

Informe  
Proyecto  
Arclim

# Acui- cultura



**ARCLIM**  
Atlas de Riesgo Climático  
Chile



## Equipo realizador:

### Doris Soto

INCAR / Universidad de Concepción

### David Opazo

IFOP, Puerto Montt

### Jorge León- Muñoz

UCSC e INCAR

### Patricio Díaz

ULA, Puerto Montt

### Carlos Molinet

UACH, Puerto Montt

### Fabián Tapia

COPAS Sur Austral e INCAR, UDEC

### Yuri Soria

Consultor

### Cristián Segura

INTEMIT

### Jose Videla

Consultor

Puerto Montt, Chile - 2020



### Este informe debe citarse de la siguiente manera:

Soto, D.; León-Muñoz, J.; Molinet, C.; Soria-Galvarro, Y.; Videla, J.; Opazo, D.; Díaz, P.; Tapia, F. & Segura, C. 2020. Informe Proyecto AR-Clim: Acuicultura. INCAR, Universidad de Concepción, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Universidad Austral de Chile, INFOP, Universidad de Los Lagos, e INTEMIT coordinado por Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia y Centro de Cambio Global UC para el Ministerio del Medio Ambiente a través de La Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). Puerto Montt.

## Preparado para:



ARClim es un proyecto del Ministerio del Medio Ambiente del Gobierno de Chile apoyado por el Programa Mundial de Evaluación y Gestión de Riesgos para la Adaptación al Cambio Climático (Pérdidas y Daños) por encargo del Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo (BMZ).

## Coordinado por:



Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia [CR]2  
ANID/FONDAP/15110009



Centro Interdisciplinario de Cambio Global UC  
de la Pontificia Universidad Católica de Chile

## Desarrollado por:



Informe  
Proyecto  
ARCLIM

# Acui- cultura

**ARCLIM**  
Atlas de Riesgo Climático  
Chile



# ÍNDICE DE CONTENIDOS

Pág.

## **1** 1. Resumen Ejecutivo

## **3** 2. Introducción

3 2.1 Acuicultura en Chile.

5 2.2 Salmonicultura.

6 2.3 Impacto socioeconómico de la salmonicultura.

6 2.4 Mitilicultura.

7 2.5 Cambio climático y su impacto en la acuicultura.

## **11** 3. Metodología

11 3.1 Estimación de Riesgos.

11 3.2 Estimación de Riesgo para la salmonicultura.

12 3.2.1 Exposición.

12 3.2.2 Amenazas y cadenas de impacto.

13 3.2.3 Sensibilidad.

15 3.3 Estimación de Riesgo para la mitilicultura (cultivo de mejillones).

Pág.

15 3.3.1 Exposición

15 3.3.2 Amenazas y cadenas de impacto.

16 3.3.3 Sensibilidad.

16 3.4 Elaboración de las planillas/matrices para estimación de Riesgo y metodología de cálculo.

## **19** 4. Resultados y conclusiones

19 4.1 Riesgo estimado para las pisciculturas.

20 4.1.2 Medidas de adaptación para reducir el nivel de Riesgo en la etapa piscicultura.

20 4.2 Riesgo estimado para la engorda de salmones en el mar interior.

25 4.3 Riesgo estimado para la mitilicultura y algunas medidas de adaptación.

## **28** 5. Referencias

# ÍNDICE DE FIGURAS

Pág.	
4	<b>Figura 1.</b> 1a . Producción acuícola en Chile. 1b. Producción acuícola, excluyendo salmones y choritos.
5	<b>Figura 2.</b> Cosechas acuícolas por región, 2018 y 2019.
6	<b>Figura 3.</b> Distribución comunal del número de concesiones salmoacuícolas.
7	<b>Figura 4.</b> Mapa esquemático del mar interior de la Región de Los Lagos.
20	<b>Figura 5.</b> Exposición (E), Sensibilidad (S), Amenaza (A) y Riesgo (R) de pisciculturas del centro-sur de Chile ante el cambio climático.
21	<b>Figura 6.</b> Indicadores de tasas de cambio entre el clima presente (1980 - 2010) y futuro (2030 - 2060).
21	<b>Figura 7.</b> Distribución de la Exposición, Sensibilidad y Amenaza para cada ACS, acorde a su posición latitudinal.
21	<b>Figura 8.</b> Distribución del Riesgo de perder biomasa por incremento de parasitismo debido al incremento de salinidad por agrupación de concesiones de salmones (ACS).
22	<b>Figura 9.</b> Distribución del Riesgo de incremento de parasitismo y enfermedades por agrupación de concesiones de salmones.
23	<b>Figura 10.</b> Nivel de Riesgo de perder biomasa, por comuna, en la Región de Los Lagos.
23	<b>Figura 11.</b> Niveles de Riesgo de perder biomasa por incremento de parasitismo y enfermedades asociadas a incremento de la salinidad, bajo escenario modelados, por comuna.

Pág.	
24	<b>Figura 12.</b> 12a. Nivel de Riesgo de perder biomasa por incremento de FAN, debido a aumento de luminosidad asociado a reducción de precipitaciones por ACS. 12b. Nivel de Riesgo de perder biomasa por incremento de FAN, debido a aumento de luminosidad asociado a reducción de precipitaciones, por comuna.
26	<b>Figura 13.</b> 13a. Nivel de Riesgo de perder biomasa de semilla, debido a incremento de salinidad por reducción de precipitaciones. 13b. Nivel de Riesgo de perder biomasa para cosecha y comercialización por eventos FAN.

# ÍNDICE DE TABLAS

Pág.	
9	<b>Tabla 1.</b> Principales forzantes asociados al cambio climático y cadena de efectos más relevantes, con impactos posibles para acuicultura en sistemas flotantes en el mar.
17	<b>Tabla 2.</b> 2a. Escala semicuantitativa de puntajes. 2b. Ejemplo, estimación de Riesgo en el caso de salmones en fase de engorda.
22	<b>Tabla 3.</b> Escenarios de Riesgo.





# 1

# RESUMEN EJECUTIVO

El presente análisis aborda la salmonicultura y la mitilicultura, actividades que representan más del 98% de la producción nacional (2019) en este sector y se concentran fuertemente en la zona sur de Chile. El estudio utilizó los modelos de proyección climática de cambios en temperatura del aire y de precipitaciones 2030-2060, asociados a las áreas de producción entre las regiones del Biobío y de Magallanes, y que pueden influenciar: a) la calidad y la disponibilidad de agua dulce para la producción de estadios juveniles de salmón en pisciculturas en tierra; b) salinidad del agua y temperatura superficial del mar, que pueden afectar negativamente la engorda de salmones en el mar, la disponibilidad de semilla de mejillones y la engorda de mejillones.

Estudios preliminares indican que en Patagonia norte la reducción de las precipitaciones y leves incrementos en la temperatura superficial del mar serían las Amenazas más relevantes. En específico, menores ingresos de agua dulce a los mares interiores generarían una condición más propicia para la proliferación e impacto de parásitos nocivos en la salmonicultura; a la vez, podrían aumentar el Riesgo de ocurrencia y expansión de otras enfermedades y eventos de

floraciones de algas nocivas (FAN), que también afectarían a los mejillones. En tanto, la producción de semilla de mejillones está muy asociada a estuarios con alto ingreso de agua dulce, condición que facilita su producción y que se podría perder por la reducción de precipitaciones.

El valor de **Riesgo** se estimó a partir de indicadores de **Exposición** (E, la biomasa que se puede perder), de **Sensibilidad** (S, aspectos que hacen a la producción más susceptible a la pérdida) y de **Amenaza** climática (A, incremento de días sin lluvia, aumento de años secos, alza de temperatura), de tal forma que:  $R = E \times S \times A$ , donde los tres componentes tienen el mismo peso.

Para la producción de salmones en pisciculturas, los mayores niveles de Riesgo ocurren más al norte, en la medida que el pronóstico de reducción de precipitaciones es mayor, y también en aquellas cuencas cuyo paisaje ha sido fuertemente transformado desde bosque nativo a plantaciones y agricultura. Cuencas mejor conservadas generan una mayor resiliencia para la producción de ovas y juveniles de salmón, y este es un elemento clave para la adaptación.

Para la producción de salmones a engorda y cosecha, los barrios (Áreas de Concesiones de Salmonicultura o ACS) con mayores niveles de Riesgo de perder biomasa por incremento de parasitismo y/o aumento de FAN se ubican en la Región de Los Lagos, los que -además- tienen las más altas cargas productivas actuales y acumuladas. Modelaciones simples que cambian algunos factores de S y E, dependientes de la gestión productiva, muestran que se puede reducir el Riesgo mejorando la gestión sanitaria de los salmones y repartiendo en forma más equitativa la producción entre los barrios, de modo de equiparar el nivel de Riesgo.

Para la mitilicultura, los mayores niveles de Riesgo de perder la producción de semilla de mejillones se registran en las comunas de Cochamó y Hualaihué, Región de Los Lagos, particularmente en la primera. También en este caso, si se modelan cambios en la gestión productiva y

en la distribución de la captación de semilla, se podrían reducir los Riesgos.

Para la engorda de mejillones, los mayores niveles de Riesgo están entre Castro y Quellón, en el archipiélago de Chiloé, influenciados por la preexistencia de FAN y por la alta concentración de la producción. Al igual que en los casos anteriores, se podrían reducir los niveles de Riesgo si se repartiera en forma más equitativa la producción entre las comunas.

Una ordenación espacial más estratégica de la acuicultura, que obedezca a criterios de Riesgo, ambiental y sanitario, es necesaria para mejorar la resiliencia del sector. Obviamente, es necesario balancear estos Riesgos con las oportunidades, incluyendo también aspectos sociales, económicos y de equidad en el acceso.





# 2

## INTRO- DUCCIÓN

González *et al* (2013) realizan un análisis de vulnerabilidad de la acuicultura chilena frente al cambio climático y revisan la situación de los cultivos de algas, de ostiones, de mejillones y de salmones, concluyendo que el cultivo de salmones y de ostiones son levemente más vulnerables. Sin embargo, este estudio agrupa los sectores a nivel nacional, enfocándose, principalmente, en la detección de brechas de información, y aboga por análisis más detallados a niveles regional y local.

El presente análisis aborda sólo la **salmonicultura** y la **mitilicultura**, actividades que representan más del 98% de la producción nacional (2019) en este sector y se concentran fuertemente en la zona sur de Chile. Ambas industrias destacan por disponer y facilitar bases de información ambiental y productiva relevantes a escala local. La acuicultura de pequeña escala, como de algas, se aborda en el análisis de los Riesgos de la pesca artesanal en las caletas (Cubillos *et al.* en este informe). La mitilicultura, en tanto, destaca por una alta participación de productores de pequeña escala; particularmente en la fase de captación de la semilla, la cual es conducida por pescadores artesanales y pequeños productores.

### 2.1 ACUICULTURA EN CHILE

---

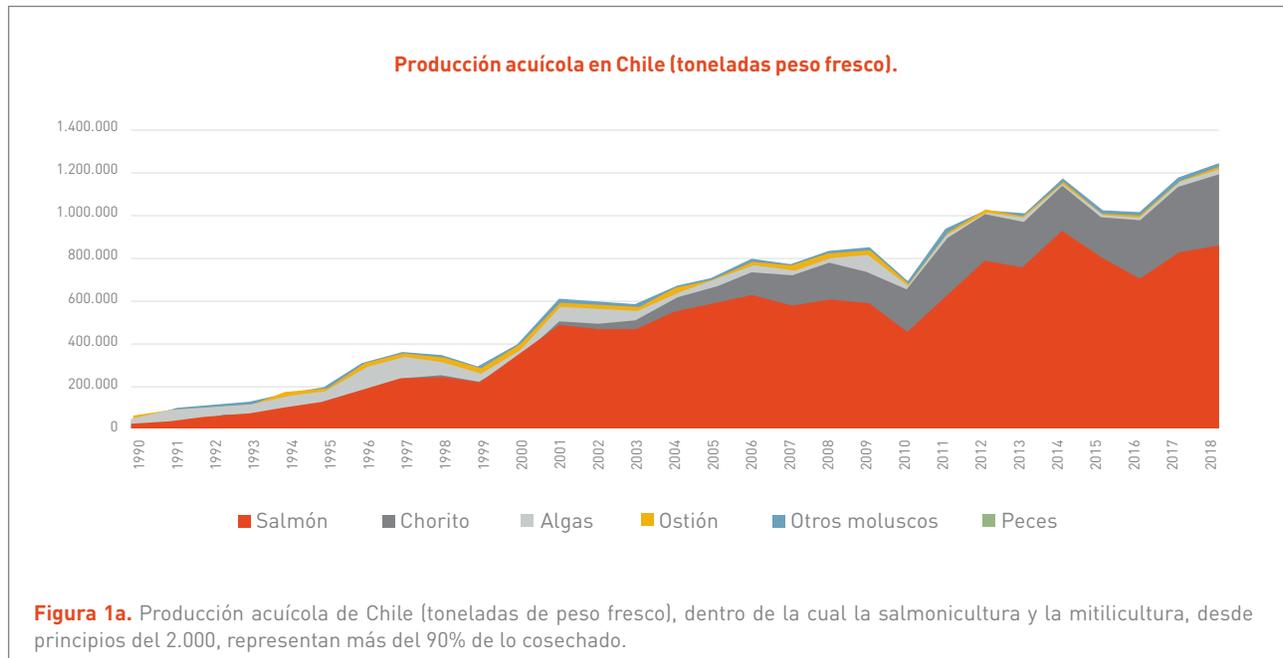
Entre 1961 y 2016, el consumo mundial de pescado aumentó en un promedio anual de 3,2%, superando la tasa de crecimiento de las carnes procedentes de todos los animales terrestres (2,8%) y duplicando la tasa anual de crecimiento poblacional (1,6%) (FAO, 2018). A nivel mundial, la expansión de la demanda del sector pesquero ha sido impulsada por una creciente demanda por proteína animal, la emergente tendencia por una alimentación más sana y sustentable, y el aumento en el nivel de ingresos de la población. En esta historia, la producción de peces desde la acuicultura ha jugado un papel preponderante, mientras que la pesca extractiva para consumo humano se ha mantenido prácticamente estancada o bien, se ha reducido.

