



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE  
ESCUELA DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL Y SISTEMAS  
ICS1113-OPTIMIZACIÓN

## Informe 3

---

**Minimizar el impacto ambiental en el fondo  
marítimo de la industria del salmón chilena,  
estableciendo las regulaciones pertinentes y  
satisfaciendo la demanda del mercado nacional**

**Grupo 18**

Javiera Romero, 21626243, Sección 2  
María Trinidad Bersezio, 21639558, Sección 2  
Fernanda Joustra, 21624917, Sección 2  
Martina Aravena, 21627649, Sección 2  
Alonso Espinoza, 21656045, Sección 2  
Mauricio Acuña, 2163887J, Sección 2

Fecha entrega: 23 de Junio de 2023

# Índice

<b>1.Descripción del problema</b>	<b>3</b>
1.1 Contexto y relevancia . . . . .	3
1.2 Impacto Ambiental de la Salmonicultura en Chile . . . . .	3
1.3 Regulaciones . . . . .	4
<b>2.Modelación</b>	<b>6</b>
2.1. Conjuntos . . . . .	6
2.2. Parámetros . . . . .	6
2.3. Variables . . . . .	6
2.4. Restricciones . . . . .	7
2.5. Función objetivo . . . . .	8
<b>3.Definición de Datos</b>	<b>8</b>
3.1. Rango de conjunto . . . . .	8
3.2. Descripción de Parámetros . . . . .	9
<b>4.Resultados</b>	<b>10</b>
4.1. Reslución del Problema . . . . .	10
<b>5.Análisis de Sensibilidad</b>	<b>10</b>
<b>6.Conclusiones</b>	<b>13</b>
<b>6.Anexo</b>	<b>14</b>

# Descripción del problema

## Contexto y relevancia

Hace unos 50 años en Chile, se comenzó a desarrollar la salmonicultura de manera artesanal, la cual se ha convertido en una de las industrias más importantes del país. Esta actividad se concentra en la zona sur del país, desde la región de la Araucanía hasta la región de Magallanes y la Antártica Chilena. Actualmente la salmonicultura es el segundo mayor sector exportador después de la minería. A nivel mundial Chile es el segundo mayor productor de salmónidos, después de Noruega, y representa alrededor de un 28 % de la producción global.[14]

Según el Consejo del Salmón de Chile los primeros procesos de introducción de salmón en Chile se remontan al siglo XIX, con la llegada de huevos de salmón y trucha. En 1976 se creó el Servicio Nacional de Pesca y Acuicultura (Sernapesca), encargado de fiscalizar la producción acuícola y pesquera en Chile. En la década del 1980 la producción de salmónes era de 1.200 toneladas aproximadamente, mientras que en la década de 1990 sumó más de 60.000 toneladas y continuó creciendo mucho más a nivel industrial con una mayor tecnología. Pudiendo consolidarse la internalización del salmón chileno teniendo un fuerte enfoque en mercados como Japón y Estados Unidos. [1].

A nivel nacional, las exportaciones de salmón conforman el tercer lugar, luego de las exportaciones de cobre y litio [4]. A partir de estos números se puede estimar y hacer una proyección de cómo va a ser la demanda y las exportaciones a futuro. Se estima que para los próximos años la cosecha de salmón alcance de 1.200.000 a 1.300.000 de toneladas, aumentando el ingreso monetario y la empleabilidad. Asimismo se estima que los métodos de extracción de salmón se van a ir automatizando e innovando, respondiendo a las demandas y necesidades de la zona en los años que siguen [5].

En los últimos años en las regiones de Los Lagos, Aysén y Magallanes han llevado a cabo la producción de salmón por más de 1.200 empresas lo que genera alrededor de 70.000 empleos directos e indirectos en las regiones mencionadas anteriormente. Esto genera que en las regiones australes de nuestro país se tenga la menor tasa de desempleo en Chile (5 %) en los últimos años [6].

## Impacto Ambiental de la Salmonicultura en Chile

En primer lugar, esta industria genera desechos orgánicos que pueden contener nutrientes y compuestos orgánicos que al ser liberados al mar pueden cambiar la cantidad de DBO5 (demanda bioquímica de oxígeno) en los ecosistemas acuáticos, alterando a estos y favoreciendo el crecimiento de algas y otros microorganismos. En el 2019, la industria del salmón en Chile produjo alrededor de 2.700 toneladas de heces y restos de alimento por día, lo que equivale a más de 986.000 toneladas al año. Debido a lo anterior, existen diferentes tratamientos de lodos, que las empresas pesqueras pueden adoptar para la disminución de estos contaminantes.[7]

En segundo lugar, en Chile los salmónes son alimentados diariamente con pelet que contienen antibióticos, lo más comunes son la Oxitetraciclina, Florfenicol, Piscirickettsia salmonis, Sulfato de Trimetoprima y Sulfametoxazol Enrofloxacino, que buscan proteger al salmón de diferentes bacterias. Sin embargo, cerca de un 40 % de los antibióticos no logran ser absorbidos por los peces, y son depositados al medio acuático en las heces de los salmónes.[8]. Según el Servicio Nacional de Pesca y Acuicultura (Sernapesca), la industria salmonera en Chile utilizó alrededor de 379,6 toneladas de productos químicos en 2020, incluyendo antibióticos, antiparasitarios, antifúngicos y pesticidas. [9]. Cantidad que es 100 veces más que la cantidad que utilizan en Noruega.

