargas et al., 2021; Chávez et al., 2019; Engler, 2024).

La principal limitación de este marco regulatorio radica en que continúa abordando predominantemente los impactos ambientales a escala local, con especial énfasis en las condiciones del fondo marino bajo las concesiones. Si bien la Ley N.º 21.410 reforzó las obligaciones relativas a prevención, reducción y recuperación de los impactos sobre el fondo de la concesión, y el D.S. N.º 1 incorporó el monitoreo en línea de parámetros ambientales para las ACS, el marco regulatorio aún no incorpora adecuadamente una evaluación de los efectos acumulativos, sinérgicos y territoriales. Cabe señalar que este análisis se circunscribió a leyes y reglamentos aplicables a la salmonicultura. No obstante, actualmente el SEA cuenta con metodologías para la consideración de impactos acumulativos y sinérgicos en el SEIA, las cuales no fueron incorporadas en las Tablas

1, 2 y 3 por encontrarse fuera del alcance normativo definido para esta investigación. En concordancia con ello, la literatura reporta una limitada comprensión de los efectos acumulativos derivados de múltiples centros de cultivo en un mismo fiordo o canal, debido a que la capacidad de carga continúa estimándose principalmente a escala de centro de cultivo, sin evaluaciones integradas para el sistema acuático en su conjunto (Buschmann et al., 2009; Galparsoro et al., 2020; Quiñones et al., 2019). La regulación ha evolucionado significativamente en materia sanitaria y de monitoreo, pero esa evolución no ha ido acompañada de un cambio equivalente hacia una gestión ambiental a escala ecosistémica.

Coherencia del marco regulatorio chileno frente a los impulsores directos de pérdida de biodiversidad del IPBES

El análisis y evaluación teleológica (Tabla 2 y 3) muestra que la relación entre el marco regulatorio y los impulsores de pérdida de biodiversidad de IPBES es parcial, no por la falta de normativa, sino porque la finalidad efectiva ha sido principalmente sanitaria, operativa y de habilitación productiva, mientras que la mitigación de presiones ecosistémicas acumulativas permanece débil. El gráfico radar (Figura 3) muestra que los puntajes más altos se concentran en los impulsores Contaminación y Especies exóticas invasoras, principalmente asociados a instrumentos de minimización como el RAMA y el RESA.

En el impulsor cambio de uso del mar, la literatura coincide que la problemática principal no radica únicamente en la ocupación del espacio, si no la concentración territorial de los centros acuícolas y sus actividades asociadas (Martínez et al., 2024; Niklitschek et al., 2013; Quiñones et al., 2019). Bajo esta premisa, el análisis teleológico evidencia que la gobernanza chilena mediante instrumentos de zonificación y habilitación administrativa como la LGPA, el Reglamento de Concesiones (D.S. N° 290) y la evaluación proyecto en el SEIA (D.S. N° 40) favorecen la habilitación del espacio marino, sin resolver los efectos acumulativos de múltiples concesiones sobre un mismo sistema costero (Anbleyth-Evans et al., 2020; Buschmann et al., 2009). Al contrastar el marco regulatorio con los resultados espaciales de este estudio, la significativa aglomeración territorial (clusters High-High) (Figura 1) documentada en la comuna de Cisnes evidencia que la institucionalidad no logra prevenir una alta concentración territorial de centros de cultivo. El alto puntaje de la LGPA y el D.S. N° 290 en el impulsor Cambio de uso del mar (Figura 3) es consistente con la aglomeración espacial observada (Figura 1), ya que ambos instrumentos

facilitan la habilitación y administración del espacio marino-costero sin incorporar criterios de capacidad de carga.

Respecto al impulsor de contaminación, el marco regulatorio aborda los impactos desde un enfoque fragmentado y a escala local. Mientras el SEIA (D.S. N° 40) evalúa cada proyecto de forma aislada, normativas operativas como el RAMA y la Ley N° 21.410 concentran sus mecanismos de prevención exclusivamente en el componente bentónico y el depósito físico de desechos. Paralelamente, el monitoreo y el manejo sanitario (D.S. N° 1 y D.S. N° 319) se limitan a gestionar el riesgo operativo sectorial. Al evaluar la contaminación de forma aislada y focalizada en los sedimentos (mediante las INFA), el marco regulatorio consolida un control centrado en el bentos y en el depósito local de residuos. Sin embargo, esta aproximación carece de coherencia ecosistémica, por la ausencia de límites basados en la capacidad de carga del cuerpo de agua completo (Quiñones et al., 2019). En consecuencia, al omitir efectos químicos y biológicos a mayor escala (Anbleyth-Evans et al., 2020; Bachmann-Vargas et al., 2021), marginando la eutrofización como un riesgo relevante, además de alteraciones en las comunidades bacterianas superficiales, el aumento de genes de resistencia y cambios tróficos asociados a los residuos disueltos y particulados (Montero et al., 2022; Ortiz et al., 2021; Ortiz-Severín et al., 2024; Quiñones et al., 2019).

El caso de las especies exóticas invasoras, el análisis teleológico evidencia que normativas como la LGPA, el RAMA y los reglamentos sanitarios (D.S. N° 319 y 345) abordan principalmente al control sanitario, la recaptura y la reducción de pérdidas productivas. Este enfoque operativo contrasta con la literatura, la cual enfatiza riesgos de depredación, competencia, transmisión de patógenos y alteraciones tróficas sobre la biodiversidad nativa (Cid-Aguayo et al., 2024; Quiñones et al., 2019; Sepúlveda et al., 2013). Además, el riesgo de escapes no es homogéneo, aumentando en zonas de alta intensidad productiva (como los clusters High-High) (Figura 1) y menor capacidad de mitigación, donde existen hábitats aptos para la reproducción y crianza de salmónidos no nativos (Niklitschek et al., 2013; Soto et al., 2023). Por lo tanto, tratar a estas especies solo como una contingencia de bioseguridad o pérdida de biomasa comercial subestima su capacidad real como impulsor de alteraciones sobre la biodiversidad frente a los criterios de IPBES.

Con relación al impulsor cambio climático, la literatura constata que representa una amenaza multidimensional en para la salmonicultura, donde impulsores físicos, biológicos y regulatorios interactúan de forma sinérgica. El aumento en la temperatura superficial del mar, la acidificación

del océano y el aumento en eventos climáticos extremos son estresores que afectan directamente el rendimiento productivo y de salud de los peces (Reid et al., 2019; Soto et al., 2019; Yáñez et al., 2017). El aumento de la temperatura en el mar tiene múltiples efectos sobre la industria, reduce la disponibilidad de oxígeno comprometiendo el desempeño fisiológico del cultivo al elevar la demanda fisiológica de este (Rowley et al., 2024; Soto et al., 2019), aumenta eventos de FANs (León-Muñoz et al., 2018), facilita la expansión de parásitos hacia zonas más australes (Lepe-Lopez et al., 2021; Mackintosh et al., 2025), entre otros efectos. En el análisis teleológico (Tabla 3), aunque la Ley Marco de Cambio Climático (Ley N° 21.455) establece directrices de resiliencia frente a estas problemáticas y contempla la elaboración de un plan de adaptación al cambio climático para pesca y acuicultura, y el SEA contempla en su evaluación ambiental la guía metodológica para la consideración del cambio climático en el SEIA, estos instrumentos no fueron incorporados en el análisis debido a que el alcance de esta Memoria de Título se circunscribió a leyes y reglamentos aplicables a la salmonicultura. En este sentido, los planes sectoriales constituyen instrumentos relevantes para complementar la gestión preventiva frente a los efectos del cambio climático, pero su análisis excede el alcance normativo definido para esta investigación. A nivel espacial, la zonificación bajo la Ley General de Pesca y Acuicultura (LGPA) no permite relocalizaciones preventivas frente a la pérdida de oxígeno o al riesgo climático. Ante esta inmovilidad espacial, el manejo normativo recae principalmente en la contingencia, donde instrumentos operativos como el RAMA (D.S. N° 320) y el Reglamento Sanitario (D.S. N° 319) actúan posterior al evento, focalizándose en la disposición de mortalidades masivas y el control de contaminantes.