Entre los años 1980 y 2016, la producción acuícola mundial registró una tasa anual de crecimiento de 7,6%. En igual período, la pesca extractiva presentó una tasa anual de crecimiento de sólo 0,8%. Siguiendo esta tendencia, desde 2012 la producción acuícola nacional supera a la generada desde la pesca extractiva, condición que se ha

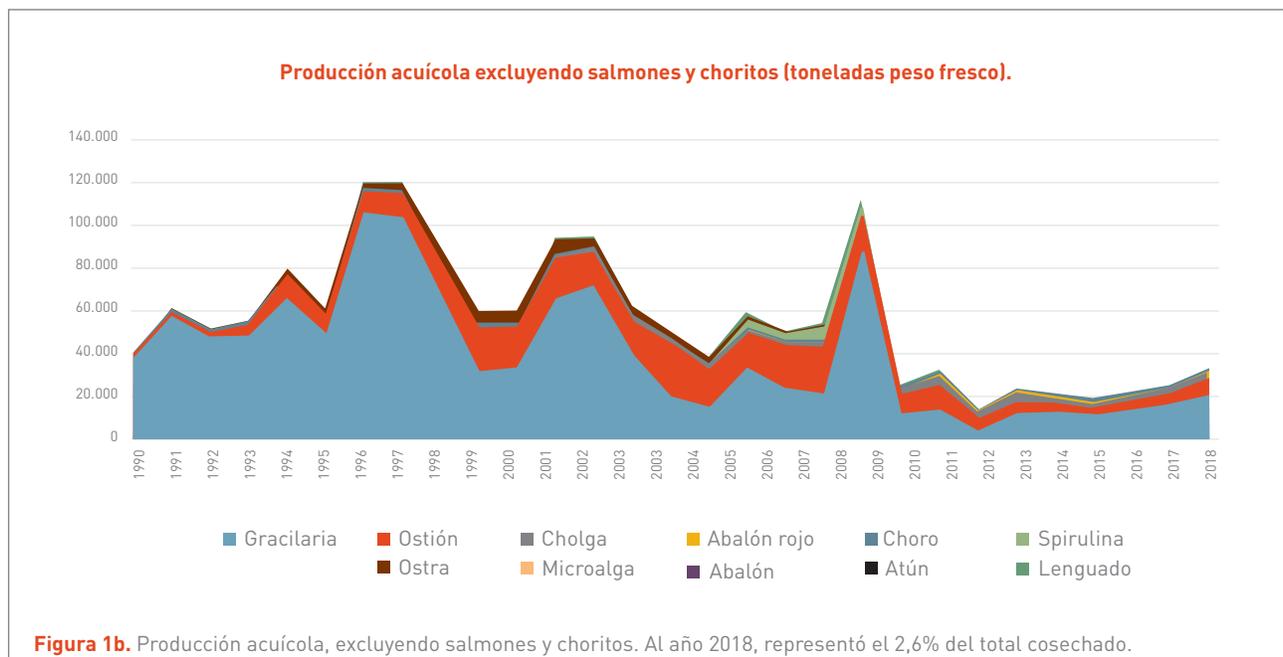


acentuado durante los últimos años (FAO, SOFIA, 2020). Chile se encuentra entre los primeros 10 productores mundiales de acuicultura, siendo el productor y exportador más importante de América Latina. En específico, en el período 2015 – 2017, Chile produjo un promedio anual de 1.1 millones de toneladas (14 especies), con un valor superior a los 6 mil millones de dólares (Wurmann y Soto, en revisión).

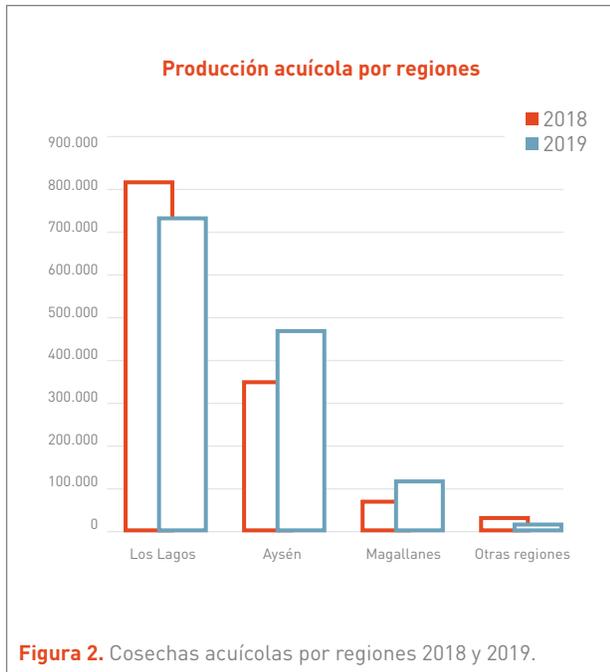
De acuerdo a la información proporcionada por la Subsecretaría de Pesca (2020), las cosechas acumuladas a diciembre de 2019 fueron de 1,3 millones de toneladas, cifra 5,7% superior a lo registrado a igual fecha del año 2018. Los peces aportaron con el 72,5% del total de la acuicultura; mientras que los moluscos y algas representaron el 26,0% y el 1,5%, respectivamente. Los principales recursos cosechados correspondieron a salmón del atlántico,



Fuente: FAO Fishstat, 2020.



Fuente: FAO Fishstat, 2020.



**Figura 2.** Cosechas acuícolas por regiones 2018 y 2019.

Fuente: Informe Sectorial de Pesca y Acuicultura 2019, Subsecretaría de Pesca.

chorito y salmón del Pacífico, aportando el 53,0%, 25,3% y 13,4%, respectivamente (**Figura 1a**). Las principales regiones donde se registran cosechas son Los Lagos y Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo, con 718,2 mil toneladas (54,6%) y 472,5 mil toneladas (35,9%), respectivamente. Entre ambas suman el 90,5% del país (**Figura 2**). La Región de Magallanes aportó con el 8,4% y el resto del país sólo el 1,1% (Informe sectorial SUBPESCA 2019).

En la zona norte (regiones de Atacama y de Coquimbo) se desarrollan cultivos de ostiones, de algas y de abalones, que constituyen una actividad económica relevante de pequeña escala y de nivel local. De acuerdo a las estadísticas que Chile reporta a FAO, sin embargo, la pesca de pequeña escala o de recursos distintos a salmones y mejillones se ha reducido en los últimos años, representando el 2,6% en volumen durante 2018 (**Figura 1b**).

Considerando la distribución geográfica y sus impactos económicos y sociales, este análisis se acotó a la salmonicultura y a la mitilicultura, principalmente, por la información disponible y la importancia de estos sectores.

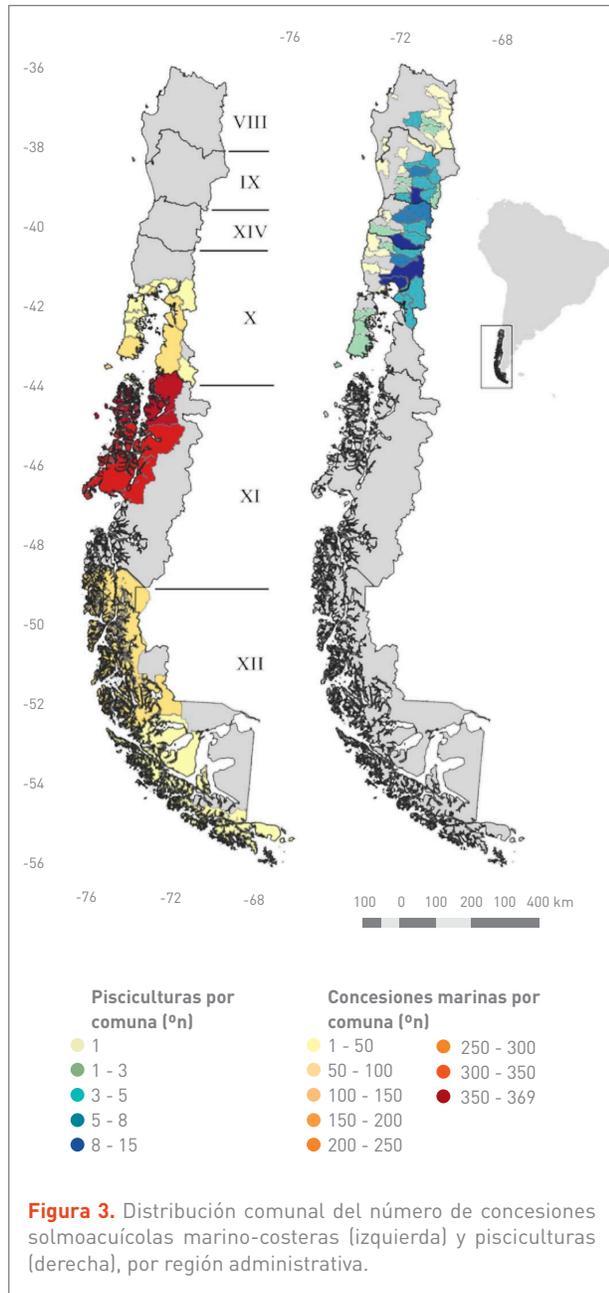
## 2.2 SALMONICULTURA

En Chile, desde sus inicios, el sector salmonero registró un crecimiento vertiginoso, convirtiéndose rápidamente al país en el segundo productor mundial de salmón y trucha, detrás de Noruega.

Entre los años 1985 y 2018, Chile avanzó desde una producción de mil toneladas a más de 800 mil toneladas. Inicialmente, el desarrollo de esta industria se concentró en la Región de Los Lagos, expandiéndose luego hacia la Región de Aysén y, últimamente, hacia la Región de Magallanes (**Figura 1a**).

Siguiendo el ciclo de vida natural de las especies salmonídeas, la etapa de producción de ovas y juveniles ocurre en hatcheries y pisciculturas, instalaciones emplazadas en tierra que operan con sistemas de flujo abierto y/o recirculación, y que son abastecidas por diferentes fuentes de agua dulce (ríos, esteros, vertientes, pozos, lagos). Al igual que los cultivos en mar, inicialmente las pisciculturas se concentraron en la Región de los Lagos, expandiéndose luego hacia las regiones de Los Ríos, de la Araucanía y, en menor medida hacia la del Biobío (**Figura 3**). Cabe mencionar que, durante los últimos años, el proceso de *smoltificación*, cambio fisiológico que prepara a los peces para ir al mar, también ha comenzado a ser desarrollado en pisciculturas, desplazando en magnitud al uso de balsas jaulas en ríos, lagos y estuarios.

A nivel productivo, la salmonicultura chilena mantiene una tasa anual de crecimiento superior a sus competidores directos, sin embargo, su producción es considerablemente más fluctuante y vulnerable que la informada por otras industrias, como la noruega. Esto se debe a la ocurrencia de problemas sanitarios y ambientales, que afectan significativamente el nivel de producción, como fue la crisis del Virus ISA entre los años 2007 y 2010 y el Florecimiento de Algas Nocivas (FAN) en el verano de 2016 (Cerdeira, 2019, León-Muñoz *et al* 2018).



Fuente: Quiñones et al., (2019).

## 2.3 IMPACTO SOCIOECONÓMICO DE LA SALMONICULTURA

Actualmente, la salmonicultura aporta alrededor del 7% de las exportaciones totales de Chile y representa más del 14% de sus exportaciones no mineras, siendo un actor relevante para el desarrollo social y económico, especialmente,

en regiones de la zona sur del país. De acuerdo a Cerda (2019), al año 2016 esta industria generaba más de 21 mil puestos directos de trabajo, principalmente, en plantas de proceso (53,1%), en centros de engorda en mar (19%) y en pisciculturas (12,5%) (Instituto Nacional de Estadísticas, 2018). En promedio, las remuneraciones recibidas por los trabajadores del sector (sueldo neto promedio = \$ 850.000) son superiores al nivel de ingresos medio de Chile (aprox. \$ 517.570) (Instituto Nacional de Estadísticas, 2018). Por otra parte, los empleos indirectos corresponden a empresas proveedoras, localizadas en torno a las pisciculturas, a centros de cultivo y a plantas de proceso. En el año 2018, la Asociación de la Industria del Salmón de Chile A.G (SalmonChile) estimaba que los empleos indirectos debiesen ser superiores a las 40 mil personas. Sin embargo, el verdadero efecto del encadenamiento de actividades económicas, desde la provisión de alimentos y alojamiento a nivel local a efectos más complejos, aún es desconocida. Además de los empleos directos e indirectos, la industria salmonera tributa a través del pago de las patentes acuícolas en las comunas donde opera, condición que en localidades remotas genera una alta dependencia (Soto et al 2019).

