



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**  
**FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y OCEANOGRÁFICAS**  
**BIOLOGÍA MARINA**

**“Estimación no invasiva del desarrollo gonadal en *Salmo salar*  
(Linnaeus, 1758) mediante ecografía y parámetros morfométricos”**

TESIS PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
BIÓLOGA MARINA

Alumna: Catalina Pizarro Vásquez

Profesor Guía: Ariel Valenzuela Saldías

Julio 2025  
Concepción, Chile.



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES  
Y OCEANOGRÁFICAS

“ESTIMACIÓN NO INVASIVA DEL DESARROLLO GONADAL EN  
*SALMO SALAR* (LINNAEUS, 1758) MEDIANTE ECOGRAFÍA Y  
PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS”

Por

CATALINA PIZARRO VÁSQUEZ

SEMINARIO DE TÍTULO PRESENTADO AL DEPARTAMENTO DE  
OCEANOGRAFÍA PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
BIÓLOGA MARINA

CONCEPCIÓN - CHILE

2025

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
DEPARTAMENTO DE OCEANOGRAFÍA

Este Seminario de Título ha sido realizado en el Departamento de Oceanografía de la Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas.

Profesor Guía:

**Dr. Ariel Valenzuela Saldías**  
Facultad de Cs. Naturales y Oceanográficas  
Universidad de Concepción

Profesor Co-Guía:

**Dr. Ciro Oyarzún González**  
Facultad de Cs. Naturales y Oceanográficas  
Universidad de Concepción

Ha sido aprobada por la siguiente Comisión Evaluadora:

**Dr. Ariel Valenzuela Saldías**  
Facultad de Cs. Naturales y Oceanográficas  
Universidad de Concepción

**Dr. Ciro Oyarzún González**  
Facultad de Cs. Naturales y Oceanográficas  
Universidad de Concepción

**Dr. Fernando Cruzat Cruzat**  
Facultad de Cs. Naturales y Oceanográficas  
Universidad de Concepción

**Dr. Sergio Neira Alarcón**  
Facultad de Cs. Naturales y Oceanográficas  
Universidad de Concepción

Jefe de carrera:

**Dr. Ariel Valenzuela Saldías**  
Facultad de Cs. Naturales y Oceanográficas  
Universidad de Concepción

*A mis padres Marcela y  
Marcelo, por su apoyo  
incondicional.*

## AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a quienes han sido fundamentales en la realización de esta tesis y a lo largo de todo mi camino universitario.

A mi profesor guía, Ariel Valenzuela, gracias por el apoyo constante, por la paciencia y la confianza entregada en todo momento. Gracias por acompañarme y por ayudarme a encontrar mi verdadera pasión dentro de esta carrera.

A mi mamá, Marcela, gracias por estar siempre para mí. Por ser mi apoyo emocional siempre y también físico en mi proceso de recuperación. Nunca dejaste de estar a mi lado, escuchándome en los días buenos y sobre todo, en los difíciles. No habría llegado hasta aquí sin ti.

A mi papá, Marcelo, por enseñarme a creer en mí misma y darme el valor para ir tras mis objetivos. Tus palabras y motivación han sido una gran fuente de fuerza para mí.

A mi hermano, Matías, mi compañero de vida, mi partner. Gracias por impulsarme a soñar en grande, siempre estar a mi lado y compartir este camino con tanto cariño, complicidad y admiración mutua.

A mi amiga, Catalina, por todos los momentos felices compartidos en la carrera, por tu apoyo y por darme el hermoso regalo de ser madrina de tu hija.

Y a mis compañeros de laboratorio, Paulina, Alberto y Jorge, por su colaboración, disposición y por acompañarme en la construcción de esta tesis. Su ayuda fue esencial en este proceso.

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN.....	12
ABSTRACT .....	13
1. INTRODUCCIÓN .....	14
1.1. Importancia biológica y productiva de <i>Salmo salar</i> en el contexto chileno .....	14
1.1.1. Descripción biológica de <i>S. salar</i> .....	14
1.1.2. Reproducción y producción.....	16
1.2. Principios del uso de ecografía en evaluación reproductiva .....	19
1.2.1. Fundamento físico del ultrasonido .....	19
1.2.2. Diferenciación sexual por ecografía.....	20
1.2.3. Ecografía Doppler .....	21
1.2.4. Parámetros hemodinámicos y estado reproductivo .....	22
1.3. Justificación científica y aplicabilidad del estudio.....	23
2. HIPÓTESIS.....	25
2.1. HIPÓTESIS 1.....	25
2.2. HIPÓTESIS 2.....	25
2.3. HIPÓTESIS 3.....	25
3. OBJETIVOS .....	26
3.1. OBJETIVO GENERAL.....	26
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	26
4. METODOLOGÍA .....	27
4.1. Animales experimentales y condiciones de cultivo .....	27
4.2. Evaluación morfométrica y ecográfica .....	28
4.3. Modelo de estimación del Índice Gonadosomático (IGS*).....	30
4.3.1. Cálculo de Índice Gonadosomático (IGS) real.....	30
4.3.2. Construcción modelo estimativo de Índice Gonadosomático (IGS*).....	30

4.4. Análisis estadístico.....	31
5. RESULTADOS.....	33
5.1. Medición de variables morfométricas.....	33
5.2. Estimación del desarrollo gonadal mediante IGS.....	36
5.3. Observación ecográfica de las estructuras gonadales.....	39
5.4. Relación entre el IGS* y las variables morfométricas.....	42
5.5. Evaluación ecografía Doppler PW.....	42
6. DISCUSIÓN.....	45
7. CONCLUSIONES.....	48
BIBLIOGRAFÍA.....	50
ANEXOS.....	58

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N°1: Ilustración gráfica del funcionamiento del ultrasonido.....	20
Figura N°2: Ilustración de la curva espectral en modo PW Doppler de flujo sanguíneo en cuello humano .....	22
Figura N°3: Estanques de cultivo con ejemplares de <i>Salmo salar</i> muestreados para el estudio. ....	28
Figura N°4: Ecógrafo BMV, modelo PT50C utilizado para la evaluación gonadal de <i>Salmo salar</i> .....	29
Figura N°5: Posicionamiento ecográfico y correlación anatómica en <i>Salmo salar</i> .....	29
Figura N°6: Zona de exploración ecográfica en <i>Salmo salar</i> .....	30
Figura N°7: Histograma de frecuencia del peso corporal en ejemplares juveniles de <i>Salmo salar</i> , separados por sexo.....	34
Figura N°8: Histogramas de frecuencia de la longitud furcal (cm) en ejemplares juveniles de <i>Salmo salar</i> , separados por sexo .....	34
Figura N°9: Correlación entre la longitud furcal (cm) y el peso corporal (g) en machos y hembras de <i>Salmo salar</i> .....	35
Figura N°10: Boxplot comparativo entre la longitud furcal y el largo de la gónada en machos y hembras de <i>Salmo salar</i> pertenecientes a una misma cohorte.....	36
Figura N°11: Correlación entre el Índice Gonadosomático (IGS) y el largo de la gónada en ejemplares de <i>Salmo salar</i> de una misma cohorte .....	37
Figura N°12: Relación entre el Índice Gonadosomático (IGS) y el largo de los ovarios en ejemplares femeninos de <i>Salmo salar</i> .....	38
Figura N°13: Gráficos diagnósticos del modelo de regresión lineal ajustado para estimar el Índice Gonadosomático (IGS) en ejemplares femeninos vivos de <i>Salmo salar</i> .....	39
Figura N°14: Identificación de órganos internos en ejemplar juvenil de <i>Salmo salar</i> ....	40

Figura N°15: Imágenes ecográficas de gónadas en juveniles de <i>Salmo salar</i> .....	40
Figura N°16: Correlación entre imagen ecográfica y gónadas en machos juveniles de <i>Salmo salar</i> .....	41
Figura N°17: Correlación entre imagen ecográfica y gónadas en hembras juveniles de <i>Salmo salar</i> .....	41
Figura N°18: Correlaciones entre parámetros morfométricos y el Índice Gonadosomático (IGS) estimado ecográficamente en hembras de <i>Salmo salar</i> .....	42
Figura N°19: Evaluación espectral del flujo sanguíneo en humanos mediante ecografía Doppler color .....	43
Figura N°20: Evaluación espectral del flujo sanguíneo en <i>Salmo salar</i> mediante ecografía Doppler color .....	44

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA N°1: Clasificación de los estadios de madurez sexual en hembras juveniles de <i>Salmo salar</i> .....	18
TABLA N°2: Clasificación de los estadios de madurez sexual en machos juveniles de <i>Salmo salar</i> .....	19

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo N°1: Tabla IGS estimado en hembras de <i>Salmo salar</i> .....	59
--	----

## RESUMEN

La maduración sexual temprana representa un desafío para la industria salmonicultora chilena, debido a sus efectos negativos sobre el crecimiento, la calidad del producto y el bienestar animal. En este contexto, la presente tesis tuvo como objetivo desarrollar y validar un enfoque no invasivo para estimar el desarrollo gonadal en juveniles de *Salmo salar* (Linnaeus, 1758), mediante ecografía modo B, como alternativa a los métodos tradicionales que requieren biopsia o sacrificio de los peces. El estudio se realizó sobre un total de 176 ejemplares, en los que se registraron el peso corporal, la longitud furcal y se efectuaron evaluaciones ecográficas con un ecógrafo BMV, modelo PT50C equipado con un transductor lineal de 7–10 MHz. Los resultados demostraron que la ecografía en modo B es una herramienta altamente eficaz para la diferenciación sexual, permitiendo identificar los ovarios como estructuras anecoicas, ovaladas, homogéneas y de mayor diámetro, mientras que los testículos se observaron como bandas hiperecoicas, más delgadas, alargadas y ocasionalmente segmentadas. Uno de los logros principales fue la formulación de un modelo de regresión lineal para la estimación no invasiva del Índice Gonadosomático (IGS) en hembras, basado en la longitud ecográfica de la gónada, con un ajuste estadístico significativo ( $R^2 = 0.13$ ,  $p < 0.05$ ). Asimismo, se observó una correlación positiva y significativa entre el IGS estimado por este modelo y las variables de tamaño corporal (largo furcal y peso corporal) en hembras ( $r = 0.51$ ,  $p < 0.05$ ), indicando que los individuos de mayor tamaño tienden a presentar un mayor desarrollo gonadal. También se identificaron diferencias significativas entre sexos en el tamaño relativo de las gónadas ( $p < 0.05$ ), siendo proporcionalmente más largas en machos, en concordancia con lo reportado en la literatura respecto a la inversión energética diferencial entre sexos. En contraste, no fue posible construir un modelo predictivo confiable para estimar el IGS en machos, lo cual podría atribuirse a una mayor variabilidad morfológica o a una muestra insuficiente. Por otro lado, la evaluación del flujo sanguíneo mediante ecografía Doppler (modo PW) no arrojó datos válidos bajo las condiciones del estudio, probablemente debido al pequeño tamaño de las estructuras vasculares o a velocidades de flujo por debajo del umbral de detección del equipo.

## ABSTRACT

Early sexual maturation poses a challenge for the Chilean salmon farming industry due to its negative effects on growth, product quality, and animal welfare. In this context, the objective of this thesis was to develop and validate a non-invasive approach to estimate gonadal development in juvenile *Salmo salar* (Linnaeus, 1758) using B-mode ultrasound as an alternative to traditional methods that require biopsy or sacrifice of the fish. The study was conducted on a total of 176 specimens, in which body weight and furcal length were recorded and ultrasound evaluations were performed with a BMV PT50C ultrasound machine equipped with a 7–10 MHz linear transducer. The results demonstrated that B-mode ultrasound is a highly effective tool for sex differentiation, allowing the ovaries to be identified as anechoic, oval, homogeneous structures with a larger diameter, while the testes were observed as hyperechoic bands, thinner, elongated, and occasionally segmented. One of the main achievements was the formulation of a linear regression model for the non-invasive estimation of the Gonadosomatic Index (IGS) in females, based on the ultrasound length of the gonad, with a significant statistical adjustment ( $R^2 = 0.13$ ,  $p < 0.05$ ). Likewise, a positive and significant correlation was observed between the GSI estimated by this model and body size variables (furcal length and body weight) in females ( $r = 0.51$ ,  $p < 0.05$ ), indicating that larger individuals tend to have greater gonadal development. Significant differences were also identified between sexes in the relative size of the gonads ( $p < 0.05$ ), which were proportionally longer in males, in accordance with what has been reported in the literature regarding the differential energy investment between sexes. In contrast, it was not possible to construct a reliable predictive model to estimate the IGS in males, which could be attributed to greater morphological variability or an insufficient sample size. On the other hand, the evaluation of blood flow using Doppler ultrasound (PW mode) did not yield valid data under the study conditions, probably due to the small size of the vascular structures or flow velocities below the detection threshold of the equipment.

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Importancia biológica y productiva de *Salmo salar* en el contexto chileno

### 1.1.1. Descripción biológica de *S. salar*

Chile es el segundo mayor productor mundial de salmón de cultivo, después de Noruega (Bustos-Gallardo, 2017), y el principal en América (FAO, 2020). En 2024, la cosecha anual de salmón del Atlántico alcanzó las 704.671 toneladas, concentrándose entre las regiones X y XII (SERNAPESCA, 2024). La salmonicultura representa el 6% del PIB, siendo el segundo sector económico más relevante del país (Rodríguez & Martínez, 2019). Sin embargo, su magnitud conlleva desafíos ambientales y sanitarios que amenazan su sostenibilidad. Ejemplo de esto fue la crisis por anemia infecciosa del salmón (ISA) en 2005, que redujo la producción de 400.000 a 100.000 toneladas en 2010 (Asche *et al.*, 2009). Asimismo, el piojo de mar *Caligus rogercresseyi* afecta negativamente el crecimiento y la supervivencia de los peces (Yatabe *et al.*, 2011). Factores como el aumento de temperatura, altas densidades y cercanía con salmones silvestres favorecen su propagación (Zalcman *et al.*, 2021).

El salmón del Atlántico es una especie generalmente anádroma, es decir, presenta una etapa de su ciclo de vida en agua dulce y otra etapa en agua salada, que se evidencia cuando alcanza la etapa juvenil y abandona su hábitat de agua dulce de origen para emprender camino hacia el océano, a través de ríos y estuarios (McCornick *et al.*, 1998). En comparación con su primera etapa en agua dulce, el salmón presenta un crecimiento a ritmo acelerado en el océano. La migración de retorno a su entorno de origen marca la obtención de su madurez sexual, por ende, presenta capacidad para desovar (Mobley *et al.*, 2021). Este proceso ocurre a partir de otoño, a causa de cambios en el fotoperiodo y en la temperatura del agua (Naeve, 2020). La fase de agua dulce, como se mencionó anteriormente, comprende desde el desarrollo embrionario hasta la esmoltificación. Desde el inicio del ciclo, el tamaño es una variable relacionada a la supervivencia, en el caso de los huevos, los más grandes presentan mayor desarrollo y por ende una eclosión más rápida que los de menor tamaño (Einum, 2003). A su vez, esta eclosión temprana da lugar

a alevines más grandes, que presentan una ventaja competitiva que podría hacer la diferencia en una esmoltificación adelantada, ya que un crecimiento más rápido en esta fase aumenta las probabilidades de una transición temprana al océano (Mobley *et al.*, 2021). El crecimiento se da a una temperatura óptima de 16° C (Finstad *et al.*, 2011). Y se mantienen en estado de alevín por varios meses (Good & Davidson, 2016). Durante la esmoltificación, los especímenes juveniles toman una coloración plateada (Jonsson & Jonsson, 2011) y en el ámbito fisiológico presentan cambios en el almacenamiento de lípidos y en la regulación iónica asociada a la adaptación a mayor salinidad (Sheridan, 1989). La maduración sexual en el caso de las hembras se da después de esmoltificar, a diferencia de los machos, que pueden madurar tanto antes como después de esmoltificar (Mobley *et al.*, 2021).