Por otro lado, debido a que los salmónes consumen todos los días antibióticos, su microbiota intestinal está altamente expuesta a tener bacterias resistentes a los antibióticos, lo cual puede afectar a los consumidores. De esta forma, al restringir la cantidad de antibióticos que los salmónes

consumen, se disminuirá el impacto ambiental que genera y la calidad del producto se verá mejorada, como también la imagen que el salmón chileno tiene a nivel mundial.

En tercer lugar, esta industria emite una serie de gases del efecto invernadero. Según un estudio de la CIEP en el 2019 las emisiones causadas por el uso de combustibles fósiles para la producción, el transporte de alimentos para salmones y la operación de las instalaciones emitieron alrededor de 421.541 toneladas de CO<sub>2</sub> al año, lo que equivale a las emisiones de aproximadamente 92 mil automóviles.[10]

Por último, debido a que el salmón es una especie introducida en Chile, los vientos fuertes o marejadas son cruciales, ya que los salmones logran escapar de las jaulas y pueden generar un impacto significativo en las poblaciones de peces salvajes y cambiar la biodiversidad acuática natural. En el 2020 se escaparon de sus jaulas 410.150 salmones, el 10 % de estos podría haber llegado a producir posibles daños al medio ambiente y a la fauna acuática nativa [11].

## Regulaciones

Actualmente existen distintas leyes en Chile que regulan de distintas formas la industria del salmón, como la Ley General de Pesca y Acuicultura (Ley N° 18.892) y su Reglamento, La Ley N° 20.920 la Resolución N° 507/2018, la Norma Chilena Nch 3084, Resolución N° 58/2017.

Según lo que se establece en el Art.122 bis de la Ley General de Pesca y Acuicultura, desde el año 2012 le corresponde a Sernapesca la elaboración y evaluación de informes de INFA (información ambiental) en donde una previa licitación pública encomienda esta labor a las entidades de análisis que están inscritas en el registro del D.S.N° 15/2011. El programa considera distintos aspectos como el tratamiento de las conductas mediante el cruce de información disponible, también se hace un seguimiento a las herramientas tecnológicas utilizadas, se realiza una fiscalización mediante cámaras y en algunos casos también se considera la fiscalización presencial en el terreno [12].

El Reglamento Ambiental de la Acuicultura (Rama) señala expresamente que es “responsabilidad de cada titular de concesión que su centro opere en niveles compatibles con las capacidades de los cuerpos de aguas lacustres, fluviales y marítimos, para lo que se debe mantener siempre condiciones aeróbicas en la superficie del área de sedimentación” lo cual busca que la industria acuícola en Chile opere de cierta manera amigable y sostenible con el planeta.

La normativa exige que se cumpla con dos principales objetivos, el primero consiste en realizar una Caracterización Preliminar de Sitio (CPS) lo cual busca asegurar que el lugar en donde se está operando esté en condiciones aeróbicas lo cual significa que se indique la presencia de oxígeno que esta disuelto en el agua intersticial de los primeros 3 cm de sedimento. Finalmente se debe realizar el estudio de Información Ambiental (INFA) el cual tiene como labor ir evaluando el desempeño de todos los centros de cultivo utilizados.[13]

## Desafíos y Objetivos

Basándonos en el contexto, se propone crear un modelo de optimización que, desde una perspectiva macro considera a una autoridad encargada de velar por el bien de las actividades marítimas en el país, conoce al detalle cada elemento de una cierta empresa, puede tomar decisiones por sobre ella y minimizar el residuo de desechos orgánicos producidos en el cultivo de salmones durante un cierto periodo de tiempo. Para este modelo solo se contarán los residuos que aporta la salmonera al fondo marino.

Regulando esto, el entorno marítimo se beneficia y con ello todas las actividades pesqueras de las cuales las autoridades marítimas son responsables. Por otra parte el horizonte de planificación es de 25 años, desde 2025 hasta 2050. Se considera este tiempo debido a que es un rango razonable para poder realizar mejores proyecciones e inferencias sobre el tema escogido.

