



Universidad de Concepción
Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas



Métodos de análisis de impactos tróficos de salmónidos en las aguas marinas y continentales de Chile: Sistemas de información geográfica, análisis de contenido estomacal y estimación del índice gonadosomático.

Habilitación profesional presentada a la
Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas
Para optar al título de Biólogo

Tomás Felipe Lepe Gutiérrez

Concepción, abril 2025

Esta habilitación profesional ha sido desarrollada en el Departamento de Zoología, Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas, Universidad de Concepción.

Prof. Guía

Dr. Daniel Gómez Uchida

Prof. Evaluadores

Dr. Billy Ernst

Dr. Selim Musleh Vega

Prof. Coordinador Seminario de Título/Habilitación Profesional

Dr. Víctor Hernández Santander

Concepción, abril de 2025

AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente al Núcleo Milenio INVASAL por financiar el final de mi proceso universitario, por su invaluable apoyo científico y logístico, el cual fue fundamental para el desarrollo de esta investigación. Mi más sincero reconocimiento al laboratorio de Genómica en Ecología, Evolución y Conservación de la Universidad de Concepción, especialmente al Dr. Daniel Gómez Uchida, por recibirme y a todo el equipo que lo conforma, brindarme acceso a laboratorios y compartir su expertise en el área; al Dr Selim Musleh Vega por apoyarme y guiarme en estos dos años, cuyo apoyo a mi y a mis compañeros tesisistas ha sido fundamental para seguir adelante en el proceso. A mis compañeros tesisistas del laboratorio por apoyarnos en todas y que hicieron el proceso más llevadero. A mi familia y amigos, por su apoyo incondicional y paciencia durante este proceso.

ÍNDICE

| | |
|--|----|
| ÍNDICE DE FIGURAS | 5 |
| ÍNDICE DE TABLAS | 6 |
| RESUMEN | 7 |
| ABSTRACT | 8 |
| INTRODUCCIÓN | 9 |
| Introducción de salmónidos en Chile | 10 |
| MATERIALES Y MÉTODOS | 16 |
| Sistemas de información geográfica (SIG) | 16 |
| Análisis de contenido estomacal..... | 16 |
| Índice gonadosomático (IGS)..... | 17 |
| RESULTADOS | 19 |
| Sistemas de Información geográfica..... | 19 |
| Análisis de contenido estomacal..... | 22 |
| Índice gonadosomático (IGS)..... | 25 |
| DISCUSIÓN | 29 |
| Sistemas de información geográfica | 29 |
| Análisis contenido estomacal..... | 30 |
| Índice gonadosomático (IGS)..... | 32 |
| CONCLUSIÓN | 34 |
| BIBLIOGRAFÍA | 35 |
| ANEXO..... | 40 |

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1.** Modelo conceptual del ciclo del Salmón Chinook en poblaciones nativas de Norte América. Inferior Izquierda (azul), Emigración del océano al río: ocurre en Primavera después de 3 – 5 años creciendo en el océano; Superior Izquierda (rojo), Desove: ocurre en Otoño; Derecha (celeste): desarrollo de juveniles en agua dulce desde alevín con saco a parr y subadulto que pueden permanecer durante un año (raza—streamII) o emigrar inmediatamente al océano a completar el ciclo (raza—oceanII). Fuente: www.nwfsc.noaa.gov.....12
- Figura 2.** Áreas de coexistencia de peces nativos y salmónidos en las 3 regiones.....20
- Figura 3.** Mapa de calor de registros de peces nativos (A) y registro de salmónidos (B).....20
- Figura 4.** Mapa de calor de registros de peces nativos (A) y mapa de áreas de coexistencia de peces nativos y salmónidos (B) en la regiones del Biobío y Ñuble.21
- Figura 5.** Fotografía del contenido estomacal de una de las muestras, donde podemos apreciar las 3 categorías del contenido; a) contenido identificable, b) teleósteos muy digeridos, y c) contenido muy digerido.....23
- Figura 6.** Relación entre el peso de la muestra y el peso total del contenido estomacal por especie.....24
- Figura 7.** Frecuencia de ocurrencia de cada categoría de cada ítem de contenido.....24
- Figura 8.** Comparación de la proporción de contenido estomacal entre salmón chinook (*Oncorhynchus tshawytscha*) y salmón coho (*Oncorhynchus kisutch*).....25
- Figura 9.** Relación peso total del individuo versus peso de su gónada para trucha arcoíris, salmón Chinook y salmón coho.....28

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Tabla comparativa entre especies de salmónidos | 11 |
| Tabla 2. Número de registros de peces nativos y salmónidos en las regiones de Biobío/Ñuble, Araucanía y los Ríos..... | 19 |
| Tabla 3. Número de estómagos analizados por especie y por año..... | 22 |
| Tabla 4. Tabla de cálculo del índice gonadosomático (IGS) de trucha arcoíris..... | 26 |
| Tabla 5. Tabla de cálculo del índice gonadosomático (IGS) de salmón coho..... | 27 |
| Tabla 6. Tabla de cálculo del índice gonadosomático (IGS) de salmón Chinook..... | 27 |

RESUMEN

Los salmónidos son especies del hemisferio norte que fueron introducidas en aguas continentales y marinas de Chile con el objetivo de desarrollarla pesca recreativa y la acuicultura. Estas especies, ya naturalizadas, han generado impactos ecológicos significativos en los ecosistemas acuáticos de Chile, alterando las redes tróficas nativas tanto en aguas continentales como marinas. Esta habilitación profesional aborda la implementación de tres metodologías que permiten un enfoque multidisciplinario para estudiar salmónidos y sus impactos. La primera metodología fue los sistemas de información geográfica (SIG) para analizar patrones espaciales de coexistencia de trucha arcoíris, salmón Chinook y trucha café con peces nativos; la segunda metodología fue análisis de contenido estomacal para determinar su dieta en aguas marinas; y la tercera metodología fue la estimación del índice gonadosomático (IGS) para evaluar el estado reproductivo de los individuos muestreados. Para los análisis de SIG se usó una base de datos publicada de peces nativos e introducidos en el Neotrópico, de las cuales se tomaron los datos sólo para las aguas continentales de cuatro regiones de Chile; el análisis de contenido estomacal se hizo en individuos de dos especies de salmones, salmón coho y salmón Chinook muestreados en su respectiva campaña de Caleta La Barra, río Toltén; el cálculo del índice gonadosomático se realizó en en gónadas muestreadas en la campaña de Caleta La Barra, habiendo gónadas de tres especies: trucha arcoíris, salmón Chinook y salmón coho, a las cuales se pesaron y midieron. Los resultados de SIG revelaron una alta coexistencia espacial entre salmónidos y especies nativas en cuencas del centro-sur de Chile. Además, el análisis permitió identificar un segmento del río Biobío donde se registra una zona de máximo registro de especies nativas, lo cataloga como un lugar de interés para maximizar esfuerzos de conservación. Los análisis de contenido estomacal revelaron que las principales presas de los salmónidos en su fase marina (en las costas cercanas a la desembocadura del río Toltén) corresponden a sardina y anchoveta, lo que concuerda con estudios pasados y confirma que los salmones Chinook y salmones coho frente al río Toltén tienen una dieta muy parecida a los salmones Chinook nativos del hemisferio norte. Los resultados de índice gonadosomático mostraron una interesante diferencia entre especies, probablemente explicados por diferencias en historias de vida, tales como residentes (trucha arcoíris) y de especies migratorias (salmón coho y salmón Chinook). Las tres metodologías de este estudio aplicadas en varias especies de salmónidos nos entregaron información global de los impactos de los salmónidos en las tramas tróficas, generando una visión a futuro de cómo seguir investigando su impacto en los ecosistemas acuáticos de Chile.

ABSTRACT

Salmonids are Northern Hemisphere species introduced into the continental and marine waters of Chile to promote recreational fishing and aquaculture. These now-naturalized species have caused significant ecological impacts on Chile's aquatic ecosystems, altering native trophic networks in both continental and marine waters. This graduation project addresses the implementation of three methodologies that enable a multidisciplinary approach to study salmonids and their impacts. The first methodology involved geographic information systems (GIS) to analyze spatial coexistence patterns of rainbow trout, Chinook salmon, and brown trout with native fish. The second methodology was stomach content analysis to determine their diet in marine waters, and the third was the gonadosomatic index (GSI) to assess the reproductive status of sampled individuals. For the GIS analysis, a published database of native and introduced fish in the Neotropics was used, extracting data only from continental waters in four Chilean regions. Stomach content analysis was performed on individuals of two salmon species—coho and Chinook salmon—sampled during the Caleta La Barra field campaign in the Toltén River. The gonadosomatic index was calculated using gonad samples collected during the same campaign, including gonads from three species: rainbow trout, Chinook salmon, and coho salmon, which were weighed and measured. The GIS results revealed high spatial coexistence between salmonids and native species in south-central Chile basins. Additionally, the analysis identified a segment of the Biobío River as a hotspot for native species records, designating it as a priority area for conservation efforts. Stomach content analysis showed that the primary prey of salmonids in their marine phase (near the mouth of the Toltén River) were sardines and anchovies, consistent with past studies and confirming that Chinook and coho salmon in the Toltén River have a diet highly similar to that of native Chinook salmon in their Northern Hemisphere range. The gonadosomatic index results highlighted notable differences between species, likely explained by life-history traits such as residency (e.g., rainbow trout) versus migratory behavior (e.g., coho and Chinook salmon). The three methodologies applied across multiple salmonid species provided comprehensive insights into their impacts on trophic webs, offering a forward-looking perspective for further research on their effects on Chile's aquatic ecosystems.

INTRODUCCIÓN

Las especies invasoras representan una de las mayores amenazas para la biodiversidad global, alterando la estructura y función de los ecosistemas nativos (Simberloff, 2014). Estas especies han sido introducidas fuera de su área de distribución nativa por efecto antrópico de manera intencional con diversos fines y suelen exhibir una combinación de rasgos biológicos claves que les permiten establecerse y dominar nuevos hábitats. Son especies que, ya naturalizadas logran dispersarse efectivamente fuera de su nuevo rango de introducción inicial (Blackburn et al., 2011). El impacto que provocan en los ecosistemas acuáticos es particularmente severo: desplazan especies nativas mediante competencia de recursos, depredación directa y/o alteración de las redes tróficas. En Chile, su riqueza de especies y grado de endemismo lo cataloga como uno de los 35 hotspots mundiales de biodiversidad (Myers et al., 2000), y su particular aislamiento geográfico hace que su biodiversidad sea especialmente frágil y susceptible a ser afectada por especies invasoras (CONAMA, 2008). Y en este contexto, los peces de agua dulce son uno de los grupos faunísticos más amenazados a nivel mundial y la introducción de especies invasoras es uno de los factores de mayor importancia en explicar esta situación (Marr et al., 2013).