La fase marina de *S. salar* se caracteriza por un rápido crecimiento somático y acumulación de lípidos, que impulsan el desarrollo gonadal (Mobley *et al.*, 2021). Existe una relación positiva entre el tiempo de permanencia en el océano y el tamaño corporal alcanzado, pudiendo superar los 20 kg tras tres años en el medio marino (Mobley *et al.*, 2020). En algunos casos, los individuos pueden permanecer hasta cinco años en el océano antes de regresar a desovar por primera vez en agua dulce (Jonsson & Jonsson, 2011). Las hembras generalmente pasan más tiempo en la fase de agua salada, ya que los machos tienden a madurar antes (Barson *et al.*, 2015) y, además necesitan seis veces más de energía para el desarrollo gonadal y producción de huevos, ya que invierten aproximadamente un 20% de su peso corporal en las gónadas, mientras que los machos un 9% (Fleming, 1996). El salmón del atlántico presenta iteroparí, es decir, tiene la capacidad de reproducirse en diferentes momentos de su vida, generalmente de manera anual cuando alcanza su etapa adulta (Mobley *et al.*, 2021). El estado de madurez se puede asociar al índice gonadosomático (IGS), que relaciona el peso de las gónadas con el peso total del pez, esta medida se utiliza frecuentemente para evaluar el momento óptimo de reproducción (Øen, 2023). Las hembras suelen desovar con un IGS > 20 (Naeve *et al.*, 2018). El principal rasgo de diferenciación sexual es la formación de cistos de células germinales en el ovario, que se observa a partir de los 52 días posteclosión (Brown *et al.*, 2022). El fotoperíodo prolongado ha demostrado aumentar el crecimiento y la tasa de

conversión alimenticia en esta especie, así como también acelerar la maduración sexual (Al-Emran *et al.*, 2024).

En general, la reproducción en peces está regulada por el eje cerebro-hipófisis-gónada (BPG), donde el hipotálamo libera la hormona liberadora de gonadotropinas (GnRH), la que estimula a la hipófisis anterior a secretar dos gonadotropinas, la hormona folículo estimulante (FSH) y la hormona luteinizante (LH). La FSH actúa principalmente en las fases iniciales de maduración sexual, promoviendo el crecimiento gonadal y la producción de gametos, mientras que la LH aumenta hacia el final de la maduración sexual (Ando *et al.*, 2004). Las hormonas mencionadas se desplazan por el flujo sanguíneo hasta los respectivos órganos sexuales, para inducir ahí la síntesis de esteroides sexuales como el estradiol y la 11-cetotestosterona, dos hormonas primordiales para la maduración gonadal (Naeve, 2020). El sistema kisspeptina/GPR54 también influye en la regulación de la maduración sexual junto a neurotransmisores como la dopamina, el neuropéptido Y (Chi *et al.*, 2017) y el ácido  $\gamma$ -aminobutírico (GABA), que estimulan la secreción de gonadotropinas influenciados por el sexo y la etapa reproductiva del pez (Mañanos *et al.*, 1999). A su vez, los esteroides E2 y T regulan el eje a través de mecanismos de retroalimentación positiva o negativa, también influenciados por la etapa de maduración y el sexo lo requieran (Ando *et al.*, 2004).

### **1.1.2. Reproducción y producción**

La maduración temprana en el salmón del atlántico es una preocupación importante en la industria, ya que ocasiona pérdidas económicas significativas debido a la reducción de las tasas de crecimiento y la menor calidad de la carne (Rivera *et al.*, 2021). Dentro de los principales factores de riesgo de la maduración temprana están las dietas con alto contenido de grasas, la manipulación excesiva del fotoperíodo para retrasar el desove y los cambios en la temperatura del agua (Rivera *et al.*, 2021). La maduración temprana ocurre más a menudo en machos, debido a la menor inversión energética en el desarrollo gonadal en comparación con la producción de huevos de las hembras (Imsland & Methúsalemsson, 2024). Controlar el momento de la maduración sexual, a través de manipulación del fotoperíodo o con herramientas genéticas puede disminuir la ocurrencia

de maduración precoz (Taranger *et al.*, 1998, Rivera *et al.*, 2021). La proporción sexual es un parámetro clave para la conservación de poblaciones de salmones (White *et al.*, 2016), sin embargo, al no presentar dimorfismo sexual, la determinación precisa del sexo sólo se puede llevar a cabo identificando las gónadas, ya sea por métodos invasivos letales o métodos no invasivos. Dentro de los métodos tradicionales actuales que existen están algunas técnicas genéticas con una precisión de alrededor de 97% (Robertson *et al.*, 2023), estudios hormonales como el Radioinmunoensayo (RIA) que mide los niveles de vitelogenina (Vg), estradiol (E2) y 11-keto-testosterona (11-keto) para determinar los estadios de maduración, presentando niveles más bajos los machos de Vg y E2 y medición de los niveles de gonadotropinas que aportan información sobre el estado reproductivo (Idler *et al.*, 1981). Existen estudios desde la década del 90 como el de Matson, 1991, que comienzan a considerar el ultrasonido como un método válido de evaluación gonadal, buscando opciones no invasivas como solución al perjuicio que provocaban los métodos de biopsia invasivos. En ese estudio se demostraron altos coeficientes de correlación para la medición de las gónadas, especialmente en hembras (Mattson, 1991). En este contexto, se vuelve fundamental avanzar hacia estrategias de evaluación del estado reproductivo que sean efectivas, precisas y no invasivas, especialmente considerando los impactos productivos y fisiológicos que implica la maduración sexual en *S. salar*.

Según Murza & Khristoforov (1995), se pueden diferenciar los estadios de madurez sexual diferenciados en hembra y macho según las siguientes tablas:

Estadio	Ovocitos	Peso ovarios	Aspecto externo
I	< 25 µm (transformaciones meióticas iniciales)	≤ 1–1,5 mg	Cuerpos transparentes, muy pequeños (1,5–3 mm), difíciles de ver.
II	25–430 µm (previtelogénesis, etapas 1–4)	2–3 mg; hasta 0,6–0,8 g	Inicialmente transparentes; luego opacos, rosados o amarillos, hasta 35 mm.
III (Temprano)	440–1200 µm (formación de vacuolas)	1–1,2 g; hasta 17 g	Color rosa pálido a naranja; ovocitos visibles como puntos blanquecinos.

	corticales)		
III (Tardío)	1210–7230 $\mu\text{m}$ (vitelogénesis)	3,8–24 g; hasta 3000 g	Gónadas grandes, de color rojo anaranjado; ovocitos maduros y secundarios visibles.
IV	4000–7230 $\mu\text{m}$	$\geq 200$ g (hasta 3000 g)	Ocupan toda la cavidad; ovocitos grandes, amarillo/naranja translúcidos.
V	4000–7230 $\mu\text{m}$ (ovulación, óvulos libres)	41–424 g	Gónadas colapsadas, color vino violeta; óvulos y sacos foliculares visibles.
VI (Temprano)	500–1200 $\mu\text{m}$ (ovocitos residuales, no fecundables)	Inicial: 43–424 g; luego 7–100 g	Flácidos, color rojizo oscuro; restos foliculares y ovocitos finos presentes.
VI (Tardío)	$\geq 1210$ $\mu\text{m}$ (vitelogénesis en nueva cohorte)	21–115 g	Ovocitos más grandes, de color amarillento/anaranjado más brillante.

**TABLA 1. Clasificación de los estadios de madurez sexual en hembras juveniles de *Salmo salar*.** Estadios de madurez sexual en hembras de *S. salar* descritos según el tamaño de los ovocitos más grandes, peso gonadal, coeficiente de madurez (calculado mediante la relación entre la longitud de la gónada más grande y el ancho de la cavidad abdominal en %) y características macroscópicas del ovario. La clasificación abarca desde la fase inmadura (estadio I) hasta la regresión post-ovulatoria (estadio VI tardío). (Tabla modificada de Murza & Khristoforov (1995)).

Estadio	Descripción citológica	Peso testículos	Aspecto externo
I (Inactiva)	Solo spgA, mitosis escasas, vascularización débil.	<1 mg a 29 g, según fase y tipo de individuo.	Cordones delgados, translúcidos o rosados, poco visibles.
I (Activa)	Predominan spgAL.	Igual que I inactiva.	Igual que I inactiva.
II	Aparición de cistos con spgB, spgAL aún activos.	Enanos: 14–350 mg; migratorios: 2,5–30 g.	Cordones más anchos; color rosado; vasos visibles.
III (Temprano)	Cistos con spcI y spcII.	Enanos: 28 mg–2,3 g; migratorios: 10–170 g.	Cilíndricos, grisáceos; conductos deferentes dilatándose.
III (Tardío)	Cistos con spd y spz; spz aparecen en luz ampollar.	Enanos: 0,4–11 g; migratorios: 20–800 g.	Gónadas grandes, cremosas; esperma en conductos deferentes.
IV	Ampollas llenas de spz; se	Enanos: 0,4–18,1 g;	Igual a etapa III tardía; esperma espeso al tacto.

	conservan pocos cistos con spd/spz.	migratorios: 30–800 g.	
V	Alta secreción de esperma, activación por agua.	Enanos: 1,7–16 g; migratorios: 1,4–4,9 g.	Testículos colapsados, conductos llenos de esperma.
VI (Inactiva)	>50% spz no activables; colapso de ampollas; fagocitosis espermiática.	Enanos: 27 mg–2,6 g; migratorios: 1,3–20+ g.	Testículos colapsan, se aplanan; color blanquecino a rosado.
VI (Activa)	Predominan spgAL.	Igual que VI inactiva.	Igual que VI inactiva.
VI-II	Cistos con spgB, fagocitosis disminuida.	Igual que VI inactiva.	Como etapa II, pero con conductos deferentes dilatados.
VI-III (Temprano)	Cistos con spcI y spcII.	Igual que etapa III temprana.	Como etapa III temprana, pero con conductos deferentes dilatados.

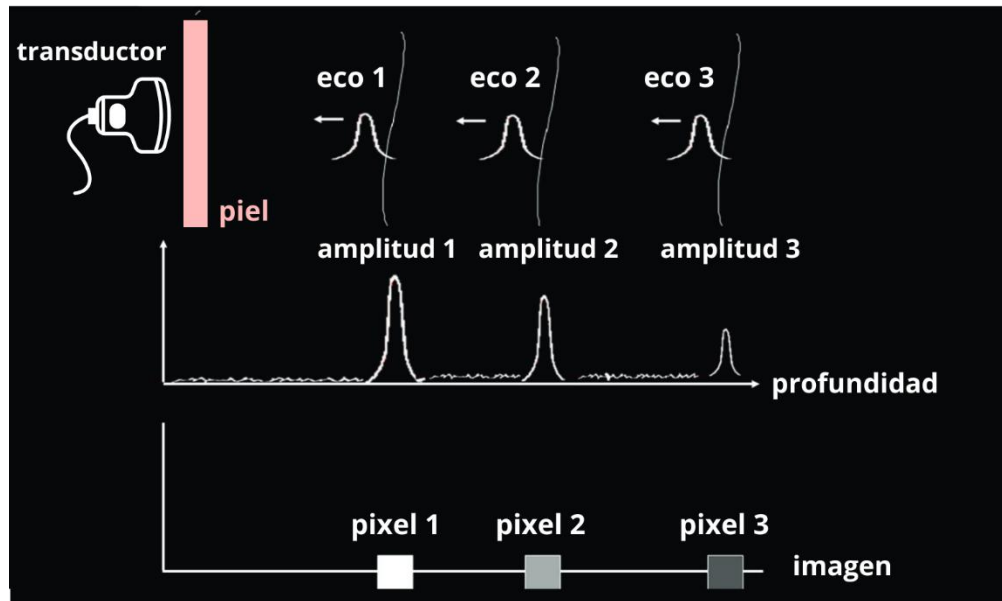
**TABLA 2. Clasificación de los estadios de madurez sexual en machos juveniles de *Salmo salar*.** Estadios de madurez sexual en machos de *S. salar*, descritos mediante características citológicas, peso gonadal, coeficiente de madurez (calculado mediante la relación entre la longitud de la gónada más grande y el ancho de la cavidad abdominal en %) y morfología externa. La clasificación comprende desde fases inmaduras (inactivas) hasta la madurez funcional y regresión post-reproductiva, considerando diferencias entre machos enanos y migratorios. Las abreviaciones citológicas utilizadas son: spgA: espermatogonias tipo A (células madre indiferenciadas); spgAD: tipo A densas (núcleo oscuro); spgAL: tipo A ligeras (núcleo claro); spgB: espermatogonias tipo B (pre-meióticas); spcI / spcII: espermatoцитos primarios/secundarios (en meiosis I y II); spd: espermatidas (post-meióticas, inmóviles); spz: espermatozoides (maduras, móviles y funcionales). (Tabla modificada de Murza & Khristoforov (1995)).

## 1.2. Principios del uso de ecografía en evaluación reproductiva

### 1.2.1. Fundamento físico del ultrasonido

La ecografía en modo B es una técnica de imagenología segura y no invasiva que utiliza ondas sonoras para producir imágenes transversales anatómicas en tiempo real de órganos y tejidos (Evans *et al.*, 2011). La fuente del ultrasonido proviene de un transductor, que funciona por el efecto piezoeléctrico, el cual convierte energía eléctrica en ondas de ultrasonido y viceversa, al aplicar esta corriente los cristales del transductor se contraen y emiten estas ondas a través de un gel conductor al cuerpo en estudio, las ondas que regresan del cuerpo examinado se conocen como “ecos” (Różyło-Kalinowska & Orhan, 2021) (Figura 1). Los transductores con una frecuencia entre 5 y 15 MHz son óptimos para visualizar estructuras superficiales del cuerpo en estudio, mientras que con rangos entre 2 a 5 MHz se utilizan para observar estructuras más profundas (Ma *et al.*, 2015). La apariencia de las imágenes ecográficas depende fundamentalmente de las interacciones

físicas del sonido con los tejidos corporales (Aldrich, 2007), de esta manera, los distintos órganos y tejidos se visualizan con diferentes intensidades de grises según su composición. Las áreas anecoicas aparecen oscuras debido a la ausencia de ecos, ya que están llenas de líquido, mientras que las zonas hiperecoicas se muestran más claras por su mayor densidad y capacidad de reflejar las ondas ultrasónicas (Schölmerich & Volk, 1986).



**Figura 1.** Ilustración gráfica del funcionamiento del ultrasonido (Imagen modificada de Novario (2024)).

### 1.2.2. Diferenciación sexual por ecografía

Cómo se mencionó en el punto 1.1.2, el sexaje en el salmón del Atlántico es de gran importancia a nivel de cultivo comercial debido a diversos factores relacionados con la optimización del sistema de producción, específicamente en el manejo de reproductores. La ecografía ha surgido como una herramienta no invasiva, convirtiéndose en un método preciso para determinar sexo y maduración gonadal. En individuos desde 50 g de peso corporal este método de sexaje presenta una precisión del 95% en machos y 97% en hembras (Naeve, 2020).

La evaluación ecográfica permite determinar la relación óptima entre machos y hembras, generalmente diez hembras por macho, para maximizar la producción de huevos (Naeve, 2020). A su vez, ambos sexos pueden mostrar diferentes patrones de crecimiento, por lo

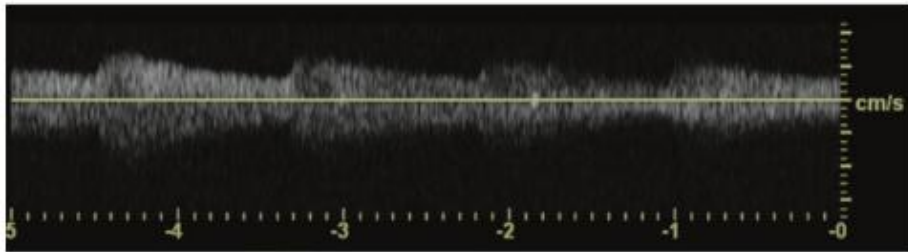
que la crianza separada podría ser beneficiosa para la industria al permitir estrategias de alimentación diferenciadas por sexo (Naeve, 2020). También puede facilitar el seguimiento del crecimiento de los huevos, su tamaño y sus atributos biológicos (Yari *et al.*, 2024).

La distinción entre ovarios y testículos se basa en la visibilidad, forma, ecogenicidad y cambios de estas características durante la maduración. Con el pez en decúbito lateral y el transductor aplicado transversalmente en la región ventrolateral del cuerpo, caudal a la aleta pectoral y por debajo de la línea lateral, el ovario se aprecia como una estructura ovalada y claramente definida (Naeve *et al.*, 2018). Los testículos pueden ser difíciles de discernir por su grosor y semejanza de ecogenicidad con órganos adyacentes como el riñón y el hígado (Nevoux *et al.*, 2019), sin embargo, abarca casi la totalidad de la cavidad abdominal y a medida que madura aumenta su ecogenicidad (Naeve *et al.*, 2019).