## 2.4 MITILICULTURA

La mitilicultura chilena, representada por el chorito o mejillón patagónico (*Mytilus chilensis*), creció de forma exponencial en los últimos 20 años, convirtiendo al país en el segundo productor mundial de mejillones (> 300 mil toneladas) y en el primer mercado exportador. En efecto, Chile ha absorbido el crecimiento del mercado, ya que países productores de mitílidos, como España, Francia y Nueva Zelanda, no han logrado incrementar su producción (Molinet et al., 2017). A nivel local, el crecimiento de esta actividad (Figura 1) ha impactado fuertemente la economía en la Región de Los Lagos, donde se cosecha el 99 % de la producción nacional.

A diferencia de la salmonicultura, la totalidad de la producción de mejillones se lleva a cabo en la Región de Los

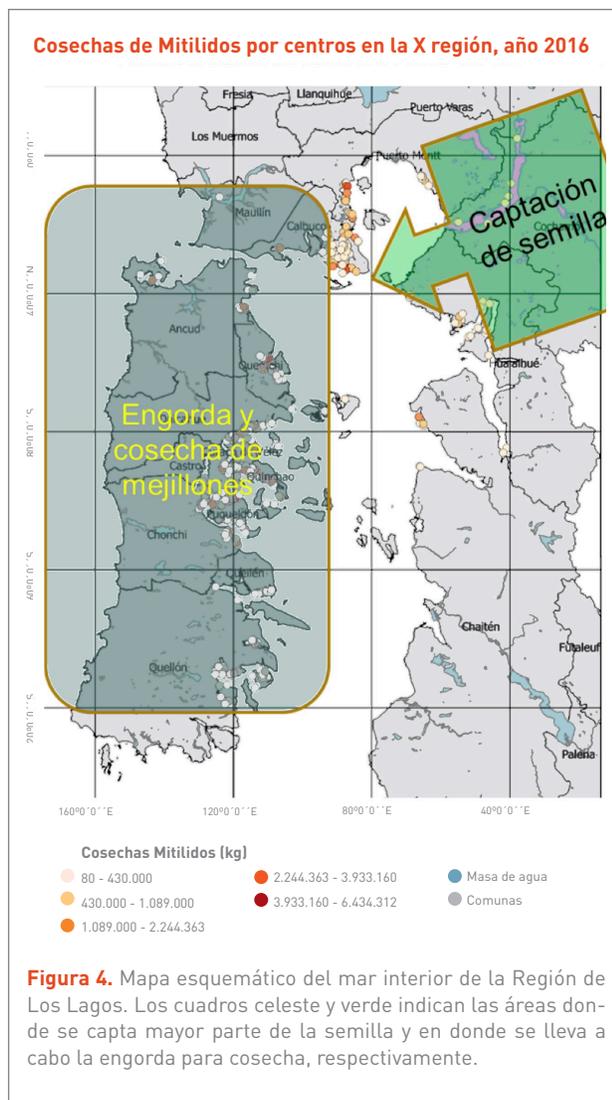
Lagos. El 99% de las semillas utilizadas por la industria chilena proviene de la captación en el medio natural, lo cual se conoce como acuicultura basada en pesca. En específico, las semillas se originan a partir de larvas que son producidas por bancos naturales de mejillones ubicados, principalmente, en el fiordo de Reloncaví y en el área de Hornopirén (**Figura 4**). La captura de semillas se realiza en cuerdas que ofrecen sustratos artificiales muy eficientes para su captación y crecimiento. Luego de unos meses, las semillas son trasladadas a zonas de engorda en el archipiélago de Chiloé y a zonas del Seno de Reloncaví y de Calbuco, donde -además- se emplazan las plantas de proceso y empaque para la exportación.

## 2.5 CAMBIO CLIMÁTICO Y SU IMPACTO EN LA ACUICULTURA

A diferencia de las aves y de los mamíferos, los organismos acuáticos son poiquilotermos, es decir, no pueden controlar su temperatura interna, que es dependiente de las condiciones externas; al mismo tiempo, poseen una limitada capacidad para controlar otros parámetros internos, como salinidad y acidez. Así, los organismos acuáticos en vida libre buscan, se mueven y se establecen, en aquellos ambientes donde encuentran las condiciones óptimas para vivir y reproducirse.

En cambio, los organismos acuáticos que se desarrollan en cultivo acuícolas están confinados a una ubicación acotada y fuertemente influenciada por las condiciones ambientales circundantes, donde la variabilidad y cambio climático afectan de forma diferencial, según la forma de alimentación de las especies. Por ejemplo, aquellos cultivos que reciben alimentación externa (salmonicultura: pellet) serían menos vulnerables que aquellos que obtienen el alimento del medio (mitilicultura: fitoplancton). De igual forma, sistemas de cultivo cerrados o semicerrados (pisciculturas) están más protegidos que sistemas de cultivos abiertos, como las balsas jaulas de salmones o las cuelgas de mejillones.

En este sentido, desde la década del 2000, se analizan los efectos del incremento de los gases de efecto invernadero (GEI) sobre la acuicultura (De Silva y Soto, 2009, González *et al.* 2013<sup>1</sup>, FAO 2018<sup>2</sup>), señalándola como un sector muy vulnerable, pero que tiene oportunidades de adaptación. Dabaddie *et al.* y Soto *et al.* (2018) entregan un análisis resumido de los potenciales impactos y vulnerabilidad del sector a nivel global y destacan la vulnerabilidad de la acuicultura chilena, como un sector muy importante pero frágil. Las Amenazas más comunes en acuicultura dulceacuícola y costera están asociadas a reducción en las precipitaciones y/o a aumentos en la temperatura del agua, debido a incrementos en la temperatura del aire y a la mayor radiación.



1 <http://www.fao.org/3/i3356s/i3356s.pdf>

2 <http://www.fao.org/3/CA0356ES/ca0356es.pdf>



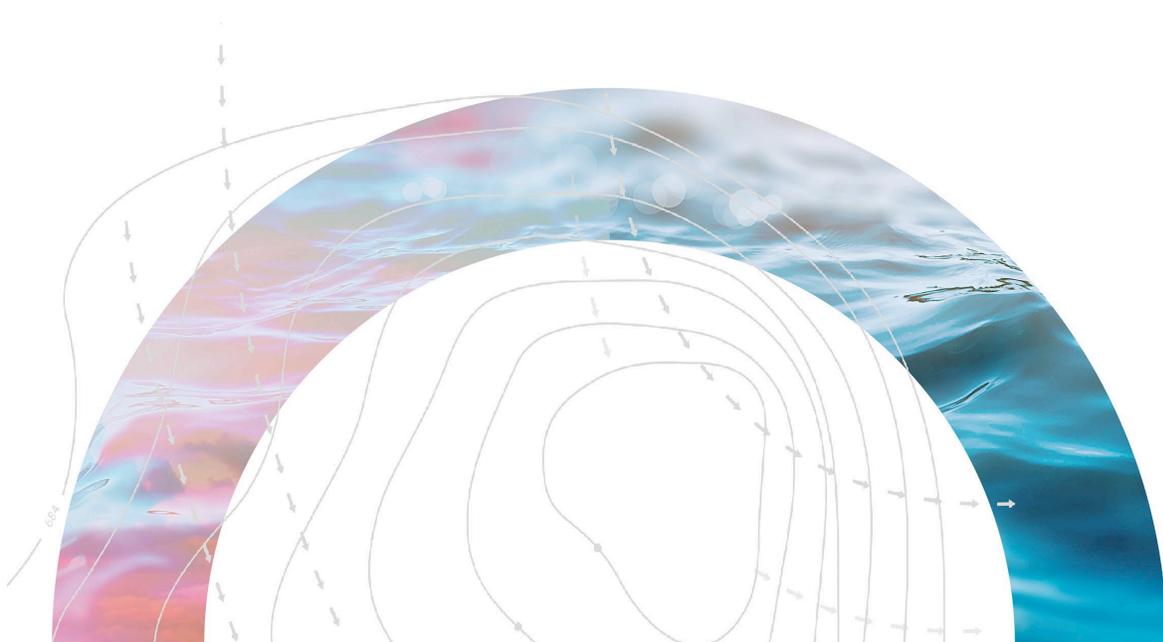
Estos patrones de cambio pueden afectar directamente a los organismos en cultivo por estrés fisiológico, o bien, gatillar una cadena de eventos y de efectos altamente complejos y que, a menudo, ocurren en forma sinérgica y/o como resultado de complejas interacciones biofísicas (**Tabla 1**). Por ejemplo, el incremento de temperatura puede determinar a) aumentos de salinidad, b) disminución de la solubilidad del oxígeno y c) favorecer, en acople con el viento, cambios en patrones de circulación. En resumen, en ambientes acuáticos y especialmente en zonas marino-costeras, es extremadamente difícil aislar efectos e impactos de un sólo tipo de forzante.

En el caso chileno, donde el 98% de la acuicultura corresponde a salmones y mejillones, estudios preliminares indican que en Patagonia norte la reducción de las precipitaciones y los leves incrementos en la temperatura superficial del mar serían las Amenazas más relevantes. En específico, menor ingreso de agua dulce a los mares interiores generaría una condición más propicia para la proliferación e impacto de parásitos nocivos para la salmicultura; a la vez, podría aumentar el Riesgo de ocurrencia y expansión de otras enfermedades y eventos de floraciones de algas nocivas (FAN) (León-Muñoz *et al.* 2018, Soto *et al.* 2019, Aguayo *et al.* 2019). Esta última Amenaza es también relevante para la mitilicultura, afectando bancos semilleros y patrones de circulación de aquellos sistemas

altamente influenciados por agua dulce, donde se realiza la captación de semilla, y limitando la comercialización del producto final en presencia de eventos FAN (por ejemplo, debido a la presencia de la microalga tóxica *Alexandrium catenella*) (**Tabla 1**).

Considerando los antecedentes expuestos, uno de los objetivos del estudio es elaborar mapas de Riesgo ante el cambio climático para los dos principales sistemas acuícolas de Chile, la salmicultura y la mitilicultura. En este sentido, el área de estudio corresponde a las regiones de los sectores centro-sur y sur de Chile, donde se concentra el desarrollo de ambas industrias: entre las regiones del Biobío y de Magallanes en el caso de la salmicultura y, de forma acotada, la Región de Los Lagos para la mitilicultura. En este trabajo, el análisis de Riesgo de la mitilicultura no consideró la acidificación del océano por carecer de proyecciones suficientes sobre sus patrones en los mares interiores.

Por otra parte, algunos estudios han señalado que los mitílidos que habitan en fiordos con alta influencia de agua dulce ya estarían expuestos a fluctuaciones relevantes de acidez del mar, por lo que ya tendrían una cierta capacidad de adaptación (Vargas *et al.* 2017).





Amenaza principal y cadena de eventos	Cadena de efectos en el ambiente acuático	Impactos posibles en cultivos de salmones	Impactos posibles en cultivos de mejillones
Reducción de precipitaciones, resultando en menor ingreso de agua dulce a fiordos.	Incremento de la salinidad, permitiendo ingreso de especies competidoras más exitosas a salinidades altas, que reducen poblaciones de bancos semilleros de choritos.	NA	La reducción de los bancos por incremento de salinidad, lo que -a su vez- reduce la producción de larvas, con impacto en la captación y producción de semilla.
	Incremento de la salinidad, resultando en la reducción de la picnoclina, mecanismo facilitador de la concentración de larvas.	NA	Por debilitamiento de uno de los mecanismos de concentración de las larvas, se reduce la captación y se impacta la producción de semilla.
	Incremento de la salinidad que facilita la presencia y expansión de parásitos del salmón, mejores adaptados a altas salinidades.	Reducción del crecimiento, incremento de la mortalidad (ej., debido al piojo del salmón y también de la ameba de las branquias).	NA
Reducción de la precipitación, dando lugar a períodos más secos y con mayor radiación solar.	Se generan condiciones para mayor crecimiento del fitoplancton, con potencial generación de mareas rojas (FANs).	Reducción de crecimiento y mortalidad, debido a la presencia de FANs.	Pérdida de la producción y/o del mercado, por acumulación de toxinas que impiden el consumo humano.
Incremento de la concentración de CO2 en el océano.	Reducción del pH, resultando en acidificación del océano.	No existe aún evidencia de impactos.	La condición más corrosiva del agua impide el desarrollo normal de la concha, pudiendo afectar el crecimiento y el desarrollo normal de larvas, semillas y adultos.

**Tabla 1.** Principales forzantes asociados al cambio climático y cadena de efectos más relevantes, con impactos posibles para acuicultura en sistemas flotantes en el mar.



# 3

# METODOLOGÍA

## 3.1 ESTIMACIÓN DE RIESGOS

---

Existen diversas metodologías para abordar la vulnerabilidad y el Riesgo frente al cambio climático. En nuestro caso, el Riesgo (R) corresponde a un indicador que está en función de estimaciones de Exposición (E), Amenaza (A) y Vulnerabilidad (V).

$$\text{Riesgo} = f(\text{Exposición, Amenaza y Vulnerabilidad})^3$$

Para esta aproximación, i) la Exposición se definió como la biomasa acuícola producida en un espacio y tiempo determinado, ii) la Amenaza, como la cadena de impactos climáticos que pudiesen afectar a los cultivos acuícolas en los años venideros (**Tabla 1**) y iii) la Vulnerabilidad, como aquellos aspectos que hacen que el desarrollo de esta actividad sea más “sensible” o “susceptible” a las Amenazas evaluadas. En este último caso, no se consideró la vulnerabilidad del sistema socio ecológico ni la capacidad de

adaptación directa. De tal forma, el Riesgo se estima con la combinación de Exposición, Sensibilidad y Amenaza. El cálculo se describe más adelante con un ejemplo.

