



Universidad de Concepción
Facultad de Ciencias Ambientales
Ingeniería Ambiental

**Evaluación de variables ambientales críticas para la mitilicultura
en el sur de Chile, a través del monitoreo ambiental como
medida de adaptación al cambio climático**

Habilitación presentada para optar al título de
Ingeniera Ambiental

Piera Carolina Carrasco Fuentes

Profesor Guía:

Dr. Cristian Vargas Gálvez

Profesora Co-Guía:

Dra. Nicole Castillo Villagrán

CONCEPCIÓN (Chile), 2026



Facultad de Ciencias Ambientales
Universidad de Concepción



Universidad de Concepción



Evaluación de variables ambientales críticas para la mitilicultura en el sur de Chile, a través del monitoreo ambiental como medida de adaptación al cambio climático

Habilitación presentada para optar al título de

Ingeniera Ambiental

Alumna: Piera Carolina Carrasco Fuentes

Profesor Guía: Dr. Cristian Vargas Gálvez

Profesora Co-Guía: Dra. Nicole Castillo Villagrán

Profesora Comisión: Dra. Marcela Salgado Vargas

CONCEPCIÓN (Chile), 2026



Facultad de Ciencias Ambientales
Universidad de Concepción



Universidad de Concepción



**“EVALUACIÓN DE VARIABLES AMBIENTALES CRÍTICAS PARA LA
MITILICULTURA EN EL SUR DE CHILE, A TRAVÉS DEL MONITOREO AMBIENTAL
COMO MEDIDA DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO.”**

Profesor Guía: Dr. Cristian Vargas Gálvez

Profesor Guía: Dra. Nicole Castillo Villagrán

Profesor Comisión: Dra. Marcela Salgado

CONCEPTO: APROBADO CON DISTINCIÓN MAXIMA

Conceptos que se indica en el Título

- ✓ Aprobado por Unanimidad : (En Escala de 4,0 a 4,9)
- ✓ Aprobado con Distinción (En Escala de 5,0 a 5,6)
- ✓ Aprobado con Distinción Máxima (En Escala de 5,7 a 7,0)

Concepción, abril 2026

Índice

Índice de tablas	6
Índice de figuras	7
Agradecimientos.....	9
Resumen	10
I. Introducción.....	11
1. Pregunta de investigación	13
2. Objetivo general	13
3. Objetivos específicos	13
II. Antecedentes	14
1. Acuicultura de moluscos en Chile: La mitilicultura y su relevancia para la producción acuícola	14
1.1. Caracterización de la actividad acuicultora	14
1.2. Importancia socio-ecológica de la actividad mitilicultora.....	16
1.3. Etapas del ciclo productivo de la mitilicultura	17
2. Variables ambientales importantes para la actividad mitilicultora.....	19
3. Cambio climático en Chile	20
4. Vulnerabilidad de la mitilicultura frente al cambio climático y la variabilidad ambiental	21
5. Adaptación al cambio climático del sector mitilicultor: Principales herramientas	23
5.1. Herramientas para la adaptación	23
5.2. Monitoreo de variables ambientales y alertas tempranas.....	25
III. Metodología	26
1. Área de estudio	26
2. Biología de la especie (<i>Mytilus chilensis</i>)	29
3. Metodología para cada objetivo.....	30

3.1. Identificar y jerarquizar las variables ambientales más relevantes para el cultivo de <i>Mytilus chilensis</i> en Acuicultura de Pequeña Escala (APE).....	30
3.2. Evaluar la variabilidad de los parámetros ambientales críticos que influyen en el cultivo de <i>Mytilus chilensis</i> en el sur de Chile.	33
3.3. Relacionar la variabilidad oceanográfica local y los umbrales fisiológicos para un crecimiento óptimo, como herramienta de apoyo a la gestión productiva de la industria mitilicultora y como una medida de adaptación al cambio climático.....	36
IV. Resultados y discusión.....	39
1. Identificar y jerarquizar las variables ambientales para el cultivo de <i>Mytilus chilensis</i> en Acuicultura de Pequeña Escala (APE).	39
2. Evaluar la variabilidad de los parámetros ambientales críticos que influyen en el cultivo de <i>Mytilus chilensis</i> en el sur de Chile.....	46
2.1. Variabilidad temporal	46
2.2. Análisis estadístico multivariado.....	49
2.3. Acoplamiento de variables y procesos	51
3. Relacionar la variabilidad oceanográfica local y los umbrales fisiológicos para un crecimiento óptimo, como herramienta de apoyo a la gestión productiva de la industria mitilicultora y como una medida de adaptación al cambio climático.	55
3.1. Determinación de umbrales fisiológicos	55
3.2. Variabilidad oceanográfica local.....	57
3.2. Riesgo por etapas de cultivo.....	62
3.4. Propuesta de manejo.....	66
V. Conclusiones.....	72
VI. Referencias bibliográficas.....	74
IX. Anexos	96
1. Anexo 1.....	96
2. Anexo 2.....	98
3. Anexo 3.....	98
4. Anexo 4.....	99