Esto se conseguirá controlando los flujos tanto de peces como de alimentos, el alimento que reciben los peces, cumpliendo los requisitos nutricionales que implica un buen producto y restringiendo ciertas actividades de manera de controlar las emisiones producidas.

Entre las restricciones impuestas se incluyen satisfacer la demanda, cumplir una cierta densidad en las empresas de manera de no generar estés en los distintos peces que serán cultivados, un tope máximo de residuo orgánico anual permitido, entre otros.

## Supuestos

Para poder enfrentar la problemática generada por el desecho de residuos orgánicos en el cultivo de salmones, existen ciertos supuestos sobre los cuales se trabajan para poder plantear el modelo.

- La primera gran suposición es que la autoridad marítima que regula a estas plantas productoras tiene control total sobre las decisiones que puede tomar cada empresa, y en base a eso se desarrolla una política de producción regulada con el fin de reducir los desechos orgánicos.
- Al ser una autoridad nacional, la demanda que se busca satisfacer es solamente la demanda nacional, a pesar de que Chile sea uno de los mayores exportadores de salmón a nivel mundial.
- Por otra parte, se asume que no existirán escapes masivos de peces, hechos que cuando ocurren generan un impacto negativo en el ecosistema marítimo. Otro supuesto relacionado con los peces es que la demanda es anual y que enviando productos una vez al año a cada región cubierta por el modelo se puede cumplir la demanda anual.
- Asimismo, se asume que los peces solo pasan por la etapa de engorda, ya que se trabaja solo en agua de mar, no en agua dulce.
- También se asume que el peso de un pez se mantiene constante. Esta suposición en la práctica no se puede realizar, debido a que el peso varía y por ende la densidad de peces también.
- Como último supuesto que se consideró a la hora de modelar el problema, es que el volumen que posee cada salmonera es tal que no es necesario restringir la densidad de peces por metro cúbico, es decir, independiente de la cantidad de peces la densidad se cumplirá.
- De igual manera, se asume en el programa que las variables utilizadas son continuas, para de esta forma obtener valores factibles a la hora de correr el código.

## Modelación

A continuación se presenta como fue modelada la problemática expuesta de manera formal.

### Conjuntos

- $p$ : Tipo de pez.  $p \in \{1, \dots, P\}$
- $t$ : Periodos de tiempo donde se aplica la normativa.  $t \in \{2025, \dots, 2050\}$
- $s$ : Cantidad de salmoneras.  $s \in \{1, \dots, S\}$
- $n$ : Tipo de "externalidad negativa" que se genera.  $n \in \{1, \dots, N\}$
- $a$ : Tipo de alimento.  $a \in \{1, \dots, A\}$
- $i$ : Nutrientes necesarios para la dieta del salmón.  $i \in \{1, \dots, I\}$

### Parámetros

- $\alpha_{i,p}$ : Mínimo requerido de un nutriente  $i$  por un tipo de pez  $p$ .
- $\beta_{n,p}$ : Porcentaje de residuo orgánico  $n$  que genera una un tipo de pez  $p$  por kilogramo de alimento.
- $d_{p,t}$ : Demanda del pez  $p$  durante un período  $t$ .
- $WP_p$ : Peso del pez  $p$ .
- $PE_{s,p}$ : Cantidad inicial de pez  $p$  en la salmonera  $s$ .
- $MAP_p$ : Densidad máxima permitida en una jaula, por cada pez  $p$ .
- $VOL_s$ : Volumen de cada jaula, en la salmonera  $s$ .
- $\epsilon_{i,a}$ : Porcentaje de nutrientes  $i$  que contiene una unidad de alimento  $a$ .
- $TOP_{n,s,t}$ : Tope permitido de externalidades negativas  $n$  para salmonera  $s$  en período  $t$ .
- $PA_{s,a}$ : Cantidad inicial de alimento  $a$  que posee salmonera  $s$ .
- $CO_{n,a}$ : Porcentaje de residuos que genera el alimento  $a$  en el mar.
- $PC_{t,p}$ : Suma de alimento que no es consumido por el pez  $p$  en un periodo  $t$ .
- $V_{t,s,p}$ : Cantidad de peces  $p$  que ingresan a  $s$  en  $p$ .
- $Y_{s,t,a}$ : Cantidad de alimento que ingresa a la salmonera

### Variables

- $X_{s,p,t}$ : Cantidad de peces  $p$  que tiene la salmonera  $s$  durante período  $t$ .
- $CA_{a,s,t,p}$ : Cantidad de alimento  $a$  entregado al pez  $p$  por la salmonera  $s$  durante período  $t$
- $Q_{s,t}$ : 1 si sobrepaso el tope de contaminante en la salmonera  $s$ , 0 en otro caso.
- $Z_{s,p,t}$ : Cantidad de peces  $p$  que fueron comercializados en un tiempo  $t$ , en la salmonera  $s$ .