## 3.2 ESTIMACIÓN DE RIESGO PARA LA SALMONICULTURA

---

Para los mapas de Riesgo de la salmonicultura se optó por separar el análisis entre las fases de cultivo de agua dulce (pisciculturas) y de agua de mar (balsas jaulas). De este modo, se estimaron niveles de Riesgos para 1) las pisciculturas (instalaciones en tierra) emplazadas en el área centro-sur de Chile (36° S – 42° S) y 2) la salmonicultura en el mar desarrollada en la zona sur de Chile (41,5° S – 56° S). Como nota de precaución, es necesario indicar que los niveles de Riesgo de ambos estados del proceso productivo están extremadamente ligados. Si algo sale mal en las pisciculturas, sus consecuencias podrían

---

<sup>3</sup> De acuerdo al modelo más reciente (IPCC, AR5, 2014).



ser traspasadas a las etapas de engorda en el mar. Por otra parte, si algo sale mal en la engorda en el mar no habría demanda para la producción de ovas y juveniles desarrollada en pisciculturas. En futuros análisis podría ser relevante agregar o conectar ambas fases de cultivo.

### 3.2.1 EXPOSICIÓN

La Exposición se definió como el volumen de producción que se podría perder producto de efectos adversos del cambio y variabilidad climática. La estimación de este indicador para las pisciculturas se realizó utilizando información geográfica (coordenadas de los puntos de captación) y productiva, proporcionada por el Servicio Nacional de Pesca y Acuicultura (SERNAPESCA) y la Subsecretaría de Pesca y Acuicultura (SUBPESCA), a través del sistema de Transparencia y Acceso a la Información Pública de Chile (Ley N°20.285). La estimación para la etapa de engorda en el mar consideró los volúmenes promedio cosechados en los años 2017-2018, lo cual representa la situación de último período productivo del cual se tiene información completa. La información también fue aportada por SERNAPESCA, a través del sistema de transparencia.

Para el caso de las pisciculturas, se utilizaron los datos productivos del período 2012 – 2018 vinculados sólo a instalaciones de cultivo cuyos puntos de captación de agua se encontrasen entre los 36,5°S y 42°S y se asociasen a cursos de agua superficiales (ríos, arroyos, esteros). El análisis se acotó al área comprendida entre las regiones del Biobío y de Los Lagos, dada la alta concentración de pisciculturas y su elevado aporte al total de ovas, alevines y juveniles-smolts demandados por la industria salmonera. Luego, cada punto de captación fue utilizado para delimitar las cuencas tributarias a las pisciculturas como unidades de análisis, trabajo realizado en sistemas de información geográfica en base al modelo de elevación digital SRTM (30m; Shuttle Radar Topography Mission). Después, cada unidad de estudio se vinculó a una de las subcuencas o cuencas oficialmente clasificadas por la Dirección General de Aguas. Para este trabajo, se consideró la producción total de las pisciculturas, sin diferenciar entre las etapas de ovas, de alevines o de juvenil-smolts.

Para la etapa de engorda (cultivo en balsas jaulas en fiordos y mares interiores), se utilizaron los datos productivos (período 2017-2018) de concesiones (balsas jaulas) de acuicultura de salmónidos vigentes entre las regiones de Los Lagos y de Magallanes. Estos datos fueron anidados utilizando como unidad de análisis a las agrupaciones de concesiones de salmónidos (ACS) definidas entre los 41,5°S y 56°S. Reconocemos que las ACS son un constructo y pueden no representar fielmente las características oceanográficas del área. Sin embargo, sí son unidades clave en la toma de decisiones de manejo y gobernanza, por lo cual hacen posible vincular los Riesgos asociados al cambio climático a la toma de decisiones.

### 3.2.2 AMENAZAS Y CADENAS DE IMPACTO

La Amenaza se entiende como los eventos climáticos en años venideros, que generan una cadena de impactos que pudiese afectar el desarrollo de las actividades acuícolas evaluadas. En particular, se considera que una reducción de las precipitaciones, debido al cambio climático, podría disminuir la disponibilidad de agua dulce para las pisciculturas (producción de ovas y juveniles de salmón) y tener dos consecuencias generales para el mar interior donde ocurre la acuicultura, especialmente, en la Patagonia norte: i) incremento de la salinidad en fiordos que, actualmente, reciben importantes flujos de agua dulce y ii) aumento de los períodos sin lluvia y, por consiguiente, con mayor luminosidad (**Tabla 1**).

Para evaluar las Amenazas climáticas se utilizaron indicadores de las tasas de cambio (1980 - 2010 vs. 2030 - 2060) de la temperatura del aire ( $\Delta T$ ) y de precipitación ( $\Delta PP$ ), generados por el proyecto ARCLIM desde datos provenientes de Modelos de Circulación General (GCM). Para la evaluación de las pisciculturas, los análisis fueron desarrollados por unidad de estudio (cuencas tributarias) para el dominio 36,5°S y 42°S; en tanto, para la salmonicultura costera se estimaron valores para cada agrupación de concesiones de salmónidos (ACS) contenidas en el dominio 41,5°S y 56°S.

De forma conjunta, para el sistema costero se consideró la variabilidad espaciotemporal de la temperatura superficial del mar (TSM). Para esto, se procesaron series temporales de alta resolución con información diaria y una resolución de pixel de 500 x 500m. Luego, para probar si la TSM ha cambiado significativamente, se aplicaron análisis de tendencia a los datos de cada pixel, los cuales cubren los últimos 15 años. Sin embargo, dado que no se tienen proyecciones claras ni modelos locales para prever cambios en la temperatura superficial del mar interior, esta información se usó, principalmente, para estimar cómo las condiciones actuales y tendencias de la TSM podrían condicionar la Sensibilidad de estos ecosistemas. Finalmente, se consideró la asignación de puntajes a la probabilidad de ocurrencia de eventos nocivos (FANs), en base a las estimaciones reportadas en Soto *et al.*, 2019, desde información histórica, publicaciones relevantes, pronósticos de ocurrencia para los años venideros y opinión de expertos<sup>4</sup>.

En resumen, las Amenazas y cadenas de impacto que se identificaron son las siguientes:

- **Pisciculturas:** la reducción y cambios en los patrones de precipitación produciría cambios en la provisión de agua dulce a las pisciculturas del centro-sur de Chile, reduciendo la disponibilidad de agua en períodos de estiaje y también afectando su calidad por: i) mayor amplitud térmica, ii) inestables niveles de oxígeno disuelto y iii) altas concentraciones de sólidos suspendidos y nutrientes. El impacto final sería una mayor mortalidad y reducción del crecimiento, con la consiguiente pérdida de biomasa de la cosecha (Soto *et al.* 2019, Aguayo *et al.* 2019) – **Riesgo de pérdida de biomasa por reducción de las tasas de conversión del alimento, presencia de metales pesados e incremento de parásitos y enfermedades.**

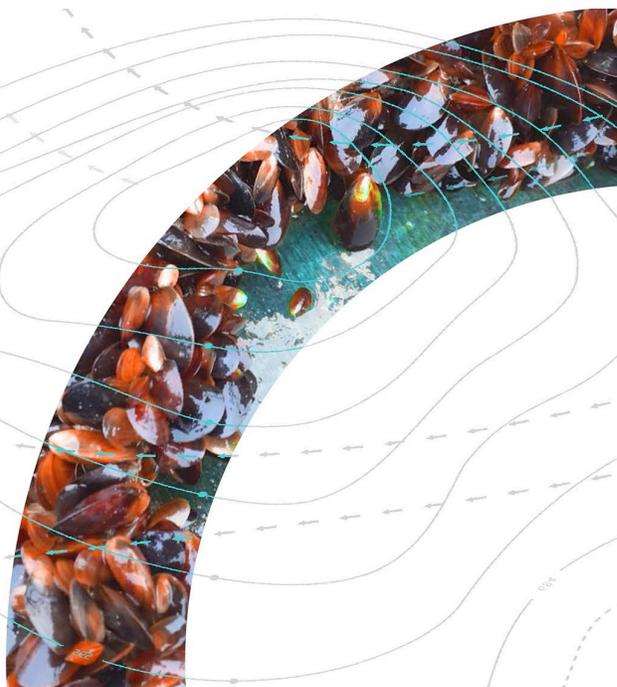
- **Salmonicultura costera:** la reducción de las precipitaciones produciría menores ingresos de agua dulce al mar interior. Esto incrementaría la salinidad de algunos fiordos y canales, facilitando la entrada de parásitos, como el piojo del salmón y la amebiasis, los cuales son más exitosos en

salinidades altas. El impacto final sería una mayor mortalidad y reducción del crecimiento con la consiguiente pérdida de biomasa de la cosecha (Soto *et al.* 2019, Aguayo *et al.* 2019) – **Riesgo de pérdida de biomasa por incremento de parásitos y enfermedades.** El incremento de la salinidad se traduce también en menor solubilidad del oxígeno, pudiendo facilitarse períodos de anoxia.

- **Adicionalmente,** la reducción de las precipitaciones y el incremento de períodos secos se traducirían en un mayor número de días sin lluvia, generando -potencialmente- mayor radiación acumulada y una leve alza de la temperatura del mar. Esto facilitaría el aumento de floraciones algales nocivos (FANs), las cuales causan importante mortalidad en los salmones (León Muñoz *et al.* 2018, Soto *et al.* 2019)- **Riesgo de pérdida de biomasa por FANs.**

### 3.2.3 SENSIBILIDAD

En este trabajo se consideraron factores físicos y biogeográficos que pudiesen maximizar el impacto de las Amenazas evaluadas.



<sup>4</sup> Procesos consultivos con expertos para la evaluación de Riesgo de salmonicultura se describen en Soto *et al.* 2019. Para la evaluación de Riesgo de la mitilicultura, se creó un grupo de trabajo de científicos con reconocida experiencia en este sector y sus Amenazas, quienes son además coautores de este estudio.



Para el caso de las pisciculturas, se decidió incluir un indicador de estado de conservación de las cuencas tributarias. Se definió que una alta cobertura de bosque nativo se asocia a cursos de agua que: i) registran una baja amplitud térmica, ii) mantienen altos y constantes niveles de oxígeno disuelto y iii) presentan bajas concentraciones de sólidos. Bajo esta conceptualización, se estimó un índice por cuenca tributaria, que representa el porcentaje de cobertura de bosque nativo en relación a otros usos antrópicos (agricultura, pastoreo, plantaciones forestales).

Para el caso de la engorda en los sistemas costeros marinos se incluyó:

**a)** El indicador de “edad del agua”, o tasa de recambio del agua de un fiordo o sistema costero. Este supuesto considera que los tiempos de circulación marina, producto de modificaciones en los patrones de interacción entre océano y atmósfera, condicionan la capacidad de carga de las unidades espaciales donde se cultiva. Un cuerpo de agua con mayor “edad” (menor tasa de recambio) tiene menos oxígeno, acumula más nutrientes y podría facilitar el incremento de mareas rojas y de enfermedades. El ingreso de agua dulce desde los ríos es uno de los factores más relevantes para el recambio de masas de agua en los fiordos. Por lo tanto, una reducción en el ingreso de agua dulce tendrá un mayor impacto en un cuerpo de agua con mayor tasa de retención o edad del agua<sup>5</sup>. La preexistencia de mareas rojas también se consideró como un factor de Sensibilidad, puesto que es altamente probable que las esporas de las microalgas que las producen ya están presentes en el ecosistema.

También se incluyó la actual densidad del agua (combinación de salinidad y temperatura) como un indicador de Sensibilidad ante la reducción en los ingresos de agua dulce. Es decir, un ambiente de baja salinidad y alta influencia de ríos es más sensible a la reducción de las precipitaciones, que un ambiente plenamente marino que no cambiará su salinidad en forma significativa, aunque llueva menos.

**b)** De forma conjunta, se estimó un índice que ponderase la biomasa producida en función del área marina-costera destinada al cultivo de salmones y la biomasa acumulada, es decir, la biomasa que se ha producido en los últimos 10 años. Este indicador se basa en el supuesto de que la producción acumulada ha inyectado nutrientes al ecosistema, los cuales pudieran facilitar o gatillar mareas rojas, junto a un reservorio de enfermedades y parásitos (Soto *et al.* 2019, Soto *et al.* 2020<sup>5</sup>). A nivel práctico, esto supuso delimitar el área marina-costera de las ACS, donde se emplazan las concesiones de acuicultura de salmónidos, y caracterizar cada unidad con datos productivos facilitados por SERNAPESCA.

**c)** La dominancia de *Salmo salar* también se consideró como un indicador de Sensibilidad, especialmente frente al potencial incremento de parasitismo y de enfermedades, pues es la especie que presenta mayor susceptibilidad a las infecciones por cáligos y a la enfermedad bacteriana SRS (*Piscirickettsia salmonis*). En cambio, el salmón Coho y la trucha parecen ser más resistentes a cáligos y a SRS (Gallardo *et al.* 2019, Figueroa *et al.* 2019)

**d)** Finalmente, se consideró un indicador de manejo sanitario (uso de antibióticos en los dos últimos años de ciclos productivos) como un componente de la Sensibilidad, dado que los peces que están en mejores condiciones de salud pueden ser más resilientes a parásitos y a otros estresores eternos, incluyendo reducciones de oxígeno. Por otra parte, un análisis de la base de datos que se ha usado para este estudio muestra una relación positiva entre la biomasa total por barrio o ACS y la cantidad total de antibióticos utilizada.