5. Anexo 5.....	100
-----------------	-----

Índice de tablas

Tabla 1. Amenazas ambientales y medidas de adaptación para el cultivo de <i>Mytilus chilensis</i> ...	25
Tabla 2. Ubicación geográfica y periodos de registro del monitoreo oceanográfico utilizados para este estudio	35
Tabla 3. Categorización utilizada para la evaluación de la probabilidad del riesgo	37
Tabla 4. Síntesis de los principales efectos fisiológicos y morfológicos de los parámetros ambientales en <i>Mytilus chilensis</i>	45
Tabla 5. Medidas de tendencia central (valores mínimos, máximos y medias) para las variables oceanográficas críticas por cada sitio de estudio	46
Tabla 6. Coeficientes de variación (CV) por parámetro ambiental para cada una de las estaciones monitoreadas	48
Tabla 7. Resultados del análisis multivariado <i>PERMANOVA</i> y pruebas <i>post-hoc</i> para las variables ambientales entre los tres sistemas estudiados	49
Tabla 8. Umbrales fisiológicos óptimos y de riesgo para <i>Mytilus chilensis</i> establecidos mediante revisión bibliográfica y panel de expertos	55
Tabla 9. Rangos de idoneidad ambiental y de riesgo de inhibición para <i>Mytilus chilensis</i> integrando revisión bibliográfica y consenso de expertos	56
Tabla 10. Porcentajes de exposición a riesgo ambiental considerando proyecciones futuras según variable para cada sitio de estudio	59
Tabla 11. Frecuencia y contabilización de eventos de riesgo ambiental categorizados según etapas del ciclo productivo de <i>Mytilus Chilensis</i>	64

Índice de figuras

Figura 1. Distribución espacial y cuantificación de los centros de cultivo de moluscos por región registrados en el Registro Nacional de Acuicultura al año 2024	15
Figura 2. Producción mundial de la pesca de captura y la acuicultura, 1990-2030	16
Figura 3. Principales efectos del cambio climático en la mitilicultura	22
Figura 4. Distribución espacial de las concesiones de acuicultura de moluscos y salmones en Chile	26
Figura 5. Mapa de distribución espacial y densidad de las concesiones de acuicultura en las áreas de cultivo de las estaciones de monitoreo (Boya ACS1, ACS10A, SECOS), en la Región de Los Lagos	27
Figura 6. Esquema metodológico PRISMA de las etapas secuenciales de búsqueda, depuración e inclusión de la literatura científica utilizada para determinar y jerarquizar las variables ambientales más relevantes para el cultivo de la especie	31
Figura 7. Ubicación geográfica de las estaciones de monitoreo (Boya ACS1, ACS10A y SECOS) en la región de Los Lagos	34
Figura 8. Diagramas de caja de valores Log Response Ratio ($LnRR$) para temperatura, clorofila, pH y salinidad	40
Figura 9. Series de tiempo y distribución de los parámetros ambientales críticos registrados en las estaciones ACS1, ACS10A y SECOS	47
Figura 10. Ordenación mediante Análisis de Componentes Principales (PCA) de las variables ambientales en las 3 estaciones monitoreadas	50
Figura 11. Gráficos de dispersión y correlación entre las principales variables oceanográficas para las estaciones ACS1, ACS10A y SECOS	52
Figura 12. Representación visual de los rangos de tolerancia fisiológica y de riesgo de inhibición	

para <i>Mytilus chilensis</i>	57
Figura 13. Series de tiempo oceanográficas divididas por condición óptima y de riesgo fisiológico para las estaciones ACS1, ACS10A y SECOS	58
Figura 14. Mapas de distribución espacial y densidad de las concesiones de acuicultura en los sectores de las estaciones de ASC10A y SECOS	61
Figura 15. Actores públicos claves vinculantes al sector mitilicultor	67
Figura 16. Prototipo de plataforma “Semáforo Ambiental” para el monitoreo de variables oceanográficas	69
Figura 17. Prototipo de aplicación móvil para la visualización de datos oceanográficos en centros de cultivo de <i>Mytilus chilensis</i>	70

Agradecimientos

A mis profesores guía y co-guías, Dr. Cristian Vargas, Dra. Nicole Castillo y Dra. Marcela Salgado por su dedicación, vocación y compromiso por su labor que me inspira. Su disposición para orientarme y la cercanía resultaron muy importantes para mi seguridad académica.

A mi madre, Silvia Fuentes, que desde muy lejos siempre me brinda contención, amor, confianza y comprensión en cada etapa de mi crecimiento personal y académico. A mi padre, Alfredo Carrasco, por siempre estar pendiente de mí en cada paso de este camino y depositar su confianza en mis capacidades.

A mi familia y amigos por su interés genuino en querer formar parte de este proceso y acompañarme, brindándome palabras de apoyo en más de una ocasión o compartir conmigo largas jornadas de estudio.

Y a cada una de las personas que de alguna u otra forma contribuyeron en mi desarrollo académico y como persona, que en diferentes etapas y de distintas maneras dejaron una huella en mí.