Para el caso de Chile, las especies invasoras más abundantes que podemos encontrar ampliamente distribuidas en aguas continentales pertenecen a la familia Salmonidae (Habit et al., 2015). En el ambiente marino, los salmónidos juegan un rol trófico complejo. Durante su fase de vida en el océano, estas especies actúan como depredadores de alto nivel trófico, alimentándose de una variedad de organismos, como peces pequeños, crustáceos y zooplancton (Sepulveda et al., 2013). Esta depredación puede alterar la estructura de las comunidades marinas, afectando a especies nativas y modificando los flujos de energía dentro del ecosistema (Soto et al., 2001). En este contexto, comprender el rol trófico de los salmónidos en aguas marinas de Chile es fundamental para evaluar sus impactos ecológicos y diseñar estrategias de manejo que minimicen sus efectos negativos sobre la biodiversidad (Arismendi et al., 2014).

Introducción de salmónidos en Chile

El grupo de los salmónidos es un grupo de peces nativo del hemisferio norte que han sido introducidos en todos los continentes a excepción de la Antártica. Son conocidos por sus complejas y variadas historias de vida, que van desde especies residentes en agua dulce que completan todo su ciclo de vida en ríos, lagos o estuarios, hasta migraciones desde el océano a los ríos para el desove (anadromía) (Quinn, 2018). Su historia evolutiva los dotó de adaptaciones únicas; desde la capacidad de osmorregulación para transitar entre aguas dulces y marinas (McCormick, 1994), hasta desarrollados sistemas de navegación que combinan orientación magnética y señales químicas (Dittman & Quinn, 1996; Putman et al., 2013) que les permiten regresar con gran precisión a los ríos donde nacieron para reproducirse. Además, existe una enorme variación ecológica y genética entre poblaciones nativas, con algunas remontando a aguas continentales en primavera, verano, otoño e incluso invierno (Figura 1). Fuera de su rango de distribución nativa, más específicamente en Chile, este grupo ha sido introducido desde finales de 1800 's con el objetivo de aumentar el stock de pesca recreativa, y más recientemente con el objetivo de desarrollar acuicultura en Chile (Basulto, 2003; Thorstad et al., 2008).

Tabla 1. Comparación de atributos entre especies de salmónidos descritas en Chile

| | Trucha arcoíris | Trucha café | Salmón Chinook | Salmón coho |
|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Historia de vida | Residente/ Anádromo | Residente/Anádr omo | Anádromo | Anádromo |
| Eventos reproductivos | Múltiples (Iteróparo) | Múltiples (Iteróparo) | Uno (Semélparo) | Uno (Semélparo) |
| Motivo introducción | Pesca recreativa | Pesca recreativa | Acuicultura | Acuicultura |
| Acuicultura en Chile | Sí | No | Actualmente No | Sí |
| Tamaño promedio | 60 cm | 72 cm | 70 cm | 71 cm |
| Distribución nativa | Norteamérica | Eurasia | Siberia-Alaska | Japón, Siberia, Alaska |
| Distribución en Chile | Todo Chile | Río Loa hacia el sur | Araucanía hacia el Sur | Araucanía hacia el Sur |
| Éxito de invasión | Alto | Alto | Alto | Bajo |

Especies como la trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) y trucha café (*Salmo trutta*) han logrado establecerse formando poblaciones autosustentables en varios lugares de Chile (Soto et al., 2006) y las podemos encontrar a lo largo de todo el país. Además, al no depender de migraciones, establecen poblaciones estables que ejercen presión sobre especies nativas. El éxito de estas especies en estos ecosistemas ha generado problemáticas significativas. Como depredadores de alto nivel trófico, tanto la trucha arcoíris como la trucha café ejercen un fuerte impacto, alimentándose de una variedad de presas, incluyendo peces nativos como el puye (*Galaxias maculatus*) e invertebrados acuáticos (Soto et al., 2001). Esta depredación ha llevado a la disminución de poblaciones de especies nativas y a la alteración de las redes tróficas locales, afectando la biodiversidad y la funcionalidad de los ecosistemas (Arismendi et al., 2009). Otros salmónidos que han sido introducidos en Chile, cómo salmón Chinook (*Oncorhynchus tshawytscha*) y salmón coho (*Oncorhynchus kisutch*) son dos especies de salmónidos que podemos encontrar en las aguas marinas y continentales de Chile, han logrado naturalizarse y en la actualidad existen poblaciones naturalizadas que coexisten con especies nativas, y

que, por otro lado, han contribuido al desarrollo de la pesca recreativa y artesanal, fortaleciendo economías locales (Astorga et al., 2008; Soto et al., 2006).

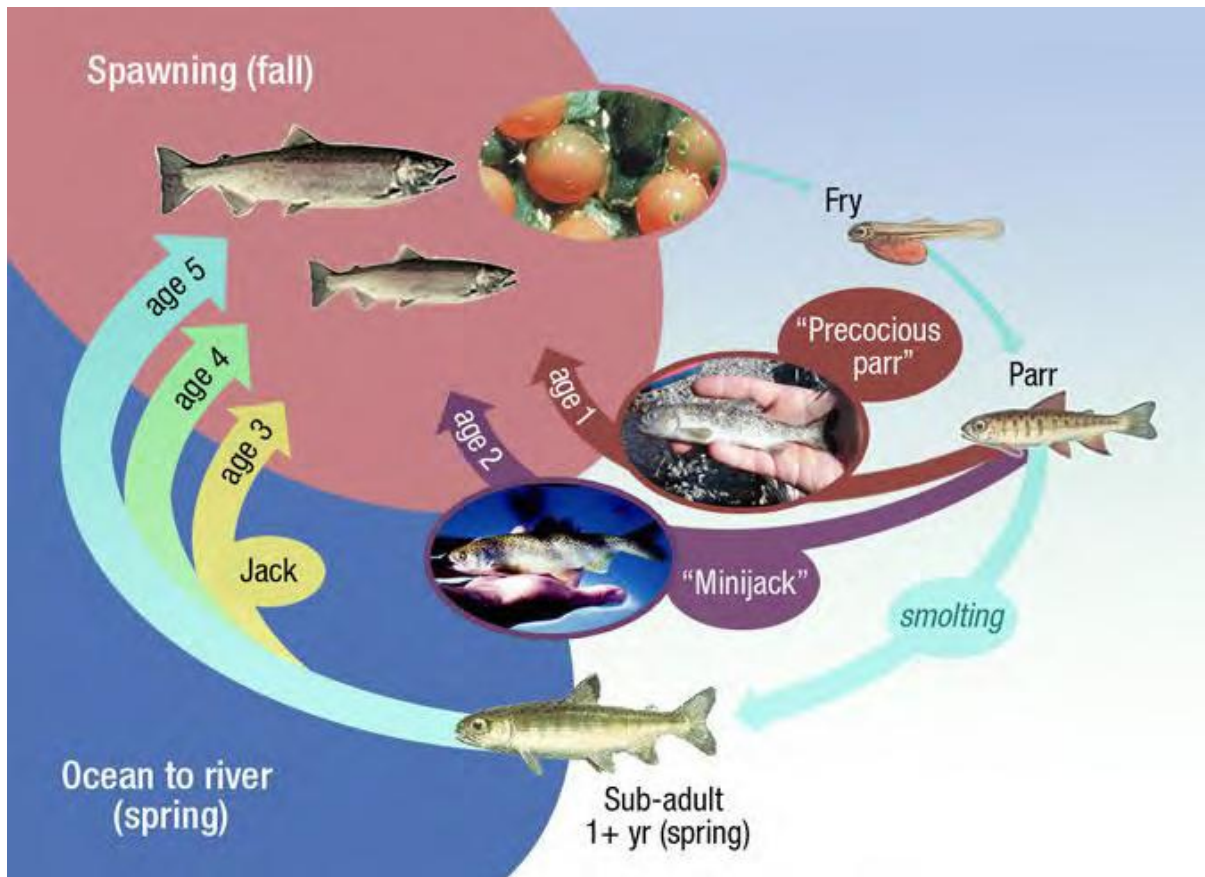


Figura 1. Modelo conceptual del ciclo del Salmón Chinook en poblaciones nativas de Norte América. Inferior Izquierda (azul), Emigración del océano al río: ocurre en primavera después de 3 – 5 años creciendo en el océano; Superior Izquierda (rojo), Desove: ocurre en Otoño; Derecha (celeste): desarrollo de juveniles en agua dulce desde alevín con saco a parr y subadulto que pueden permanecer durante un año (raza—stream) o emigrar inmediatamente al océano a completar el ciclo (raza—ocean). Fuente: www.nwfsc.noaa.gov.

El río Toltén, ubicado en la región de la Araucanía en el sur de Chile, es un punto donde se ha confirmado la presencia de salmón Chinook anádromo. En el otoño de 2004, se observó una pequeña corrida de desove en el río Allipén, un afluente del Toltén, aunque no se encontraron juveniles a pesar de los esfuerzos de muestreo (Correa & Gross, 2008). Los pescadores deportivos también han reportado la presencia de adultos de salmón Chinook en este río durante el verano y el otoño. Sin embargo, en la cuenca del río Imperial, que es la cuenca más cercana al norte del Toltén, los adultos son raramente vistos y no se han observado juveniles, lo que sugiere que el Toltén es actualmente el límite norte de la colonización del salmón

Chinook en Chile. En la cuenca del río Toltén se ha descrito una población importante de salmón Chinook y que sustenta una importante actividad de pesca artesanal (SERNAPESCA, 2018). La abundancia poblacional de salmón Chinook ha permitido el desarrollo de una pesquería artesanal legal desde el año 2018, cuando la Subsecretaría de Pesca y Acuicultura autorizó el desarrollo de actividades de pesca extractivas sobre el salmón Chinook en el río Toltén. El inicio del ingreso de salmón Chinook en esta cuenca ocurriría a partir de agosto y se extendería hasta febrero, siendo el periodo de diciembre y enero el de mayor remonte.