## Restricciones

1. Flujo de peces: La cantidad de peces que posee una salmonera al final del año anterior, se le suma la cantidad de peces que se empiezan a cultivar en una salmonera en el presente año. A lo anterior restarle la cantidad de peces que cosecha la salmonera ese mismo año.

$$X_{s,p,t} = V_{s,p,t} + X_{s,p,t-1} - Z_{s,p,t-1} \quad (1)$$

$$\forall p \in \{1, \dots, P\}, \forall t \in \{2026, \dots, 2050\}, \forall s \in \{1, \dots, S\}$$

Caso Base:

$$X_{s,0,p} = V_{s,0,p} + PE_{s,p} - Z_{s,p,0} \quad (2)$$

$$\forall p \in \{1, \dots, P\}, \forall s \in \{1, \dots, S\}$$

2. Flujo de Alimento: La cantidad de alimento a que tiene la salmonera al final de un tiempo t es igual a la cantidad de alimento que quedó del año anterior, sumado a la cantidad que se compró ese año.

$$\sum_{p \in P} CA_{a,s,t,p} = Y_{s,a,t} - \sum_{p \in P} CA_{a,s,t-1,p} \quad (3)$$

$$\forall t \in \{2026, \dots, 2050\}, \forall s \in \{1, \dots, S\}, \forall a \in \{1, \dots, A\}$$

Caso base:

$$\sum_{p \in P} CA_{a,s,1,p} \leq PA_{s,a} + Y_{s,a,1} \quad (4)$$

$$\forall a \in \{1, \dots, A\}, \forall s \in \{1, \dots, S\}$$

3. Capacidad máxima de salmoneras: La cantidad máxima de tipos de peces p que puede haber en una salmonera s, según la densidad máxima permitida.

$$X_{s,p,t} \leq (VOL_s \cdot MAP_p) / WP_p + M \cdot Q_{s,t} \quad (5)$$

$$\forall p \in \{1, \dots, P\}, \forall s \in \{1, \dots, S\}, \forall t \in \{2025, \dots, 2050\}$$

4. Satisfacer la demanda: Las salmoneras tienen que satisfacer la demanda de los salmónes en el tiempo t.

$$d_{p,t} \leq \sum_{s \in S} Z_{s,p,t} \quad (6)$$

$$\forall t \in \{2025, \dots, 2050\}, \forall p \in \{1, \dots, P\}$$

5. Activación de la multa: La cantidad total de alimento entregado a los salmónes, se multiplica por la cantidad de externalidad negativa generada en el fondo del mar. Este valor debe ser menor o igual al valor límite (proporcional al volumen de peces de cada salmonera) para cada salmonera. En caso contrario se aplica la multa.

$$\sum_{a \in A} \sum_{p \in P} CA_{s,t,p,a} (\beta_{n,p} \cdot (1 - PC_{t,p}) + CO_{n,a} \cdot PC_{t,p}) \leq TOP_{n,s,t} + M \cdot Q_{s,t} \quad (7)$$

$$\forall t \in \{2025, \dots, 2050\}, \forall s \in \{1, \dots, S\}, \forall n \in \{1, \dots, N\}$$

6. Respetar el mínimo nutricional: Cada pez en un tiempo  $t$  requiere de una cantidad mínima de nutrientes la cual va contenida en  $a$ .

$$\sum_{a \in A} \epsilon_{i,a} \cdot CA_{s,t,a,p} \geq \alpha_{i,p} \cdot X_{s,p,t} \quad (8)$$

$$\forall p \in \{1, \dots, P\}, \forall t \in \{2025, \dots, 2050\} \quad \forall s \in \{1, \dots, S\}, \forall i \in \{1, \dots, I\}$$

7. Sólo se pueden enviar peces maduros: Los peces que ingresan a la etapa de engorda tienen que pasar un mínimo de dos años en las "piscinas".

$$V_{t,s,p} \geq Z_{s,p,t+1} \quad (9)$$

$$\forall p \in \{1, \dots, P\}, \forall s \in \{1, \dots, S\}, \forall t \in \{2025, \dots, 2050\}$$

Caso base:

$$PEs, p \geq Z_{s,p,0} \quad (10)$$

$$\forall p \in \{1, \dots, P\}, \forall s \in \{1, \dots, S\}$$

8. Naturaleza de las Variables.

$$X_{s,p,t}; Y_{s,a,t}; CA_{a,s,t,p}; Z_{s,p,t} \in \mathbb{Z}_0^+ \quad (11)$$

$$Q_{s,t} \in \{0, 1\} \quad (12)$$

## Función objetivo

Busca minimizar los residuos orgánicos que genera el alimento del salmón desde el año  $t = 1$  hasta el año  $t = T$ .