El valor final del indicador de Sensibilidad se calculó promediando los indicadores descritos.

El análisis de Riesgo se hizo para 69 barrios salmoneros o agrupaciones de concesiones salmoneras (ACS), que tenían producción entre 2017 y 2018 en las regiones de Los Lagos, de Aysén y de Magallanes. Luego, se estimó un Riesgo promedio ponderado por comuna, considerando los ACS por

<sup>5</sup> Ver Soto et al 2020 Informe indicadores ecosistémicos para la salmonicultura <https://www.incar.cl/wp-content/uploads/2020/01/INFORME-COMPILADO-FINAL->

cada comuna y teniendo en cuenta que algunos ACS tienen porciones de área en varias comunas.

### 3.3 ESTIMACIÓN DE RIESGO PARA LA MITILICULTURA (CULTIVO DE MEJILLONES)

La evaluación de la mitilicultura consideró dos sistemas de análisis: el primero asociado a la fase de producción de semillas de mejillones (*Mytilus chilensis*), principalmente, en fiordos y canales de Patagonia norte (fiordo Reloncaví, Hualaihué); la segunda, vinculada a las áreas de engorda de esta especie ubicadas, principalmente, en el sector sureste del Seno de Reloncaví y todo el mar interior de la Isla de Chiloé (Figura 4). Como en el caso de la salmonicultura, es necesario indicar que los niveles de Riesgo de ambas fases del proceso productivo están extremadamente ligados. Si algo sale mal con la captación de semilla, se podría acabar con la engorda en el mar, es decir, la producción y exportación de mejillones. Y, si algo sale mal con la engorda en el mar, no habría demanda para la captación y producción de semilla. Como unidad de estudio se definió la utilización de las comunas donde se capturan las semillas y aquellas donde se cosecha la biomasa final para exportación.

En este trabajo se optó por realizar ambos análisis de Riesgo en forma independiente, pero en futuros estudios podría ser relevante agregar o conectar ambas fases de cultivo, utilizando un modelo de mayor complejidad; para ello, sería necesario tener mejor información sobre la procedencia de la semilla para cada comuna.

#### 3.3.1 EXPOSICIÓN

La Exposición se definió como la biomasa de semillas generada por comuna en 2017 y la biomasa cosechada de choritos

para exportación en 2018. La información fue obtenida de las bases de datos de SERNAPESCA. La información sobre captación de semilla es menos confiable que la de producción para exportación; además, si bien la captación y la engorda están relativamente segregadas, los dos procesos coexisten en algunas comunas, por lo cual el análisis coloca énfasis especialmente en aquellas comunas que concentran más del 50% de la biomasa en cada etapa.

#### 3.3.2 AMENAZAS Y CADENAS DE IMPACTO

Como se mencionó anteriormente, la mitilicultura también presentaría Riesgos relevantes ante la disminución de precipitaciones en el futuro (Tabla 1). Para evaluar las cadenas de impacto asociadas a esta Amenaza, se utilizaron prácticamente los mismos indicadores, pronósticos climáticos y procesamiento de la información descritos para la salmonicultura. En particular, fue relevante la inclusión de la variabilidad espaciotemporal de la temperatura superficial del mar (TSM) como elemento de Sensibilidad, especialmente, en relación a la posible circulación y aportes de esporas de microalgas productoras de FAN. Para esto, se consideraron los valores de TSM calculados para pixeles cercanos a los centros en evaluación. Finalmente, para la mitilicultura también se consideró la asignación de puntajes a la probabilidad de ocurrencia de eventos nocivos (FANs) en base a información histórica, especialmente, para la especie que produce las toxinas más peligrosas y que ha afectado históricamente a la mitilicultura (*Alexandrium catenella*). Esto, basado en la información colectada por IFOP<sup>6</sup> y opiniones expertas de los investigadores de este proyecto.

Las cadenas de impacto asociadas a la principal Amenaza (reducción de precipitaciones) se describen a continuación:

- **Producción de semilla:** Se estima que una reducción en las precipitaciones en la zona norte de la Patagonia -especialmente, en el Estuario de Reloncaví y, en menor grado, en el área de Hualaihué- provocará menor ingreso de agua

<sup>6</sup> Instituto de Fomento Pesquero, Área Marea Roja (CREAN).



dulce por aportes directos desde los ríos y, en particular, del Río Puelo (Aguayo *et al.* 2019). Esto provocaría un ambiente de mayor salinidad, que incrementará la presencia de especies que compiten por espacio con los bancos semilleros de mejillones. Por otra parte, los ingresos de agua dulce generan una discontinuidad en la densidad de una masa de agua conocida como pycnoclina, que separa el agua más dulce del agua más salada y profunda. Esta discontinuidad sería relevante para la movilización y acumulación de las larvas, facilitando su captación en los colectores. **Riesgo de reducción relevante en la captación de semilla (biomasa).**

- **Engorda para cosecha:** Se estima que la reducción en las precipitaciones, el incremento del número de días consecutivos sin lluvia y el aumento de años más secos, especialmente en la zona norte de la Patagonia, resultará en un mayor número de días con mayor radiación<sup>7</sup>, lo cual facilitaría el crecimiento del fitoplancton y también los eventos FANs. **Riesgo de pérdida de la producción o no acceso a comercialización por contaminación con toxinas generadas por FANs.**

### 3.3.3 SENSIBILIDAD

**a)** En el caso de la captación y producción de semilla, el principal elemento que hace más susceptible esta etapa de la producción sería la sobreexplotación de los bancos semilleros (o la excesiva captación de semilla). Ello, impediría que un número de semillas relevante contribuya a mantener los bancos naturales (Molinet *et al.*, 2017). Así, cambios climáticos que afecten a los bancos semilleros tendrán mayores impactos si estos ya están debilitados. Si bien no existe suficiente información sobre el estado de los bancos, se utiliza información reciente para construir indicadores tipo proxies. Además, se analizaron datos de una expedición reciente (febrero, 2020) para evaluar el estado de los bancos.

**b)** Se utilizó también un indicador preliminar que describe la concentración de la captación por área, en el supuesto de que

mayor densidad de captación puede reducir la circulación y oxigenación de las cuelgas, y podrían hacer más fácil el desprendimiento de la semilla en caso de incremento de salinidad y reducción de oxígeno. Además, una excesiva densidad de captación incrementa la presión sobre los bancos naturales. Para el caso de la engorda, se consideró:

**a)** La historia de eventos de mareas rojas como un elemento de susceptibilidad, puesto que las esporas de las especies más nocivas estarían presentes.

**b)** Un indicador de estado de manejo de la producción como elemento que incrementaría la susceptibilidad, simplemente, porque se pierde más por unidad de área. Este puede ser también un factor extremadamente relevante en el caso que el cambio climático produzca, efectivamente, una reducción de la productividad del fitoplancton (Froehlich *et al.* 2018).

El indicador final de Sensibilidad se obtiene como promedio de los componentes de la misma. En este caso, todos tienen el mismo peso, sin embargo, se podrían ponderar de forma diferenciada si existe suficiente información para apoyar la decisión.

## 3.4 ELABORACIÓN DE LAS PLANILLAS/MATRICES PARA ESTIMACIÓN DE RIESGO Y METODOLOGÍA DE CÁLCULO

Para elaborar las planillas, se ordenaron las unidades de estudio latitudinalmente y se asoció cada unidad a la producción en biomasa de modo de estimar Exposición, los indicadores que representan la Amenaza y los indicadores que contribuyen a la Sensibilidad.

En todos los casos se construyó una escala de puntaje de 1 a 5 (**Tabla 2.a**) como en una matriz de Riesgo semicuantitativa, donde la Exposición y la Sensibilidad constituyen la

<sup>7</sup> Pudiendo también incrementar la temperatura superficial del mar y generar cambios en la circulación de mares interiores y océano expuesto.



magnitud del impacto. En esta aproximación, la probabilidad de ocurrencia de un evento negativo asociado a la Amenaza se expresa también con puntajes de 1 a 5 (Soto *et al.* 2019).

El valor de Riesgo se calcula como  $R = E \times S \times A$ , donde los tres componentes tienen el mismo peso, aunque se podrían ponderar de manera diferenciada.

Dado que se usaron puntajes de 1 a 5 para cada uno de los componentes del Riesgo, el valor máximo de R se obtendría cuando E, S y A tienen un puntaje de 5; entonces, el resultante ( $5 \times 5 \times 5$ ) sería 125. Luego, se divide por este valor para normalizar entre 0 y 1, resultando un valor de  $R = 1$ , el máximo nivel de Riesgo. La **Tabla 2.b** describe la escala de puntajes y un ejemplo de cálculo de Riesgo.

PUNTAJE	1	2	3	4	5
Nivel de Exposición, o de Amenaza, o de Sensibilidad	Nulo	Mínimo	Mediano o intermedio	Alto	Muy Alto

**Tabla 2a.** Escala semicuantitativa de puntajes<sup>8</sup>

Estimación Exposición		Biomasa anual promedio por ACS 2017 - 2018			EXPOSICIÓN
Valor		33.532,5			
Puntaje		5			5

Estimación Sensibilidad	A. Biomasa Acumulada total 2010 - 2019 (toneladas)	B. Dependencia Ingresos de agua dulce como salinidad en los primeros 10 m de la columna de agua	C. Condición sanitaria Uso de antibióticos 2017 - 2018 (toneladas)	D. Dominancia de S salar (%)	SENSIBILIDAD
Valor	291.298	Sal < 20	9,7	2	
Puntaje	5	5	3	1	$(A+B+C+D)/4 = 3,5$

Estimación Amenaza	A. N o de días/año con temperatura máximas sobre 25 °C	B. N o de días consecutivos con precipitación sobre 1mm	C. Frecuencia de sequías (déficit de precipitación mayor a 75%) entre el clima actual y futuro	D. Cambios en la precipitación media anual (%) (clima actual vs clima futuro)	AMENAZA
Valor	16,493	-8,61	9,808	-9,856	
Puntaje	5	5	5	5	$(A+B+C+D)/4 = 5$

Riesgo =  $5 \times 3,5 \times 5 = 87,5/125 = 0,7$

**Tabla 2b.** Ejemplo estimación de Riesgo en el caso de salmones, fase de engorda. Caso: Barrio 1, Estuario de Reloncaví. Riesgo de perder biomasa de salmones por incremento de parasitismo, asociado a aumento de salinidad.

<sup>8</sup> Los puntajes se determinan en base a la distribución de los valores del factor estudiado, desagregados en quintiles, a partir del valor que se considera conducente a un máximo Riesgo. La plataforma ARCLIM permite revisar la base de datos completa, tanto de valores como de puntajes.



# 4 RESULTADOS

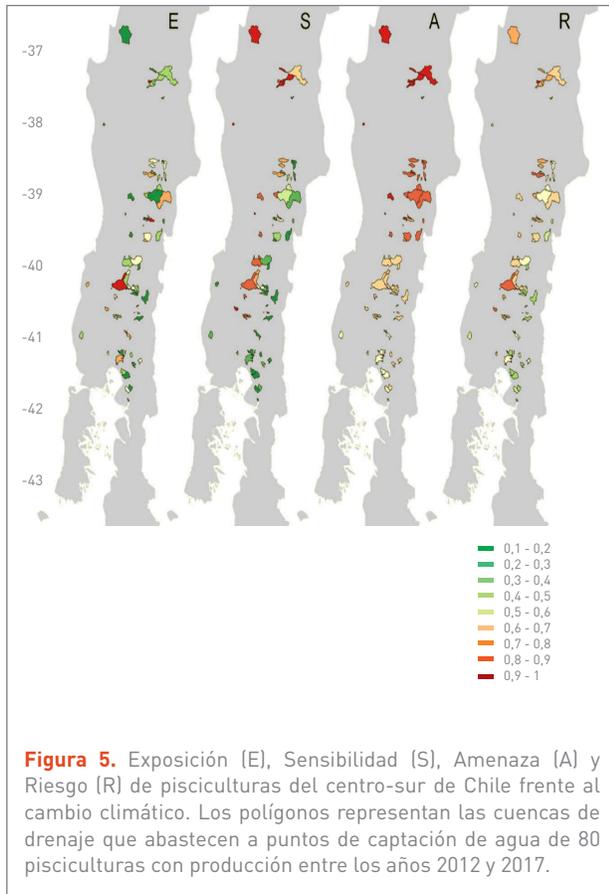
## 4.1 RIESGO ESTIMADO PARA LAS PISCICULTURAS

La estimación de la **Amenaza climática** proyectó fuertes diferencias respecto de las tasas de cambio entre los períodos 1980 - 2010 y 2030 - 2060 (**Figura 5, panel "A"**). Considerando el escenario RCP8.5, existiría una alta probabilidad de disminución en los valores anuales de precipitación. Esta señal es coherente con el descenso en el número de días consecutivos con lluvia (> 1mm) y con el aumento en la frecuencia de años secos.

A nivel de temperatura del aire, se proyecta una alta probabilidad de que aumente el número de días con temperaturas superiores a los 25 °C. En todos los indicadores evaluados, la zona norte del área de estudio sería la más afectadas, con tasas de cambio que, incluso, duplican a las que debiesen acontecer en la zona sur. En base a estos patrones de cambio, la asignación de clases de Amenaza para el futuro intermedio sugiere que ninguna de las

cuenas de estudio estará asociada a un nivel muy bajo de Amenaza, previéndose que gran parte de estas presentará niveles de Riesgo moderado (51%), alto (~29%) y muy alto (12,5%).