### **1.2.3. Ecografía Doppler**

La ecografía Doppler color se solapa a la imagen de la ecografía modo B descrita anteriormente con un mapa de color que representa el movimiento de los fluidos (Evans *et al.*, 2011), se basa en el principio de su mismo nombre, definido por Christian Andreas Doppler, que postula que las ondas de sonido y de luz cambian de frecuencia cuando el receptor se mueve (Dickey, 1997), en términos de flujo sanguíneo, se producen ecos cuando la sangre o las paredes de los vasos sanguíneos están en movimiento (Dickey, 1997). La dirección del flujo generalmente se indica de color rojo cuando es hacia el transductor y de color azul cuando se aleja del transductor (Lee, 2024). El ángulo de isonación es un parámetro crítico en la ecografía Doppler, se define como el ángulo entre la trayectoria del haz de ultrasonido y la dirección (o vector de velocidad) del flujo sanguíneo (Frühwald & Blackwell, 1992), los ángulos óptimos son de 0° o 180°, se debe evitar el ángulo de 90° (Hangiandreou & Strissel, 2017).

La información del flujo sanguíneo obtenida a través del ultrasonido Doppler se puede observar cuantificada a través de una curva espectral obtenida en el modo PW Doppler, que produce una gráfica en tiempo real donde el eje vertical representa la velocidad de la sangre y el eje horizontal representa el tiempo (Figura 2), este modo permite seleccionar la sección de estudio, denominada “compuerta de rango” (Lee, 2024; Ma *et al.*, 2015). La Velocidad Sistólica Máxima (PSV) se define como el punto más alto de la curva espectral, es decir la velocidad máxima de la sangre medida durante el ciclo cardíaco, al contrario, la Velocidad Diastólica Final (EDV), indica la velocidad del flujo sanguíneo al final de la diástole o fase de relajación del corazón (Różyło-Kalinowska & Orhan, 2021).



**Figura 2.** Ilustración de la curva espectral en modo PW Doppler de flujo sanguíneo en cuello humano (Hangiandreou & Strissel, 2017).

El Índice de Resistencia (RI) evalúa la impedancia al flujo en vasos sanguíneos más pequeños, lo puede subestimar en caso de arterias con velocidad sistólica muy alta (Lee, 2024). El índice de pulsatilidad (IP) evalúa la resistencia de los vasos sanguíneos y se utiliza generalmente para vasos donde el flujo está casi ausente durante la diástole (Dickey, 1997).

#### **1.2.4. Parámetros hemodinámicos y estado reproductivo**

En la medicina reproductiva humana, el ultrasonido Doppler se utiliza como una técnica no invasiva para investigar la dinámica del flujo sanguíneo dentro del útero y los ovarios, junto a la relación con el embarazo y la salud reproductiva (Dickey, 1997). Los parámetros descritos en el punto 1.2.2 dan información clave para comprender el estado reproductivo en este caso en humanos. La velocidad del flujo intraovárico aumenta luego de la ruptura folicular en un ciclo menstrual normal, la impedancia, que está asociada a los Índices de pulsatilidad (PI) y Resistencia (RI), disminuye después de la ruptura folicular, quiere decir

que existe menos oposición al paso del flujo (Xie *et al.*, 2001). En el estudio realizado por Szczerba *et al.*, 2019, se encontró una asociación directa entre el volumen del flujo sanguíneo y el desarrollo asimétrico de las gónadas en aves, esta relación se atribuye a la formación unilateral de la vena vitelina posterior (VVP) en el lado izquierdo, lo que incrementa el flujo sanguíneo en esa zona y por ende favorece la llegada de células germinales a la gónada izquierda.

La capacidad del ultrasonido Doppler para cuantificar parámetros hemodinámicos como la velocidad sistólica (PSV), la velocidad diastólica final (EDV), el índice de resistencia (RI), el índice de pulsatilidad (PI) y el volumen del flujo sanguíneo (Q), lo establece como una herramienta para evaluar la dinámica de la sangre asociada al desarrollo gonadal, si bien, está establecido en humanos, este estudio propone utilizar estos antecedentes como marco conceptual para su adaptación y aplicación en el estudio del flujo sanguíneo y su relación con el estado gonadal *S. salar*, con potencial de integrarse como una herramienta complementaria en el manejo reproductivo de esta especie.

### **1.3. Justificación científica y aplicabilidad del estudio**

Actualmente, las técnicas de sexaje y evaluación de madurez sexual de los reproductores dependen en gran medida de métodos invasivos como la biopsia o el sacrificio de ejemplares para análisis histológicos. Si bien existen métodos hormonales o genéticos alternativos, estos requieren equipamiento de laboratorio especializado y tiempo de procesamiento. Por lo tanto, se hace evidente la necesidad de herramientas diagnósticas no invasivas, objetivas y fácilmente aplicables en terreno, que permitan monitorear el estado reproductivo de manera confiable y óptima.

Si bien este método de sexaje no invasivo ha tomado protagonismo en el área de cultivo comercial, los estudios de uso común no son muy abundantes, ya que la gran mayoría son asociados a uso confidencial, por lo que este estudio surge como respuesta a la necesidad de estandarizar el proceso de evaluación ecográfica y así optimizar el manejo reproductivo en centros de cultivo de menor escala en el contexto acuícola nacional. De este modo, en

consecuencia con lo anteriormente planteado se define la hipótesis presentada en la siguiente sección.

## **2. HIPÓTESIS**

### **2.1. HIPÓTESIS 1**

“En individuos de una misma cohorte de *Salmo salar*, el sexo y el estado de maduración gonadal en juveniles pueden ser determinados de forma no invasiva mediante ecografía”.

### **2.2. HIPÓTESIS 2**

“Es posible estimar el Índice Gonadosomático (IGS) a partir de un modelo predictivo construido con variables morfométricas y parámetros gonadales obtenidos en ejemplares sacrificados de *Salmo salar* y establecer patrones de desarrollo reproductivo en edad temprana”

### **2.3. HIPÓTESIS 3**

“El uso de ecografía Doppler permite establecer patrones de desarrollo reproductivo en *Salmo salar* en edad temprana”.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1. OBJETIVO GENERAL**

Evaluar el estado de maduración gonadal en ejemplares juveniles de una cohorte de *Salmo salar* mediante variables morfométricas, estimación del Índice Gonadosomático (IGS) y observaciones ecográficas estructurales.

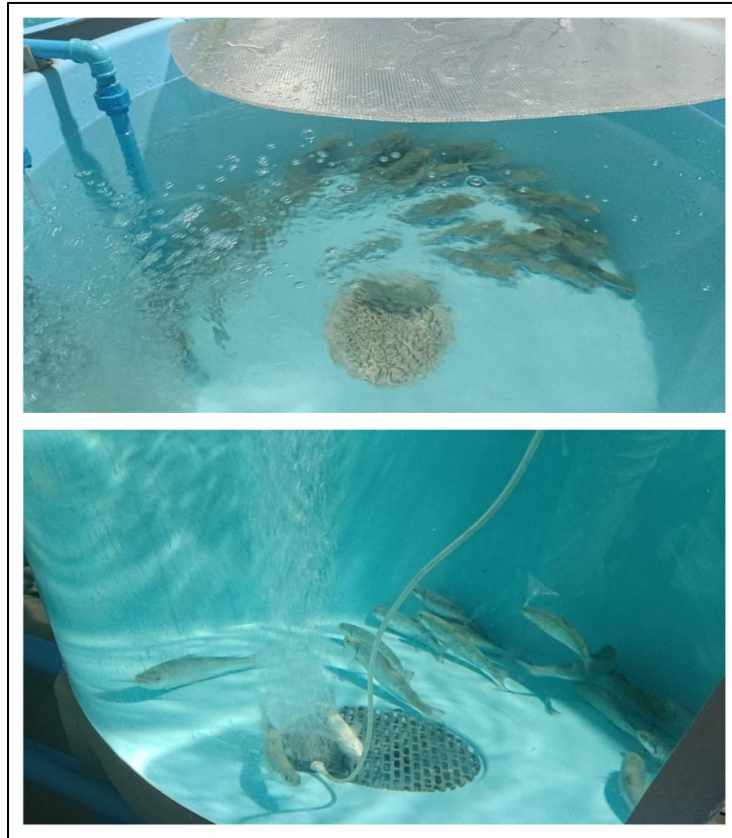
#### **3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- I. Describir visualmente las estructuras gonadales a través de ecografía modo B, registrando presencia, forma y localización relativa de los ovarios o testículos.
- II. Basado en las variables morfométricas de peso y longitud de la cohorte de *Salmo salar*, estimar el desarrollo gonadal mediante el cálculo del Índice Gonadosomático (IGS), utilizando un modelo predictivo no invasivo basado en ecografía.
- III. Analizar la relación entre el IGS y las variables morfométricas para identificar posibles correlaciones que reflejen el estado de maduración.
- IV. Evaluar el uso de ecografía Doppler para caracterizar el flujo gonadal en individuos juveniles, proponiendo recomendaciones metodológicas para futuras investigación.

## 4. METODOLOGÍA

### 4.1. Animales experimentales y condiciones de cultivo

Los 176 peces fueron mantenidos en estanques circulares de 400 L en un sistema de recirculación de agua (RAS) ubicados en el Laboratorio de Piscicultura y Patología Acuática de la Universidad de Concepción (Figura 3). La alimentación fue en base de pellets, con una frecuencia de 2 veces al día. Para la exploración ecográfica se utilizaron 76 individuos vivos de *S. salar* pertenecientes a una misma cohorte mantenida en condiciones controladas de temperatura (12-13 °C), salinidad (5 ppt) y fotoperiodo 12/12. Debido a un corte prolongado de suministro eléctrico en el laboratorio, ocasionado por condiciones climáticas adversas, se produjo la mortalidad inesperada de 100 ejemplares. Esta situación fue aprovechada para aumentar el tamaño muestral destinado al desarrollo del modelo de estimación del índice gonadosomático (IGS\*), mediante la obtención directa de datos morfométricos y gonadales de los peces fallecidos. A todos los peces se les realizó necropsia el mismo día del incidente, y los residuos biológicos fueron congelados para su posterior eliminación, siguiendo el protocolo institucional para el manejo de desechos tóxicos dispuesto por la universidad. Los procedimientos de evaluación ecográfica fueron realizados según la Directiva 2010/63/EU de la Unión Europea que establece que: “Los procedimientos que impliquen lesiones graves que puedan causar dolor intenso no se realizarán sin anestesia” (Artículo 14) (European Commission, 2010). El anestésico utilizado fue benzocaína, que se caracteriza por tener una rápida inducción y recuperación, así como una veloz eliminación de los tejidos (Meinertz *et al.*, 1999). La dosis administrada fue de 30 mg/L con no más de diez minutos de exposición.



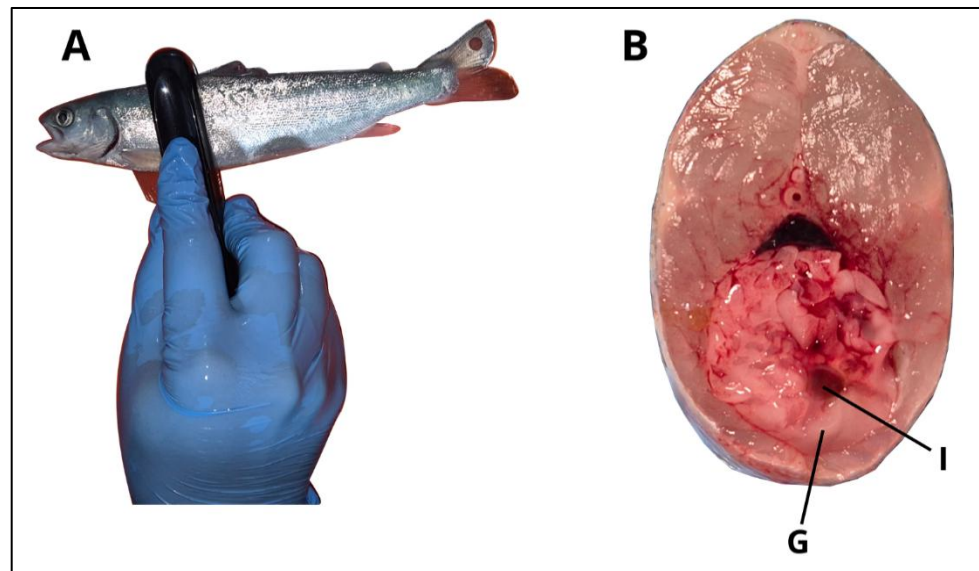
**Figura 3.** Estanques de cultivo con ejemplares de *Salmo salar* muestreados para el estudio. Elaboración propia.

#### **4.2. Evaluación morfométrica y ecográfica**

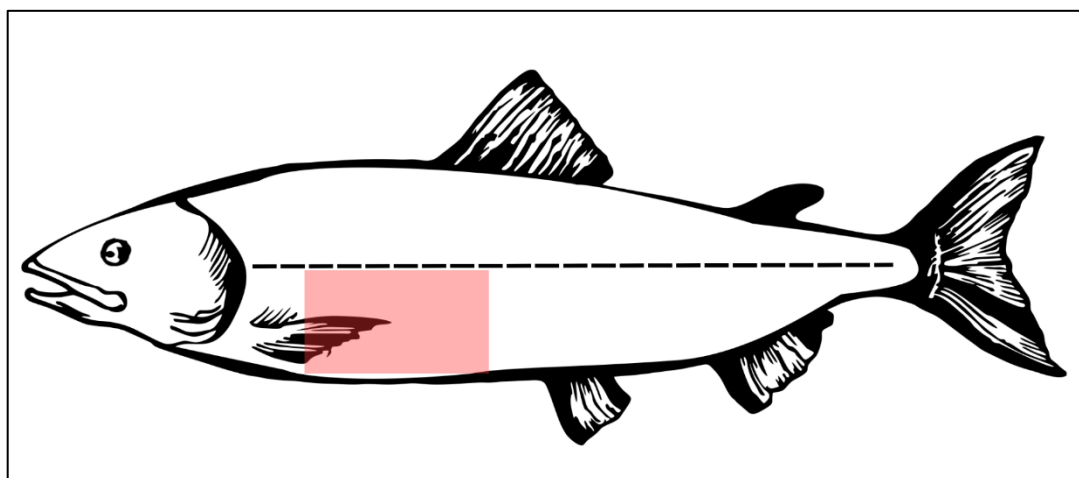
Se midió la longitud furcal (cm) utilizando un ictiómetro milimétrico y el peso corporal (g) con una balanza digital de precisión  $\pm 0,01$  g. Todos los datos fueron registrados individualmente para cada ejemplar (Anexo N°1). Las imágenes ecográficas fueron obtenidas utilizando un ecógrafo BMV, modelo PT50C, equipado con un transductor lineal de 7-10 MHz (Figura 4). Para el modo B, se utilizó una profundidad de 30 mm y una ganancia de 100%. Los peces fueron posicionados en decúbito lateral derecho sobre una bandeja, el transductor se aplicó directamente en la región ventrolateral del cuerpo, en orientación craneocaudal, caudal a la aleta pectoral y por debajo de la línea lateral, siguiendo el eje longitudinal del cuerpo (Figura 5A y 6).



**Figura 4.** Ecógrafo BMV, modelo PT50C utilizado para la evaluación gonadal de *Salmo salar*.



**Figura 5. Posicionamiento ecográfico y correlación anatómica en *Salmo salar*.** (A) Vista lateral del pez en decúbito lateral derecho, mostrando la colocación del transductor sobre la región ventrolateral del cuerpo, caudal a la aleta pectoral y por debajo de la línea lateral, con orientación craneocaudal. (B) Corte transversal anatómico que representa la disposición interna aproximada observada en la imagen ecográfica. Se identifican las gónadas (G) e intestino (I) en posición central, lo cual sirve como referencia anatómica para la interpretación de la ecografía. Elaboración propia.



**Figura 6. Zona de exploración ecográfica en *Salmo salar*.** Representación esquemática de un ejemplar de *S. salar* en vista lateral izquierda. El área sombreada en color rojo indica la región anatómica donde se posiciona el transductor para la evaluación ecográfica de las gónadas. Elaboración propia.

En la evaluación en modo Doppler PW, se obtendrán los siguientes parámetros a partir de la curva espectral: Velocidad sistólica máxima (PS), Velocidad diastólica final (ED), Velocidad promedio del flujo (TAMAX), Índice de Resistencia (RI) e Índice de Pulsatilidad (PI).