$$\min \sum_{n \in N} \sum_{a \in A} \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} \sum_{p \in P} CA_{a,s,t,p} (\beta_{n,p} \cdot (1 - PC_{t,p}) + CO_{n,a} \cdot PC_{t,p} + Q_{s,t}) \quad (13)$$

## Definición de Datos

### Rango de conjuntos

Para la base de datos de este modelo, consideramos los siguientes conjuntos:

- $p$ : Se consideró 3 tipos de salmón (Salmón Atlántico, Salmón Coho, Trucha).
- $t$ : El tiempo donde aplica esta normativa, desde el 2025 hasta 2050
- $s$ : Se consideraron 3 grandes salmoneras, una por cada región productora, ubicadas en las regiones de Los lagos, Aysén y Magallanes.
- $n$ : Residuos orgánicos. Se busca reducir las emisiones de fósforo y nitrógeno que no son absorbidos por los peces y se desechan al mar.
- $a$ : Alimento del salmón, en este conjunto se consideraron 3 las marcas más vendidas en Chile (Vitapro, Biomar, Skretting Chile).
- $i$ : Se considero que el salmón necesita Vitaminas, Lípidos, Proteínas, Carbohidratos para tener una buena nutrición.



## Descripción de parámetros

- $\alpha_{i,p}$ : Mínimo requerido de un nutriente  $i$ , en un tipo de pez  $p$ . (Kg)

Para estos valores se utilizó la información nutricional del conjunto  $i$  la cual se obtuvo del sitio web de Biomar. Estos datos se encuentran en el archivo *Alpha.i,p.csv*

- $\beta_{n,p}$ : Porcentaje de residuo orgánico que genera una unidad de alimento  $a$ .

Para obtener estos valores se utilizó la información del conjunto  $n$  obtenida entrega del sitio web de Salmón Expert. En su base de datos se encuentra cual es el porcentaje de residuo que genera tanto el nitrógeno como el fósforo. Estos datos se encuentran en el archivo *Beta.n,a.csv*

- $d_{p,t}$ : Demanda de un tipo de pez  $p$  durante un período  $t$ . (Kg)

Para estos datos se tomó en consideración información del sitio web de Salmon Expert, de la cual se obtuvo la demanda en un año, luego se consideró el aumento de la tasa de consumo anual de los salmones como un 3,5% para cada año, desde el 2025 hasta el 2050. Estos datos se pueden encontrar en el archivo *d.p,t.csv*

- $WP_p$ : Peso del pez  $p$  (Kg).

Para obtener el peso cada tipo de salmón se utilizó la información del sitio web de Salmón Chile. Estos datos se encuentran en el archivo *WP.p.csv*

- $PE_{s,p}$ : Cantidad inicial de pez  $p$  en una salmonera  $s$ .

Estos datos se obtuvieron del sitio web de la Subsecretaría de Pesca y Acuicultura. Se estimaron los valores de peces iniciales para 3 salmoneras distintas. Estos datos se encuentran en el archivo *PE.s,p.csv*

- $MAP_p$ : Densidad máxima permitida en una jaula, por cada pez  $p$ . (Kg/m<sup>3</sup>)

Para estos datos se utilizó la información obtenida por la Subsecretaría de Pesca y Acuicultura. Los datos sobre la máxima densidad permitida por jaula se encuentran en el archivo *MAP.p.csv*

- $VOL_s$ : Volumen de cada jaula en la salmonera  $s$ . (m<sup>3</sup>)

Se consideró el volumen obtenido por el sitio web de Aqua Chile. El volumen de una jaula normal obtenido, se multiplicó por 20 (debido a que el promedio de jaulas es 20). Los datos se encuentran en el archivo *VOL.s.csv*

- $\epsilon_{i,a}$ : % de nutrientes  $i$  que contiene una unidad de alimento  $a$ .

Para estos datos se utilizó la información del conjunto  $a$  y la del conjunto  $i$  las cuales se obtuvieron de la paginas web del diario Emol y de Biomar respectivamente. Se sacó el porcentaje que contiene cada uno de los nutrientes del conjunto  $i$ . Estos datos se encuentran en el archivo *Epsilon.i,a.csv*

- $TOP_{n,s,t}$ : Tope permitido de externalidades negativas  $n$  para salmonera  $s$  en período  $t$ . (Kg)

Para obtener estos datos se sumó las cantidades iniciales de cada tipo de pez que hay en las salmoneras  $s$ , y luego ese valor se multiplicó por 1,5 que es la cantidad que come cada pez por cada kilogramo que este pesa. El resultado de los anterior representa la cantidad total de alimento en kilogramo que consume cada pez  $p$  en un año. Posteriormente para ver las emisiones de fósforo se multiplica el resultado anterior por 0,015 (porcentaje de fósforo en el

alimento). Asimismo, para obtener las emisiones de nitrógeno se realizó el mismo proceso sólo que multiplicando la cantidad de alimento por 0,3 (porcentaje de nitrógeno en el alimento). Estos datos se encuentran en el archivo *TOP\_n, s, t.csv*