El análisis de impacto trófico de salmónidos introducidos en ecosistemas acuáticos requiere de un enfoque multidisciplinario que integre diferentes escalas espaciales y biológicas (Vander Zanden & Olden, 2008). Los sistemas de información geográfica (SIG) permiten evaluar patrones espaciales de coexistencia entre especies nativas e invasoras (en este caso salmónidos), identificando áreas críticas de interacción trófica. Estudiar las áreas de coexistencia entre especies nativas e introducidas es esencial para la conservación de la biodiversidad, manejo y gestión de especies invasoras, comprensión de los impactos ecológicos. Al comprender las interacciones entre peces nativos e introducidos, se pueden implementar estrategias de manejo y conservación más efectivas para proteger a las especies nativas y sus hábitats (Arismendi et al., 2014). En este sentido, el uso de sistemas de información geográfica (SIG) es importante porque permite abordar el análisis de las amenazas que representan las especies exóticas para la biodiversidad de agua dulce de manera integral y en un contexto biogeográfico. Los SIG son una herramienta poderosa para gestionar y visualizar datos geoespaciales lo que resulta fundamental en el estudio de la distribución geográfica y los patrones de invasión de especies exóticas en los ecosistemas acuáticos. Utilizar SIG es de suma importancia para comprender y abordar los desafíos relacionados con la conservación de la biodiversidad en ecosistemas de agua dulce, como sugieren Kajee et al. (2023) y Panlasigui et al. (2018), su uso y la georreferenciación han permitido mejorar la comprensión de la distribución geográfica de las especies de peces de agua dulce, permite analizar, visualizar y comprender los datos geoespaciales relacionados con las especies exóticas y su impacto en la biodiversidad. Esto es esencial para la conservación y gestión efectiva de la biodiversidad de peces de agua dulce, la cual tiene una prioridad

crucial para la conservación, ya que su hábitat (agua dulce) representa una pequeña fracción de la superficie terrestre (2.5%) (UNESCO, 2018).

Complementariamente, el análisis de contenido estomacal revela los hábitos alimenticios de los salmónidos, cuantificando su presión depredadora sobre la fauna local (Vinson & Angradi, 2011). El análisis estomacal es una metodología valiosa para inferir como, en una red trófica, los peces interactúan con las especies, animales y vegetales, y con su medio. La descripción y cuantificación de la dieta de organismos acuáticos es la base para comprender cómo ocurren los ciclos energéticos. De esta forma podemos estimar como los peces utilizan los recursos disponibles en su medio, si compiten por recursos con otros organismos, y cuál es la posición que ocupan dentro de la red trófica (Hyslop, 1980; Krebs, 1989). También nos proporciona datos valiosos sobre las interacciones ecológicas y los posibles desequilibrios en los ecosistemas. Por ejemplo, en el caso de salmones escapados de cultivos, se ha encontrado que estas especies pueden consumir grandes cantidades de fauna local, alterando las dinámicas de depredación y competencia en el ecosistema. Este tipo de estudios es esencial para diseñar políticas de manejo sostenible y mitigar los impactos negativos de la salmonicultura en las aguas chilenas. El análisis estomacal es una herramienta crucial para evaluar el impacto trófico de los salmones en el mar de Chile. Este método permite identificar qué especies de presas son consumidas por los salmones y cuantificar su frecuencia, lo que ayuda a entender su rol en la cadena alimentaria local. A través del estudio del contenido estomacal, se puede determinar si los salmones están depredando especies nativas y/o compitiendo por recursos con otras especies marinas.

Por último, el índice gonadosomático (IGS) aporta información clave sobre el estado reproductivo de los individuos, lo que puede influir en su comportamiento alimentario. El IGS es una herramienta utilizada en biología pesquera y ecología para evaluar el estado reproductivo de los peces. Este índice calcula la relación entre el peso de las gónadas (ovarios o testículos) y el peso del cuerpo del pez, expresado en porcentaje. Este índice es útil para determinar en qué fase del ciclo reproductivo se encuentra el pez. Un IGS alto indica que el pez está en un período de maduración gonadal o listo para el desove, mientras que el IGS bajo sugiere que el pez está en una fase de reposo reproductivo. Al monitorear el IGS a lo largo del tiempo se puede identificar la

época de desove de una población de peces. También puede reflejar factores como la contaminación, estrés térmico o la disponibilidad de recursos afectan la reproducción de los peces. Por ejemplo, un IGS anormalmente bajo podría indicar estrés ambiental que afecta la maduración gonadal. En este contexto, el índice gonadosomático permitirá entender mejor la biología reproductiva de los salmónidos introducidos y su posible impacto en el ecosistema. Por ejemplo, si se observa que los salmones retornantes tienen un IGS alto, esto indicaría que están en plena fase reproductiva.

Esta habilitación profesional tuvo como objetivo evaluar los impactos tróficos de los salmónidos introducidos en los ecosistemas acuáticos de Chile, tanto en aguas continentales como marinas, mediante tres enfoques metodológicos complementarios. En primer lugar, la implementación de sistemas de información geográfica (SIG) para analizar los patrones espaciales de distribución, áreas de influencia y coexistencia entre salmónidos - principalmente trucha café y trucha arcoíris - y peces nativos en aguas continentales, identificando zonas críticas de coexistencia. En segundo lugar, se realizaron análisis de contenido estomacal en salmónidos durante su fase marina, con el objetivo de determinar su rol trófico, identificar sus principales presas y evaluar su impacto sobre los recursos alimentarios en ambientes costeros. En tercer lugar, se calculó el índice gonadosomático (IGS) para evaluar el estado reproductivo de los individuos analizados, lo que permite comprender mejor su biología y su potencial impacto en los ecosistemas. Estas metodologías integradas buscan proporcionar una visión holística de los impactos ecológicos de los salmónidos en Chile, contribuyendo a la gestión y conservación de los ecosistemas acuáticos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Esta parte de este proyecto formó parte de mi Unidad de Investigación para obtener mi grado de licenciado en biología. En esta investigación, se utilizó la base de datos *Neotropical Freshwater Fishes* (Tonella et al., 2023), que contiene 185,787 registros de ocurrencia y abundancia de peces nativos y exóticos en el neotrópico. Para este estudio, se seleccionaron 2027 registros de peces nativos y salmónidos en las regiones de Ñuble, Biobío, Araucanía y Los Ríos, correspondientes a 27 especies de peces nativos (incluyendo la lamprea de bolsa, *Geotria australis*) y principalmente 3 especies de salmónidos: trucha café, trucha arcoíris y salmón Chinook. Mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) en QGIS 3.30.1, se asignó un área de influencia de 1 kilómetro a cada registro geográfico, separando los datos en salmónidos y peces nativos. Las capas geográficas de las regiones se obtuvieron del IDE Chile, realizándose Ñuble y Biobío en conjunto debido a la georreferenciación previa a la división regional y limitaciones en los filtros de los shapefiles. Para estimar las áreas de coexistencia, se calculó por medio de la herramienta de intersección de las áreas de influencia de ambas categorías. Finalmente, se generaron mapas de calor en QGIS a partir de las capas vectoriales de registros, permitiendo identificar áreas de máxima presencia de peces nativos y salmónidos, así como las zonas de coexistencia entre ambos grupos. Para poner a prueba la hipótesis de independencia de las áreas de influencia de peces nativos, áreas de influencia de salmónidos y áreas de coexistencia entre regiones se ocupó un test de chi-cuadrado de Pearson y una tabla de contingencia (tablas en Anexo 1).

Análisis de contenido estomacal

Se usó una colección de estómagos de salmón Chinook obtenidas por el Núcleo Milenio INVASAL como parte del monitoreo de la pesquería del río Toltén. Los individuos de salmón Chinook y salmón coho diseccionados corresponden a varias temporadas (2021-2024) en las localidades de Caleta La Barra y Puerto Saavedra. Se extrajeron los estómagos, se etiquetaron y se conservaron en alcohol al 75% para su posterior análisis.

El análisis estomacal de los individuos recolectados se hizo en laboratorio. Para ello se utilizaron los siguientes materiales: balanza, guantes, delantal, bandejas, placas Petri, bisturí, pinzas y cámara fotográfica. La muestra total sin analizar fue pesada en balanza. El contenido de los estómagos se obtuvo haciendo un corte longitudinal de extremo a extremo. Todo el contenido y cada elemento fue pesado por separado en una Balanza Digital - 7000 gramos x 1 gramo, y fotografiado. Cada ítem estomacal analizado fue categorizado en tres: a) identificable, b) teleósteo muy digerido, c) contenido muy digerido (un bolo), en donde a) corresponde a contenido identificable; b corresponde a teleosteos digeridos al punto en que no son identificables, con musculatura o sin ella; y c) corresponde a contenido muy digerido a nivel de bolo, básicamente una masa.; La identificación de estos teleosteos identificables se hizo en base a la guía “Mi guía de especies marinas” del IFOP (Reyes y Hüne, 2015). Los desechos orgánicos de tipo 1 y el etanol sobrante fueron desechados siguiendo los protocolos de RESPEL para su respectivo descarte.

El análisis de datos de contenido estomacal se hizo utilizando el software R v4.3.1 (R Core Team, 2023). Se hizo un gráfico de puntos para permitir explorar las relaciones entre peso total de la muestra versus el peso total del contenido estomacal, un diagrama de cajas (boxplot) para comparar la proporción de contenido estomacal entre salmón Chinook y salmón coho. Adicionalmente se hizo un gráfico de barras para facilitar la visualización de frecuencias de contenido estomacal.

Índice gonadosomático (IGS).

Para el cálculo del índice gonadosomático (IGS), se utilizaron gónadas de individuos muestreados durante la campaña realizada en Caleta La Barra en el año 2024. La muestra incluyó un total de 24 gónadas, correspondientes a tres especies de salmónidos: 6 gónadas de trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*), 7 gónadas de salmón coho (*Oncorhynchus kisutch*) y 11 gónadas de salmón chinook (*Oncorhynchus tshawytscha*). Cada gónada fue extraída mediante disección, limpiada de tejidos adheridos y pesada con una balanza de precisión para obtener su peso en gramos. Paralelamente, se registró el peso total de cada individuo. El IGS se calculó utilizando la fórmula estándar:

$$IGS = (\text{Peso de las gónadas} / \text{Peso total del pez}) * 100$$

Además, se hizo un plot de puntos utilizando el software R, para explorar la visualización del peso de las gónadas vs el peso total de los individuos eviscerados.

RESULTADOS

Sistemas de Información geográfica

Los N = 2027 registros de peces obtenidos desde tres regiones del país, Biobío/Ñuble (que fue considerada como una sola por motivos de logística), Araucanía y Los Ríos, reveló un total de 27 especies peces nativos (incluyendo la lamprea de bolsa *Geotria australis*) y 3 especies de salmónidos: trucha café, trucha arcoíris y salmón Chinook .