### **4.3. Modelo de estimación del Índice Gonadosomático (IGS\*)**

#### **4.3.1. Cálculo de Índice Gonadosomático (IGS) real**

Para la construcción del modelo estimativo del IGS\* a partir de la medición de las gónadas por ecografía, fue necesario calcular el IGS real del subconjunto de 100 peces necropsiados. Se tomaron las medidas morfométricas de estos ejemplares: peso corporal, largo furcal, peso y largo de las gónadas. Para la medición de las gónadas se realizó la extracción completa de ellas. El IGS real de cada pez del subconjunto fue calculado con la fórmula de Nicolsky (1963) como base, modificándola como sigue:

$$IGS = (Peso\ gónada / (Peso\ corporal - Peso\ gónada)) \times 100$$

#### **4.3.2. Construcción modelo estimativo de Índice Gonadosomático (IGS\*)**

Para estimar el Índice Gonadosomático (IGS) en otro subconjunto de peces de la cohorte de manera no invasiva, se desarrolló un modelo de regresión lineal simple en el cual se estableció una relación entre el largo de la gónada y el IGS. Este modelo fue aplicado

obteniendo la longitud de la gónada por medición externa a través de ecografía, con el pez ubicado en decúbito lateral, el transductor se aplicó directamente en la región ventrolateral del cuerpo, caudal a la aleta pectoral y por debajo de la línea lateral, la medición se obtuvo midiendo el desplazamiento del transductor de craneal a caudal, desde el comienzo al término de la gónada. Con este método se permite una estimación no invasiva del IGS.

Con el objetivo de estimar el sexo en los ejemplares necropsiados y para construir modelos diferenciados para cada sexo para la estimación de IGS, se desarrolló un modelo de regresión logística binaria (Sreejesh & Anusree, 2014) usando como variables predictoras, la diferencia entre el largo furcal y el largo de las gónadas, y el largo furcal. El modelo se entrenó con el subconjunto de peces ecografiados, cuyos sexos eran conocidos y fueron codificados como variable binaria (0 = macho, 1 = hembra). La eficiencia del modelo para discriminar entre sexos fue evaluada mediante una curva ROC (Receiver Operating Characteristic), obteniéndose un área bajo la curva (AUC) de 0.937, que indica una alta capacidad para discriminar entre sexos (Gneiting & Vogel, 2018; Krupinski, 2017). A partir de este análisis, se estableció un umbral de probabilidad de 0.8 para clasificar a un individuo como hembra. Finalmente, el modelo fue aplicado al grupo de individuos necropsiados, permitiendo estimar su sexo de forma indirecta, y así ajustar modelos predictivos de IGS separados por sexo, con mayor precisión y representatividad.

#### **4.4. Análisis estadístico**

Se utilizó RStudio (versión 2025.05.0) para todos los análisis, junto con los paquetes `pwr`, `car`, `lmtest`, `ggplot2` y `corrplot`. Se estableció un nivel de significancia estadística de  $\alpha = 0.05$ . Para evaluar el tamaño muestral de la construcción del modelo predictivo del IGS\*, se realizó un cálculo de potencia estadística utilizando la función `pwr.f2.test` del paquete `pwr` en R. Se asumió un tamaño del efecto medio ( $f^2 = 0.15$ ) y una potencia estadística del 95%, lo que arrojó un tamaño mínimo requerido de 89 individuos. Considerando esto, el tamaño muestral utilizado ( $n = 100$ ) fue considerado adecuado. Se calcularon estadísticos descriptivos como promedio y rango para las variables peso corporal y longitud furcal, para el grupo total y para cada sexo. La normalidad fue evaluada mediante la prueba de Shapiro-Wilk y dependiendo del cumplimiento de este supuesto, se definieron las pruebas

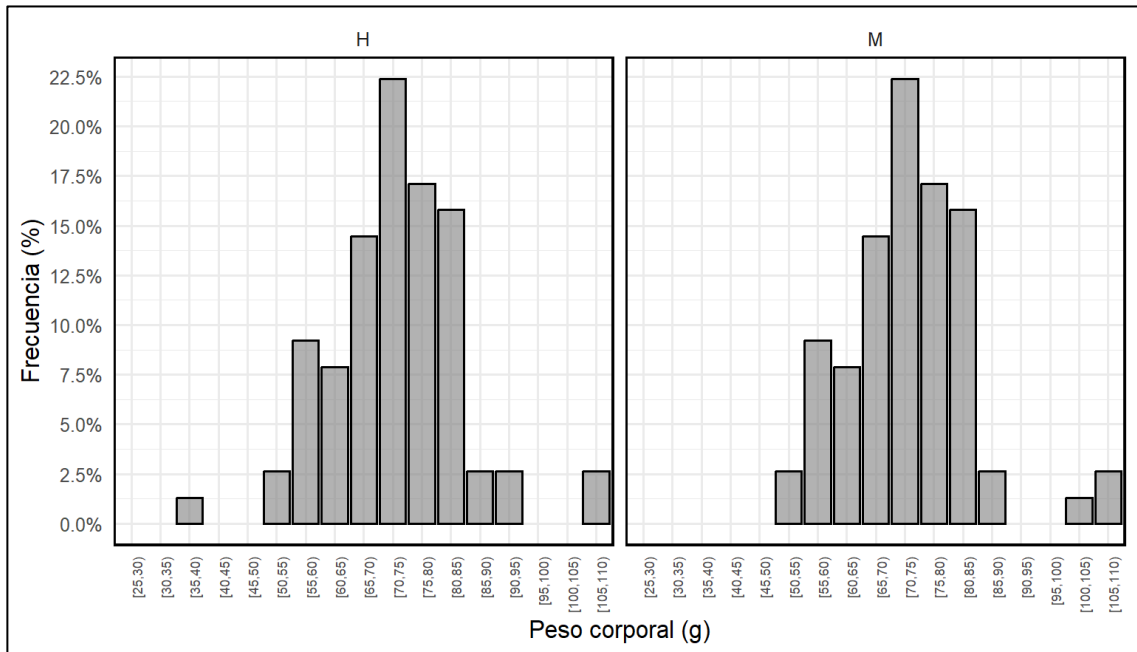
posteriores a aplicar (Cohen, 2013; Kleinman & Horton, 2010). La relación entre peso corporal y longitud furcal fue evaluada por separado en machos y hembras. En los casos en que ambas variables presentaron distribución normal, se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson y cuando alguna variable no presentó normalidad, se aplicó el coeficiente de correlación de Spearman. Los resultados se representaron gráficamente mediante diagramas de dispersión con líneas de ajuste lineal. Para explorar el patrón de desarrollo gonadal relativo a la asociación entre la longitud furcal y el largo de las gónadas, se calculó la diferencia entre estas variables y se evaluó su distribución mediante la prueba de Shapiro-Wilk. Debido a que los datos de hembras y machos no presentaron el mismo comportamiento de normalidad, se utilizó la prueba no paramétrica de Wilcoxon para comparar ambos sexos. Con el objetivo de explorar la posible asociación entre el Índice Gonadosomático (IGS\*) estimado por ecografía y el tamaño corporal de estos ejemplares, se evaluó la relación entre el IGS\* y dos variables morfométricas: largo furcal y peso corporal. Este análisis se realizó exclusivamente en hembras del grupo ecografiado, ya que como se especifica anteriormente, sólo se obtuvo el modelo de estimación de IGS\* para hembras. Se calcularon coeficientes de correlación de Pearson entre el IGS\* y cada una de las variables morfométricas mencionadas, la normalidad de los datos fue previamente verificada, y se emplearon gráficos de dispersión con línea de tendencia para visualizar las relaciones identificadas.

## 5. RESULTADOS

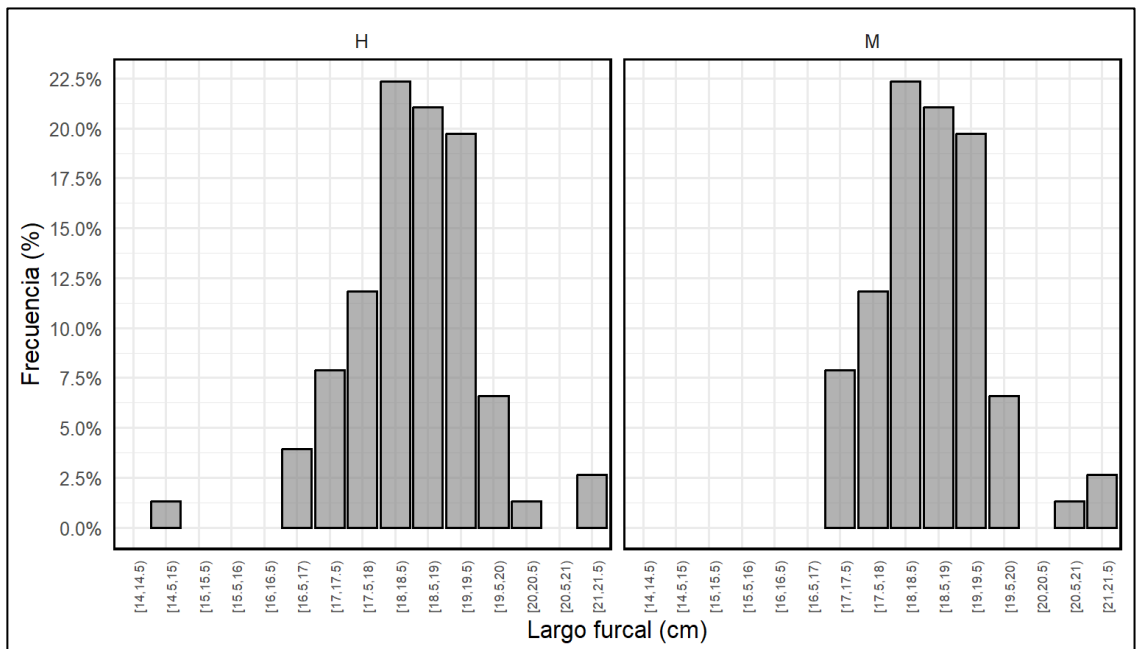
### 5.1. Medición de variables morfométricas

El peso corporal promedio del subconjunto de 76 peces fue de 72.79 g, con un rango entre 38.63 g y 107.40 g, mientras que la longitud furcal promedio fue de 18.42 cm, con valores comprendidos entre 14.50 cm y 21.20 cm. El peso corporal promedio en los machos fue de 74.64 g, con un rango entre 54.75 g y 105.05 g, mientras que la longitud furcal promedio fue de 18.39 cm, con valores comprendidos entre 14.5 cm y 21.2 cm. Y el peso corporal promedio en las hembras fue de 72.12 g, con un rango entre 38.63 g y 107.40 g, mientras que la longitud furcal promedio fue de 18.52 cm, con valores comprendidos entre 17 cm y 21 cm.

Al aplicar la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para las variables peso corporal y longitud furcal considerando a todos los ejemplares, se observó que estas variables no presentaron una distribución normal (peso corporal ( $p < 0.05$ ) y largo furcal ( $p < 0.05$ ). Sin embargo, al evaluar la normalidad por separado según el sexo, se observó que en los machos ambas variables presentaron una distribución normal (peso corporal ( $p > 0.05$ ) y largo furcal ( $p > 0.05$ ). En las hembras, el peso corporal también presentó distribución normal ( $p > 0.05$ ), mientras que la longitud furcal no cumplió con el supuesto de normalidad ( $p < 0.05$ ). Los datos se visualizan en los gráficos de histograma de peso corporal y longitud furcal (Figura 7 y 8).

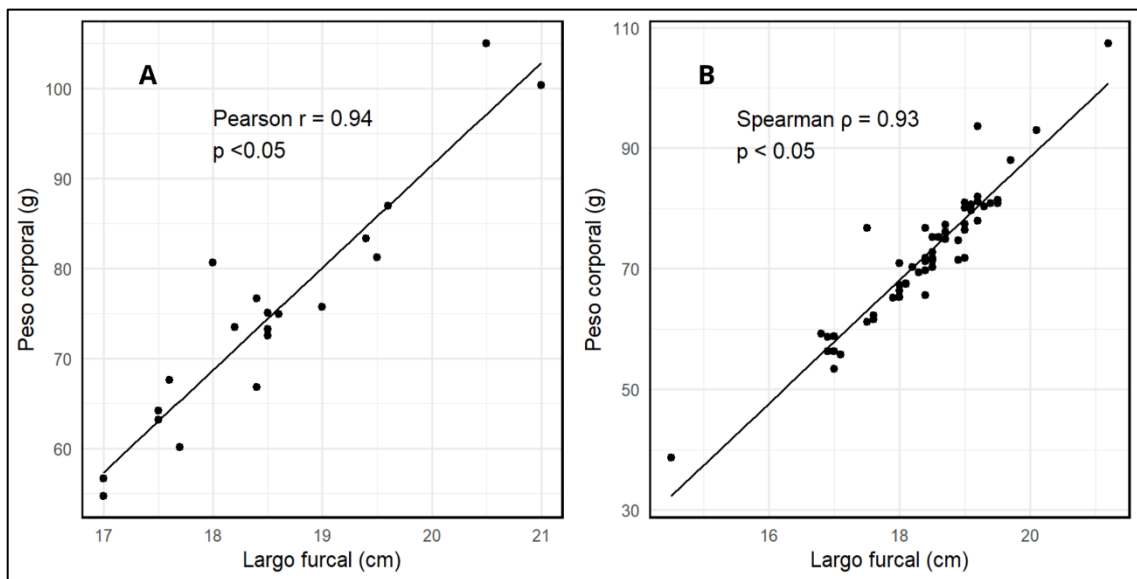


**Figura 7. Histograma de frecuencia del peso corporal en ejemplares juveniles de *Salmo salar* (n=76), separados por sexo. Las barras muestran la distribución de frecuencias para hembras (H) (n=56) y machos (M) (n=20).**



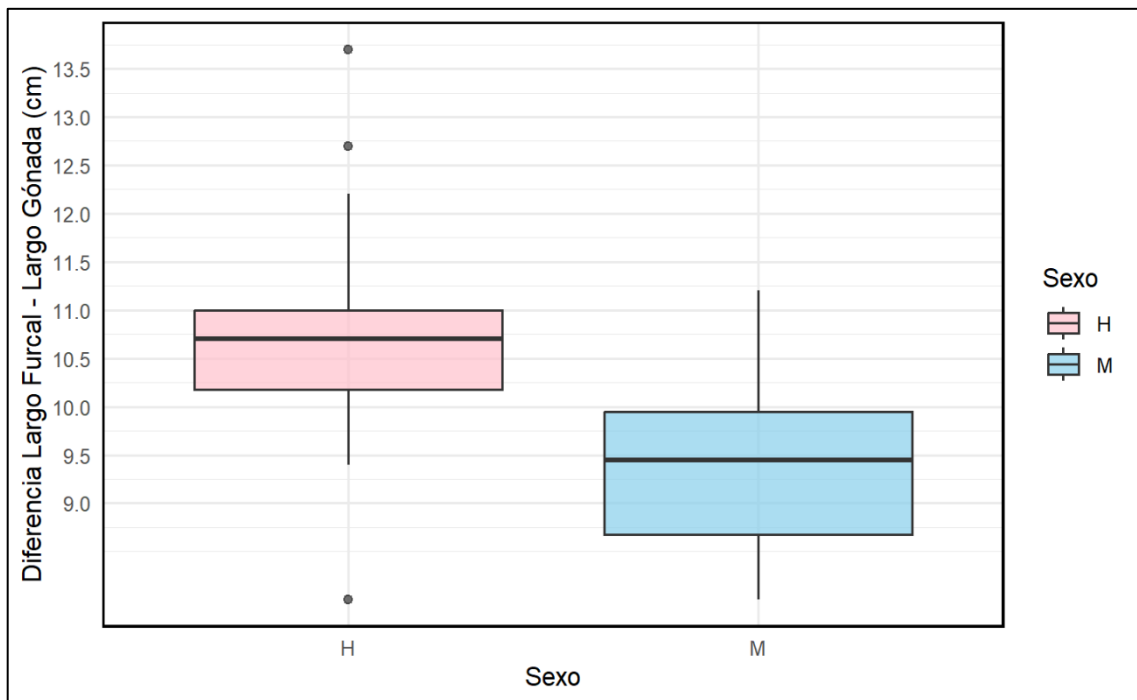
**Figura 8. Histogramas de frecuencia de la longitud furcal (cm) en ejemplares juveniles de *Salmo salar* (n=76), separados por sexo. Las barras representan la distribución de frecuencias para hembras (H) (n=56) y machos (M) (n=20).**

Al evaluar la correlación entre el peso corporal y la longitud furcal por sexo, se observó una correlación positiva muy fuerte y estadísticamente significativa en ambos casos. En los machos, ambas variables presentaron distribución normal, por lo que se aplicó la prueba de correlación de Pearson, obteniéndose un coeficiente de correlación de  $r = 0.94$  y un valor  $p < 0.05$  (Figura 9A), lo que indica una asociación significativa y directa entre el peso y la longitud furcal. En las hembras, dado que la variable longitud furcal no presentó distribución normal, se utilizó la prueba de correlación de Spearman, obteniéndose un coeficiente de correlación de  $\rho = 0.93$  y un valor  $p < 0.05$  (Figura 9B), lo que también indica una correlación positiva y significativa.