- $PA_{s,a}$ : Cantidad inicial de alimento  $a$  que posee salmonera  $s$ .(Kg)

En un inicio, la salmonera va a tener que empezar con una cantidad de alimento mínimo para poder empezar con el proceso industrial de la salmonera. Esto fue calculado con la cantidad de alimento que come cada pez (1,5 Kg) multiplicado por la cantidad total de peces en una salmonera. Estos datos se encuentran en el archivo *PA\_s, a.csv*

- $CO_{n,a}$ : Porcentaje de residuos  $n$  que genera el alimento  $a$  en el mar.

Para estos datos se hizo una estimación con el porcentaje de fósforo y de nitrógeno que hay en cada alimento  $a$ . Los datos de los porcentajes se obtuvieron de un informe de Fundación Chile para la Subsecretaría de Pesca. Estos datos se encuentran en el archivo *CO\_n, a.csv*

- $PC_{t,p}$ : Suma de alimento que no es consumida por un pez  $p$  en un tiempo  $t$ .

La resta entre la cantidad de alimento que se le proporciona al pez, menos la cantidad de alimento que come el pez. El cual es un 10 % que cae al fondo marítimo, el cual va disminuyendo en 1 % cada tres años. Estos datos se encuentran en el archivo *PC\_p.csv*

- $V_{t,s,p}$ : Cantidad de peces  $p$  que ingresan a  $s$  en un tiempo  $t$ .

Se considero una cantidad inicial para todas las salmoneras iguales. Se asumió un crecimiento del 8 por ciento. Peces que están ingresando en el año. Cantidad de peces que en promedio se cosechan al año. Los datos se encuentran en el archivo *V[s, t, p].csv*

- $Y_{s,t,a}$ : Cantidad de alimento  $a$  que ingresa a la salmonera  $s$  en un tiempo  $t$ .(Kg)

Los datos de la cantidad de alimento que ingresa a una salmonera se obtuvieron del sitio web de Aqua Chile. Estos datos obtenidos se estimaron para cada una de las salmoneras en un tiempo  $t$ , se encuentran en el archivo *Ingreso\_alimento.csv*

## Resolución del Problema

Para abordar el problema, se empleó la interfaz Python-Gurobi, que permite programar las restricciones y variables necesarias para encontrar la solución óptima utilizando los datos previamente definidos para determinar la manera óptima de reducir contaminantes.

Se obtuvo que la cantidad de residuos orgánicos que se van a generar a lo largo del horizonte de tiempo (2025 hasta 2050), la cual es 60.601.011,66 toneladas. Por lo que en promedio, en cada año se generaría 2.330.808,141 ton de residuos.

Este resultado tiene sentido, ya que en promedio una salmonera de tamaño mediano genera 3.000 toneladas al año. Si consideramos que hay 900 salmoneras en Chile, al año se generan 2.700.000 toneladas de residuos en el fondo marítimo. En el modelo se considera que una salmonera serían la combinación de todas las salmoneras en esa región en particular, por lo que al comparar los datos computación y los de la vida real, se concluye que es podría ser el óptimo.