Número de registros de peces nativos y salmónidos en las regiones de Biobío/Ñuble, Araucanía y los Ríos.

| | Biobío/Ñuble | Araucanía | Los Ríos | Total |
|----------------------------|--------------|-----------|----------|-------|
| Registros de salmónidos | 288 | 372 | 207 | 867 |
| Registros de peces nativos | 821 | 189 | 150 | 1160 |
| | | | | 2027 |

Mediante el uso de la herramienta de intersección espacial en QGIS, se identificaron zonas de coexistencia entre peces nativos y salmónidos en aguas continentales (Figura 2) para las regiones de Biobío/Ñuble, Araucanía y Los Ríos. Estas áreas de coexistencia fueron medidas en kilómetros cuadrados (km²) Anexo 1. Se obtuvieron dos mapas de calor de máximos registros de peces nativos y de salmónidos por separado (Figura 3) para las tres regiones juntas, mostrando una distribución homogénea en salmónidos para las regiones estudiadas, mientras que los peces nativos muestran un punto caliente (en rojo) de registros en la región del Biobío, más específicamente en el río Biobío al sur de la ciudad de Los Ángeles. Además, en un análisis comparativo de la Figura 4 se muestra un análisis espacial comparativo de los registros de peces nativos y de coexistencia de peces nativos con salmónidos en las regiones de Biobío/Ñuble.

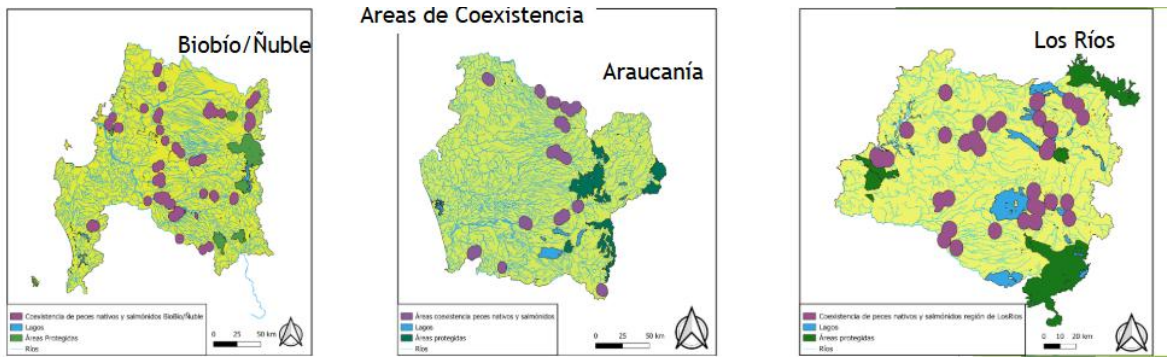


Figura 2. Áreas de coexistencia de peces nativos y salmónidos en las 3 regiones.

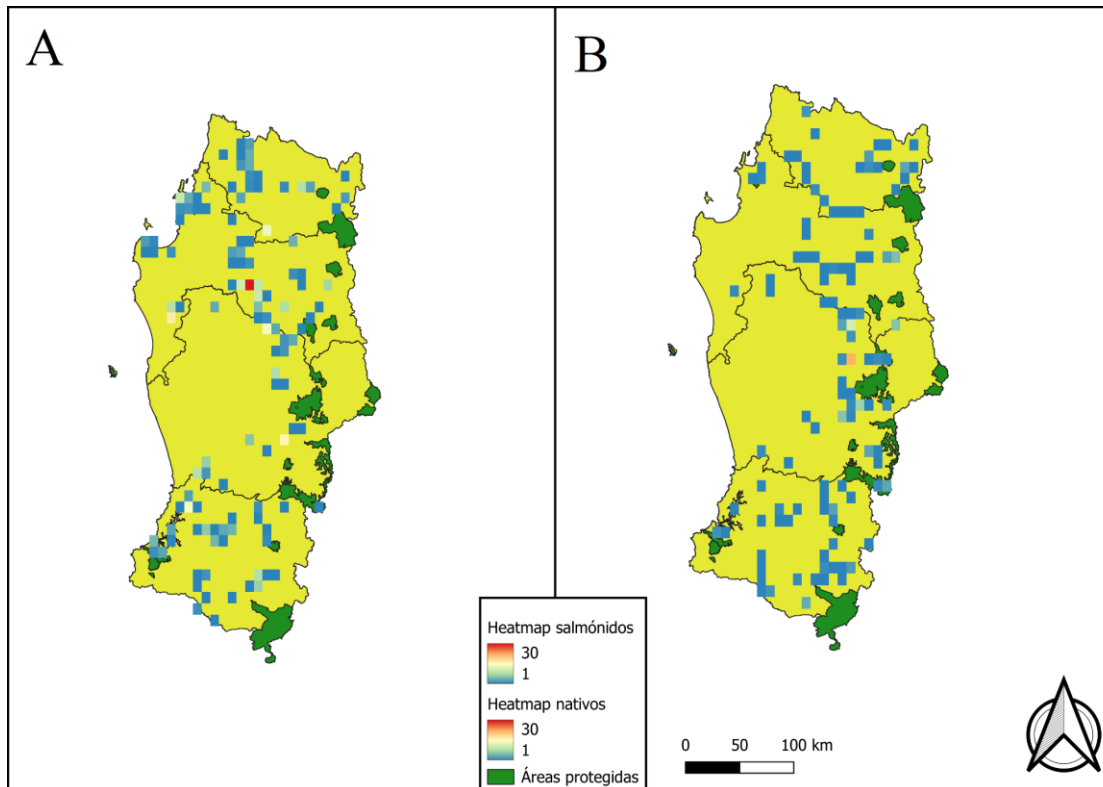


Figura 3: Mapa de calor de registros de peces nativos (A) y registro de salmónidos (B).

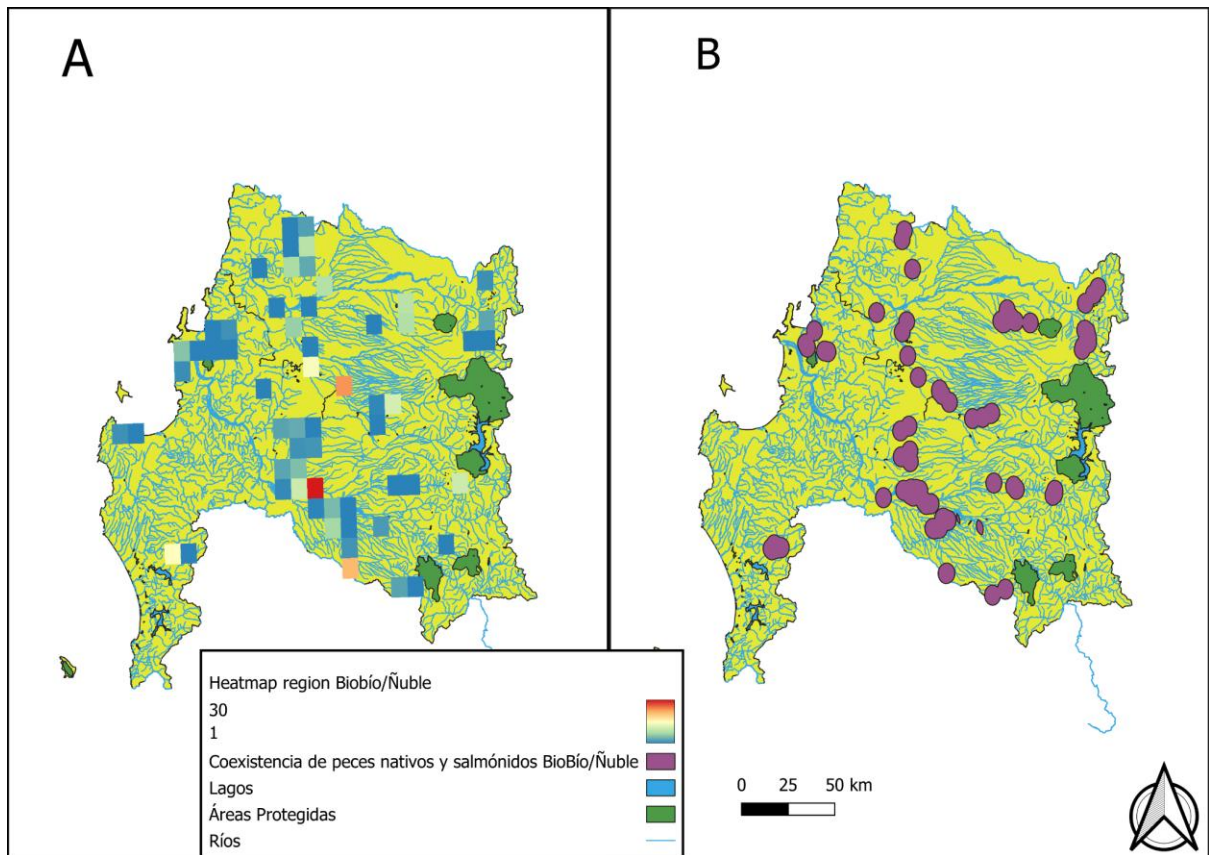


Figura 4: Mapa de calor de registros de peces nativos (A) y mapa de áreas de coexistencia de peces nativos y salmónidos (B) en las regiones del Biobío y Ñuble.

El resultado del test de chi-cuadrado que compara áreas de coexistencia e influencia Pearson fue $\chi^2 = 461.19$ siendo éste superior al valor crítico 0.71, por lo que podemos rechazar la hipótesis nula de independencia. Esto quiere decir que existe una dependencia en la diferencia de las áreas de influencia y coexistencia de peces nativos y salmónidos con las regiones del Biobío/Ñuble, Araucanía y los Ríos (Anexo 3).

Análisis de contenido estomacal

Se analizó un total de 36 estómagos de salmón coho (*O. kisutch*) y 313 estómagos de salmón Chinook (*O. tshawytscha*) muestreados durante los años 2021, 2022, 2023 y 2024, a partir de monitoreos realizados en Caleta La Barra y Puerto Saavedra, Región de la Araucanía

Tabla 3. Número de estómagos analizados por especie y por año

| año/especie | <i>O. kisutch</i> | <i>O. tshawytscha</i> |
|-------------|-------------------|-----------------------|
| 2020 | 18 | 0 |
| 2021 | 0 | 137 |
| 2022 | 0 | 99 |
| 2023 | 7 | 47 |
| 2024 | 11 | 30 |
| Total | 36 | 313 |

Del total de N=36 muestras de salmón coho (*O. kisutch*) obtenidos en Caleta La Barra: 18 correspondió al año 2020, 7 al año 2023, y 11 para el año 2024. Y para salmón Chinook (*O. tshawytscha*) se tomaron muestras de dos localidades: Puerto Saavedra y Caleta La Barra. Se analizó un total de 313 estómagos: 137 muestras corresponden a la localidad de Puerto Saavedra del año 2021; 176 corresponden a la localidad de Caleta La Barra: 99 son del año 2022, 47 al año 2023, y 30 al año 2024. Todo esto tabulado en la tabla 3.