**Figura 9. Correlación entre el largo furcal (cm) y el peso corporal (g) en machos (A) y hembras (B) de *Salmo salar*.** En machos, se observó una correlación positiva significativa según el coeficiente de Pearson ( $r = 0.94$ ,  $p = 6.363e-10 < 0.05$ ). En hembras, debido a que la variable longitud furcal no presentó distribución normal, se utilizó el coeficiente de Spearman, observándose también una correlación positiva significativa ( $\rho = 0.93$ ,  $p = 6.363e-10 < 0.05$ ). Las líneas representan los ajustes lineales para cada grupo.

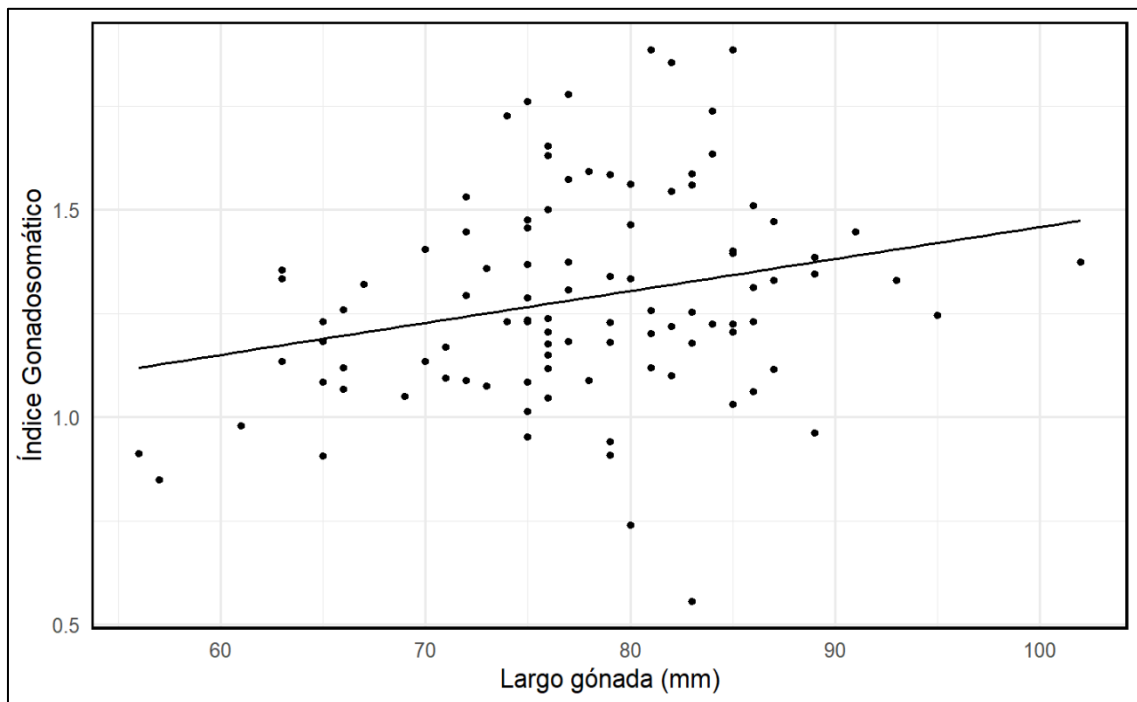
En machos, los valores presentaron una distribución normal ( $p > 0.05$ ), mientras que en hembras se observó una distribución no normal ( $p < 0.05$ ). Debido a esta asimetría entre los grupos, se utilizó la prueba no paramétrica de Wilcoxon para comparar ambos sexos (Figura 10). El análisis reveló una diferencia estadísticamente significativa entre machos y hembras ( $p < 0.05$ ), lo que indica que el tamaño relativo de las gónadas respecto al cuerpo difiere según el sexo, confirmando que las gónadas ocupan una mayor proporción del cuerpo en los machos.



**Figura 10. Boxplot comparativo que muestra la diferencia entre el largo furcal y el largo de la gónada en machos (M) (n=20) y hembras (H) (n=56) de *Salmo salar* pertenecientes a una misma cohorte. Los puntos individuales representan valores atípicos (outliers) que se sitúan fuera del rango intercuartílico. Se observó una diferencia estadísticamente significativa entre sexos (prueba de Wilcoxon,  $p = 1.619e-06 < 0.05$ ), lo que sugiere un patrón diferenciado de desarrollo gonadal relativo al tamaño corporal por sexo.**

## 5.2. Estimación del desarrollo gonadal mediante IGS

Se encontró una correlación positiva ( $r = 0.25$ ) y estadísticamente significativa ( $p < 0.05$ ) pero un poco débil entre el IGS real del subconjunto necropsiado y el largo de la gónada (Figura 11).

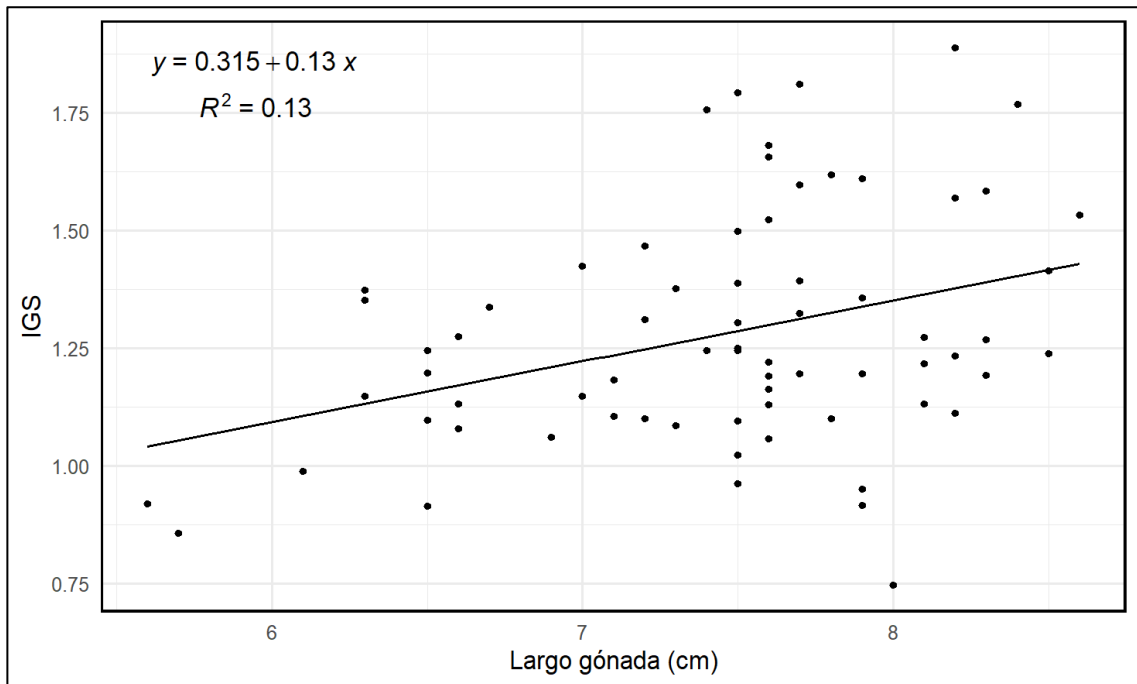


**Figura 11. Correlación entre el Índice Gonadosomático (IGS) y el largo de la gónada (mm) en ejemplares de *Salmo salar* de una misma cohorte (n=100).** Se observa una correlación positiva y significativa ( $r = 0.25$ ,  $p = 0.011 < 0.05$ ), indicando que el aumento en el largo de la gónada se asocia con un mayor desarrollo gonadal medido a través del IGS. Los puntos representan valores individuales de los peces analizados.

En el grupo ecografiado ( $n = 76$ ), la diferencia entre el largo furcal y el largo de la gónada presentó un patrón distinto según el sexo, en hembras los valores estuvieron entre 11,4 y 14,7 cm, mientras que en machos entre 10 y 12,5 cm. Para los ejemplares necropsiados ( $n = 100$ ), que no contaban con identificación directa del sexo, se aplicó un modelo de regresión logística utilizando variables morfométricas. El modelo identificó como predictores significativos del sexo la diferencia entre el largo furcal y el largo gonadal ( $p < 0.05$ ) y el largo furcal ( $p < 0.05$ ). La validación del modelo mediante análisis de la curva ROC arrojó un AUC de 0.9371. Aplicando un umbral de probabilidad de 0.8, se estimó una proporción sexual de 71 hembras y 29 machos en el grupo necropsiado. Para los ejemplares clasificados como machos, el modelo lineal simple entre el IGS y el largo de la gónada no fue estadísticamente significativo ( $p > 0.05$ ,  $R^2 = 0.023$ ). La incorporación de otras variables como el peso corporal y el largo furcal no mejoró el ajuste del modelo ( $p > 0.05$ ,  $R^2 = 0.03$ ). En consecuencia, no se construyó un modelo de estimación de IGS para machos, y se desarrolló únicamente un modelo validado para hembras (Figura 12).

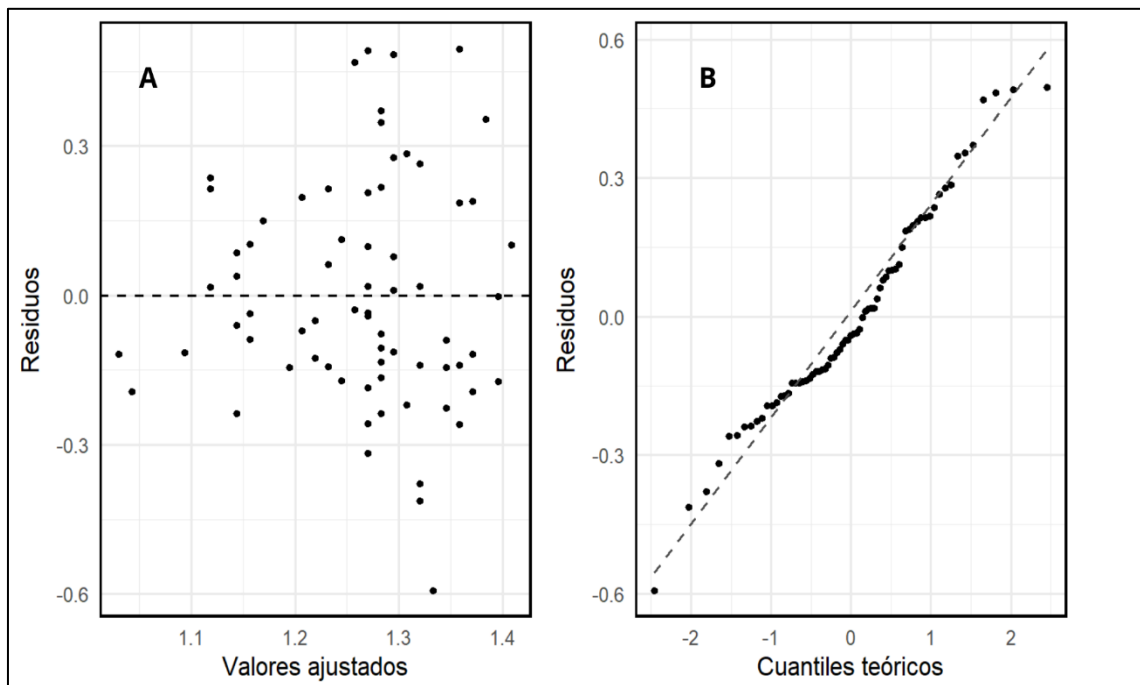
El modelo de regresión lineal para hembras entregó la siguiente fórmula de estimación del índice gonadosomático (IGS\*):

$$IGS^* = 0.3148 + 0.1296 (Largo\ gónada)$$



**Figura 12.** Relación entre el Índice Gonadosomático (IGS\*) y el largo de los ovarios en ejemplares femeninos de *Salmo salar*. Se muestra el modelo de regresión lineal ajustado, junto con su ecuación, representando la relación entre ambas variables.

Este modelo presentó un buen ajuste estadístico ( $R^2 = 0.13$ ,  $p < 0.05$ ), con residuos distribuidos normalmente y sin evidencia de heterocedasticidad (Figura 13).

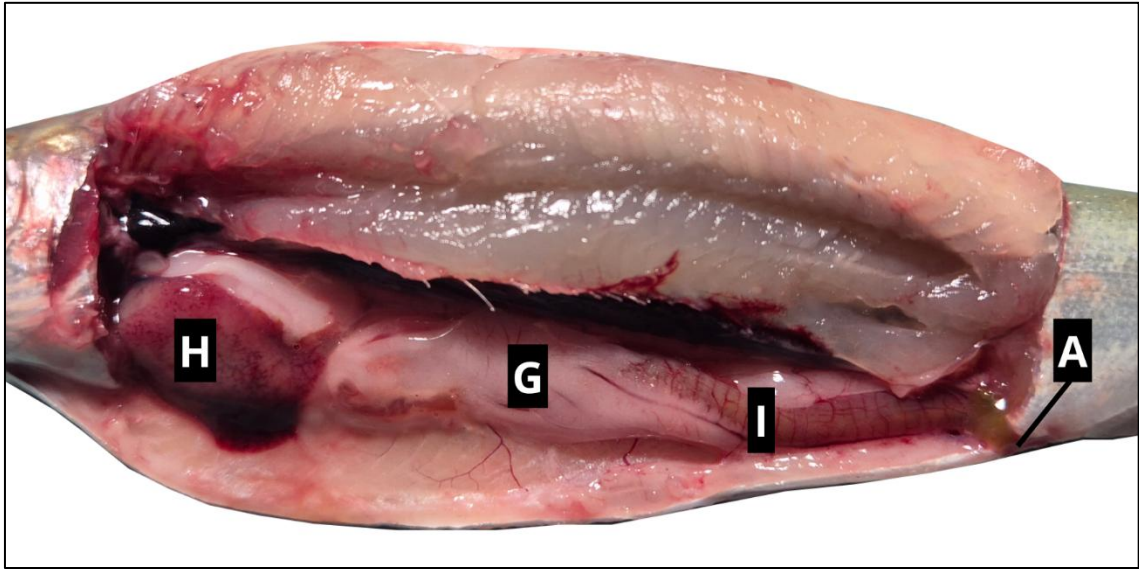


**Figura 13. Gráficos diagnósticos del modelo de regresión lineal ajustado para estimar el Índice Gonadosomático (IGS\*) en ejemplares femeninos vivos de *Salmo salar*.** (A) Gráfico de residuos v/s valores ajustados, donde se observa una distribución aleatoria de los residuos alrededor del cero, sin indicios de heterocedasticidad ni patrones sistemáticos. (B) Gráfico cuantil-cuantil (Q-Q plot) de los residuos, que muestra alineación cercana a la diagonal teórica, indicando normalidad aceptable de los errores.