A nivel de **Sensibilidad**, al año 2011, la superficie total de bosque nativo estimada para las cuencas de estudio cubría el 45% del área total de drenaje, las zonas agrícolas abarcaban alrededor del 20% y las plantaciones forestales representaban el 5%. (**Figura 5, panel "S"**). Las cuencas con menor grado de cambio de cobertura de suelo se ubican en sectores altos y, principalmente, en la fracción sur del área de estudio. Por el contrario, las cuencas ubicadas en la zona norte y en sectores de menor altitud tendieron a presentar mosaicos de cobertura de suelo más heterogéneos. En base a estos patrones, la asignación de clases de Sensibilidad arrojó que, al año 2011, el 36% de las cuencas evaluadas presentaban muy bajos niveles de Sensibilidad, es decir, la cobertura de bosque nativo era dominante, y las superficies silvoagropecuarias ocupaban un lugar secundario. En el otro extremo, las cuencas vinculadas a clases de Sensibilidad altas y muy altas representaban el 32% del total de unidades evaluadas.



**Figura 5.** Exposición (E), Sensibilidad (S), Amenaza (A) y Riesgo (R) de pisciculturas del centro-sur de Chile frente al cambio climático. Los polígonos representan las cuencas de drenaje que abastecen a puntos de captación de agua de 80 pisciculturas con producción entre los años 2012 y 2017.

Dado los indicadores de Amenaza climática y de Sensibilidad, los resultados para el análisis de **Riesgo** prevén que para el año 2050, de mantenerse una configuración del paisaje similar a la reportada para el año 2011, alrededor del 32% las cuencas analizadas presenten bajos niveles de Riesgo y en sólo 4% sea muy bajo (**Figura 5, panel “R”**). Estos niveles de Riesgo se explican, principalmente, porque en 2050 alrededor del 51% de las cuencas aún mantendrían una alta cobertura de bosque nativo y una baja participación de usos agrícolas y forestales, composición que ayudarían a mitigar los impactos un clima futuro más cálido y seco.

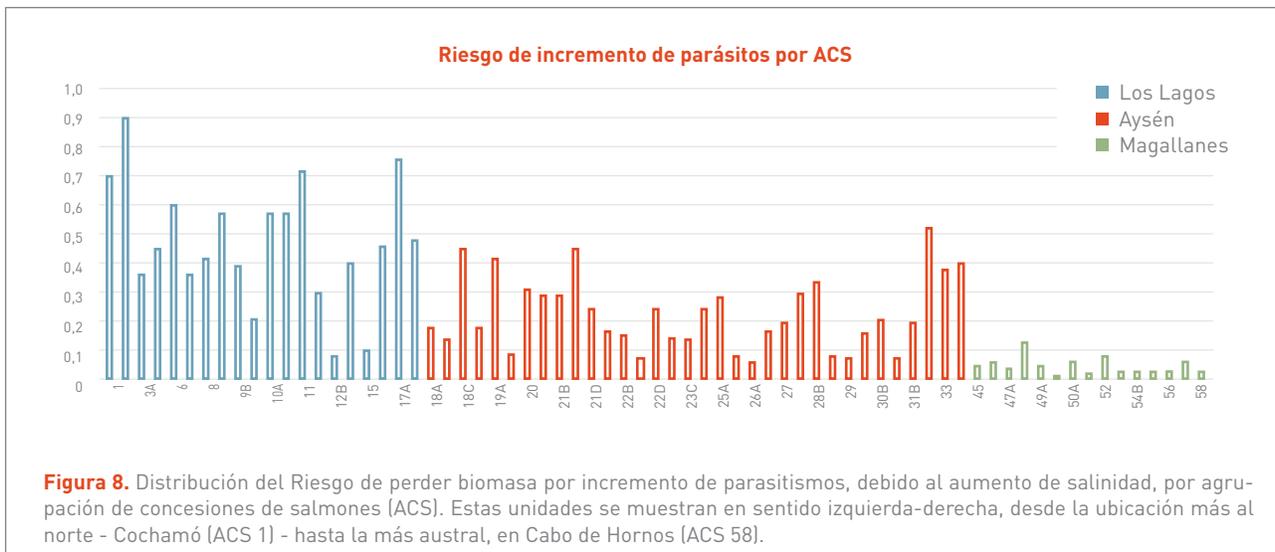
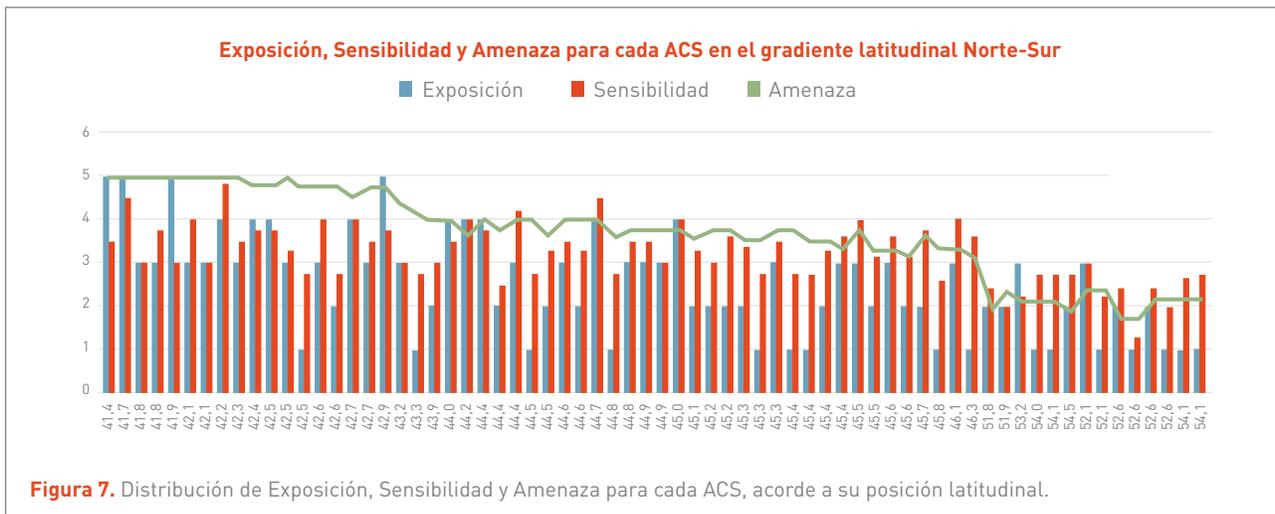
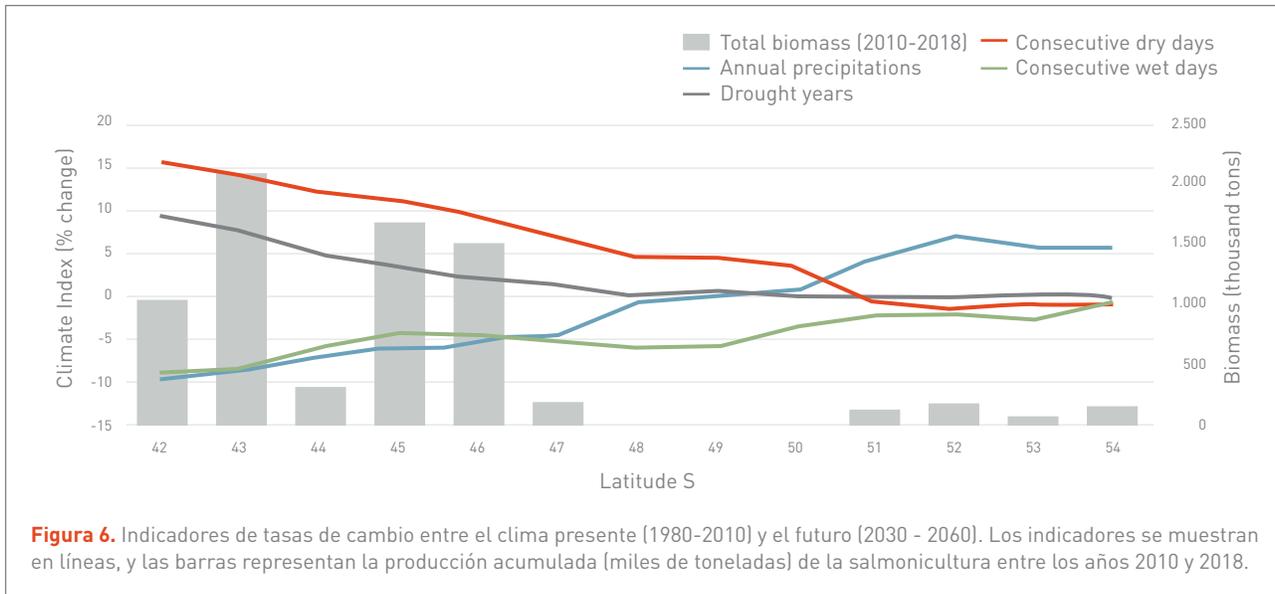
En el otro extremo, más del 33% de las cuencas evaluadas se emplazarían en zonas donde la sinergia entre clima y paisaje (> usos silvoagropecuarios) podrían implicar un Riesgo climático alto o muy alto.

#### 4.1.2 MEDIDAS DE ADAPTACIÓN PARA REDUCIR EL NIVEL DE RIESGO EN LA ETAPA PISCICULTURA

Cuencas mejor conservadas generan una mayor resiliencia en la producción de ovas y de juveniles de salmón. Una disminución en la tasa de transformación del paisaje que se ha registrado en los últimos años permitiría bajar el Riesgo, por reducción de la Sensibilidad (Leon-Muñoz *et al.*, 2017). Por otra parte, la concentración excesiva de la producción en una o pocas pisciculturas por cuenca incrementa el Riesgo y esto se puede modificar.

#### 4.2 RIESGO ESTIMADO PARA LA ENGORDA DE SALMONES EN EL MAR INTERIOR

La **Figura 6** muestra la distribución latitudinal de algunas de las Amenazas consideradas en la etapa engorda de salmones. Resulta evidente que una parte importante de la producción, especialmente en la Región de Los Lagos, podría ser fuertemente afectada por cambios en los patrones y magnitud de la precipitación. Considerando las variables descritas, se infiere un claro gradiente latitudinal (**Figura 7**) en relación al Riesgo de pérdida de biomasa, por incremento de salinidad en los sistemas costeros donde se cultiva. La reducción de la precipitación, especialmente en Patagonia norte (entre Cochamó y Chaitén), generarían un Riesgo mayor para la fase de engorda de salmones, especialmente, en aquellas agrupaciones de concesiones de salmón (ACS) o “barrios” que se encuentran en áreas con una fuerte influencia de agua dulce, como son las ubicadas en las comunas de Cochamó, Puerto Montt y Hualaihué (Aguayo *et al.* 2019). En este escenario, el incremento de salinidad facilitaría la presencia de parásitos, como cáligus (piojo del salmón) y la amebiasis branquial (Soto *et al.* 2019) (**Figura 8**).



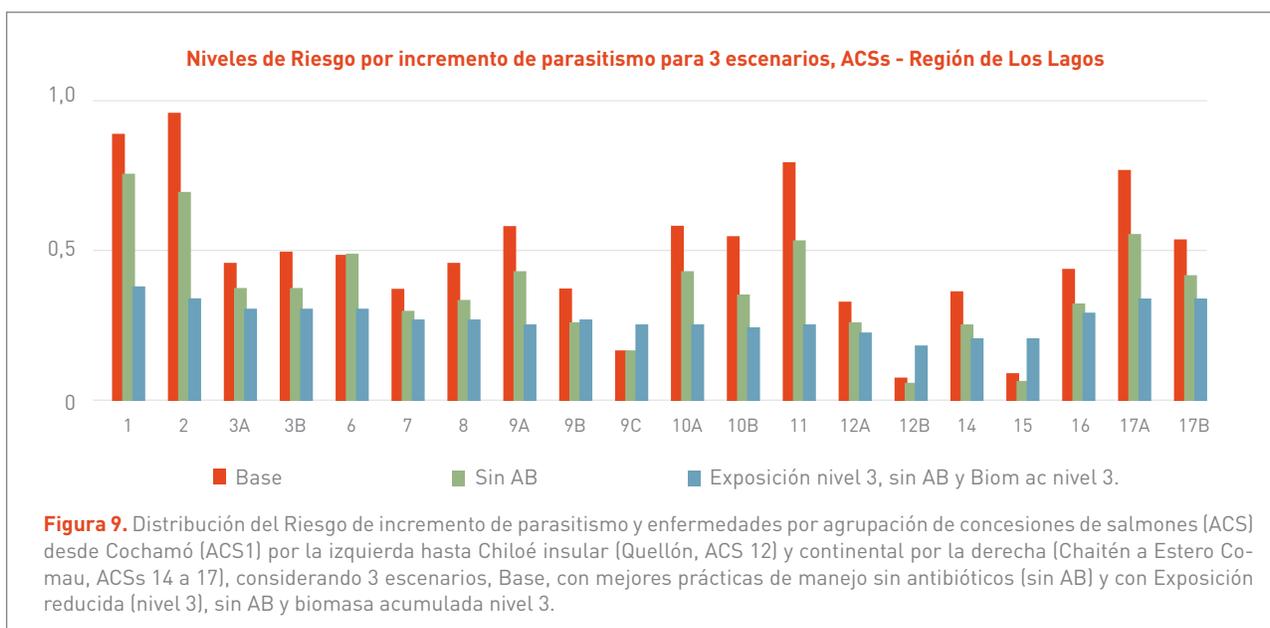


Con el objetivo de evaluar el potencial impacto de algunas medidas de adaptación sobre el nivel de Riesgo, se analizaron diferentes tipos de manejo productivo, modificándose para los componentes de Sensibilidad y de Exposición de ACS en la Región de los Lagos. Por ejemplo, elevar la condición sanitaria de los ACS (menor uso de antibióticos) supuso una reducción relevante del Riesgo (Figura 9, ver ACS10A, 10B y 11). El mejoramiento en la gestión sanitaria, en busca de un mejor estado de bienestar de los peces -ya sea por reducción de densidades, uso de vacunas, entre otras-, pudiese volver más resilientes a los cultivos frente a las afecciones de parásitos.<sup>9</sup>