Análisis de Contenido estomacal

En la Figura 5 se puede apreciar las distintas categorías de contenido estomacal, dependiendo del grado de digestión del contenido.



Figura 5: Fotografía del contenido estomacal de una de las muestras, donde podemos apreciar las 3 categorías del contenido; a) contenido identificable, b) teleósteos muy digeridos, y c) contenido muy digerido.

Dentro de la categoría de contenido identificable pudimos identificar dos especies: sardina común (*Strangomera bentincki*) y anchoveta (*Engraulis ringens*). También se identificó elementos no digeribles, como fragmentos plásticos y piedras.

Se comparó la relación entre la proporción peso del contenido estomacal/peso del estómago para las dos especies, salmón coho y salmón Chinook. Se visualizó un mayor número de valores de proporción cercanos a 0 para salmón Chinook que para salmón coho (Figura 6), posiblemente indicando que la especie salmón Chinook muestra una mayor frecuencia de estómagos vacíos que el salmón coho.

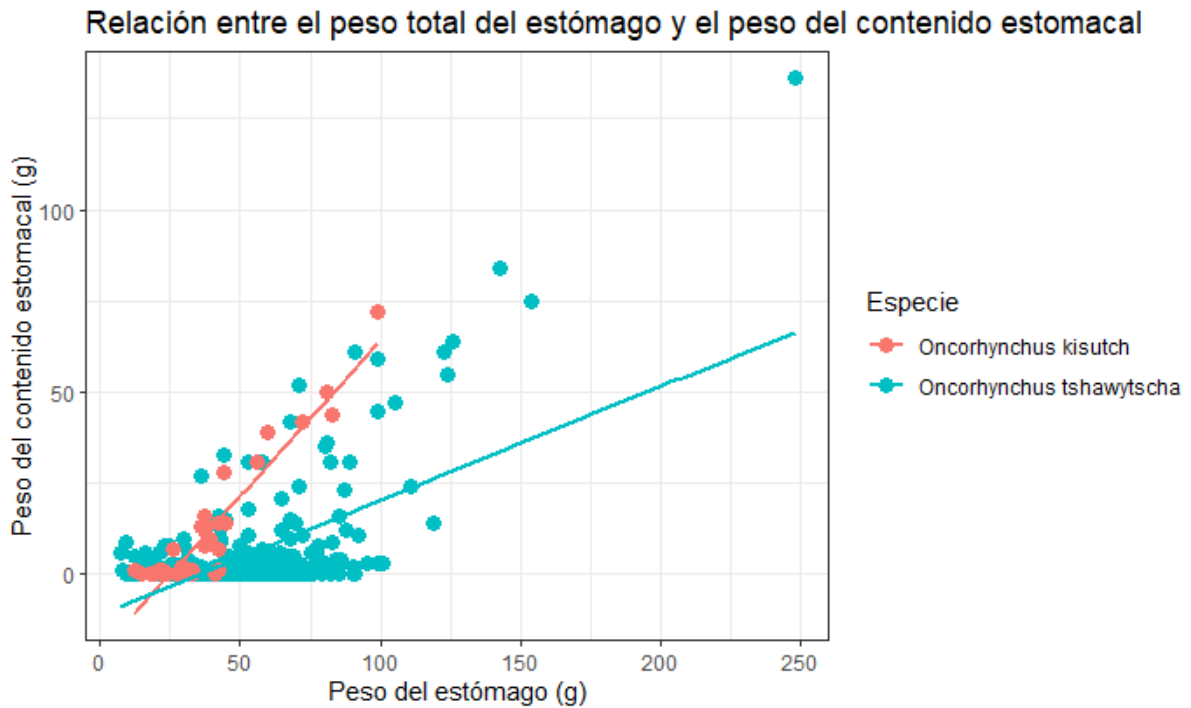


Figura 6. Relación entre el peso de la muestra y el peso total del contenido estomacal por especie.

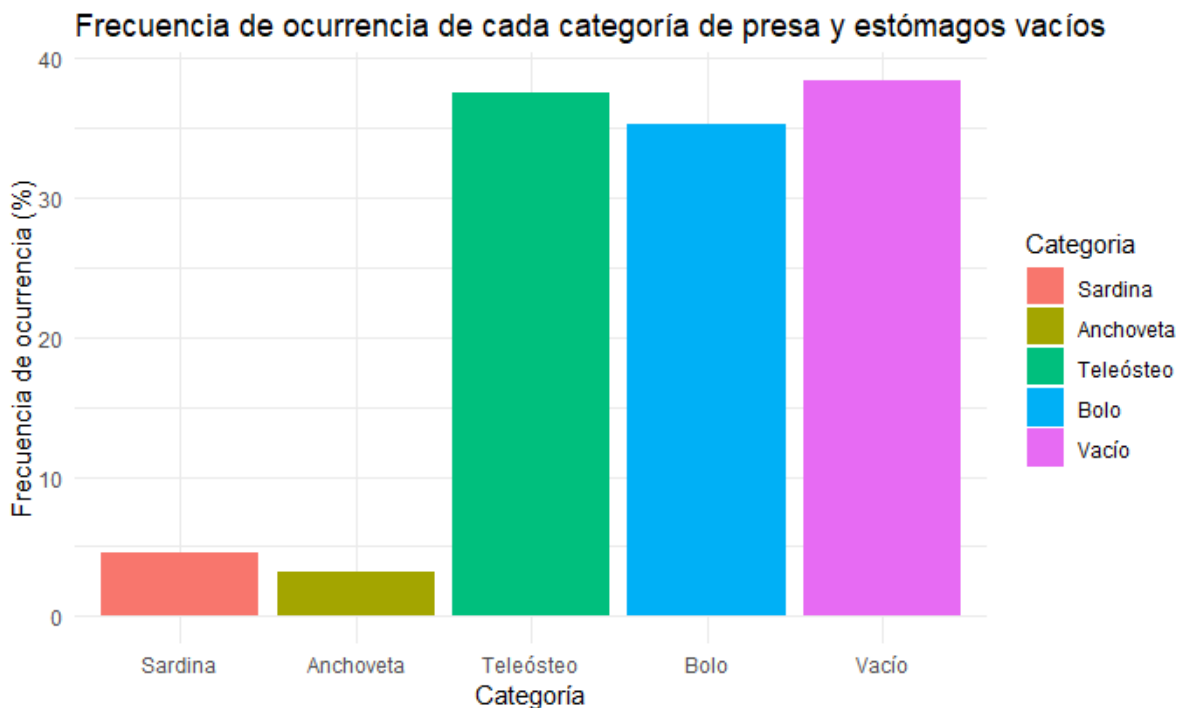


Figura 7: Frecuencia de ocurrencia de cada categoría de cada ítem de contenido.

La Figura 7 muestra la frecuencia de ocurrencia de cada categoría de contenido digerido, donde podemos ver que el contenido estomacal llega mayoritariamente

digerido o el estómago llega vacío. En la Figura 8 podemos notar la diferencia entre especies, siendo que en salmón Chinook el contenido llega aún más digerido.

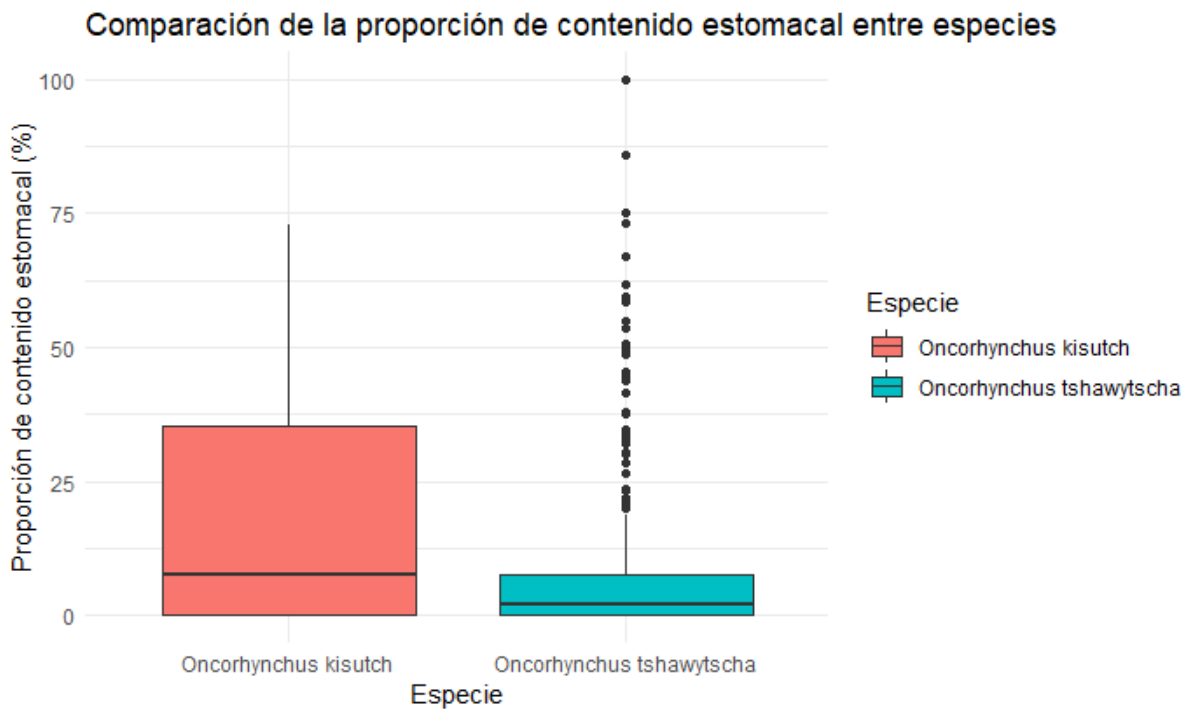


Figura 8. Comparación de la proporción de contenido estomacal entre salmón Chinook (*Oncorhynchus tshawytscha*) y salmón coho (*Oncorhynchus kisutch*).