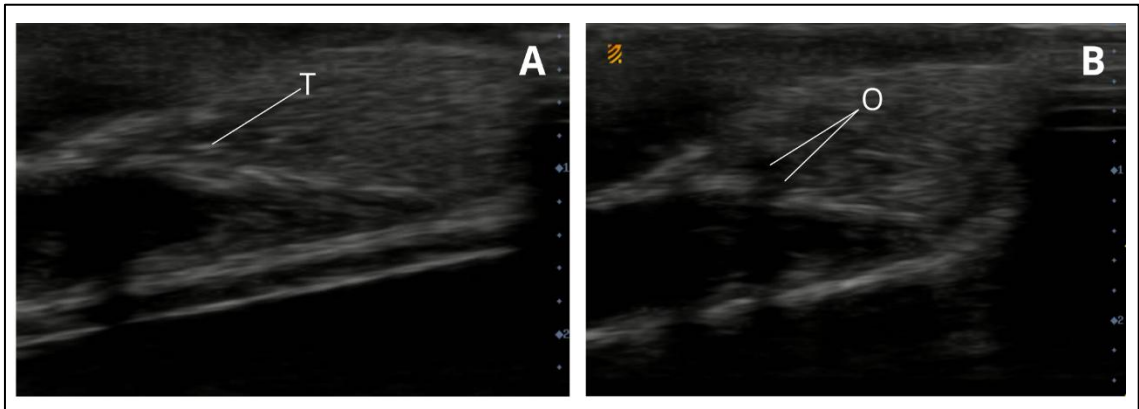
Los valores de IGS\* estimados de los 50 ejemplares hembras, se detalla en el Anexo N°1.

### 5.3. Observación ecográfica de las estructuras gonadales

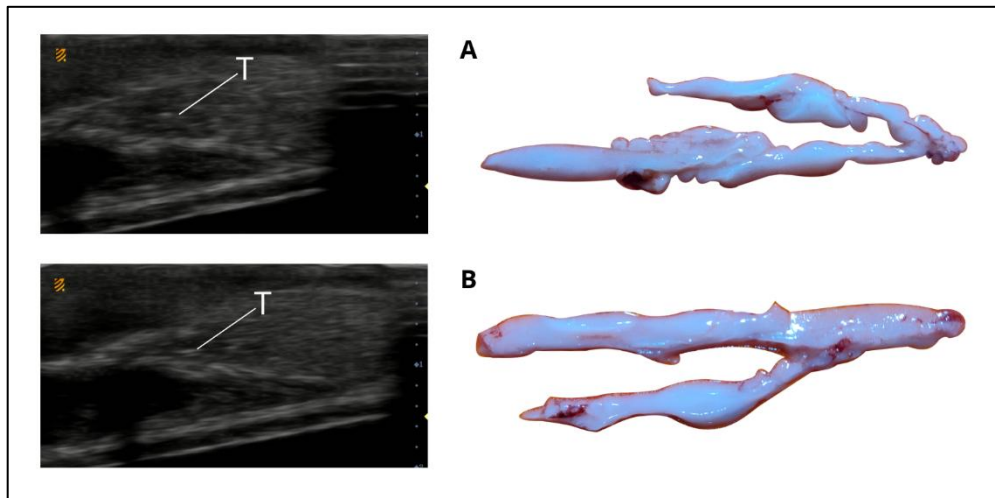
La visualización ecográfica en modo B permitió identificar las gónadas en todos los ejemplares. Con el ejemplar en decúbito lateral derecho, en el caso de las hembras (Figura 15B y 17), se observaron como dos estructuras anecoicas ovaladas en su porción de mayor grosor, conforme se hacía la exploración ecográfica con orientación craneal-caudal, el grosor aumentaba hasta su máximo y luego disminuía hasta desaparecer por completo, se observan más anchas, homogéneas y continuas que en el caso de los machos (Figura 15A y 16), que se observaron como dos bandas hiperecoicas, más delgadas, alargadas y segmentadas en algunos casos, en ambos sexos situadas en la región ventrolateral del abdomen, bajo la línea lateral y caudal a la aleta pectoral. La visualización e identificación de las gónadas se facilita identificando al intestino como una banda hiperecoica, situándolo adyacente a las gónadas y relacionando la anatomía interna tras apertura abdominal (Figura 14).



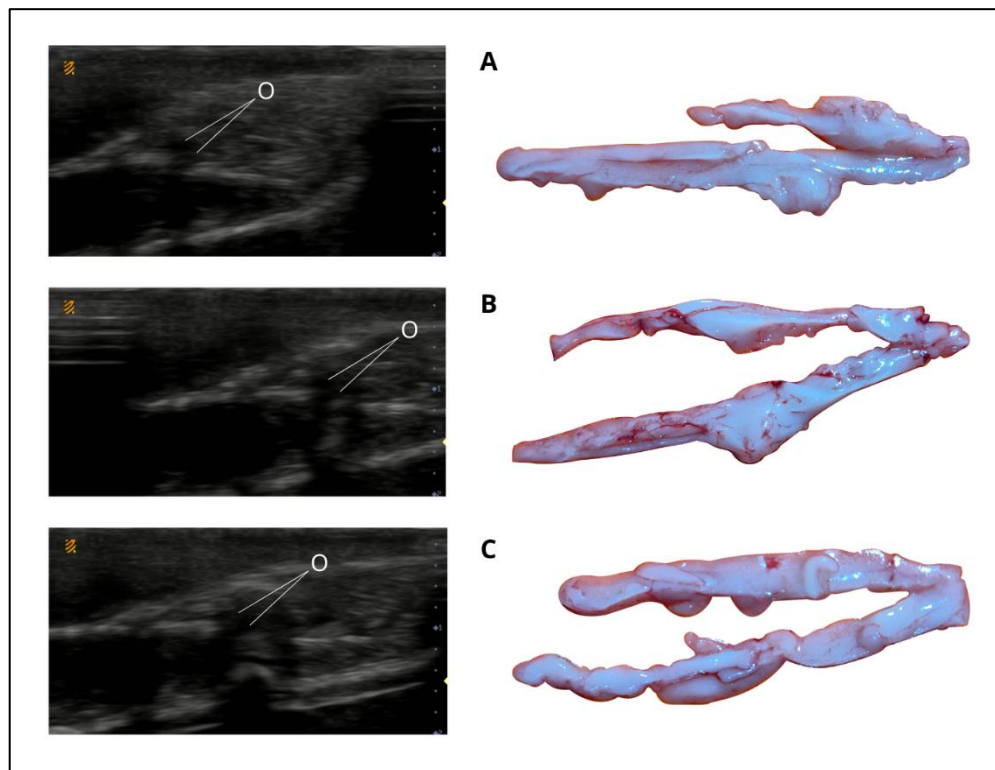
**Figura 14. Identificación de órganos internos en ejemplar juvenil de *Salmo salar*.** Vista ventral del abdomen de un ejemplar juvenil de *S. salar*, donde se identifican los principales órganos de interés ecográfico: H, hígado; G, gónadas; I, intestino; A, ano. Elaboración propia.



**Figura 15. Imágenes ecográficas de gónadas en ejemplares juveniles de *Salmo salar*.** Comparación ecográfica transversal entre un macho (A) y una hembra (B) juveniles de *S. salar*. En A, la letra T indica la ubicación de los testículos. En B, la letra O señala la ubicación de los ovarios. Elaboración propia.



**Figura 16. Correlación entre imagen ecográfica y gónadas en machos juveniles de *Salmo salar*.** Imagen ecográfica longitudinal (izquierda) y gónada extraída (derecha) de dos ejemplares machos juveniles de *S. salar*. En ambas ecografías, la letra T indica la ubicación del testículo. (A) Ejemplar con un peso de 86,96 g, longitud total de 19,6 cm y gónadas de 9,5 cm de longitud. (B) Ejemplar con un peso de 81,29 g, longitud total de 19,5 cm y gónadas de 10 cm de longitud. El aspecto azulado que se aprecia es a consecuencia de la luz de la fotografía capturada. Elaboración propia.

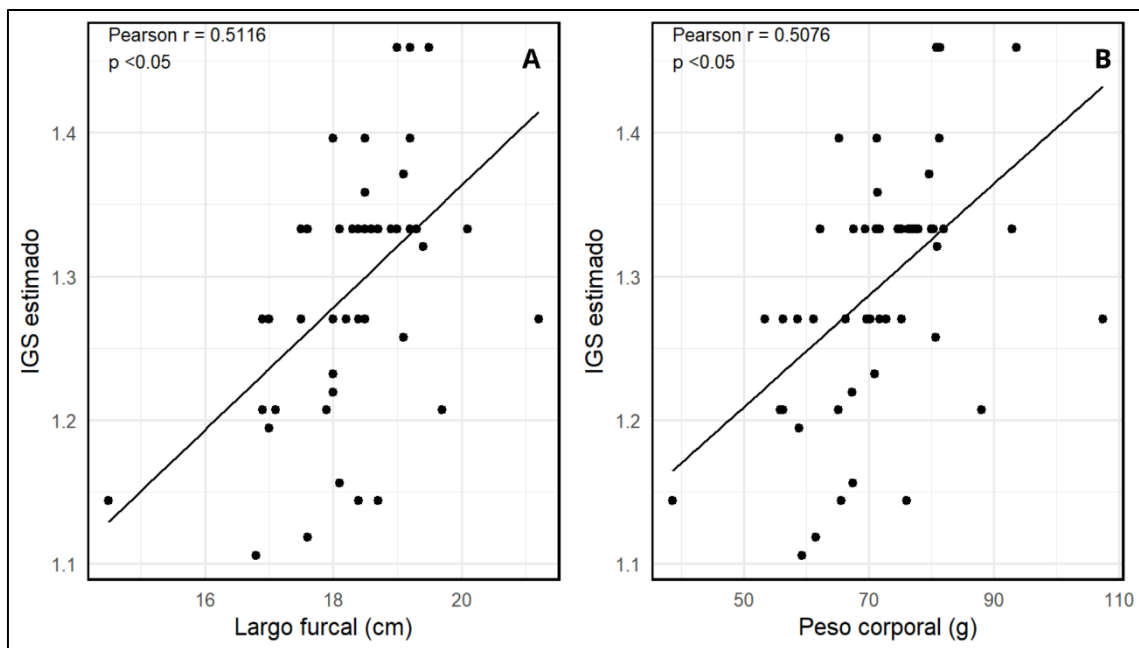


**Figura 17. Correlación entre imagen ecográfica y gónadas en hembras juveniles de *Salmo salar*.** Imagen ecográfica longitudinal (izquierda) y gónada extraída (derecha) de tres ejemplares hembras juveniles de *S. salar*. En las tres ecografías, la letra O indica la ubicación de los ovarios. (A) Ejemplar con un peso de 77,26 g, longitud total de 18,7 cm y gónadas de 8 cm de longitud. (B) Ejemplar con un peso de 81,40 g, longitud total de 19,5 cm y gónadas de 9 cm de longitud. (C) Ejemplar con un peso de 93,60 g, longitud total de 19,5 cm y gónadas de 9 cm de longitud. El aspecto azulado que se aprecia es a consecuencia de la luz de la fotografía capturada. Elaboración propia.

total de 19,2 cm y gónadas de 9 cm de longitud. El aspecto azulado que se aprecia es a consecuencia de la luz de la fotografía capturada. Elaboración propia.

#### 5.4. Relación entre el IGS\* y las variables morfométricas

En el grupo de hembras ecografiadas, se observó una correlación positiva y significativa entre el Índice Gonadosomático (IGS\*) estimado y las variables morfométricas (Figura 18). En particular, el IGS\* presentó una correlación moderada con el largo furcal ( $r = 0.51$ ,  $p < 0.05$ ) y con el peso corporal ( $r = 0.51$ ,  $p < 0.05$ ). Estos resultados sugieren que, en hembras, un mayor tamaño corporal se asocia con un mayor desarrollo gonadal estimado. La relación se visualiza en los gráficos de dispersión (Figura 18), donde se aprecia una tendencia lineal ascendente.

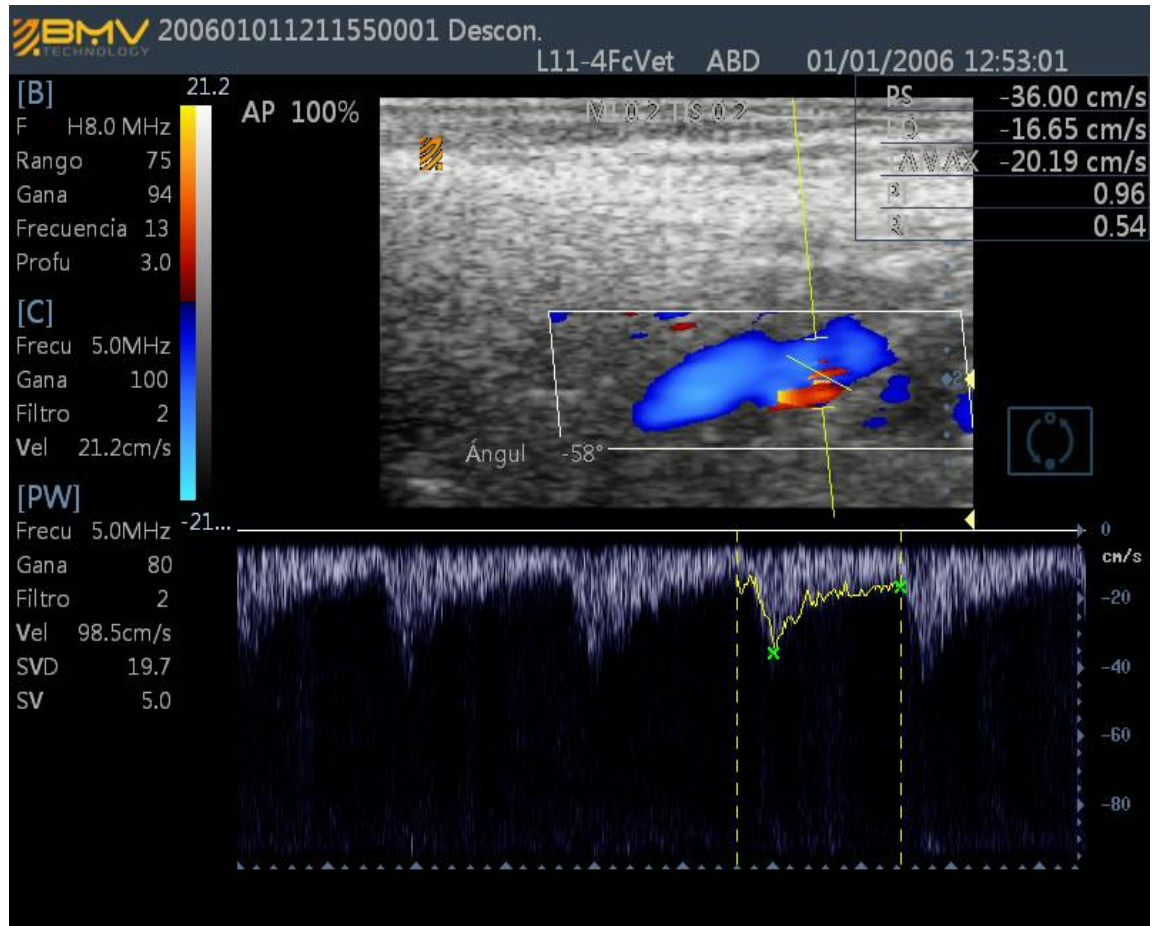


**Figura 18. Correlaciones entre parámetros morfométricos y el Índice Gonadosomático (IGS\*) estimado ecográficamente en hembras de *Salmo salar*.** (A) Relación entre el largo furcal (cm) y el IGS\* estimado (%) en hembras de *S. salar* evaluadas mediante ecografía. Se observa una correlación positiva significativa ( $r = 0.51$ ,  $p = 5.582e-05 < 0.001$ ), representada por la línea de tendencia. (B) Relación entre el peso corporal (g) y el IGS\* estimado (%) en hembras de *S. salar* evaluadas mediante ecografía. Se observa una correlación positiva significativa ( $r = 0.51$ ,  $p = 6.53e-05 < 0.05$ ), representada por la línea de tendencia.