Respecto al impulsor de explotación directa de organismos, este fue excluido de la presente discusión dado que el alcance metodológico de esta investigación se restringe a la gobernanza ambiental in situ de los centros de cultivo y sus impactos espaciales directos. Al tratarse de un factor asociado mayoritariamente a presiones tróficas indirectas, como la cadena de suministro de insumos y no a los efectos territoriales del funcionamiento operativo evaluado en las concesiones, su análisis escapa a los límites de esta memoria.

Implicancias de la evidencia espacial para la toma de decisiones y la gestión institucional

Los patrones de aglomeración espacial identificados en la comuna de Cisnes no solo evidencian una concentración productiva relevante desde el punto de vista territorial, sino que también constituyen un insumo relevante para la gestión ambiental, al permitir focalizar territorios donde la evaluación ambiental basada en proyectos individuales resulta insuficiente. Esta lectura es coherente con el marco de la IPBES, donde para revertir estas tendencias se necesitan respuestas de políticas basadas en evidencia y aplicadas especialmente a escalas territoriales (Ruckelshaus et al., 2020).

En este contexto, los resultados pueden aportar al MMA y al SEA en el fortalecimiento de metodologías que incorporen impactos sinérgicos, criterios de capacidad de carga, adaptación al cambio climático y seguimiento territorial, ámbitos que la literatura identifica como déficits persistentes del sistema regulatorio chileno (Engler, 2024; Reicher et al., 2024; Rodríguez-Luna et al., 2021). Estos desafíos pueden ser abordados mediante el enfoque ecosistémico para la acuicultura propuesto por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (Aguilar-Manjarrez et al., 2018), el cual promueve una planificación espacial que considere la capacidad de carga ecológica y social y la gestión a escala de áreas. En la misma línea, Soto et al. (2026) proponen un sistema de semáforo productivo que a partir de indicadores de presión productiva y sensibilidad del ecosistema, permite clasificar áreas para aumentar, mantener o reducir la producción, ofreciendo un mecanismo concreto para traducir el análisis espacial en decisiones de gestión (Soto et al., 2026). Asimismo, los resultados pueden servir como base para instrumentos de planificación y ordenamiento espacial acuícola más preventivos, en línea con enfoques de planificación marina ecosistémica que permiten comparar escenarios, evitar la sobre concentración de concesiones acuícolas y traducir la evidencia en decisiones regulatorias más transparentes y trazables.

Desde esta perspectiva, los resultados obtenidos pueden ser útiles para organismos como el MMA, el SEA y el SBAP, ya que entregan una base para fortalecer instrumentos de evaluación y planificación que incorporen impactos acumulativos, articulen ciencia y política, y orienten decisiones de ordenamiento acuícola más preventivas y con carácter ecosistémico para el uso sustentable del medio ambiente. De este modo, articular la evidencia espacial con instrumentos de

gestión concretos permite superar la fragmentación institucional, dotando al Estado de los mecanismos y recursos técnicos indispensables para resguardar la capacidad de carga de los ecosistemas patagónicos.

En conjunto, los hallazgos de esta investigación permiten abordar la problemática planteada al evidenciar que la salmonicultura en la comuna de Cisnes presenta una distribución espacial agrupada y que el marco regulatorio vigente, si bien dispone de instrumentos para ordenar, evaluar, monitorear y controlar distintos aspectos de la actividad, presenta una articulación limitada entre estos instrumentos y una gestión de la biodiversidad a escala territorial. La integración del análisis espacial con la revisión normativa y el análisis teleológico permite identificar sectores donde la concentración de centros de cultivo constituye un antecedente relevante para fortalecer la gestión ambiental, orientando futuras evaluaciones hacia una escala que considere la interacción entre múltiples centros y las características del sistema marino receptor. De esta manera, los resultados pueden ser utilizados como insumo para mejorar la planificación espacial de la actividad, fortalecer el seguimiento ambiental territorial y apoyar la incorporación de criterios ecosistémicos y de efectos acumulativos en la toma de decisiones, contribuyendo a compatibilizar el desarrollo de la salmonicultura con la conservación de la biodiversidad marina en la comuna de Cisnes.

CONCLUSIONES

1. La presente memoria de título permitió analizar la gestión ambiental de la biodiversidad asociada a la salmonicultura en la comuna de Cisnes mediante el análisis espacial de los centros de cultivo y la evaluación teleológica del marco normativo vigente. Los resultados evidenciaron un patrón de concentración espacial estadísticamente significativo, asociado a la ocupación territorial de la actividad.
2. El análisis de los instrumentos normativos evidenció una predominancia de mecanismos de gobernanza y minimización frente a los impulsores directos de pérdida de biodiversidad identificados por IPBES. Asimismo, se observó una incorporación limitada de criterios ecosistémicos asociados a la protección y restauración de la biodiversidad, la capacidad de carga, la planificación territorial y los impactos acumulativos.
3. En conjunto, los resultados muestran que la gestión ambiental de la salmonicultura ha fortalecido la gobernanza y el control operativo, pero mantiene desafíos para avanzar hacia una gestión preventiva e integral de la biodiversidad. En este contexto, la implementación del Servicio de Biodiversidad y Áreas Protegidas constituye una oportunidad para fortalecer la incorporación de criterios ecosistémicos y la articulación entre conservación de la biodiversidad y gestión sectorial.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abisha, R., Krishnani, K. K., Sukhdhane, K., Verma, A. K., Brahmane, M., & Chadha, N. K. (2022). Sustainable development of climate-resilient aquaculture and culture-based fisheries through adaptation of abiotic stresses: A review. *Journal of Water and Climate Change*, 13(7), 2671–2689. <https://doi.org/10.2166/wcc.2022.045>
- Adams, T., Black, K., Black, K., Carpenter, T., Hughes, A., Reinardy, H., & Weeks, R. (2020). Parameterising resuspension in aquaculture waste deposition modelling. *Aquaculture Environment Interactions*, 12, 401–415. <https://doi.org/10.3354/aei00372>
- Aguilar-Manjarrez, J., Soto, D. y Brummett, R. 2018. Zonificación acuícola, selección de sitios y áreas de manejo bajo el enfoque ecosistémico a la acuicultura. Un manual. Informe ACS18071. Roma, FAO y el Grupo del Banco Mundial, Washington DC. 62 pp. (395 pp.). Licencia: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.
- Anbleyth-Evans, J., Araos Leiva, F., Ther Rios, F., Segovia Cortés, R., Häussermann, V., & Aguirre-Munoz, C. (2020). Toward marine democracy in Chile: Examining aquaculture ecological impacts through common property local ecological knowledge. *Marine Policy*, 113, 103690. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2019.103690>
- Avendaño-Herrera, R., Mancilla, M., & Miranda, C. D. (2023). Use of antimicrobials in Chilean salmon farming: Facts, myths and perspectives. *Reviews in Aquaculture*, 15(1), 89–111. <https://doi.org/10.1111/raq.12702>
- Bachmann-Vargas, P., van Koppen, C. S. A. (Kris), & Lamers, M. (2021). Re-framing salmon aquaculture in the aftermath of the ISAV crisis in Chile. *Marine Policy*, 124, 104358. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2020.104358>