Índice gonadosomático (IGS)

Se obtuvo estimación de IGS para la especie trucha arcoíris (Tabla 4), salmón coho (Tabla 5), y salmón Chinook (Tabla 6). La mayoría de las gónadas muestreadas correspondieron a machos, a excepción de trucha arcoíris, las que todas las gónadas eran de hembras. Los IGS más bajos se obtuvieron en trucha arcoíris, seguidos de salmón Chinook y salmón coho con los IGS más altos. La Figura 8 establece una correlación positiva entre el peso total del individuo y el peso de la gónada en las tres especies de salmónidos (*O. mykiss*, *O. kisutch* y *O. tshawytscha*). Esto sugiere que, a mayor tamaño corporal, mayor es la inversión en tejido reproductivo. Se aprecian diferencias entre especies: la trucha arcoíris (en verde) presenta los valores más bajos, por lo que sus gónadas también tienen un peso mejor en comparación a las otras especies. En el caso del salmón coho (en rojo) se muestra en un rango intermedio de peso total, pero con un incremento pronunciado del peso de la gónada a medida que aumenta el peso corporal. Para salmón Chinook, alcanza los mayores

pesos totales, y sus gónadas también pueden llegar a pesos altos. La pendiente de la relación indica que, a medida que el pez crece, la inversión en gónadas crece de forma consistente.

Tabla 4. Tabla de cálculo del índice gonadosomático (IGS) de trucha arcoíris

| Especie | Peso gónadas (g) | Peso total individuos (g) | IGS |
|------------------|------------------|---------------------------|------|
| <i>O. mykiss</i> | 3 | 595 | 0,50 |
| <i>O. mykiss</i> | 4 | 600 | 0,67 |
| <i>O. mykiss</i> | 4 | 700 | 0,57 |
| <i>O. mykiss</i> | 2 | 400 | 0,50 |
| <i>O. mykiss</i> | 2 | 377 | 0,53 |
| <i>O. mykiss</i> | 4 | 589 | 0,68 |

Tabla 5. Tabla de cálculo de IGS de salmón coho

| Especie | Peso gónadas (g) | Peso total individuos (g) | IGS |
|-------------------|------------------|---------------------------|------|
| <i>O. kisutch</i> | 130 | 2200 | 5,91 |
| <i>O. kisutch</i> | 143 | 2700 | 5,30 |
| <i>O. kisutch</i> | 136 | 2550 | 5,33 |
| <i>O. kisutch</i> | 98 | 2400 | 4,08 |
| <i>O. kisutch</i> | 88 | 1900 | 4,63 |
| <i>O. kisutch</i> | 103 | 2150 | 4,79 |
| <i>O. kisutch</i> | 180 | 3650 | 4,93 |

Tabla 6. Tabla de cálculo de IGS de salmón Chinook

| Especie | Peso gónadas (g) | Peso total individuos (g) | IGS |
|-----------------------|------------------|---------------------------|------|
| <i>O. tshawytscha</i> | 65 | 11200 | 0,58 |
| <i>O. tshawytscha</i> | 18 | 2000 | 0,90 |
| <i>O. tshawytscha</i> | 75 | 6300 | 1,19 |
| <i>O. tshawytscha</i> | 49 | 4400 | 1,11 |
| <i>O. tshawytscha</i> | 145 | 13600 | 1,07 |
| <i>O. tshawytscha</i> | 48 | 3600 | 1,33 |
| <i>O. tshawytscha</i> | 125 | 9450 | 1,32 |
| <i>O. tshawytscha</i> | 158 | 11000 | 1,44 |
| <i>O. tshawytscha</i> | 169 | 10800 | 1,56 |
| <i>O. tshawytscha</i> | 95 | 4500 | 2,11 |
| <i>O. tshawytscha</i> | 68 | 2500 | 2,72 |
| <i>O. tshawytscha</i> | 336 | 13000 | 2,58 |
| <i>O. tshawytscha</i> | 188 | 7800 | 2,41 |
| <i>O. tshawytscha</i> | 272 | 11500 | 2,37 |
| <i>O. tshawytscha</i> | 64 | 2150 | 2,98 |
| <i>O. tshawytscha</i> | 254 | 8800 | 2,89 |
| <i>O. tshawytscha</i> | 331 | 9700 | 3,41 |
| <i>O. tshawytscha</i> | 132 | 3200 | 4,13 |

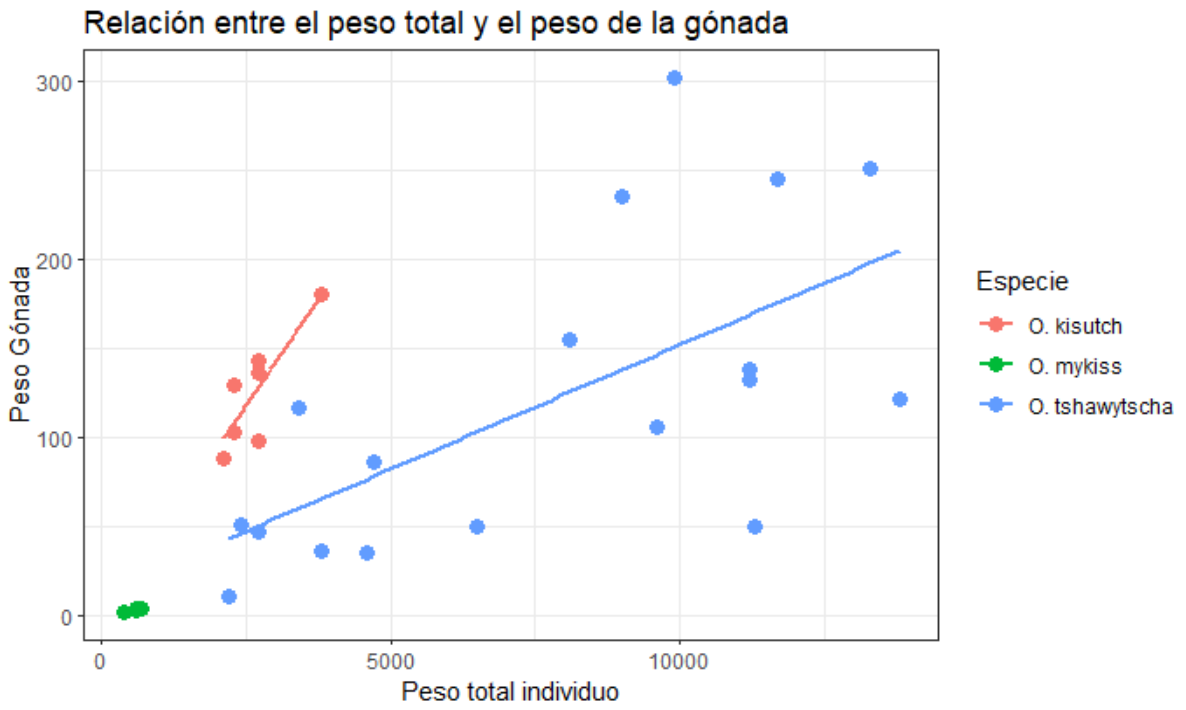


Figura 9. Relación peso total del individuo versus peso de su gónada para trucha arcoíris, salmón Chinook y salmón coho

DISCUSIÓN

En esta habilitación profesional se abordó la implementación de tres metodologías para el estudio de impactos de los salmónidos en sistemas acuáticos de nuestro país. La primera metodología nos mostró la importancia de los sistemas de información geográfica a la hora de estudiar a las especies invasoras y su coexistencia con las especies nativas. La segunda metodología reveló las principales presas que consumen salmón coho y salmón Chinook en su fase de crecimiento en el mar de Chile. Por último, la tercera metodología abordó el estado reproductivo de los salmónidos retornantes y residentes del río Tolden. A continuación, se discuten los resultados.

Sistemas de Información Geográfica

Los peces nativos de agua dulce presentan un preocupante estado de conservación (Habit et al., 2006), considerando el impacto negativo de los salmónidos invasores en la biodiversidad nativa (Arismendi et al., 2014). La identificación de áreas donde es probable que las especies nativas de peces coexistan con salmónidos mediante implementación de SIG podría ser de gran ayuda para priorizar esfuerzos de conservación. La utilidad de este enfoque ha sido ilustrada por varios estudios recientes, que han aplicado modelos de distribución de especies para predecir áreas de conflicto entre especies invasoras conocidas y especies particulares de interés o áreas ecológicas sensibles (Vicente et al., 2011; Vicente et al., 2013). Trabajos como Kajee *et al.* (2023) y Panlasigui *et al.* (2018) que han hecho un trabajo similar usando SIG tienen una larga base de datos que les ha permitido mapear riqueza de especies, presión de invasión acumulada, o un índice de prioridad, en los cuales proponen aumentar los planes de manejo y conservación de especies nativas.

Las áreas de influencia de salmónidos fueron mayores en la región de Los Ríos que en La Araucanía, lo que podría deberse a una mayor propagación de estas especies en cuencas como el río Bueno y Valdivia (Basulto, 2003). La historia de propagación de las principales especies de salmónidos que formaron parte de este análisis, como trucha arcoíris y trucha café, revela una notable influencia antropogénica en la distribución actual de estas especies en estas regiones. En el caso de la trucha arcoíris, se constata su introducción principalmente con fines de pesca deportiva y

acuicultura en cuerpos de agua seleccionados. Asimismo, la trucha café, fue introducida en esta región en diferentes momentos para aumentar la diversidad de especies de pesca y como resultado de la práctica histórica de la introducción de especies exóticas en cuerpos de agua (Basulto, 2003).

El análisis estadístico (Anexo 3) también mostró que hubo diferencias significativas en las áreas de influencia y coexistencia de peces nativos y salmónidos entre las regiones Biobío/Ñuble, Araucanía y los Ríos. Es posible que esto esté explicado por mayor número de registros de peces nativos en Biobío/Ñuble que en otras regiones. La región del Biobío y Ñuble representan una zona caliente de diversidad de peces nativos, lo que se ha destacado en diversos estudios (Habit, 2005; Valenzuela-Aguayo et al., 2019), además de efectivos procesos de translocación de peces nativos como medida de mitigación (Habit et al., 2002). El río Biobío tiene la característica de ser una zona de transición, donde podemos encontrar especies que tienen su límite norte - como *Aplochiton zebra* - y otras que tienen su límite sur - como *Percichthys melanops* -, y microendemismo de *Percilia irwini*, especie que sólo se encuentra en el río Biobío y en el río Andalién (Habit et al., 2006).