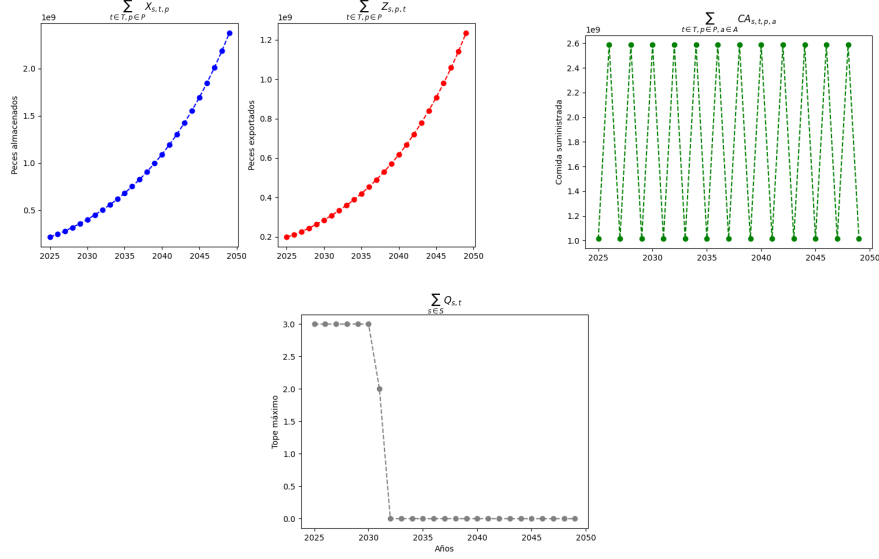


Figura 1: Presentación de resultados

## Análisis de Sensibilidad

Demanda  $d_{p,t}$ : Al cambiar el parámetro de la demanda, podemos ver que el valor de la función objetivo no cambia. Esto quiere decir que la cantidad de los residuos en el fondo marítimo no cambiará. Esto lo podemos atribuir a que sólo varía la demanda nacional (es en lo que se enfoca el modelo) cuando las empresas se planifican para satisfacer tanto demanda nacional como internacional, por lo que para seguir funcionando según los estándares establecidos es necesario que envíe cantidades altamente superiores a la demanda.

Cambio en d	valor de Z	cambio en Z
0.8	60601011656	0
0.85	60601011656	0
0.9	60601011656	0
1	60601011656	0
1.1	60601011656	0
1.15	60601011656	0
1.20	60601011656	0

Cuadro 1: Cambios en la demanda

Peces iniciales  $PE_{s,p}$ : Al disminuir la cantidad inicial de peces por salmonera, la cantidad de residuos aumentará. Esto es porque la cantidad de comida que se le da a los peces se mantiene igual, por lo que hay una mayor cantidad de comida que nos es utilizada y cae directamente al fondo marítimo. Lo cual hace que aumenten los residuos en el mar.

Cambio en $PE$	valor de $Z$	cambio en $Z$
0.7	61.618.766.395	1,67943523
0.8	61.279.514.816	1,119623487
0.9	60.940.263.236	0,5598117433
1	60.601.011.656	0
1.1	58.497.069.808	-3,471793276
1.2	58.155.518.794	-4,035399402
1.3	57.813.967.780	-4,599005527

Cuadro 2: Cambios en peces iniciales ( $PE$ )

Cambio en el % de desechos por inutilización de alimento  $CO_{n,a}$ : Como podemos ver si disminuye la cantidad de utilización de alimento, disminuye la cantidad de desechos en el fondo marítimo. Al disminuir la cantidad de alimento otorgado a los peces, esta tendrá una mejor utilización”, es decir que comerán más y caerá menos al fondo marítimo. Por lo que existirá un número menor de residuos.

Cambio en $CO$	valor de $Z$	cambio en $Z$
0.7	60.170.314.606	-0,7107093402
0.8	60.313.880.289	-0,4738062268
0.9	60.457.445.972	-0,2369031143
1	60601011656	0
1.1	60.744.577.339	0,2369031134
1.2	60.888.143.023	0,4738062268
1.3	61.031.708.706	0,7107093402

Cuadro 3: Cambios en % de desechos por inutilización de alimento ( $CO$ )

Cambio en el % de nutriente que contiene cada alimento  $\epsilon_{i,a}$ : Si disminuye la cantidad de nutrientes de cada alimento, aumentará la cantidad de residuos en el fondo del mar. Esto es porque existe un mínimo nutricional que se debe cumplir. Por lo que se deberá alimentar con mayor cantidad de alimento a los peces para cumplirlo, y al aumentar la cantidad de alimento proporcionado aumentará la cantidad de residuos totales. Esto podría abrirse a que posibilite la existencia de un alimento con mejor composición nutrición, y así disminuir los residuos marítimos....

Cambio en $\epsilon$	valor de Z	cambio en Z
0.8	Infactible	-
0.85	64.138.737.949	5,837734712
0.9	62.828.461.024	3,675597663
1	60601011656	0
1.1	58.778.560.932	-3,007294225
1.15	57.986.193.935	-4,314808696
1.20	57.259.857.521	-5,513363628

Cuadro 4: Cambios en % de nutriente que posee cada alimento *epsilon*

## Conclusiones

El modelo presentado anteriormente se acerca mucho a la realidad, pero no es su totalidad, ya que en la realidad las empresas tienen otras preocupaciones e incentivos, que hacen que tomen diferentes decisiones en cuanto a la producción. Entre estas están, intereses monetario, costos de producción,....., que harían que cambien las variables que se están considerando, como la cantidad de salmones en los criadero o la cantidad de alimento.

En el modelo hay un caso en donde los resultados no tienen sentido. En la variable  $X_{s,t,p}$  la cantidad de peces que hay en la salmonera 3 en el año 2026 es 0, por lo que no existe una explicación razonable por que ese año, decide no producir. Sin embargo como solo ocurre ese caso específico, lo decidimos obviar.

Por otro lado, modelo no es preciso ya que no se dispone de algunos datos, por lo que mucho de los parámetros de nuestra base de datos, fueron en base a supuestos. Por la falta de información precisa.