- Baquedano, M., Chávez, C., Dresdner, J., & Eggert, H. (2025). The rise of mussel aquaculture in Chile: Causes, effects, and challenges. *Reviews in Aquaculture*, 17(3), e70045. <https://doi.org/10.1111/raq.70045>
- Barton, J. R. (1997). Environment, sustainability and regulation in commercial aquaculture: The case of Chilean salmonid production. *Geoforum*, 28(3–4), 313–328. [https://doi.org/10.1016/S0016-7185\(97\)00013-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7185(97)00013-4)
- Bath, G. E., Price, C. A., Riley, K. L., & Morris, J. A. (2023). A global review of protected species interactions with marine aquaculture. *Reviews in Aquaculture*, 15(4), 1686–1719. <https://doi.org/10.1111/raq.12811>
- Beauchesne, D., Cazelles, K., Daigle, R. M., Gravel, D., & Archambault, P. (2025). Ecological interactions amplify cumulative effects in marine ecosystems. *Science AdvAnceS*.
- Bojarski, B., Kot, B., & Witeska, M. (2020). Antibacterials in aquatic environment and their toxicity to fish. *Pharmaceuticals*, 13(8), 189. <https://doi.org/10.3390/ph13080189>
- Bravo, S., Whelan, K., Diaz, Y., & Silva, M. T. (2023). Causal analysis of escapement of farmed salmonids in southern Chile. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 51(3), 363–378. <https://doi.org/10.3856/vol51-issue3-fulltext-3005>
- Buchmann, K. (2022). Control of parasitic diseases in aquaculture. *Parasitology*, 149(14), 1985–1997. <https://doi.org/10.1017/S0031182022001093>
- Buschmann, A. H., Cabello, F., Young, K., Carvajal, J., Varela, D. A., & Henríquez, L. (2009). Salmon aquaculture and coastal ecosystem health in Chile: Analysis of regulations, environmental impacts and bioremediation systems. *Ocean & Coastal Management*, 52(5), 243–249. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2009.03.002>

- Buschmann, A. H., & Fortt, A. (2005). *Efectos ambientales de la acuicultura intensiva y alternativas para un desarrollo sustentable*. 21(3), 58–64.
- Buschmann, A. H., Riquelme, V. A., Hernández-González, M. C., Varela, D., Jiménez, J. E., Henríquez, L. A., Vergara, P. A., Guíñez, R., & Filún, L. (2006). A review of the impacts of salmonid farming on marine coastal ecosystems in the southeast Pacific. *ICES Journal of Marine Science*, 63(7), 1338–1345. <https://doi.org/10.1016/j.icesjms.2006.04.021>
- Buschmann, A. H., Tomova, A., López, A., Maldonado, M. A., Henríquez, L. A., Ivanova, L., Moy, F., Godfrey, H. P., & Cabello, F. C. (2012). Salmon aquaculture and antimicrobial resistance in the marine environment. *PLoS ONE*, 7(8), e42724. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0042724>
- Bustos-Gallardo, B., & Irrázaval, F. (2022). From crisis to stability and back again: The fragility of environmental governance in the Chilean salmon industry. *Area Development and Policy*, 7(1), 22–41. <https://doi.org/10.1080/23792949.2021.1910527>
- Campagne, C. S., Roy, L.-A., Langridge, J., Claudet, J., Mongruel, R., Beillouin, D., & Thiébaud, É. (2023). Existing evidence on the impact of changes in marine ecosystem structure and functioning on ecosystem service delivery: A systematic map. *Environmental Evidence*, 12(1), 13. <https://doi.org/10.1186/s13750-023-00306-1>
- Campuzano, F. J., Mateus, M. D., Leitão, P. C., Leitão, P. C., Marín, V. H., Delgado, L. E., Tironi, A., Pierini, J. O., Sampaio, A. F. P., Almeida, P., & Neves, R. J. (2013). Integrated coastal zone management in South America: A look at three contrasting systems. *Ocean & Coastal Management*, 72, 22–35. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2011.08.002>

- Carrasco-Bahamonde, D., & Casellas, A. (2024). Evolving blue development discourses and policies: Salmon farming industry and regional making in Chile. *Marine Policy*, 163, 106111. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2024.106111>
- Castillo Levicoy, C. N., & Pérez Lira, C. (2019). Caracterización de la arquitectura vernácula en madera de complejos constructivos rurales, región de Aysén, Chile. *Intervención, Revista Internacional de Conservación, Restauración y Museología*, 10(19), 99–110. <https://doi.org/10.30763/Intervencion.2019.19.212>
- Ceballos-Concha, A., Asche, F., & Cárdenas-Retamal, R. (2025). Salmon aquaculture in Chile: Production growth and socioeconomic impacts. *Reviews in Aquaculture*, 17(1), e12993. <https://doi.org/10.1111/raq.12993>
- Chávez, C., Dresdner, J., Figueroa, Y., & Quiroga, M. (2019). Main issues and challenges for sustainable development of salmon farming in Chile: A socio-economic perspective. *Reviews in Aquaculture*, 11(2), 403–421. <https://doi.org/10.1111/raq.12338>
- Chen, J., Sun, R., Pan, C., Sun, Y., Mai, B., & Li, Q. X. (2020). Antibiotics and food safety in aquaculture. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68(43), 11908–11919. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c03996>
- Cid-Aguayo, B. E., Henríquez, A., Arias Ramírez, L., Durán Pérez, M., Harrod, C., & Gomez-Uchida, D. (2024). Socioecology of farmed salmon escapes: “Commons” and de-privatization of escaped salmon for better management of a potentially invasive species. *Marine Policy*, 160, 105935. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2023.105935>
- Cochrane, S. K. J., Andersen, J. H., Berg, T., Blanchet, H., Borja, A., Carstensen, J., Elliott, M., Hummel, H., Niquil, N., & Renaud, P. E. (2016). What is marine biodiversity? Towards

- common concepts and their implications for assessing biodiversity status. *Frontiers in Marine Science*, 3. <https://doi.org/10.3389/fmars.2016.00248>
- Dauda, A. B., Ajadi, A., Tola-Fabunmi, A. S., & Akinwale, A. O. (2019). Waste production in aquaculture: Sources, components and managements in different culture systems. *Aquaculture and Fisheries*, 4(3), 81–88. <https://doi.org/10.1016/j.aaf.2018.10.002>
- Dehling, D. M., Barreto, E., & Graham, C. H. (2022). The contribution of mutualistic interactions to functional and phylogenetic diversity. *Trends in Ecology & Evolution*, 37(9), 768–776. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2022.05.006>
- Dowle, E., Pochon, X., Keeley, N., & Wood, S. A. (2015). Assessing the effects of salmon farming seabed enrichment using bacterial community diversity and high-throughput sequencing. *FEMS Microbiology Ecology*, 91(8), fiv089. <https://doi.org/10.1093/femsec/fiv089>
- Duffy, J., & Stachowicz, J. (2006). Why biodiversity is important to oceanography: Potential roles of genetic, species, and trophic diversity in pelagic ecosystem processes. *Marine Ecology Progress Series*, 311, 179–189. <https://doi.org/10.3354/meps311179>
- Duque, G., Gamboa-García, D. E., Molina, A., & Cogua, P. (2022). Influence of water quality on the macroinvertebrate community in a tropical estuary (Buenaventura Bay). *Integrated Environmental Assessment and Management*, 18(3), 796–812. <https://doi.org/10.1002/ieam.4521>
- Engler, C. (2024). Fit for purpose? Evaluating climate change adaptation laws and policies for marine aquaculture in Chile. *Frontiers in Marine Science*, 11, 1386545. <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1386545>