Análisis contenido estomacal

El análisis de contenido estomacal nos entrega información de las presas que el pez consumió en las horas previas a ser capturado, y en este caso, la alimentación en adultos de salmón Chinook y salmón coho durante su permanencia en la zona marina cercana a la costa de la región de la Araucanía, se sustenta en especies pelágicas. Su dieta fue principalmente piscívora, por lo que el salmón Chinook y el salmón coho tendrían roles como consumidores secundario y terciario. La dieta de estas especies es muy similar en el hemisferio norte donde son nativos. Se ha reportado que la dieta de ambas especies de salmones, que presentan una historia de vida muy parecida (Quinn, 2018), es principalmente peces pelágicos, cefalópodos, larvas de decápodos y eufáusidos (Beamish, 2018).

La sardina común (*Strangomera bentincki*) y la anchoveta (*Engraulis ringens*) serían las principales presas de los salmones cuando se encuentran en su etapa de

crecimiento en el mar de Chile. Sardina y anchoveta son dos especies claves para las redes tróficas marinas del sistema de la corriente de Humboldt, sirviendo de alimento para diversas especies de peces y aves marinas, y ambas constituyen recursos pesqueros de importancia para una flota industrial y artesanal de cerco (Cubillos et al., 2001; Espinoza & Bertrand, 2008). Su importancia, tanto económica como cultural, es enorme, ya que en especies pelágicas -sardina, anchoveta y, adicionalmente, jurel- se concentran las mayores cuotas de pesca industrial y donde se desarrolla la pesquería artesanal de cerco del país (SERNAPESCA, 2023). Las evaluaciones hidroacústicas realizadas por el Instituto de Fomento Pesquero (IFOP) demuestran que tanto sardinas como anchovetas se distribuyen de manera abundante en la zona costera de las cercanías del río Toltén (Saavedra-Godoy, 2022). La presencia y gran disponibilidad de estos pequeños peces pelágicos en las cercanías de las zonas muestreadas explicaría por qué el contenido estomacal analizado sea abundante en estas especies, lo que concuerda con estudios previos en la zona (Gomez-Uchida et al., 2016; Musleh-Vega, 2023 datos no publicados). La predominancia de sardina y anchoveta en la dieta del salmón Chinook y del salmón coho subraya la importancia de estas especies en la ecología trófica del salmón en su etapa marina. Dado que tanto la sardina como la anchoveta son especies clave en los ecosistemas marinos, su alta frecuencia en la dieta del salmón Chinook podría tener consecuencias significativas para las poblaciones de estas presas. La dieta, tanto de salmón Chinook como de salmón coho, en su fase oceánica puede variar en su densidad y cantidad. Ambas especies de salmón en el océano pueden no ser un riesgo para la fauna nativa, ya que, por lo menos en la zona cercana a la desembocadura del río Toltén, se alimentan de especies que no presentan un problema de conservación (IUCN, 2025). Además, su pesca se encuentra regulada por un régimen de pesca. Sabemos que, en su hábitat natural, el hemisferio norte, estas especies de salmón realizan grandes migraciones, por lo que estudios a futuro que nos den a conocer con mayor exactitud la abundancia de estas especies nos permitiría estimar mejor el impacto de estas especies sobre los ecosistemas marinos de Chile.

La elevada frecuencia de estómagos vacíos (Figura 7) puede explicarse por una dieta piscívora. Los piscívoros comen menos, pero en promedio más grandes y con mayor densidad energética que las especies que se alimentan en niveles tróficos inferiores (Vinson & Angradi, 2011). Las limitaciones del análisis estomacal por un porcentaje

importante de estómagos vacíos se pueden abordar mediante el análisis de isótopos estables, una técnica complementaria que supera estos sesgos al integrar información dietética a más largo plazo. A diferencia del contenido estomacal, que solo refleja la ingesta reciente, los isótopos estables en tejidos como músculos y aletas proporcionan datos sobre la asimilación trófica durante semanas (Boecklen et al., 2011).

Índice gonadosomático (IGS)

En agua dulce las especies de salmónidos residentes, como lo son la trucha arcoíris y la trucha café, no presentan depredadores naturales y tienen el potencial de generar un mayor efecto negativo en la fauna nativa (Soto et al., 2006), ya que coexisten con especies que presentan un preocupante estado de conservación (Habit et al., 2006). El IGS puede ser una herramienta útil para el manejo de poblaciones de especies residentes, ya que permite monitorear su estado reproductivo y predecir eventos de desove, facilitando la implementación de medidas de control en ventanas temporales, especialmente en áreas donde esta especie es invasora .

Los análisis del índice gonadosomático (IGS) reveló patrones reproductivos contrastantes entre las especies estudiadas. En las truchas arcoíris (*O. mykiss*), los valores de IGS fueron consistentemente menores al 1% (tabla 4), indicando que los individuos analizados se encontraban en una fase de reposo reproductivo o crecimiento somático, sin desarrollo gonadal avanzado. En esta especie, que presenta múltiples eventos reproductivos (especie iterópara, Tabla 1), por lo que su IGS varía durante el año y alcanza su máximo desove en invierno o principios de primavera en el hemisferio sur (Soto et al., 2006), lo que coincide con lo esperado de estas muestras que fueron muestreadas en verano.

Por otra parte, las muestras de salmón coho (*O. kisutch*) resultaron ser todos machos, se registraron valores de IGS superiores al 5%, un umbral que, aunque modesto en comparación con las hembras (que pueden superar el 15%) (Fleming & Gross, 1990), confirma su estado reproductivo activo. Esta diferencia refleja la disparidad en el tamaño gonadal entre sexos: mientras los testículos son proporcionalmente más pequeños, su desarrollo es suficiente para garantizar la fertilización durante el desove.

En relación al salmón Chinook (*O. tshawytscha*), los valores de IGS varían desde 0.58% hasta 4.13%, lo que indica una considerable variabilidad en el desarrollo gonadal entre los individuos muestreados. Las gónadas examinadas eran todas de individuos machos, cuyos valores de IGS son más bajos en comparación con las hembras (Fleming & Gross, 1990) También puede explicarse porque los peces muestreados podrían estar en distintas fases de maduración gonadal.

El IGS es una herramienta clave para evaluar el potencial invasivo de los salmónidos introducidos, ya que refleja su capacidad reproductiva y adaptación a nuevos ecosistemas. Valores altos de IGS demuestran que algunas especies presentan una mayor inversión energética en reproducción, lo que favorece su establecimiento y dispersión en hábitats invadidos (Jonsson & Jonsson, 2011). Además cuando los salmónidos introducidos muestran valores de IGS consistentemente elevados en sus nuevos hábitats, esto indica que han logrado adaptar su ciclo reproductivo a las condiciones locales, superando posibles barreras fisiológicas o ambientales (Fleming & Gross, 1990; Quinn et al., 2000)

CONCLUSIÓN

El estudio de impactos tróficos de los salmónidos introducidos en Chile demuestra la necesidad crítica de adoptar enfoques multidisciplinarios que integren escalas espaciales, biológicas y ecológicas. La combinación de SIG, análisis de contenido estomacal e índice gonadosomático ha permitido caracterizar el impacto sobre especies nativas y también identificar patrones espaciales en regiones. Los resultados con SIG nos mostraron lugares en que los salmónidos residentes y peces nativos coexisten en lugares de registros de peces nativos, y, además, la visualización de estos datos geoespaciales ha sido importante mejorar el estado de conocimiento de coexistencia entre peces nativos y salmónidos, y también identifiqué al río Biobío como una cuenca interesante debido a su alto registro de peces nativos, lo que lo convierte en una zona en la cual maximizar esfuerzos de conservación. El análisis de contenido estomacal nos mostró que las principales presas de los salmones en su fase de crecimiento en el mar son sardina común y anchoveta, además que esta metodología presenta limitaciones que requiere que sea complementada con isótopos estables o genómica. Y los resultados del IGS nos revelaron el estado reproductivo de los salmones de las zonas aledañas a la desembocadura del río Toltén, pero la limitada cantidad de muestras no permite proyectar más allá de lo analizado, por lo que muestrear a lo largo del tiempo permitiría captar las variaciones estacionales, lo que es esencial para comprender mejor el ciclo reproductivo. Estos resultados revelan cómo los salmónidos alteran las redes tróficas, tanto en aguas continentales como aguas marinas, actuando como depredadores y competidores. Los resultados muestran la urgencia de implementar estrategias de conservación basadas en evidencia científica que consideren a estas especies como especies exóticas invasoras que son. A futuro, en un escenario que junte todo esto en un trabajo se puede ampliar el marco metodológico, incorporando técnicas como isótopos estables o genómica para predecir escenarios de invasión bajo cambios globales.

BIBLIOGRAFÍA

- Arismendi, I., Penaluna, B. E., Dunham, J. B., García De Leaniz, C., Soto, D., Fleming, I. A., Gomez-Uchida, D., Gajardo, G., Vargas, P. V., & León-Muñoz, J. (2014). Differential invasion success of salmonids in southern Chile: Patterns and hypotheses. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 24(3), 919-941. <https://doi.org/10.1007/s11160-014-9351-0>
- Arismendi, I., Soto, D., Penaluna, B., Jara, C., Leal, C., & León-Muñoz, J. (2009). *Aquaculture, non- native salmonid invasions and associated declines of native fishes in Northern Patagonian lakes*. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-2427.2008.02157.x>
- Astorga, M. P., Valenzuela, C., Arismendi, I., & Iriarte, J. L. (2008). Salmones Chinook asilvestrados en el norte de la Patagonia chilena: ¿se originan desde escapes de cultivo? *Revista de biología marina y oceanografía*, 43(3), 669-674. <https://doi.org/10.4067/S0718-19572008000300025>
- Basulto, S. (2003). *El largo viaje de los salmones. Una crónica olvidada. Propagación y cultivo de especies acuáticas en Chile*. (Maval Ltda).
- Beamish, R. J. (2018). *The ocean ecology of Pacific salmon and trout*. Canada: American Fisheries Society. DOI: 10.47886/9781934874455.
- Blackburn, T. M., Pyšek, P., Bacher, S., Carlton, J. T., Duncan, R. P., Jarošík, V., Wilson, J. R. U., & Richardson, D. M. (2011). A proposed unified framework for biological invasions. *Trends in Ecology & Evolution*, 26(7), 333-339. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2011.03.023>
- Boecklen, W., Yarnes, C., Cook, B., & James, A. (2011). On the Use of Stable Isotopes in Trophic Ecology. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 42, 411-440. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-102209-144726>
- CONAMA (Ed.). (2008). *Biodiversidad de Chile: Patrimonio y desafíos* (2. ed., actualizada). CONAMA ; Ocho Libros.