#### 5.5. Evaluación ecografía Doppler PW

Para validar el uso del Doppler como herramienta de medición de parámetros hemodinámicos en peces, se realizó inicialmente una prueba de referencia ecográfica en un cuello humano, logrando identificar la arteria carótida y obtener una curva de flujo

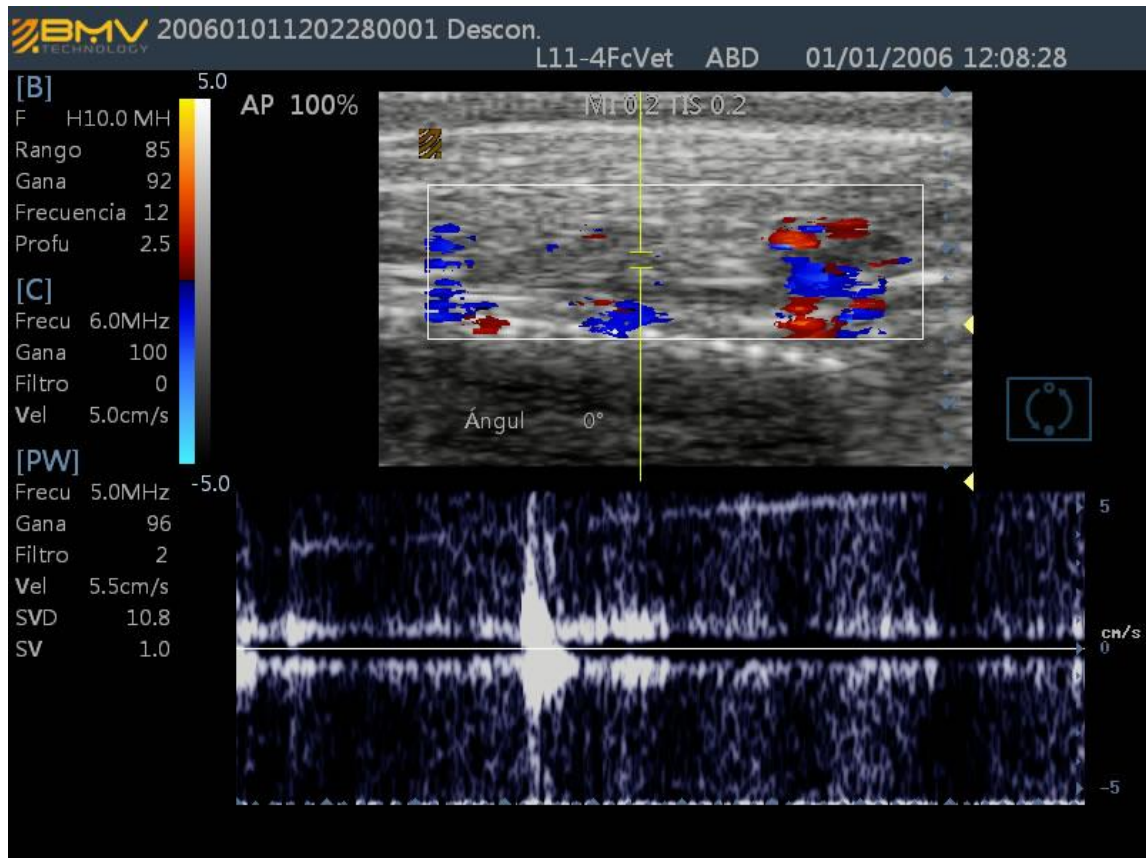
espectral representativa (Figura 19), con esta se lograron calcular con éxito la velocidad sistólica máxima (PS), Velocidad diastólica final (ED), Velocidad promedio del flujo (TAMAX), Índice de Resistencia (RI) e Índice de Pulsatilidad (PI), confirmando la funcionalidad del equipo y la técnica.



**Figura 19. Evaluación espectral del flujo sanguíneo en humanos mediante ecografía Doppler color.** En la parte superior se observa la imagen en modo B con sobreposición Doppler color, evidenciando flujo sanguíneo dentro de una estructura vascular. La línea amarilla indica el ángulo de insonación ajustado a  $-58^\circ$ . En la parte inferior, se presenta la curva espectral Doppler, que grafica la velocidad del flujo sanguíneo en función del tiempo. La traza amarilla representa la traza de la señal espectral utilizada para el cálculo de parámetros hemodinámicos, PS:  $-36.00$  cm/s, ED:  $-16.65$  cm/s, TAMAX:  $-20.19$  cm/s, RI: 0.54 y PI: 0.96. Los parámetros aparecen con valores negativos porque la dirección de la sangre se aleja del transductor, pero no tiene incidencia en sus valores absolutos. Elaboración propia.

Sin embargo, al aplicar el mismo procedimiento en los ejemplares de *S. salar*, no fue posible estandarizar la localización de una arteria específica en todos los individuos. Las estructuras vasculares observadas eran muy pequeñas y no se diferenciaban con claridad en las imágenes ecográficas, lo que dificultó su identificación consistente (Figura 20).

Tampoco se logró obtener curvas espectrales de flujo sanguíneo en ninguno de los ejemplares, lo que impidió el cálculo de parámetros hemodinámicos. Una posible explicación es que la velocidad del flujo sanguíneo en los peces podría estar por debajo del umbral de detección del ecógrafo utilizado, cuyo límite inferior era de 5 cm/s. Lo anterior junto con la imposibilidad de ubicar consistentemente una misma arteria entre ejemplares, limitó la aplicabilidad del método en *S. salar* de pequeño tamaño bajo las condiciones de este estudio.



**Figura 20. Evaluación espectral del flujo sanguíneo en *Salmo salar* mediante ecografía Doppler color.** La imagen ecográfica en modo Doppler pulsado (PW) de *S. salar* no muestra una curva espectral definida. La ausencia de esta señal sugiere una detección inadecuada del flujo sanguíneo en la región evaluada, posiblemente debido a limitaciones técnicas. Elaboración propia.

## 6. DISCUSIÓN

El presente estudio tuvo como objetivo evaluar la viabilidad de una metodología no invasiva para estimar el grado de madurez sexual en ejemplares juveniles de *Salmo salar* pertenecientes a una misma cohorte, utilizando variables morfométricas (peso corporal y longitud furcal) junto con la observación ecográfica de las gónadas en modo B. Esta propuesta metodológica resulta de gran relevancia para la industria acuícola chilena al validar una herramienta diagnóstica precisa y eficiente, capaz de reemplazar técnicas tradicionales invasivas que requieren de la eutanasia del pez y de procedimientos histológicos.

Uno de los principales aportes de este trabajo fue la estimación no invasiva del Índice Gonadosomático (IGS\*) en ejemplares vivos, obtenida a partir de la medición del largo de las gónadas mediante ecografía modo B. La diferenciación ecográfica de las gónadas fue posible gracias a las características ecográficas observadas, ovarios como estructuras anecoicas de contorno ovalado y testículos como bandas hiperecoicas segmentadas, concordando con lo descrito en la literatura (Naeve *et al.*, 2018; Naeve *et al.*, 2019; Naeve, 2020). Esta herramienta de sexaje no solo permite prescindir de técnicas invasivas, sino que además se posiciona como un avance para optimizar la selección temprana de reproductores, mejorando la eficiencia del ciclo productivo. Asimismo, se evidenció que las variables morfométricas fueron útiles para contextualizar el desarrollo gonadal. En particular, se encontró una correlación positiva y significativa entre el peso corporal y la longitud furcal en ambos sexos, coincidente con lo descrito en la literatura sobre la relación longitud-peso ampliamente utilizada en evaluación pesquera (Kuriakose, 2017). También se encontró una correlación positiva entre el IGS\* estimado por ecografía y el tamaño corporal en hembras, lo que sugiere que las hembras de mayor talla presentan estadios reproductivos más avanzados. Este resultado concuerda con lo afirmado por Jonsson & Jonsson (2011), quienes señalan que, en condiciones controladas, los individuos de mayor tamaño dentro de una misma cohorte tienden a madurar sexualmente antes. A su vez, Gjerde (1984) afirma lo anterior, sin embargo, detalla que esta ventaja de tamaño corporal se perdería a medida avanza el proceso de maduración. La correlación positiva encontrada entre el largo furcal y el IGS\* es concordante con lo encontrado por

Kadri *et al.* (1997), quienes plantean que el largo furcal junto con el factor de condición son predictores fuertes de maduración sexual. De alguna forma Devlaming *et al.* (1982) resume las ideas anteriores afirmando que la relación entre el peso de los ovarios y todas las expresiones de tamaño corporal varía con la etapa de desarrollo gonadal.

Desde el punto de vista reproductivo, estas tendencias podrían representar una herramienta para identificar a los individuos probables de presentar maduración precoz y así poder llevar a cabo estrategias de optimización de su desarrollo sexual. Para este análisis sería fundamental también tener en cuenta las señales de maduración sexual, ya que es complejo determinar una talla de maduración universal considerando los diferentes parámetros de crianza a los que se ven expuestas las diferentes cohortes. Los peces que madurarán muestran un aumento en el peso relativo de sus gónadas aproximadamente 1 año antes de desovar (Kadri *et al.*, 1997) y en el caso de los valores de IGS al momento de la maduración, Leclercq *et al.* (2010) encontró un promedio de  $0.51 \pm 0.02\%$  en machos y de  $1.37 \pm 0.11\%$  en hembras. Asimismo, complementar con un estudio hormonal, sería una buena estrategia, ya que previo a la maduración sexual aumentan los niveles de hormonas sexuales (Kadri *et al.*, 1997).

En el análisis exploratorio del grupo ecografiado ( $n = 76$ ), se observó que la diferencia entre el largo furcal y el largo de la gónada presentaba un patrón según el sexo, en hembras los valores estaban entre 11.4 y 14.7 cm, mientras que en machos entre 10 y 12.5 cm. Esta diferencia sugiere que, en proporción al cuerpo, los machos tienden a tener gónadas más largas que las hembras. Se evaluó la diferencia entre la longitud furcal y el largo de la gónada como un posible indicador del grado de desarrollo gonadal de los especímenes ecografiados, encontrando que esta variable difiere según el sexo, lo que sugiere que las gónadas ocupan una mayor proporción del cuerpo en los machos a pesar de pertenecer a una misma cohorte, demostrando diferencias en el patrón de desarrollo entre machos y hembras. Además, se identificó una diferencia estadísticamente significativa en el tamaño de las gónadas entre machos y hembras, posiblemente asociadas a un ritmo de maduración sexual diferente para cada sexo.

Debido a que no se disponía del equipo ecográfico al momento de la necropsia del subconjunto de 100 peces, no fue posible determinar el sexo de estos ejemplares mediante ecografía. Sin embargo, se observó una diferencia consistente entre el largo furcal y el largo gonadal en los ejemplares ecografiados, que mostró ser significativa entre sexos. Esto sugería que, de mantenerse un único modelo predictivo para estimar el Índice Gonadosomático (IGS) en todos los ejemplares, se podrían introducir sesgos al no considerar la variabilidad sexual en la relación entre las variables morfométricas y el desarrollo gonadal. Por ello, se construyó un modelo de regresión logística binaria para estimar el sexo, basado en variables morfométricas como el largo furcal y la diferencia entre largo corporal y largo gonadal. Esta diferencia puede ser usada para construir modelos predictivos específicos por sexo, como se hizo en este estudio para el caso de las hembras. Para el caso de los machos, no se logró construir un modelo equivalente, probablemente debido a una mayor variabilidad morfológica o a la necesidad de un tamaño muestral mayor. En efecto, estos resultados sugieren que en los ejemplares machos, el desarrollo gonadal no presenta una relación lineal clara con las variables morfométricas medidas, probablemente debido a una mayor variabilidad en su morfología, patrón de maduración más asincrónico que el de las hembras, o tamaño muestral insuficiente para determinar una asociación clara.

Cabe señalar que este estudio no logró obtener datos válidos de flujo sanguíneo mediante Doppler, por lo que no se realizó análisis hemodinámico. De igual forma, esta técnica representa una herramienta potencialmente útil para investigar la relación entre el flujo sanguíneo y el desarrollo gonadal, ya que extrapolándolo a humanos, se ha observado que la velocidad del flujo sanguíneo intraovárico aumenta y la resistencia vascular disminuye tras la ovulación (Xie *et al.*, 2001). Si bien, según lo descrito anteriormente no se obtuvieron resultados contundentes, las observaciones realizadas pueden servir como base conceptual para futuras investigaciones en salmónidos.

## 7. CONCLUSIONES

Al contrastar los resultados obtenidos con la hipótesis y los objetivos, se puede concluir que la mayoría de los objetivos fueron exitosamente alcanzados, aunque con algunas limitaciones puntuales. El estudio logró evaluar el estado de maduración gonadal de un subconjunto de una cohorte utilizando tanto variables morfométricas como ecografía. Se desarrolló un modelo para estimar el IGS\* en hembras y se describieron detalladamente las estructuras gonadales, permitiendo una clara diferenciación sexual no invasiva. Se logró construir y validar un modelo predictivo no invasivo del IGS\* específicamente para hembras, a partir de la medición ecográfica del largo de la gónada. Este es un avance significativo para el manejo de hembras reproductoras.

Sin embargo, no fue posible establecer un modelo confiable para los machos, lo que indica una limitación en la aplicación del modelo propuesto para ambos sexos, posiblemente debido a una mayor variabilidad morfológica en machos o a un tamaño muestral insuficiente para ellos. La visualización ecográfica en modo B permitió identificar las gónadas en todos los ejemplares. Se lograron describir de manera clara y distintiva las características de ovarios (anecoicas, ovaladas, más anchas, homogéneas y continuas) y testículos (hiperecoicas, más delgadas, alargadas y segmentadas), así como su localización en la región ventrolateral abdominal.

Se encontraron correlaciones positivas y estadísticamente significativas entre el peso corporal y la longitud furcal en ambos sexos. De mayor relevancia de acuerdo con la hipótesis, se encontró una correlación positiva y significativa entre el IGS\* estimado ecográficamente y el tamaño corporal (largo furcal y peso corporal) en hembras. Además, se demostró una diferencia estadísticamente significativa en el tamaño relativo de las gónadas entre machos y hembras, con los machos tendiendo a tener gónadas proporcionalmente más largas.

En relación con las hipótesis planteadas, se aceptan la primera y la segunda, pero se rechaza la tercera. La primera y segunda hipótesis, referidas a la determinación no invasiva del sexo y del estado de maduración gonadal mediante ecografía, y la construcción de un modelo predictivo del IGS\* a partir de variables morfométrica, fue

cumplida con éxito en hembras, validando el enfoque propuesto. No obstante, la tercera hipótesis relativa a la evaluación del flujo sanguíneo mediante ecografía Doppler, no pudo ser confirmada, ya que no se obtuvieron datos válidos ni fue posible identificar de forma consistente estructuras vasculares bajo las condiciones de equipamiento del presente estudio. Esta limitación no compromete el objetivo central, pero sí representa un aspecto a considerar para futuras investigaciones que busquen integrar parámetros funcionales como el flujo sanguíneo a los modelos morfométricos de predicción o asociación de madurez sexual en peces.

## BIBLIOGRAFÍA

- Al-Emran, M., Zahangir, M. M., Badruzzaman, M., & Shahjahan, M. (2024). Influences of photoperiod on growth and reproduction of farmed fishes: Prospects in aquaculture. *Aquaculture Reports*, 35, 101978. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2024.101978>
- Aldrich, J. E. (2007). Basic physics of ultrasound imaging. *Critical Care Medicine*, 35(5). <https://doi.org/10.1097/01.CCM.0000260624.99430.22>
- Ando, H., Swanson, P., Kitani, T., Koide, N., Okada, H., Ueda, H., & Urano, A. (2004). Synergistic effects of salmon gonadotropin-releasing hormone and estradiol-17 $\beta$  on gonadotropin subunit gene expression and release in masu salmon pituitary cells in vitro. *General and Comparative Endocrinology*, 137(1), 109–121.
- Asche, F., Hansen, H., Tveterås, R., & Tveterås, S. (2009). The salmon disease crisis in Chile. *Marine Resource Economics*, 24(4), 405–411. <https://doi.org/10.5950/0738-1360-24.4.405>
- Barson, N. J., Aykanat, T., Hindar, K., Baranski, M., Bolstad, G. H., Fiske, P., ... & Primmer, C. R. (2015). Sex-dependent dominance at a single locus maintains variation in age at maturity in salmon. *Nature*, 528, 405–408. <https://doi.org/10.1038/nature16062>
- Brown, M. S., Evans, B. S., & Afonso, L. O. (2022). Changes in gene expression and gonadal morphology during sexual differentiation in Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Gene*, 823, 146393. <https://doi.org/10.1016/j.gene.2022.146393>
- Bustos-Gallardo, B. (2017). The Chilean salmon industry after 2008: An enclave economy. *The Geographical Journal*, 183(2), 152–163. <https://doi.org/10.1111/geoj.12204>
- Chi, L., Li, X., Liu, Q., & Liu, Y. (2017). Photoperiod regulates gonad development via kisspeptin/kissr in the hypothalamus and saccus vasculosus of Atlantic salmon (*Salmo salar*). *PLOS ONE*, 12(2), e0169569.