- Estay, M., & Chávez, C. (2017). Location decisions and regulatory changes: The case of the Chilean aquaculture. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 43(4), 700–717. <https://doi.org/10.3856/vol43-issue4-fulltext-9>
- Falconer, L., Cutajar, K., Krupandan, A., Capuzzo, E., Corner, R. A., Ellis, T., Jeffery, K., Mikkelsen, E., Moore, H., O’Beirn, F. X., O’Donohoe, P., Ruane, N. M., Shilland, R., Tett, P., & Telfer, T. C. (2023). Planning and licensing for marine aquaculture. *Reviews in Aquaculture*, 15(4), 1374–1404. <https://doi.org/10.1111/raq.12783>
- Fan, H., Huang, M., Chen, Y., Zhou, W., Hu, Y., & Wei, F. (2023). Conservation priorities for global marine biodiversity across multiple dimensions. *National Science Review*, 10(6), nwac241. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwac241>
- Fortt Z, A., Cabello C, F., & Buschmann R, A. (2007). Residuos de tetraciclina y quinolonas en peces silvestres en una zona costera donde se desarrolla la acuicultura del salmón en Chile. *Revista Chilena de Infectología*, 24(1), 14–18. <https://doi.org/10.4067/S0716-10182007000100002>
- Friedlander, A. M., Ballesteros, E., Goodell, W., Hüne, M., Muñoz, A., Salinas-de-León, P., Velasco-Charpentier, C., & Sala, E. (2021). Marine communities of the newly created Kawésqar National Reserve, Chile: From glaciers to the Pacific Ocean. *PLOS ONE*, 16(4), e0249413. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0249413>
- Galparsoro, I., Murillas, A., Pinarbasi, K., Sequeira, A. M. M., Stelzenmüller, V., Borja, Á., O’Hagan, A. M., Boyd, A., Bricker, S., Garmendia, J. M., Gimpel, A., Gangnery, A., Billing, S., Bergh, Ø., Strand, Ø., Hiu, L., Fragoso, B., Icely, J., Ren, J., ... Tett, P. (2020). Global stakeholder vision for ecosystem-based marine aquaculture expansion from coastal

- to offshore areas. *Reviews in Aquaculture*, 12(4), 2061–2079.
<https://doi.org/10.1111/raq.12422>
- Gammal, J., Hewitt, J., Gladstone-Gallagher, R., Thrush, S., Douglas, E., Lohrer, A., & Pilditch, C. (2023). Stressors Increase the Impacts of Coastal Macrofauna Biodiversity Loss on Ecosystem Multifunctionality. *Ecosystems*, 26(3), 539–552.
<https://doi.org/10.1007/s10021-022-00775-4>
- Gaüzère, P., O'Connor, L., Botella, C., Poggiato, G., Münkemüller, T., Pollock, L. J., Brose, U., Maiorano, L., Harfoot, M., & Thuiller, W. (2022). The diversity of biotic interactions complements functional and phylogenetic facets of biodiversity. *Current Biology*, 32(9), 2093–2100.e3. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2022.03.009>
- Gentry, R. R., Lester, S. E., Kappel, C. V., White, C., Bell, T. W., Stevens, J., & Gaines, S. D. (2017). Offshore aquaculture: Spatial planning principles for sustainable development. *Ecology and Evolution*, 7(2), 733–743. <https://doi.org/10.1002/ece3.2637>
- Gianella, F., Burrows, M. T., & Davidson, K. (2023). The relationship between salmon (*Salmo salar*) farming and cell abundance of harmful algal taxa. *Harmful Algae*, 129, 102512.
<https://doi.org/10.1016/j.hal.2023.102512>
- Hald-Mortensen, C. (2023). The main drivers of biodiversity loss: A brief overview. *Journal of Ecology & Natural Resources*, 7(3), 000346. <https://doi.org/10.23880/jenr-16000346>
- Hansen, B. H., Nordtug, T., Øverjordet, I. B., Sørensen, L., Kvæstad, B., Davies, E. J., Meier, S., Gomes, T., Brooks, S., & Farkas, J. (2022). Monitoring ocean water quality by deployment of lumpfish (*Cyclopterus lumpus*) eggs: In situ bioaccumulation and toxicity in embryos. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 245, 114074.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.114074>

- Herrera, J., Cornejo, P., Sepúlveda, H. H., Artal, O., & Quiñones, R. A. (2018). A novel approach to assess the hydrodynamic effects of a salmon farm in a Patagonian channel: Coupling between regional ocean modeling and high resolution les simulation. *Aquaculture*, 495, 115–129. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.05.003>
- Hornick, K. M., & Buschmann, A. H. (2018). Insights into the diversity and metabolic function of bacterial communities in sediments from Chilean salmon aquaculture sites. *Annals of Microbiology*, 68(2), 63–77. <https://doi.org/10.1007/s13213-017-1317-8>
- Hosono, A., Iizuka, M., & Katz, J. (Eds.). (2016). *Chile's Salmon Industry*. Springer Japan. <https://doi.org/10.1007/978-4-431-55766-1>
- Hughes, A. R., Inouye, B. D., Johnson, M. T. J., Underwood, N., & Vellend, M. (2008). Ecological consequences of genetic diversity. *Ecology Letters*, 11(6), 609–623. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2008.01179.x>
- Iizuka, M., & Katz, J. (2015). Globalisation, sustainability and the role of institutions: The case of the Chilean salmon industry. *Tijdschrift Voor Economische En Sociale Geografie*, 106(2), 140–153. <https://doi.org/10.1111/tesg.12132>
- Jaureguiberry, P., Titeux, N., Wiemers, M., Bowler, D. E., Coscieme, L., Golden, A. S., Guerra, C. A., Jacob, U., Takahashi, Y., Settele, J., Díaz, S., Molnár, Z., & Purvis, A. (2022). The direct drivers of recent global anthropogenic biodiversity loss. *Science Advances*, 8(45), eabm9982. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abm9982>
- Johansen, B. O., Mikalsen, S.-O., Magnussen, E., Patursson, E. J., á Norði, G., & Djurhuus, A. (2024). Impacts on microbial communities in sediments by aquaculture farming during one salmon cycle. *Frontiers in Marine Science*, 11, 1266410. <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1266410>

- Johansson, D., Juell, J.-E., Oppedal, F., Stiansen, J.-E., & Ruohonen, K. (2007). The influence of the pycnocline and cage resistance on current flow, oxygen flux and swimming behaviour of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) in production cages. *Aquaculture*, 265(1–4), 271–287. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2006.12.047>
- Jordano, P. (2026). *The ecological interactome: Understanding biodiversity through patterns of interactions*. 57, 51–76. <https://doi.org/https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-102824-110132>
- Jossart, J., Theuerkauf, S. J., Wickliffe, L. C., & Morris Jr., J. A. (2020). Applications of Spatial Autocorrelation Analyses for Marine Aquaculture Siting. *Frontiers in Marine Science*, 6, 806. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00806>
- Keeley, N., Valdemarsen, T., Woodcock, S., Holmer, M., Husa, V., & Bannister, R. (2019). Resilience of dynamic coastal benthic ecosystems in response to large-scale finfish farming. *Aquaculture Environment Interactions*, 11, 161–179. <https://doi.org/10.3354/aei00301>
- Keith, D. A., Ferrer-Paris, J. R., Nicholson, E., & Kingsford, R. T. (Eds.). (2020). *IUCN global ecosystem typology 2.0: Descriptive profiles for biomes and ecosystem functional groups*. IUCN, International Union for Conservation of Nature. <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2020.13.en>
- Keller, S., Bartolino, V., Hidalgo, M., Bitetto, I., Casciaro, L., Cuccu, D., Esteban, A., Garcia, C., Garofalo, G., Josephides, M., Jadaud, A., Lefkaditou, E., Maiorano, P., Manfredi, C., Marceta, B., Massutí, E., Micallef, R., Peristeraki, P., Relini, G., ... Quetglas, A. (2016). Large-scale spatio-temporal patterns of mediterranean cephalopod diversity. *PLOS ONE*, 11(1), e0146469. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0146469>