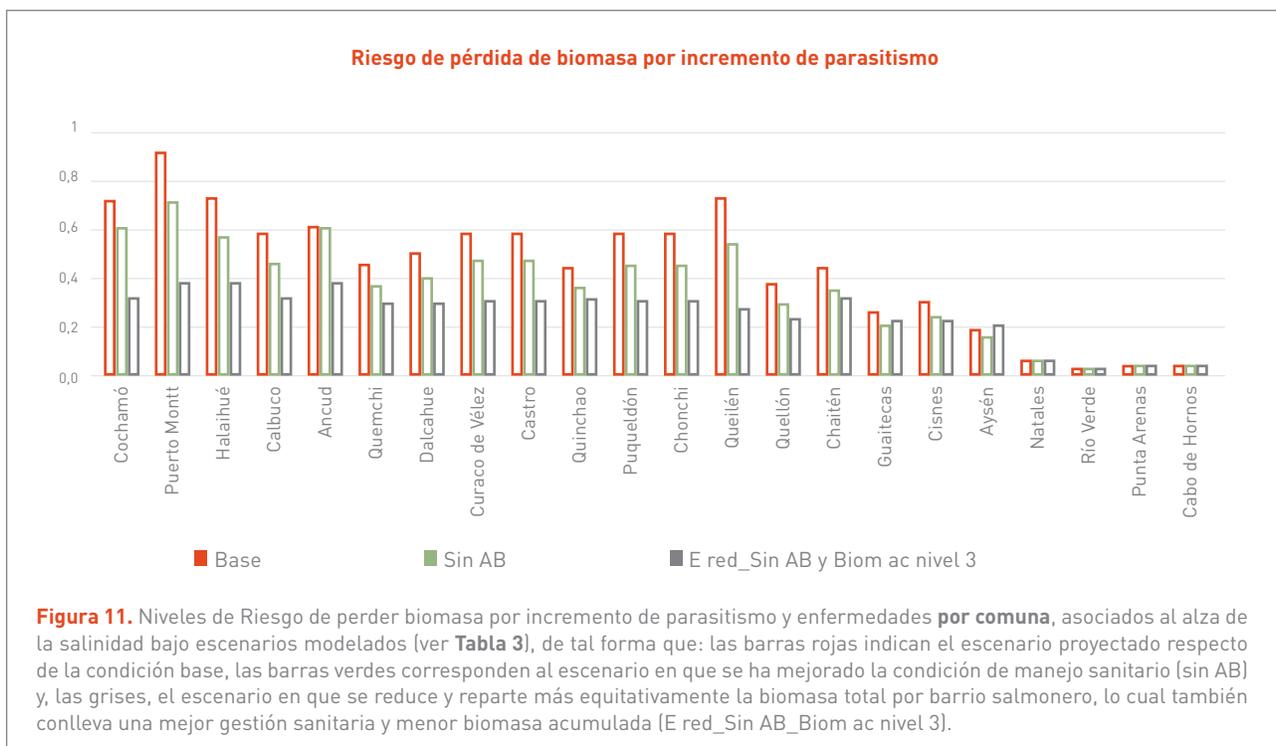
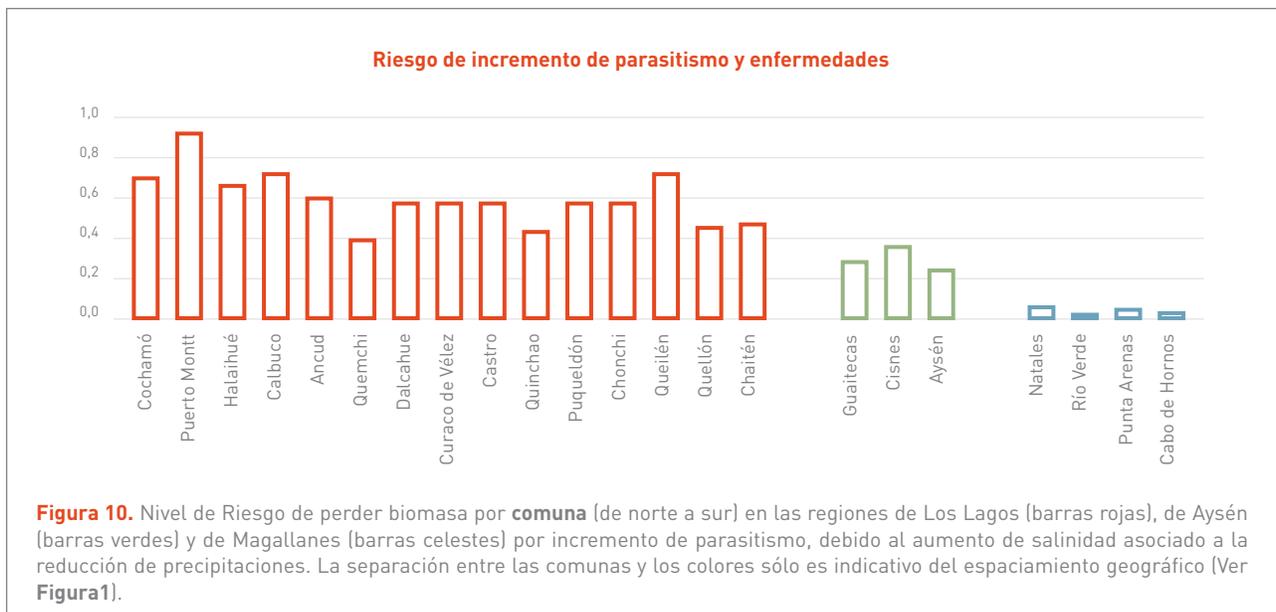
Por otra parte, si la producción acumulada (Sensibilidad) y la producción actual (Exposición) se redujeran a nivel 3 (no más de 14.000 toneladas por ACS) y se repartiesen en forma equitativa en todos los ACS, se conseguiría reducir el Riesgo para todo el sector en forma significativa (Tabla 3, Figura 9). Estos resultados podrían ser relevantes a la hora de hacer recomendaciones específicas de adaptación al cambio climático, particularmente, cuando la información se agrupa a nivel de comunas (Figura 10). Destacan, por ejemplo, altos niveles de Riesgo en Cochamó, Puerto Montt y Queilén. En concreto, la reducción de producción por comuna (barras grises en la Figura 11) bajaría en forma efectiva el Riesgo de los cultivos frente a un incremento de parásitos.

Base	Sin Antibióticos (AB)	Exposición nivel 3 (o E reducida), sin AB y Biom ac nivel 3
Considerando las condiciones actuales de Exposición y Sensibilidad.	Mejorando la gestión sanitaria (componente de Sensibilidad), a través de mejores prácticas de manejo (BMP) de los peces en cultivo, de forma tal que no requieran uso de antibióticos.	Reduciendo o ajustando la biomasa acumulada (Sensibilidad) y la actual (Exposición) de todos los ACS (barrios) a nivel 3 o condición de carga productiva intermedia que no requiere uso de AB.

**Tabla 3.** Escenarios de Riesgo



<sup>9</sup> El uso de AB es solo un "proxi" de la gestión sanitaria en ausencia de buena información de antiparasitarios.



Por otra parte, la reducción de la precipitación daría lugar a una mayor disponibilidad de luz para el fitoplancton y esto podría incrementar la frecuencia e intensidad de FANs, lo cual se ha observado con consecuencias muy

negativas para la salmonicultura, en particular durante El Niño 2015 - 2016 (León-Muñoz *et al.* 2017, Garreaud 2018). Los niveles de Riesgo de incremento FAN, debido a esta Amenaza asociada al cambio climático<sup>10</sup>, tienden a ser

<sup>10</sup> Es importante enfatizar que este es el Riesgo de incremento de frecuencia e intensidad de FAN en las comunas estudiadas, **debido a la Amenaza descrita**. Ello no quiere decir que los eventos FANs sigan existiendo más al sur asociados a otros fenómenos. La tendencia de reducción de precipitaciones no se manifiesta al sur de Aysén y en Magallanes, donde más bien se observa un incremento.



mayores en la Región de Los Lagos y se minimizan hacia el sur (Figura 12). En este caso, si la biomasa se redistribuyera en forma más equitativa entre las ACS, también se reduciría el nivel de Riesgo individual; simplemente, porque los eventos FAN suelen tener efectos en extensiones geográficas acotadas a lo largo de las tres regiones donde se cultiva. Por lo tanto, resulta más segura la práctica de “no tener todos los huevos en el mismo canasto”.

Claramente, los barrios y comunas que tienen mayor concentración y biomasa en cultivo presentan un mayor Riesgo, como es el caso de Queilén para ambas Amenazas (Figuras 10 y 12b). Sin embargo, es importante recalcar que la distribución espacial de la producción debería obedecer a un análisis de Riesgo estratégico que considere los aspectos ambientales y socioeconómicos (Soto *et al.* 2019), incluyendo capacidad de carga de los ecosistemas.

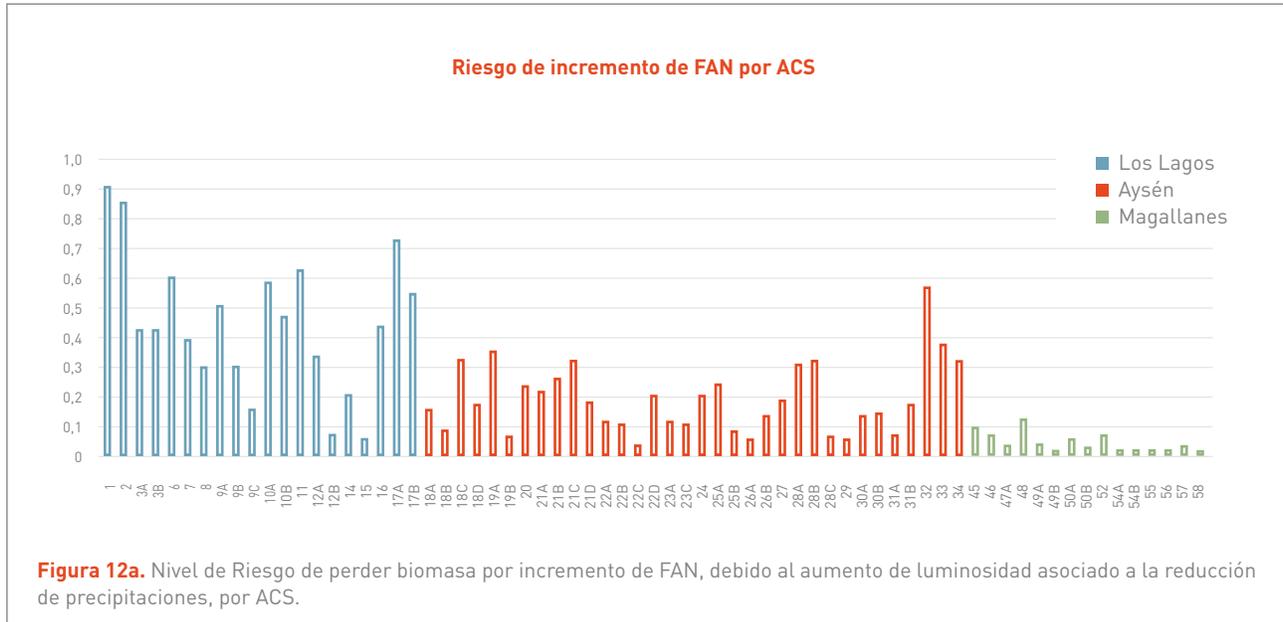


Figura 12a. Nivel de Riesgo de perder biomasa por incremento de FAN, debido al aumento de luminosidad asociado a la reducción de precipitaciones, por ACS.