- Correa, C., & Gross, M. R. (2008). Chinook salmon invade southern South America. *Biological Invasions*, 10(5), 615-639. <https://doi.org/10.1007/s10530-007-9157-2>
- Cubillos, L., Arcos, D., Bucarey, D., & Canales, Tm. (2001). Seasonal growth of small pelagic fish off Talcahuano, Chile (37°S, 73°W): A consequence of their reproductive strategy to seasonal upwelling? *Aquatic Living Resources - AQUAT LIVING RESOUR*, 14, 115-124.
- Dittman, A., & Quinn, T. (1996). Homing in Pacific salmon: Mechanisms and ecological basis. *The Journal of Experimental Biology*, 199(Pt 1), 83-91. <https://doi.org/10.1242/jeb.199.1.83>
- Espinoza, P., & Bertrand, A. (2008). Revisiting Peruvian anchovy (*Engraulis ringens*) trophodynamics provides a new vision of the Humboldt Current system. *Progress in Oceanography*, 79(2), 215-227. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2008.10.022>
- Fleming, I. A., & Gross, M. R. (1990). Latitudinal Clines: A Trade-Off between Egg Number and Size in Pacific Salmon. *Ecology*, 71(1), 1-11. <https://doi.org/10.2307/1940241>
- Gomez-Uchida, D., Ernst, B., Aedo, G., Canales-Aguirre, C. B., Ferrada, S., Musleh, S., Rivara, P., & Santelices, A. (2016). *Estudio biológico pesquero y sanitario de la población de salmón chinook en la cuenca del río Toltén en la Región de la Araucanía—FIPA. SUBPESCA. Fondo de Investigación Pesquera y de Acuicultura.* <https://www.subpesca.cl/fipa/613/w3-article-89445.html>
- Habit, E. (2005). Aspectos de la biología y hábitat de un pez endémico de Chile en peligro de extinción (*Diplomystes nahuelbutaensis* ARRATIA, 1987). *Interciencia*, 30(1), 8-11.
- Habit, E., Dyer, B., & Vila, I. (2006). Estado de conocimiento de los peces dulceacuícolas de Chile. *Gayana (Concepción)*, 70(1). <https://doi.org/10.4067/S0717-65382006000100016>
- Habit, E., González, J., Ortiz-Sandoval, J., Elgueta, A., & Sobenes, C. (2015). Efectos de la invasión de salmónidos en ríos y lagos de Chile: *Ecosistemas*, 24(1), Article 1. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2015.24-1.08>

- Habit, E., Victoriano, P., & Parra, O. (2002). TRANSLOCACION DE PECES NATIVOS EN LA CUENCA DEL RIO LAJA (REGION DEL BIOBIO, CHILE). *Gayana (Concepción)*, 66(2), 181-190. <https://doi.org/10.4067/S0717-65382002000200012>
- Hyslop, E. J. (1980). Stomach contents analysis—A review of methods and their application. *Journal of Fish Biology*, 17(4), 411-429. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.1980.tb02775.x>
- Jonsson, B., & Jonsson, N. (2011). *Ecology of Atlantic salmon and Brown Trout: Habitat as A Template For Life Histories* (Vol. 33). <https://doi.org/10.1007/978-94-007-1189-1>
- Krebs, C. J. (1989). *Ecological methodology*. New York, NY: Harper and Row Publishers Inc., 654 p.
- Marr, S., Olden, J., Leprieur, F., Arismendi, I., Cáleta, M., Morgan, D., Nocita, A., Sanda, R., Tarkan, A., & García-Berthou, E. (2013). A global assessment of freshwater fish introductions in mediterranean-climate regions. *Hydrobiologia*, 719, 317-329. <https://doi.org/10.1007/s10750-013-1486-9>
- McCormick, S. (1994). Ontogeny and Evolution of Salinity Tolerance in Anadromous Salmonids: Hormones and Heterochrony. *Estuaries*, 17, 26-33. <https://doi.org/10.2307/1352332>
- Musleh Vega, S. (2023). *Evaluación de las interacciones tróficas e impacto de salmónidos asilvestrados en la fauna nativa del Río Toltén*. <https://repositorio.udec.cl/handle/11594/11089>
- Myers, N., Mittermeier, R. A., Mittermeier, C. G., da Fonseca, G. A. B., & Kent, J. (2000). Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 403(6772), 853-858. <https://doi.org/10.1038/35002501>
- Putman, N. F., Lohmann, K. J., Putman, E. M., Quinn, T. P., Klimley, A. P., & Noakes, D. L. G. (2013). Evidence for geomagnetic imprinting as a homing mechanism in Pacific salmon. *Current Biology: CB*, 23(4), 312-316. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2012.12.041>
- Quinn, T. (2018). *The Behavior and Ecology of Pacific Salmon and Trout*. *University of*

- Washington Press. <https://uwapress.uw.edu/book/9780295743332/the-behavior-and-ecology-of-pacific-salmon-and-trout/>
- Quinn, Unwin, & Kinnison. (2000). Evolution of temporal isolation in the wild: Genetic divergence in timing of migration and breeding by introduced chinook salmon populations. *Evolution; International Journal of Organic Evolution*, 54(4), 1372-1385. <https://doi.org/10.1111/j.0014-3820.2000.tb00569.x>
- R Core Team. (2023). *A Language and Environment for Statistical Computing* (Versión 4.3.1) [Software]. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- Saavedra-Godoy, Á. (2022). *Evaluación hidroacústica de los stocks de anchoveta y sardina común entre las Regiones de Valparaíso y los Lagos, año 2022. Instituto de Fomento Pesquero.*
- Sepulveda, 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, 273-283. <https://doi.org/10.3354/aei00089>
- SERNAPESCA. (2023). *Anuarios Estadísticos de Pesca y Acuicultura – sernapesca.* <https://www.sernapesca.cl/informacion-utilidad/anuarios-estadisticos-de-pesca-y-acuicultura/>
- Simberloff, D. (2014). Biological invasions: What's worth fighting and what can be won? *Ecological Engineering*, 65, 112-121. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.08.004>
- Soto, D., Arismendi, I., González, J., Sanzana, J., Jara, F., Jara, C., Guzman, E., & Lara, A. (2006). Sur de Chile, país de truchas y salmones: Patrones de invasión y amenazas para las especies nativas. *Revista chilena de historia natural*, 79(1), 97-117. <https://doi.org/10.4067/S0716-078X2006000100009>
- Soto, D., Jara, F., & Moreno, C. (2001). Soto, D., F. Jara & C. A. Moreno (2001) Escaped Salmon in the Inner Seas, Southern Chile: Facing ecological and social conflicts. *Ecological Applications*: Vol. 11, No. 6, pp. 1750–1762. *Ecological Applications*, 11. <https://doi.org/10.2307/3061093>
- Thorstad, E. B., Fleming, I. A., McGinnity, P., Soto, D., Wennevik, V., & Whoriskey, F.

- (2008). Incidence and impacts of escaped farmed Atlantic salmon *Salmo salar* in nature. En 110. Norwegian Institute for Nature Research (NINA).
<https://brage.nina.no/nina-xmlui/handle/11250/2725676>
- Tonella, L. H., Ruaro, R., Daga, V. S., Garcia, D. A. Z., Vitorino Júnior, O. B., Lobato-de Magalhães, T., dos Reis, R. E., Di Dario, F., Petry, A. C., Mincarone, M. M., de Assis Montag, L. F., Pompeu, P. S., Teixeira, A. A. M., Carmassi, A. L., Sánchez, A. J., Giraldo Pérez, A., Bono, A., Datovo, A., Flecker, A. S., ... de Lucena, Z. M. S. (2023). NEOTROPICAL FRESHWATER FISHES: A dataset of occurrence and abundance of freshwater fishes in the Neotropics. *Ecology*, 104(4), e3713.
<https://doi.org/10.1002/ecy.3713>
- Valenzuela-Aguayo, F., McCracken, G., Manosalva, A., Habit, E., & Ruzzante, D. (2019). Human-induced habitat fragmentation effects on connectivity, diversity, and population persistence of an endemic fish, *Percilia irwini*, in the Biobío River basin (Chile). *Evolutionary Applications*, 13. <https://doi.org/10.1111/eva.12901>
- Vander Zanden, M. J., & Olden, J. D. (2008). A management framework for preventing the secondary spread of aquatic invasive species. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 65(7), 1512-1522. <https://doi.org/10.1139/F08-099>
- Vinson, M. R., & Angradi, T. R. (2011). Stomach Emptiness in Fishes: Sources of Variation and Study Design Implications. *Reviews in Fisheries Science*, 19(2), 63-73.
<https://doi.org/10.1080/10641262.2010.536856>

ANEXO

Anexo 1: Áreas (km²) de influencia de peces nativos y salmónidos, y su área de coexistencia en las regiones de Biobío/Ñuble, Araucanía y los Ríos observados.

| OBSERVADOS | BioBío/Ñuble | Araucanía | Los Ríos | Total |
|------------------|--------------|-----------|----------|----------|
| Áreas Nativos | 5663.01 | 1954.05 | 3293.61 | 10910.67 |
| Áreas Salmónidos | 4233.88 | 3001.93 | 3776.47 | 11012.28 |
| Coexistencia | 3384.97 | 1672.71 | 2327.03 | 7384.70 |
| Total | 13281.86 | 6628.69 | 9397.10 | 29307.66 |

Anexo 2: Tabla 3: Áreas (km²) de influencia de peces nativos y salmónidos, y su área de coexistencia en las regiones de Biobío/Ñuble, Araucanía y los Ríos esperados.

| ESPERADOS | BioBío/Ñuble | Araucanía | Los Ríos | Total |
|------------------|--------------|-----------|----------|----------|
| Áreas Nativos | 4944.58 | 2467.73 | 3498.36 | 10910.67 |
| Áreas Salmónidos | 4990.63 | 2490.71 | 3530.94 | 11012.28 |
| Coexistencia | 3346.66 | 1670.24 | 2367.81 | 7384.70 |
| Total | 13281.86 | 6628.69 | 9397.10 | 29307.66 |

Tabla de Chi-cuadrado

| Test estadístico | BioBío/Ñuble | Araucanía | Los Ríos | Total |
|------------------|--------------|-----------|----------|--------|
| Áreas Nativos | 104.38 | 106.93 | 11.98 | |
| Áreas Salmónidos | 114.75 | 104.93 | 17.07 | |
| Coexistencia | 0.44 | 0.00 | 0.70 | |
| Total | | | | 461.19 |