- Legrand, E., Taormina, B., Grall, J., Sævik, P. N., Lelièvre, Y., Pinsivy, L., Peña, V., & Husa, V. (2024). Salmon farming alters the structure and functioning of Norwegian maerl bed communities. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 34(4), e4142. <https://doi.org/10.1002/aqc.4142>
- León-Muñoz, J., Urbina, M. A., Garreaud, R., & Iriarte, J. L. (2018). Hydroclimatic conditions trigger record harmful algal bloom in western Patagonia (summer 2016). *Scientific Reports*, 8(1), 1330. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-19461-4>
- Lepe-Lopez, M., Escobar-Dodero, J., Zimin-Veselkoff, N., Azat, C., & Mardones, F. O. (2021). Assessing the present and future habitat suitability of *Caligus rogercresseyi* (Boxshall and Bravo, 2000) for salmon farming in southern Chile. *Frontiers in Veterinary Science*, 7, 615039. <https://doi.org/10.3389/fvets.2020.615039>
- Lozano-Muñoz, I., Wacyk, J., Kretschmer, C., Vásquez-Martínez, Y., & Cortez-San Martín, M. (2021). Antimicrobial resistance in Chilean marine-farmed salmon: Improving food safety through One Health. *One Health*, 12, 100219. <https://doi.org/10.1016/j.onehlt.2021.100219>
- Lulijwa, R., Rupia, E. J., & Alfaro, A. C. (2020). Antibiotic use in aquaculture, policies and regulation, health and environmental risks: A review of the top 15 major producers. *Reviews in Aquaculture*, 12(2), 640–663. <https://doi.org/10.1111/raq.12344>
- Mackintosh, A. L., Assis, J., & Costello, M. J. (2025). Temperature-driven suitability shifts of sea lice species under climate change and the implications for salmon farming. *Aquaculture Environment Interactions*, 17, 175–186. <https://doi.org/10.3354/aei00502>
- Mardones, J. I., Paredes-Mella, J., Flores-Leñero, A., Yarimizu, K., Godoy, M., Artal, O., Corredor-Acosta, A., Marcus, L., Cascales, E., Espinoza, J. P., Norambuena, L., Garreaud, R. D., González, H. E., & Iriarte, J. L. (2023). Extreme harmful algal blooms, climate

- change, and potential risk of eutrophication in Patagonian fjords: Insights from an exceptional *Heterosigma akashiwo* fish-killing event. *Progress in Oceanography*, 210, 102921. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2022.102921>
- Martinez, M. J., Larraín-Barrios, B., Verde Arregoitia, L., Gelcich, S., Alvarez, R., & Tecklin, D. (2024). Spatial assessment of risks faced by marine protected areas in Chilean Patagonia. *Ecology and Society*, 29(4), art40. <https://doi.org/10.5751/ES-15633-290440>
- Mayor, S., Allan, E., Altermatt, F., Isbell, F., Schaepman, M. E., Schmid, B., & Niklaus, P. A. (2024). Diversity–functioning relationships across hierarchies of biological organization. *Oikos*, 2024(1), e10225. <https://doi.org/10.1111/oik.10225>
- McLaverty, C., Beukhof, E. D., Bromhall, K., Dinesen, G. E., Erichsen, A. C., & Eigaard, O. R. (2024). The relative effects of bottom trawling, organic enrichment, and natural environmental factors on coastal seabed communities. *Marine Pollution Bulletin*, 209, 117169. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.117169>
- Miranda, C. D., Godoy, F. A., & Lee, M. R. (2018). Current status of the use of antibiotics and the antimicrobial resistance in the Chilean salmon farms. *Frontiers in Microbiology*, 9, 1284. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.01284>
- Miyashita, T., Amano, T., & Yamakita, T. (2014). Effects of ecosystem diversity on species richness and ecosystem functioning and services: A general conceptualization. En S.-I. Nakano, T. Yahara, & T. Nakashizuka (Eds.), *Integrative Observations and Assessments* (pp. 29–47). Springer Japan. https://doi.org/10.1007/978-4-431-54783-9_2
- Molinet, C., Niklitschek, E. J., Coper, S., Díaz, M., Díaz, P. A., Fuentealba, M., & Marticorena, F. (2014). Challenges for coastal zoning and sustainable development in the northern

- Patagonian fjords (Aysen, Chile). *Latin American Journal of Aquatic Research*, 42(1), 18–29. <https://doi.org/10.3856/vol42-issue1-fulltext-2>
- Montero, P., Gutiérrez, M. H., Daneri, G., & Jacob, B. (2022). The effect of salmon food-derived DOM and glacial melting on activity and diversity of free-living bacterioplankton in Chilean Patagonian fjords. *Frontiers in Microbiology*, 12, 772900. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.772900>
- Mulsow, S., Krieger, Y., & Kennedy, R. (2006). Sediment profile imaging (SPI) and micro-electrode technologies in impact assessment studies: Example from two fjords in Southern Chile used for fish farming. *Journal of Marine Systems*, 62(3–4), 152–163. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2005.09.012>
- Naylor, R., Fang, S., & Fanzo, J. (2023). A global view of aquaculture policy. *Food Policy*, 116, 102422. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2023.102422>
- Niederman, T. E., Aronson, J. N., Gainsbury, A. M., Nunes, L. A., & Dreiss, L. M. (2025). US Imperiled species and the five drivers of biodiversity loss. *BioScience*, 75(7), 524–533. <https://doi.org/10.1093/biosci/biaf019>
- Niklitschek, E. J., Soto, D., Lafon, A., Molinet, C., & Toledo, P. (2013). Southward expansion of the Chilean salmon industry in the Patagonian fjords: Main environmental challenges. *Reviews in Aquaculture*, 5(3), 172–195. <https://doi.org/10.1111/raq.12012>
- Núñez-Acuña, G., Sáez-Vera, C., Valenzuela-Miranda, D., Valenzuela-Muñoz, V., & Gallardo-Escárate, C. (2023). Whole-genome resequencing in the sea louse *Caligus rogercresseyi* uncovers gene duplications and copy number variants associated with pesticide resistance. *Frontiers in Marine Science*, 10, 1112691. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1112691>

- Olivos, J. A., Arismendi, I., White, S. M., Quinn, T. P., Thorstad, E. B., Penaluna, B. E., & Soto, D. (2026). Unmarked escapees undermine policy and public trust in Chilean salmon aquaculture. *Reviews in Aquaculture*, 18(1), e70105. <https://doi.org/10.1111/raq.70105>
- Ong, F. S., & Ransangan, J. (2018). Assessment of spatial and temporal variations of water quality for future mariculture operation in Ambong Bay, Sabah, Malaysia. *Open Journal of Marine Science*, 08(01), 1–19. <https://doi.org/10.4236/ojms.2017.81001>
- Ortiz, P., Quiroga, E., Montero, P., Hamame, M., & Betti, F. (2021). Trophic structure of benthic communities in a Chilean fjord (45°S) influenced by salmon aquaculture: Insights from stable isotopic signatures. *Marine Pollution Bulletin*, 173, 113149. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.113149>
- Ortiz-Severín, J., Hodar, C., Stuardo, C., Aguado-Norese, C., Maza, F., González, M., & Cambiazo, V. (2024). Impact of salmon farming in the antibiotic resistance and structure of marine bacterial communities from surface seawater of a northern Patagonian area of Chile. *Biological Research*, 57(1), 84. <https://doi.org/10.1186/s40659-024-00556-4>
- O’Ryan, R., & Pereira, M. (2015). Participatory indicators of sustainability for the salmon industry: The case of Chile. *Marine Policy*, 51, 322–330. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2014.09.010>
- Petrosillo, I., Scardia Scardia, A. M., Ungaro, N., Specchiulli, A., Fanelli, G., Centoducati, G., De Serio, F., Carlucci, R., Valente, D., Barbone, E., Pini, A., Giannuzzi, C. G., Scirocco, T., Lovello, E. M., Deflorio, M., Lillo, A. O., De Padova, D., Papa, L., Goffredo, E., ... Mossa, M. (2023). Towards sustainable marine spatial planning of aquaculture. *Ecological Indicators*, 154, 110542. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110542>