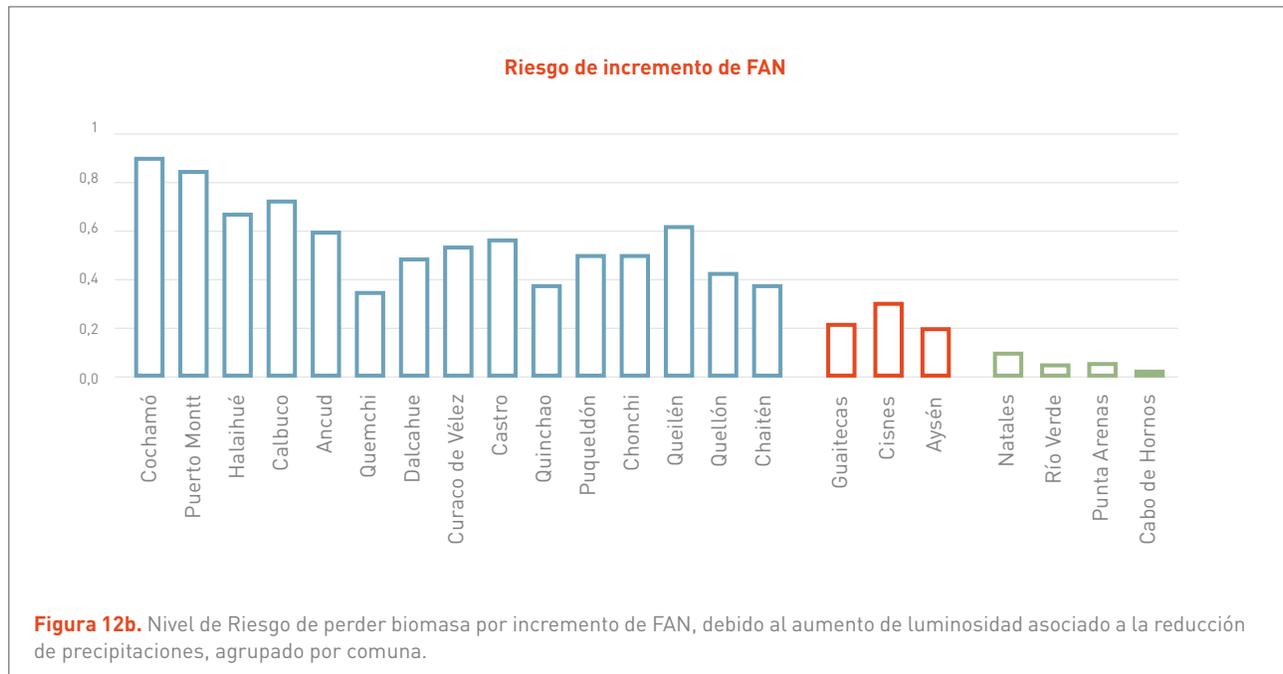


Figura 12b. Nivel de Riesgo de perder biomasa por incremento de FAN, debido al aumento de luminosidad asociado a la reducción de precipitaciones, agrupado por comuna.

## 4.3 RIESGO ESTIMADO PARA LA MITILICULTURA Y ALGUNAS MEDIDAS DE ADAPTACIÓN

### A) Etapa semilla

La **Figura 13** muestra los índices de Riesgo para la captación de semilla y la engorda en la mitilicultura frente a una reducción de precipitaciones en la Patagonia norte (**Tabla 1**). El nivel de Riesgo de perder semilla es muy alto en Cochamó, reflejando la elevada dependencia de agua dulce en el fiordo Reloncaví, donde se produce una gran proporción de la semilla demandada por esta industria. En este caso, es posible reducir el Riesgo mejorando las prácticas de gestión, lo que incluye un manejo más adecuado de los bancos naturales productores de semilla y de captación de estas, aspecto considerado como escenario con mejores prácticas de manejo (MPM) (**Figura 13a**). Cochamó, sin embargo, reúne las variables óptimas para la captación de semilla, incluyendo los aportes relevantes de agua dulce desde los ríos (Molinet *et al.* 2017) que generan condiciones oceanográficas ideales, y que no se encuentran en otras comunas. Dado que es altamente probable que la salinidad se incremente por la reducción del ingreso de agua dulce (Aguayo *et al.*, 2019), la mejor medida de adaptación tendría que involucrar, en el largo plazo, un sistema combinado de captación de semilla silvestre y de producción de larvas en laboratorio. Considerando que este ecosistema es un hatchery natural, también requeriría de un nivel de monitoreo y de gestión muy efectivos, con una visión de largo plazo, que contemple el Riesgo de reducción de precipitaciones debido al cambio climático.

### B) Etapa Engorda para cosecha y comercialización

En el caso de la etapa de engorda de mejillones, como se ha indicado, la principal Amenaza sería el incremento de eventos FAN (**Figura 13b**), con mayores niveles de Riesgo para comunas como Calbuco, Castro y Quellón. En este caso, aún no se han identificado medidas de gestión más eficientes,

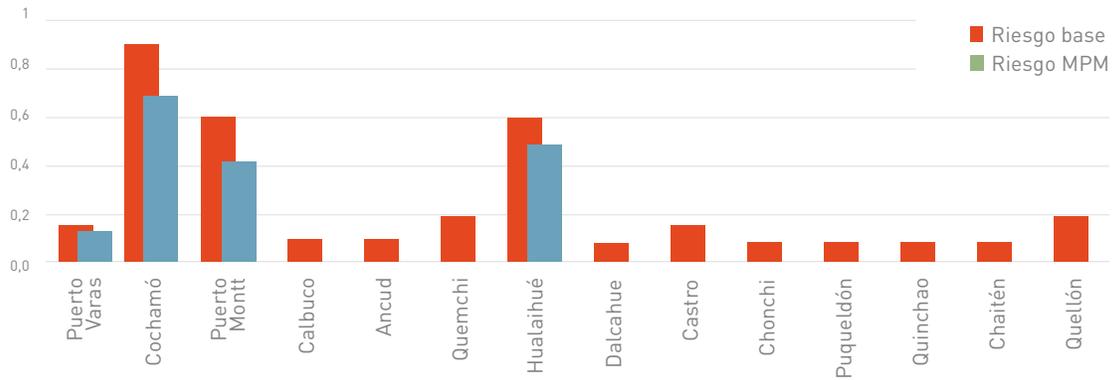


por lo que sigue siendo la opción más efectiva distribuir la producción en forma más equitativa entre las comunas, de modo de que se reparta mejor el Riesgo (**Figura 13b**). Tanto para la salmónica como para la mitilicultura ya existen algunos mecanismos de adaptación que se han ido mejorando, incluyendo sistemas de monitoreo permanente del fitoplancton y de potenciales eventos FAN, que involucran una suerte de alianza público-privada<sup>11</sup>. Existe también una iniciativa promovida por diversas instituciones de investigación a nivel nacional para habilitar un sistema integrado de observación del océano, participativo y preventivo, que permita mejorar la alerta temprana y conocer mejor los mecanismos gatillantes de FANs (SIOOC, Farias *et al.*, 2019).

<sup>11</sup> <http://www.sernapesca.cl/programas/programa-de-salud-de-moluscos-bivalvos-psmb> <https://www.ifop.cl/marearoja/>

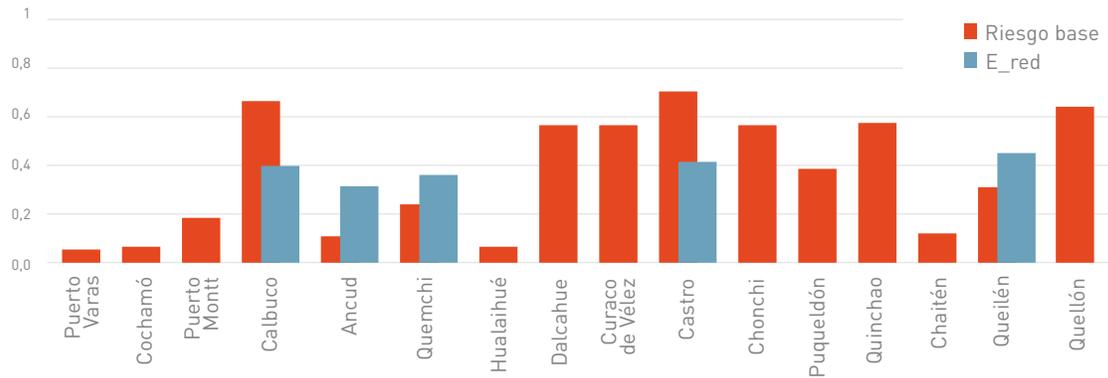


**A: Riesgo en captación de semilla de mejillones**



**Figura 13a.** Nivel de Riesgo de perder biomasa de semilla (barras rojas), debido a incremento de salinidad por reducción de precipitaciones. Las barras azul claro representan un escenario donde se han mejorado las prácticas de manejo (MPM), tanto de los bancos naturales como de la captación misma.

**B: Riesgo en engorda de mejillones**



**Figura 13b.** Nivel de Riesgo de perder biomasa para cosecha y comercialización por eventos FAN (barras rojas). Las barras azul claro representan una condición donde se ha redistribuido la producción de las dos comunas con más alto Riesgo y se muestran como Exposición reducida (E\_red).



684





# 5

## REFERENCIAS

Aguayo, R., León-Muñoz, J., Vargas-Baechelee, Montecinos, Garreaud, R., Urbina, M., Soto, D. & Iriarte, J.L. (2019). *The glass half-empty: climate change drives lower freshwater input in the coastal system of the Chilean Northern Patagonia* in *Climatic Change*. Climate Change <https://rdcu.be/bLE4H>.

Farías, L., C. Fernández, R., Garreaud, L., Guzmán, S., Hormazábal, C., Morales, D., Narváez, S., Pantoja, I., Pérez, D., Soto y P. Winckler. (2019). *Propuesta de un Sistema Integrado de Observación del Océano Chileno (SIOOC)*. Santiago, Comité Científico COP25; Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación. <http://www.cr2.cl/propuesta-de-un-sistema-integrado-de-observacion-del-oceano-chileno/>

FAO. 2020. *The State of World Fisheries and Aquaculture 2020*. Sustainability in action. Rome. <https://doi.org/10.4060/ca9229en>

Figueroa, J., Cárcamo, J., Yáñez, A., Olavarría, V., Ruiz, P., Manríquez, R., Muñoz, C., Romero, A., Avendaño, R. (2019). *Addressing viral and bacterial threats to salmon farming in Chile: historical contexts and perspectives for management and control*. Reviews in Aquaculture 11:299-324

Froehlich, H., Gentry, R. and Halpern, B. (2018). *Global change in marine aquaculture production potential under climate change*. Nature Ecology & Evolution. 2. 10.1038/s41559-018-0669-1.

Gallardo-Escarate, C., Arriagada, G., Carrera, C., Goncalves, AT., Nunez-Acuña, G., Valenzuela-Miranda, D. and Valenzuela-Muñoz, V. (2019). *The race between host and sea lice in the Chilean salmon farming: a genomic approach*. Reviews in Aquaculture 11, 325-339

González, E., Norambuena, R., Molina R. y Thomas F. (2013). *Evaluación de potenciales impactos y reducción de la vulnerabilidad de la acuicultura al cambio climático en Chile*. En: Cambio climático, pesca y acuicultura en América Latina (LA): Potenciales impactos y desafíos para la adaptación. Taller FAO/Centro de Investigación Oceanográfica en el Pacífico Sur Oriental (COPAS), Universidad de Concepción, Concepción, Chile. FAO, Actas de Pesca y Acuicultura. No. 29. Roma, FAO. 2013. 335 pp.

Gonzalez-Poblete, E., Hurtado, C.F., Rojo, C. and Norambuena, R. (2018). *Blue mussel aquaculture in Chile: Small or large scale industry?* Aquaculture 493 (2018) 113-122.



Lagos, N.A., Benítez, S., Duarte, C., Lardies, M.A. and others. (2016). *Effects of temperature and ocean acidification on shell characteristics of *Argopecten purpuratus*: implications for scallop aquaculture in an upwelling-influenced area*. *Aquacult Environ Interact* 8:357-370. <https://doi.org/10.3354/aei00183>

León-Muñoz, J., Urbina, M., Iriarte, J., Garreaud, R. (2018) *Hydro-climatic conditions trigger record harmful algal bloom in western Patagonia (summer 2016)*. *Scientific Reports* 8 (1330).

MMA 2015. *Tercera comunicación NDC Chile*. <https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2017/12/TCN-2016b1.pdf>

Molinet, C., Díaz, M., Marín, S.L., Astorga, M. P., Ojeda, M., Asencio, E. (2017). *Relation of mussel spatfall on natural and artificial substrates: Analysis of ecological implications ensuring long-term success and sustainability for mussel farming*. *Aquaculture*. 467, 211-218.

Navarro, J. M., Duarte, C., Manríquez, P. H., Lardies, M. A., Torres, R., Acuña, K., Vargas, C. A. and Lagos, N. A. (2015). *Ocean warming and elevated carbon dioxide: multiple stressor impacts on juvenile mussels from southern Chile*. *ICES, Journal of Marine Science*, 73: 764–771.

Soto, D., Leon-Muñoz, J., Dresdner, J., Luengo, C., Tapia, F. & Garreaud, R. (2019). *Salmon farming vulnerability to climate change in southern Chile: understanding the biophysical - socioeconomic and governance links*. *Reviews in Aquaculture* 11(2): 354-374 [doi: 10.1111/raq.12336 <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/raq.12336>].

Vargas, C. A., Contreras, P. Y., Pérez, C. A., Sobarzo, M., Saldañas, G. S. and Salisbury, J. (2016). *Influences of riverine and upwelling waters on the coastal carbonate system off Central Chile and their ocean acidification implications*. *J. Geophys. Res. Biogeosci.*, 121, [doi:10.1002/2015JG003213].

Vargas, C. A., Lagos, N.A., Lardies, M., Duarte, C., Manríquez, P.H. and others. (2017). *Species-specific responses to ocean acidification should account for local adaptation and adaptive plasticity*. *Nature Ecology & Evolution* 1, 0084 (2017) [DOI: 10.1038/s41559-017-0084], [www.nature.com/natecolevol](http://www.nature.com/natecolevol)