Además, este modelo podría ser más eficiente si se enfoca en un salmonera, en vez de todas, ya que así los datos de cada parámetro serán mas precisos. Lo que lograría que cada empresa mejore sus tomas de decisiones enfocadas a los residuos que estas generan conociendo su propia logística de operar y en base a eso proponer decisiones.

Por último, creemos que el tema presentado es muy relevante, ya que la salmonicultura aporta una gran parte del total de la economía en Chile, por lo que la industria se desarrollará aún más y sería de suma importancia poder regular el impacto ambiental que generan.

# Anexo: Salmonicultura en Chile

## Bibliografía

[1] Barrientos, C. (2022, March 10). 40 años de salmonicultura chilena: Una historia en constante evolución. Aqua.

<https://www.aqua.cl/2022/03/09/salmonicultura-chilena-una-historia-en-constante-evolucion/>

[2] Consejo del Salmón. (2023). Principales datos de la industria. Consejo del Salmón.

<https://www.consejodelsalmon.cl/informacion-de-la-industria/principales-datos-de-la-industria/>: :text=Chile%20es%20el%20

segundo%20productos,28%25%20de%20la%20producci%C3%B3n%20mundial.text=Fuente%3A%20Consejo%20del%20Salm%C3%B3n%2C%20con%20datos%20FAO%2C%202020.

[3] Appel, L. (2023, January). Exportaciones chilenas de salmón muestran cifras récord y el futuro es prometedor. Salmonexpert.

[https://www.salmonexpert.cl/aduanas-exportaciones-salmon-chileno/exportaciones-chilenas-de-salmon-muestran-cifras-record-y-el-futuro-es-](https://www.salmonexpert.cl/aduanas-exportaciones-salmon-chileno/exportaciones-chilenas-de-salmon-muestran-cifras-record-y-el-futuro-es-prometedor/1475457)

prometedor/1475457: :text=Entre%20enero%20y%20diciembre%20del,3%2C8%25%20en%20volumen.

[4] Consejo del Salmón. (2023). Informe de exportación de salmón y trucha. Consejo del Salmón.

<https://www.consejodelsalmon.cl/wp-content/uploads/2023/01/25012023-Reporte-exportaciones-2022.pdf>

[5] Aqua. (2018, October). En Chile: Desafíos para la salmonicultura a 2030. Aqua.

<https://www.aqua.cl/reportajes/chile-desafios-la-salmonicultura-2030/>

[6] Salmonicultura. (2021, February). Importancia de la actividad acuícola en lo económico, social y ambiental. ABC-Salmonicultura.

<https://abc-salmonicultura.cl/2021/02/02/importancia-de-la-actividad-acuicola/>

[7] Impacto ambiental de Salmonicultura en dos aspectos: Sombra bajo las aguas y los salmones escapados. (2020, March 10). Retrieved from

<http://www.bcn.cl/asesoriatecnicaparlamentaria/detalledocumento.html?id=75653>

[8] Velásquez, F. (2018, July 25). Industria salmonera y cómo destruye el fondo marino del sur de Chile. Radio Uchile. <https://radio.uchile.cl/2018/07/25/industria-salmonera-como-destruye-el-fondo-marino-del-sur-de-chile/>

[9] Sernapesca. (2020). Informe de uso de antimicrobianos 2020. Servicio Nacional de Pesca y Acuicultura. (n.d.).

<http://www.sernapesca.cl/noticias/sernapesca-publica-informe-de-uso-de-antimicrobianos-2020>

[10] Greenticket. (2022). Camancha Gei. Salmones Camanchaca.

<https://salmonescamanchaca.cl/wp-content/uploads/2022/06/CAMANCHACAGEI2022.pdf>

[11] Ministerio de Economía, Fomento y Turismo. (2021, February). Escape de peces en la salmonicultura. Sernapesca.

<http://www.sernapesca.cl/sites/default/files/escapedepecesdesalmonicultura2010al202020210203.pdf>

[12] Aqua. (2019, May). Acuicultura y medio ambiente: Condiciones de las INFAs se mantienen. Aqua. <https://www.aqua.cl/reportajes/acuicultura-y-medio-ambiente-condiciones-de-las-infas-se-mantienen/>

[13] Servicio Nacional de Pesca y Acuicultura. (2020, September). Evaluación de los informes ambientales de los centros de cultivo de las regiones de Los Lagos, Aysén y Magallanes. Sernapesca. <http://www.sernapesca.cl/sites/default/files/boletinseptiembre2020final.pdf>

[14] Consejo del Salmón. (2023). Informe de exportación de salmón y trucha. Consejo del Salmón. <https://www.consejodelsalmon.cl/informacion-de-la-industria/principales-datos-de-la-industria>