- Poirier, I., Benhaïm, D., Poizot, E., Gallon, R. K., Cauvin, E., Lemarchand, A., Bertrand, M., Lelièvre, C., Murat, A., Benoit, F., & Méar, Y. (2020). Marine aggregates in North Atlantic coast: Microbial characteristics and potential interactions with farmed Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Marine Environmental Research*, 157, 104864. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2019.104864>
- Poley, J., Purcell, S. L., Igboeli, O. O., Donkin, A., Wotton, H., & Fast, M. D. (2013). Combinatorial effects of administration of immunostimulatory compounds in feed and follow-up administration of triple-dose SLICE® (emamectin benzoate) on Atlantic salmon, *Salmo salar* L., infection with *Lepeophtheirus salmonis*. *Journal of Fish Diseases*, 36(3), 299–309. <https://doi.org/10.1111/jfd.12062>
- Price, C., Black, K., Hargrave, B., & Morris, J. (2015). Marine cage culture and the environment: Effects on water quality and primary production. *Aquaculture Environment Interactions*, 6(2), 151–174. <https://doi.org/10.3354/aei00122>
- Quiñones, R. A., Fuentes, M., Montes, R. M., Soto, D., & León-Muñoz, J. (2019). Environmental issues in Chilean salmon farming: A review. *Reviews in Aquaculture*, 11(2), 375–402. <https://doi.org/10.1111/raq.12337>
- Quiroga, E., Ortiz, P., Reid, B., & Gerdes, D. (2013). Classification of the ecological quality of the Aysen and Baker Fjords (Patagonia, Chile) using biotic indices. *Marine Pollution Bulletin*, 68(1–2), 117–126. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.11.041>
- Rain-Franco, A., Rojas, C., & Fernandez, C. (2018). Potential effect of pesticides currently used in salmon farming on photo and chemoautotrophic carbon uptake in central – southern Chile. *Aquaculture*, 486, 271–284. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2017.12.048>

- Reicher, O., Delgado Schneider, V., & Arumí, J. L. (2024). Regulatory Analysis of Strategic Environmental Assessment Follow-Up. *Land*, 13(8), 1221. <https://doi.org/10.3390/land13081221>
- Reid, G., Gurney-Smith, H., Marcogliese, D., Knowler, D., Benfey, T., Garber, A., Forster, I., Chopin, T., Brewer-Dalton, K., Moccia, R., Flaherty, M., Smith, C., & De Silva, S. (2019). Climate change and aquaculture: Considering biological response and resources. *Aquaculture Environment Interactions*, 11, 569–602. <https://doi.org/10.3354/aei00332>
- Retamal, A., Pérez, C., & Paredes, J. P. (2026). Conflicts and discursive strategies in Chilean salmon farming: Territorial hegemony, actors, and challenges for coastal governance. *The Extractive Industries and Society*, 27, 101882. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2026.101882>
- Rodríguez-Luna, D., Vela, N., Alcalá, F. J., & Encina-Montoya, F. (2021). The environmental impact assessment in aquaculture projects in Chile: A retrospective and prospective review considering cultural aspects. *Sustainability*, 13(16), 9006. <https://doi.org/10.3390/su13169006>
- Rowley, A. F., Baker-Austin, C., Boerlage, A. S., Caillon, C., Davies, C. E., Duperret, L., Martin, S. A. M., Mitta, G., Pernet, F., Pratoomyot, J., Shields, J. D., Shinn, A. P., Songsungthong, W., Srijuntongsiri, G., Sritunyalucksana, K., Vidal-Dupiol, J., Uren Webster, T. M., Taengchaiyaphum, S., Wongwaradechkul, R., & Coates, C. J. (2024). Diseases of marine fish and shellfish in an age of rapid climate change. *iScience*, 27(9), 110838. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2024.110838>
- Ruckelshaus, M. H., Jackson, S. T., Mooney, H. A., Jacobs, K. L., Kassam, K.-A. S., Arroyo, M. T. K., Báldi, A., Bartuska, A. M., Boyd, J., Joppa, L. N., Kovács-Hostyánszki, A., Parsons, J. P., Scholes, R. J., Shogren, J. F., & Ouyang, Z. (2020). The IPBES global assessment:

- Pathways to Action. *Trends in Ecology & Evolution*, 35(5), 407–414.
<https://doi.org/10.1016/j.tree.2020.01.009>
- Sala, E., & Knowlton, N. (2006). Global marine biodiversity trends. *Annual Review of Environment and Resources*, 31(1), 93–122. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.31.020105.100235>
- Salazar, F. J., & Saldana, R. C. (2007). Characterization of manures from fish cage farming in Chile. *Bioresource Technology*, 98(17), 3322–3327.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.07.003>
- Salgado-Caxito, M., Zimin-Veselkoff, N., Adell, A. D., Olivares-Pacheco, J., & Mardones, F. O. (2022). Qualitative risk assessment for antimicrobial resistance among humans from salmon fillet consumption due to the high use of antibiotics against bacterial infections in farmed salmon. *Antibiotics*, 11(5), 662. <https://doi.org/10.3390/antibiotics11050662>
- Sánchez-Jardón, L., Hernández De Diego, A., Mackenzie, R., Villodre, M., Arnaiz-Schmitz, C., Schmitz, M. F., & Acosta-Gallo, B. (2025). Bryophyte literature records database of Aysén, Chilean sub-Antarctic ecoregion. *Scientific Data*, 12(1), 36.
<https://doi.org/10.1038/s41597-024-04149-4>
- Santelices, N. (2024, diciembre). Planificación costera: Estudio comparado de instrumentos de planificación territorial. *XVI Seminario internacional de investigación en urbanismo, Barcelona-Córdoba, Junio-Agosto 2024*. <https://doi.org/10.5821/siiu.13006>
- Sanz-Lazaro, C., Casado-Coy, N., Calderero, E. M., & Villamar, U. A. (2021). The environmental effect on the seabed of an offshore marine fish farm in the tropical Pacific. *Journal of Environmental Management*, 300, 113712. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113712>

- Schendel, E. K., Nordström, S. E., & Lavkulich, L. M. (2004). Flocc and sediment properties and their environmental distribution from a marine fish farm. *Aquaculture Research*, 35(5), 483–493. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2004.01042.x>
- Schielzeth, H., & Wolf, J. B. W. (2021). Community genomics: A community-wide perspective on within-species genetic diversity. *American Journal of Botany*, 108(11), 2108–2111. <https://doi.org/10.1002/ajb2.1796>
- Sepúlveda, M., Arismendi, I., Soto, D., Jara, F., & Farias, F. (2013). Escaped farmed salmon and trout in Chile: Incidence, impacts, and the need for an ecosystem view. *Aquaculture Environment Interactions*, 4(3), 273–283. <https://doi.org/10.3354/aei00089>
- Simone, M. N., & Vopel, K. (2024). The need for proactive environmental management of offshore aquaculture. *Reviews in Aquaculture*, 16(2), 603–607. <https://doi.org/10.1111/raq.12874>
- Soto, D., Arismendi, I., Olivos, J. A., Canales-Aguirre, C. B., Leon-Muñoz, J., Niklitschek, E. J., Sepúlveda, M., Paredes, F., Gomez-Uchida, D., & Soria-Galvarro, Y. (2023). Environmental risk assessment of non-native salmonid escapes from net pens in the Chilean Patagonia. *Reviews in Aquaculture*, 15(1), 198–219. <https://doi.org/10.1111/raq.12711>
- Soto, D., Chávez, C., León-Muñoz, J., Luengo, C., & Soria-Galvarro, Y. (2021). Chilean salmon farming vulnerability to external stressors: The COVID 19 as a case to test and build resilience. *Marine Policy*, 128, 104486. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2021.104486>
- Soto, D., León-Muñoz, J., Dresdner, J., Luengo, C., Tapia, F. J., & Garreaud, R. (2019). Salmon farming vulnerability to climate change in southern Chile: Understanding the biophysical, socioeconomic and governance links. *Reviews in Aquaculture*, 11(2), 354–374. <https://doi.org/10.1111/raq.12336>