- Cohen, J. (2013). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2nd ed.). Routledge.
- Devlaming, V., Grossman, G., & Chapman, F. (1982). On the use of the gonosomatic index. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology*, 73(1), 31–39. [https://doi.org/10.1016/0300-9629\(82\)90088-3](https://doi.org/10.1016/0300-9629(82)90088-3)
- Dickey, R. P. (1997). Doppler ultrasound investigation of uterine and ovarian blood flow in infertility and early pregnancy. *Human Reproduction Update*, 3(5), 467–503. <https://doi.org/10.1093/humupd/3.5.467>
- Einum, S. (2003). Atlantic salmon growth in strongly food-limited environments: Effects of egg size and paternal phenotype. *Environmental Biology of Fishes*, 67, 263–268.
- European Commission. (2010). Directive 2010/63/EU of the European Parliament and of the Council of 22 September 2010 on the protection of animals used for scientific purposes. Brussels, Belgium.
- Evans, D. H., Jensen, J. A., & Nielsen, M. B. (2011). *Ultrasonic colour Doppler imaging. Interface Focus*, 1(4), 490–502. <https://doi.org/10.1098/rsfs.2011.0017>
- FAO. (2020). *The state of world fisheries and aquaculture 2020: Sustainability in action*. Rome. <https://doi.org/10.4060/ca9229en>
- Finstad, A. G., Armstrong, J. D., & Nislow, K. H. (2011). Freshwater habitat requirements of Atlantic salmon. In *Atlantic Salmon Ecology* (pp. 67–87). Wiley.
- Fleming, I. A. (1996). Reproductive strategies of Atlantic salmon: Ecology and evolution. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 6, 379–416. <https://doi.org/10.1007/BF00164323>
- Frühwald, F., & Blackwell, D. E. (1992). CCDS: Physical principles and technical considerations. *Atlas of color-coded Doppler sonography: Vascular and soft tissue*

*structures of the upper extremity, thoracic outlet and neck* (pp. 1–14). Springer Vienna.

Gjerde, B. (1984). Response to individual selection for age at sexual maturity in Atlantic salmon. *Aquaculture*, 38(3), 229–240.

Gneiting, T., & Vogel, P. (2018). *Receiver operating characteristic (ROC) curves*. arXiv preprint arXiv:1809.04808. <https://arxiv.org/pdf/1809.04808.pdf>

Good, C., & Davidson, J. (2016). Review of factors influencing maturation of Atlantic salmon (*Salmo salar*), with a focus on recirculating aquaculture systems. *Journal of the World Aquaculture Society*, 47(5), 605–632.

Hangiandreou, N. J., & Strissel, N. L. (2017). Principles of color and power Doppler in neck ultrasound imaging. In M. Milas, S. J. Mandel, & J. E. Langer (Eds.), *Advanced thyroid and parathyroid ultrasound* (pp. 49–58). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-44100-9\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-319-44100-9_6)

Idler, D. R., Hwang, S. J., Crim, L. W., & Reddin, D. G. (1981). Determination of sexual maturation stages of Atlantic salmon (*Salmo salar*) captured at sea. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 38(4), 405–413. <https://doi.org/10.1139/f81-057>

Imsland, A. K. D., & Methúsalemsson, H. (2024). The effects of different feed ration levels on growth, welfare rating, and early maturation in juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Fishes*, 9(2), 70. <https://doi.org/10.3390/fishes9020070>

Jonsson, B., & Jonsson, N. (2011). *Ecology of Atlantic salmon and brown trout: Habitat as a template for life histories*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-1189-1>

Kadri, S., Metcalfe, N. B., Huntingford, F. A., & Thorpe, J. E. (1997). Early morphological predictors of maturity in one-sea-winter Atlantic salmon. *Aquaculture International*, 5, 41–50. <https://doi.org/10.1007/BF02764786>

- Kleinman, K., & Horton, N. J. (2010). *SAS and R: Data management, statistical analysis, and graphics*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781439827567>
- Krupinski, E. A. (2017). Receiver operating characteristic (ROC) analysis. *Focus on Learning Problems in Mathematics*, 5(3), 31–42. <https://doi.org/10.14786/flr.v5i2.250>
- Kuriakose, S. (2017). Estimation of length-weight relationship in fishes. In R. Gopalakrishnan, M. P. L. Gopalakrishnan, & K. K. Joshi (Eds.), *Training manual on length-weight relationship and relative condition factor in fishes* (pp. 16–20). Central Marine Fisheries Research Institute. <https://eprints.cmfri.org.in/12178/>
- Leclercq, E., Taylor, J. F., Hunter, D., & Migaud, H. (2010). Body size dimorphism of sea-reared Atlantic salmon (*Salmo salar* L.): Implications for the management of sexual maturation and harvest quality. *Aquaculture*, 301(1–4), 47–56. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2010.01.029>
- Lee, J.-M. (2024). *Hemodynamics in Doppler ultrasonography*. *Ultrasonography*. <https://doi.org/10.14366/usg.24126>
- Ma, I. W. Y., Chun, R., & Kirkpatrick, A. W. (2015). Basics of ultrasound. In A. W. Kirkpatrick & M. Ball (Eds.), *Handbook of point-of-care ultrasound* (pp. 1–36). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-11876-5\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-11876-5_1)
- Mattson, N. S. (1991). A new method to determine sex and gonad size in live fishes by using ultrasonography. *Journal of Fish Biology*, 39(5), 673–677. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.1991.tb04397.x>
- Mañanos, E. L., Anglade, I., Chyb, J., Saligaut, C., Breton, B., & Kah, O. (1999). Involvement of  $\gamma$ -aminobutyric acid in the control of GtH-1 and GtH-2 secretion in male and female rainbow trout. *Neuroendocrinology*, 69(4), 269–280.
- Meinertz, J. R., Stehly, G. R., & Gingerich, W. H. (1999). Metabolism, elimination, and pharmacokinetics of the fish anesthetic benzocaine. In R. T. Zall & G. A. Dube

(Eds.), *Aquaculture pharmacology* (pp. 189–200). Springer.  
[https://doi.org/10.1007/978-1-4615-4703-7\\_14](https://doi.org/10.1007/978-1-4615-4703-7_14)

- McCormick, S. D., Hansen, L. P., Quinn, T. P., & Saunders, R. L. (1998). Movement, migration, and smolting of Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 55(S1), 77–92.
- Mobley, K. B., Aykanat, T., Czorlich, Y., House, A., Kurko, J., Miettinen, A., & Primmer, C. R. (2021). Maturation in Atlantic salmon (*Salmo salar*, Salmonidae): A synthesis of ecological, genetic and molecular processes. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 31, 523–571. <https://doi.org/10.1007/s11160-021-09656-w>
- Mobley, K. B., Granroth-Wilding, H., Ellmen, M., Orell, P., Erkinaro, J., & Primmer, C. R. (2020). Time spent in distinct life-history stages has sex-specific effects on reproductive fitness in wild Atlantic salmon. *Molecular Ecology*, 29, 1173–1184. <https://doi.org/10.1111/mec.15390>
- Murza, I. G., & Khristoforov, O. L. (1995). *Estimation of degree of maturity of gonads and prediction of age of attainment of sexual maturity in Atlantic salmon and sea trout (methodological instructions)* (Canadian Translation of Fisheries and Aquatic Sciences No. 5599). Canadian Government Publishing Centre.
- Naeve, I. (2020). Development of non-invasive methods using ultrasound technology in monitoring of Atlantic salmon (*Salmo salar*) production and reproduction (Master's thesis). Norwegian University of Life Sciences.
- Naeve, I., Mommens, M., Arukwe, A., & Kjørsvik, E. (2018). Ultrasound as a noninvasive tool for monitoring reproductive physiology in female Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Physiological Reports*, 6(9), e13640.
- Naeve, I., Mommens, M., Arukwe, A., Virtanen, J., Hoque, M. E., & Kjørsvik, E. (2019). Ultrasound as a noninvasive tool for monitoring reproductive physiology in male Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Physiological Reports*, 7(13), e14167.

- Nevoux, M., Marchand, F., Forget, G., Huteau, D., Tremblay, J., & Destouches, J.-P. (2019). Field assessment of precocious maturation in salmon parr using ultrasound imaging. bioRxiv. <https://doi.org/10.1101/425561>
- Nikolsky, G. V. (1963). *The ecology of fishes*. Academic Press.
- Novario, R. (2024). Perspective chapter: Quality assurance in diagnostic ultrasound. *IntechOpen*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.114115>
- Øen, M. (2023). Morphometric relationships as indicators of sexual maturation in Atlantic salmon (*Salmo salar*) (Master's thesis). University of Bergen.
- Rivera, P., Gallardo, J., Araneda, C., & Vasemägi, A. (2022). Sexual maturation in farmed Atlantic salmon (*Salmo salar*): A review. *IntechOpen*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.99471>
- Robertson, M. J., Lehnert, S. J., Kelly, N. I., Hamilton, L. C., Jones, R. A., Levy, A. L., Poole, R., Burke, C. M., Duffy, S., Messmer, A., & Bradbury, I. R. (2023). Genetic sex determination improves Canadian Atlantic salmon (*Salmo salar*) population assessments. *Fisheries Management and Ecology*. <https://doi.org/10.1111/fme.12655>
- Rodríguez, I. R., & Martínez, P. S. (2019). Productive diversification and sectoral specializations in Chile. *Regional Studies in Economics, Population and Development*, 9(50), 3–34.
- Różyło-Kalinowska, I., & Orhan, K. (2021). Physical principles of Doppler and color Doppler ultrasound. In *Imaging Techniques in Dental Radiology* (pp. 51–57). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-62179-7\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-62179-7_4)
- Servicio Nacional de Pesca y Acuicultura. (2024). *Anuario Estadístico de Pesca y Acuicultura 2024*. Recuperado de <https://www.sernapesca.cl/informacion-utilidad/anuarios-estadisticos-de-pesca-y-acuicultura/>

- Schölmerich, J., & Volk, B. (1986). Differential diagnosis of anechoic/hypoechoic lesions in the abdomen detected by ultrasound. *Journal of Clinical Ultrasound*, 14(5), 339–353. <https://doi.org/10.1002/jcu.1870140504>
- Sheridan, M. A. (1989). Alterations in lipid metabolism accompanying smoltification and seawater adaptation of salmonid fish. *Aquaculture*, 82, 191–203. [https://doi.org/10.1016/0044-8486\(89\)90408-0](https://doi.org/10.1016/0044-8486(89)90408-0)
- Sreejesh, S., Mohapatra, S., & Anusree, M. R. (2014). Binary logistic regression. In *Business Research Methods* (pp. 245–258). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-00539-3\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-319-00539-3_11)
- Szczerba, A., Kuwana, T., & Bednarczyk, M. (2019). The developmental changes in the extra-embryonic vascular system in the circulating phase of primordial germ cells in aves. *Folia Biologica (Krakow)*, 67(2), 79–83. [https://doi.org/10.3409/fb\\_67-2.08](https://doi.org/10.3409/fb_67-2.08)
- Taranger, G. L., Haux, C., Stefansson, S. O., Björnsson, B. T., Walther, B. T., & Hansen, T. (1998). Abrupt changes in photoperiod affect age at maturity, timing of ovulation and plasma testosterone and oestradiol-17 $\beta$  profiles in Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Aquaculture*, 162(1–2), 85–98. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(98\)00168-9](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(98)00168-9)
- White, J., Ó Maoiléidigh, N., Gargan, P., de Eyto, E., Chaput, G., Roche, W., McGinnity, P., Crozier, W. W., Boylan, P., Doherty, D., O’Higgins, K., Kennedy, B., Lawler, I., Lyons, D., & Marnell, F. (2016). Incorporating natural variability in biological reference points and population dynamics into management of Atlantic salmon (*Salmo salar*) stocks returning to home waters. *ICES Journal of Marine Science*, 73, 1513–1524. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsw015>
- Xie, H., Hata, K., Manabe, A., Ozaki, T., Eda, Y., Takahashi, K., & Miyazaki, K. (2001). Associations between Doppler ultrasound-derived luteal blood flow indices and functional hormonal profile in spontaneous and stimulated cycles. *Journal of Medical Ultrasonics*, 28(4), 139–146. <https://doi.org/10.1007/bf02481351>

- Yari, Y., Næve, I., Bergtun, P. H., Måsøy, S. E., & Løvstakken, L. (2024). Automated measurement of ovary development in Atlantic salmon using deep learning. *Ultrasound in Medicine & Biology*, 50(3), 364–373. <https://doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2023.11.008>
- Yatabe, T., Arriagada, G., Hamilton-West, C., & Urcelay, S. (2011). Risk factor analysis for sea lice, *Caligus rogercresseyi*, levels in farmed salmonids in southern Chile. *Journal of Fish Diseases*, 34(5), 345–354. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2761.2011.01238.x>
- Zalcman, E., Burroughs, A., Meyer, A., Hillman, A. E., Sadler, R., Madin, B., Mackenzie, C., Ward, M. P., Stevenson, M., Happold, J., Hutchison, J., Gallardo Lagno, A. L., Cameron, A., & Cowled, B. D. (2021). Sea lice infestation of salmonids in Chile between 2011 and 2017: Use of regulatory data to describe characteristics and identify risk factors. *Aquaculture*, 530, 735752. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735752>

## ANEXOS

**Anexo N°1:** Tabla IGS\* estimado en hembras de *Salmo salar*.

Sexo	Largo_gonada	Peso_corporal	Largo_furcal	Dif_LT_LG	IGS*
H	5,4	80,65	19,1	11,7	1,27395562
H	4,2	59,25	16,8	10,6	1,11841204
H	6,2	71,35	18,5	10,3	1,37765134
H	4,6	67,45	18,1	11,5	1,1702599
H	5,5	72,75	18,5	11	1,28691759
H	6	81,93	19,2	11,2	1,35172741
H	5,9	80,88	19,4	11,5	1,33876545
H	4,3	61,55	17,6	11,3	1,13137401
H	4,5	76,07	18,7	12,2	1,15729794
H	4,5	65,61	18,4	11,9	1,15729794
H	5	55,76	17,1	10,1	1,22210776
H	5,5	75,27	18,5	11	1,28691759
H	4,9	58,8	17	10,1	1,2091458
H	5,1	67,34	18	10,9	1,23506973
H	5	87,98	19,7	12,7	1,22210776
H	6	92,95	20,1	12,1	1,35172741
H	5,2	70,93	18	10,8	1,24803169
H	6	80,35	19,3	11,3	1,35172741
H	5,5	107,4	21,2	13,7	1,28691759

H	5,5	70,22	18,2	10,7	1,28691759
H	6	76,7	18,4	10,4	1,35172741
H	6	74,7	18,9	10,9	1,35172741
H	5,5	69,7	18,4	10,9	1,28691759
H	6	67,55	18,1	10,1	1,35172741
H	5	56,3	16,9	9,9	1,22210776
H	6,3	79,69	19,1	10,8	1,39061331
H	5,5	58,66	16,9	9,4	1,28691759
H	6	75,25	18,6	10,6	1,35172741
H	5,5	61,2	17,5	10	1,28691759
H	6	71,8	19	11	1,35172741
H	6	69,4	18,3	10,3	1,35172741
H	5,5	71,76	18,4	10,9	1,28691759
H	5	65,12	17,9	10,9	1,22210776
H	5,5	53,35	17	9,5	1,28691759
H	6,5	65,28	18	9,5	1,41653724
H	6	74,94	18,7	10,7	1,35172741
H	6,5	71,3	18,5	10	1,41653724
H	5,5	56,24	17	9,5	1,28691759
H	6	80,06	19	11	1,35172741
H	7	80,83	19,5	10,5	1,48134706
H	4,5	38,63	14,5	8	1,15729794

H	6	76,74	17,5	9,5	1,35172741
H	6	76,4	19	11	1,35172741
H	5,5	70,24	18,5	11	1,28691759
H	6	77,4	19	11	1,35172741
H	5,5	66,3	18	10,5	1,28691759
H	7	93,6	19,2	10,2	1,48134706
H	6	71,2	18,4	10,4	1,35172741
H	7	81,4	19,5	10,5	1,48134706
H	6	62,2	17,6	9,6	1,35172741
H	6	77,26	18,7	10,7	1,35172741
H	6,5	81,23	19,2	10,7	1,41653724
H	6	77,95	19,2	11,2	1,35172741
H	6	71,44	18,9	10,9	1,35172741
H	7	80,95	19	10	1,48134706
H	6	71,76	18,5	10,5	1,35172741