- Soto, D., León-Muñoz, J., Garreaud, R., Quiñones, R. A., & Morey, F. (2021). Scientific warnings could help to reduce farmed salmon mortality due to harmful algal blooms. *Marine Policy*, 132, 104705. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2021.104705>
- Soto, D., Montes, R. M., Quiñones, R. A., León-Muñoz, J., Fuentes, M. E., Avendaño-Herrera, R., Pinilla, E., Fuentes, J., & Chávez, C. (2026). Risk is not equal to impact: The challenges of developing a traffic light system to regulate farmed salmon production on an ecosystem scale. *Reviews in Aquaculture*, 18(3), e70175. <https://doi.org/10.1111/raq.70175>
- Soto, D., & Norambuena, F. (2004). Evaluation of salmon farming effects on marine systems in the inner seas of southern Chile: A large-scale mensurative experiment. *Journal of Applied Ichthyology*, 20(6), 493–501. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0426.2004.00602.x>
- Stehfest, K. M., Carter, C. G., McAllister, J. D., Ross, J. D., & Semmens, J. M. (2017). Response of atlantic salmon *Salmo salar* to temperature and dissolved oxygen extremes established using animal-borne environmental sensors. *Scientific Reports*, 7(1), 4545. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04806-2>
- Tilman, D., Isbell, F., & Cowles, J. M. (2014). Biodiversity and Ecosystem Functioning. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 45(1), 471–493. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-120213-091917>
- Tironi, A., Marin, V. H., & Campuzano, F. J. (2010). A management tool for assessing aquaculture environmental impacts in Chilean Patagonian fjords: Integrating hydrodynamic and pellets dispersion models. *Environmental Management*, 45(5), 953–962. <https://doi.org/10.1007/s00267-010-9467-5>
- Torrejón, F., Bizama, G., Araneda, A., Aguayo, M., Bertrand, S., & Urrutia, R. (2013). Descifrando la historia ambiental de los archipiélagos de Aysén, Chile: El influjo colonial y la

- explotación económica-mercantil republicana (siglos XVI-XIX). *Magallania (Punta Arenas)*, 41(1), 29–52. <https://doi.org/10.4067/S0718-22442013000100002>
- Tucca, F., Díaz-Jaramillo, M., Cruz, G., Silva, J., Bay-Schmith, E., Chiang, G., & Barra, R. (2014). Toxic effects of antiparasitic pesticides used by the salmon industry in the marine amphipod *Monocorophium insidiosum*. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 67(2), 139–148. <https://doi.org/10.1007/s00244-014-0008-8>
- Urbina, M. A., Cumillaf, J. P., Paschke, K., & Gebauer, P. (2019). Effects of pharmaceuticals used to treat salmon lice on non-target species: Evidence from a systematic review. *Science of The Total Environment*, 649, 1124–1136. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.334>
- Valdés-Castro, V., & Fernandez, C. (2021). Effect of three pesticides used in salmon farming on ammonium uptake in central-southern and northern Patagonia, Chile. *Frontiers in Marine Science*, 7, 602002. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.602002>
- Vellend, M., & Geber, M. A. (2005). Connections between species diversity and genetic diversity. *Ecology Letters*, 8(7), 767–781. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2005.00775.x>
- Verhoeven, J. T. P., Salvo, F., Knight, R., Hamoutene, D., & Dufour, S. C. (2018). Temporal bacterial surveillance of salmon aquaculture sites indicates a long lasting benthic impact with minimal recovery. *Frontiers in Microbiology*, 9, 3054. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.03054>
- Watson, R. T., Baste, I. A., Larigauderie, A., Leadley, P., Pascual, U., Baptiste, B., Demissew, S., Dziba, L., Erpul, G., Fazel, A. M., Fischer, M., Hernández, A. M., Karki, M., Mathur, V., Pataridze, T., Pinto, I. S., Stenseke, M., & Vilá, B. (2019). *Members of the managemeny committee who provided guidance for the production of this assessment* (p. 1144). Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services.

- Weitzman, J., & Filgueira, R. (2020). The evolution and application of carrying capacity in aquaculture: Towards a research agenda. *Reviews in Aquaculture*, 12(3), 1297–1322. <https://doi.org/10.1111/raq.12383>
- Willis, K. J., & Ling, N. (2003). The toxicity of emamectin benzoate, an aquaculture pesticide, to planktonic marine copepods. *Aquaculture*, 221(1–4), 289–297. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(03\)00066-8](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(03)00066-8)
- Wu, R. S. S. (1995). The environmental impact of marine fish culture: Towards a sustainable future. *Marine Pollution Bulletin*, 31(4–12), 159–166. [https://doi.org/10.1016/0025-326X\(95\)00100-2](https://doi.org/10.1016/0025-326X(95)00100-2)
- Yan, H. F., Morais, R. A., & Bellwood, D. R. (2025). Species abundances surpass richness effects in the biodiversity-ecosystem function relationship across marine fishes. *Nature Communications*, 16(1), 7789. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-63210-x>
- Yáñez, E., Lagos, N. A., Norambuena, R., Silva, C., Letelier, J., Muck, K., Martin, G. S., Benítez, S., R. Broitman, B., Contreras, H., Duarte, C., Gelcich, S., Labra, F. A., Lardies, M. A., Manríquez, P. H., Quijón, P. A., Ramajo, L., González, E., Molina, R., ... Böhm, G. (2017). Impacts of Climate Change on Marine Fisheries and Aquaculture in Chile. En B. F. Phillips & M. Pérez-Ramírez (Eds.), *Climate Change Impacts on Fisheries and Aquaculture* (1^a ed., pp. 239–332). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119154051.ch10>
- Zhang, W., Han, S., Zhang, D., Shan, B., & Wei, D. (2023). Variations in dissolved oxygen and aquatic biological responses in China's coastal seas. *Environmental Research*, 223, 115418. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115418>

- Zhang, W., Ki, J.-S., & Qian, P.-Y. (2008). Microbial diversity in polluted harbor sediments I: Bacterial community assessment based on four clone libraries of 16S rDNA. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 76(3), 668–681. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2007.07.040>
- Zhang, X., Zhang, Y., Zhang, Q., Liu, P., Guo, R., Jin, S., Liu, J., Chen, L., Ma, Z., & Liu, Y. (2020). Evaluation and analysis of water quality of marine aquaculture area. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(4), 1446. <https://doi.org/10.3390/ijerph17041446>
- Zhu, Z., Gross, A., Brown, P. B., & Luo, G. (2025). Disinfection by products in aquaculture: Sources, impacts, removal and future research. *Reviews in Aquaculture*, 17(3), e70035. <https://doi.org/10.1111/raq.70035>

INSTRUMENTOS LEGALES Y REGLAMENTARIOS

Decreto Supremo N.º 1. (5 de enero de 2021). Reglamento de Control en Línea de Parámetros Ambientales de las Agrupaciones de Concesiones de Acuicultura, del Ministerio de Economía, Fomento y Turismo; Subsecretaría de Pesca y Acuicultura URL: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1154210>

Decreto Supremo N.º 40. (30 de octubre de 2012). Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental, del Ministerio del Medio Ambiente. URL: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1053563>

Decreto Supremo N.º 290. (21 de octubre de 1993). Reglamento de Concesiones y Autorizaciones de Acuicultura, del Ministerio de Economía. URL: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=11990>

Decreto Supremo N.º 319. (6 de junio de 2001). Reglamento de Medidas de Protección, Control y Erradicación de Enfermedades de Alto Riesgo para las Especies Hidrobiológicas, del Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción; Subsecretaría de Pesca. URL: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=194194>

Decreto Supremo N.º 320. (6 de junio de 2001). Reglamento Ambiental para la Acuicultura, del Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción; Subsecretaría de Pesca. URL: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=194194>

Decreto Supremo N.º 345. (14 de diciembre de 2006). Reglamento sobre Plagas Hidrobiológicas, del Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción; Subsecretaría de Pesca. URL: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=256174>

Decreto Supremo N.º 430. (21 de enero de 1992). Fija el Texto Refundido Coordinado y Sistematizado de la Ley N.º 18.892, de 1989 y sus modificaciones, Ley General de Pesca y Acuicultura, del Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción. URL: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=194194>

Ley N.º 18.892. (23 de diciembre de 1989). Ley General de Pesca y Acuicultura, del Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción. URL: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=30265>

Ley N.º 19.300. (9 de marzo de 1994). Bases Generales del Medio Ambiente, del Ministerio Secretaría General de la Presidencia. URL: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=30667>

Ley N.º 20.417. (26 de enero de 2010). Crea el Ministerio del Medio Ambiente, el Servicio de Evaluación Ambiental y la Superintendencia del Medio Ambiente, del Ministerio Secretaría General de la Presidencia. URL: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1010459>

Ley N.º 20.434. (08 de abril de 2010). Modifica la Ley General de Pesca y Acuicultura en Materia de Acuicultura, del Ministerio de Economía, Fomento y Turismo; Subsecretaría de Pesca. URL: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1012014>

Ley N.º 21.410. (27 de enero de 2022). Modifica la Ley General de Pesca y Acuicultura con el objeto de exigir a los titulares de concesiones de acuicultura medidas para evitar o reducir el depósito de desechos inorgánicos y orgánicos, del Ministerio De Economía, Fomento y Turismo. URL: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1171783>

Ley N.º 21.455. (13 de junio de 2022). Ley Marco de Cambio Climático, del Ministerio del Medio Ambiente. URL: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1177286>

Ley N.º 21.600. (27 de diciembre de 2023). Crea el Servicio de Biodiversidad y Áreas Protegidas (SBAP) y el Sistema Nacional de Áreas Protegidas, del Ministerio del Medio Ambiente. URL: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1195666>

ANEXO

Habilitación profesional: Práctica profesional

Para la habilitación profesional se optó por realizarla en modalidad práctica profesional. Esta se realizó en la Subsecretaría del Medio Ambiente, en el Departamento de Economía Ambiental de la División de Información y Economía Ambiental, bajo el proyecto de “Caracterización de patrones de consumo y producción no sostenibles para mejorar las políticas que fortalezcan la biodiversidad y los servicios ecosistémicos” implementado por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) y el Ministerio del Medio Ambiente.

Las actividades se enmarcaron en el apoyo de diversos proyectos y consultorías, principalmente enfocadas en la gestión ambiental, biodiversidad, patrones de consumo sostenible y la aplicación de instrumentos económicos para la gestión sostenible.

Las labores realizadas durante el periodo de práctica se pueden generalizar en cuatro líneas principales:

1. Apoyo en consultorías: Revisión de productos, informes de avance y documentos de licitación para consultorías en los sectores de Pesca y Acuicultura, y Agropecuario-Silvícola.
2. Diseño y ejecución de proyectos educativos: Participación en la creación, implementación y cierre de los proyectos "Juego de la Ruleta", "Concurso Educativo: Enfoca tu consumo" y su continuación "Hábitos que transforman".
3. Análisis normativo y de políticas públicas: Elaboración de informes y revisión de documentos relacionados con la gestión hídrica y los instrumentos económicos de gestión ambiental.
4. Investigación: Análisis de estudios sobre impulsores de impacto en la biodiversidad y certificaciones ambientales.

Mes	Actividades
Marzo	• Revisión documental y planificación: ○ Revisión y análisis de las bases y documentos de inicio de los proyectos, incluyendo: "Plan de inicio KDF", "Términos de referencia KBF ruleta educativa", "Bases Concurso KBF" y "Términos de referencia KBF campaña y material educativo". • Proyecto "Ruleta Educativa": ○ Investigación y síntesis de información para la elaboración de preguntas y respuestas relativas a la actividad "Ruleta educativa". • Apoyo en consultoría de biodiversidad: ○ Elaboración de un informe resumen de la consultoría "Identificación, caracterización y cuantificación de los impulsores de Impacto sobre la biodiversidad y los servicios ecosistémicos originados por las actividades productivas y los patrones de consumo en Chile", con enfoque específico en el sector de Pesca y Acuicultura. • Gestión de consultorías: ○ Asistencia a reuniones y presentación de minutas correspondientes a la consultoría "Desarrollo de indicadores para evaluar los impactos sobre la biodiversidad nacional originados por la producción y consumo provenientes de las actividades productivas asociada a las agrupaciones productivas pesca y acuicultura" (Dictuc). • Marco regulatorio: ○ Elaboración de un informe sobre el marco normativo ambiental para los Términos de referencia del proyecto "Potencialidades, brechas y desafíos en la aplicación de instrumentos económicos de gestión ambiental para la gestión sostenible de los recursos hídricos".

Mes	Actividades
Abril	• Revisión de productos de consultoría: ○ Participación en reuniones y revisión de producto N°1 de las consultorías en las agrupaciones productivas: Pesca y Acuicultura; Agropecuario-Silvícola. • Desarrollo de proyectos de consumo sostenible: ○ Revisión bibliográfica para formulación de preguntas y contenido para proyecto "Juego de la Ruleta". ○ Inicio de actividades de planificación y diseño del proyecto "Concurso Educativo: Enfoca tu consumo". • Nuevas licitaciones: ○ Revisión de los Términos de Referencia y licitación pública para el proyecto "Potencialidades, Brechas y Desafíos en la Aplicación de Instrumentos Económicos de Gestión Ambiental para la Gestión Sostenible de los Recursos Hídricos". • Consultoría de certificaciones ambientales: ○ Revisión del producto de consultoría "Análisis de experiencias comparadas sobre sellos, certificaciones y créditos vinculados a criterios en biodiversidad y la oportunidad de incorporación a experiencias nacionales".

Mes	Actividades
Mayo	• Seguimiento de consultorías de indicadores: ○ Participación en reuniones y revisión de los informes de avance N°1 de las consultorías: ▪ <u>Pesca y Acuicultura</u>: "Desarrollo de indicadores para evaluar los impactos sobre la biodiversidad nacional originados por la producción y consumo". ▪ <u>Agropecuario-Silvícola</u>: "Desarrollo de indicadores para evaluar los impactos sobre la biodiversidad nacional". • Ejecución del concurso educativo "Hábitos que transforman": ○ <u>Inicio de actividades</u>: Se dio inicio al concurso, asumiendo tareas operativas. ○ <u>Sistematización y trazabilidad</u>: Gestión y organización de las postulaciones recibidas. ○ <u>Evaluación Técnica</u>: Revisión y evaluación de las postulaciones según los criterios establecidos. ○ <u>Atención a participantes</u>: Gestión del canal de consultas y resolución de dudas de los participantes. ○ <u>Creación de contenido</u>: Desarrollo y creación de materiales educativos para el concurso.

Mes	Actividades
Junio	• Cierre del concurso "Hábitos que transforman": ○ <u>Finalización de actividades</u>: Conclusión de todas las tareas operativas del concurso. ○ <u>Sistematización de postulaciones</u>: Procesamiento, organización y trazabilidad de información y datos de participantes. ○ <u>Trazabilidad y evaluación técnica</u>: Finalización del proceso de evaluación de postulaciones. ○ <u>Atención de canal de consultas</u>: Cierre del período de atención a participantes, asegurando que todas las consultas fueran resueltas.