Resumen

El cambio climático y la variabilidad ambiental representan desafíos críticos para el cultivo de choritos (*Mytilus chilensis*) en el sur de Chile, los cuales pueden implicar un riesgo para el desarrollo de esta industria. En este estudio, se evalúa la influencia relativa de diferentes parámetros ambientales sobre el cultivo de mitílicos (*Mytilus chilensis*) o “mitilicultura” en la Región de Los Lagos, mediante un meta-análisis bibliográfico que jerarquiza las variables críticas, determina efectos y permite definir umbrales donde se maximicen los rasgos fisiológicos de la especie objetivo, evidenciando que las disminuciones de salinidad y pH se asocian a efectos fisiológicos negativos, mientras que la temperatura y la clorofila actúan como promotores. Los resultados del análisis oceanográfico de los sitios evidenciaron una marcada diferenciación espacial, donde el fiordo Reloncaví, principal zona de captación de semillas, presenta alta productividad pero enfrenta un alto riesgo por eventos de bajas salinidades. En contraste, los sitios de Chiloé y El Manzano muestran mayor estabilidad osmótica, pero sufren una crítica limitación de alimento (clorofila) para el crecimiento de esta especie, sugiriendo que existe una sobrecarga en la capacidad de cultivo en ambos ecosistemas. Al incorporar estos datos con umbrales fisiológicos óptimos y de riesgo, se identificaron los periodos y etapas de mayor vulnerabilidad para la actividad productiva. Como estrategia de adaptación, el estudio propone la integración de los umbrales fisiológicos establecidos en este estudio con la plataforma web en curso "Semáforo Ambiental" establecida por el Instituto Milenio SECOS, indicando cuando la zona de cultivo se encuentre en riesgo o en condición óptima, y que pueda estar dirigida hacia los pescadores artesanales de forma que pudieran evaluar como la ocurrencia de eventos extremos (e.g. precipitaciones o caudales de ríos extremos, olas de calor, etc.) pudiera afectar su producción, y de esta forma poder tomar decisiones preventivas e informadas (e.g. colecta de semillas, retiro de colectores, planificar la cosecha, etc.). En conclusión, una gestión localizada y basada en monitoreos de variables ambientales es fundamental para asegurar la sostenibilidad productiva del sector, especialmente bajo escenarios de incertidumbre ambiental frente a un potencial incremento en la ocurrencia de eventos extremos producto del cambio climático.

I. Introducción

La capacidad que tienen los organismos marinos para enfrentar la presión del cambio climático resulta un gran desafío, debido a que el aumento del CO₂ en atmósfera está produciendo (y en aumento) cambios significativos tanto en los patrones de variabilidad climática como en las tendencias (IPCC, 2014). Esto toma mayor relevancia para la industria del cultivo de especies marinas, en donde, a diferencia de los sistemas de producción de alimentos terrestres, la acuicultura se encuentra limitada por factores ambientales (e.g. temperatura del agua de mar, velocidad de la corriente y disponibilidad de alimentos), y además, los centros de cultivo no se ubican a mar abierto, sino que en zonas costeras donde las condiciones ambientales son extremadamente variables en casi todas las escalas y patrones (Wolfe et al., 2020).

El cultivo de moluscos se ha convertido en la segunda fuente más grande de proteínas de los cultivos marinos, incluso superando el cultivo de peces (FAO, 2022; Froehlich et al., 2018). Este sector es de gran importancia en Chile, debido a que el desarrollo de la acuicultura de mariscos ha crecido de tal forma que posiciona al país como el segundo mayor productor a nivel mundial del mejillón chileno o “chorito” (*Mytilus chilensis*), después de China (Baquedano et al., 2025). Según Figueroa (2015), el rápido crecimiento del cultivo de esta especie en Chile es debido al estancamiento productivo de otros países mitilicultores (como España, Francia y Nueva Zelanda), impulsando un alto desarrollo a nivel nacional cuya producción se concentra principalmente en la Región de Los Lagos.

Sin embargo, existen múltiples factores ambientales que limitan el crecimiento de esta especie; por ejemplo, la temperatura del agua de mar, que por su influencia genera numerosos efectos en distintos rasgos del ciclo de vida y en particular, la tasa de crecimiento y la reproducción (Arrieche et al., 2020; Ericson et al., 2023; Fong et al., 2024; Tan et al., 2021), al igual que la salinidad, que determina la distribución espacial de las poblaciones de mitílidos (Torres et al., 2025).

El conocimiento respecto al nivel de exposición ambiental actual que enfrentan las poblaciones marinas es muy necesario, pero a menudo limitado (Doney et al., 2012; Harley et al., 2006), generando una alta brecha en la caracterización de los hábitats e identificación de los procesos que modulan los sistemas, que toma mayor relevancia en sistemas abiertos como son los de cultivo, exponiéndose a diversos riesgos debido a los múltiples factores de estrés antropogénicos (Oyinlola et al., 2018; Trégarot et al., 2024).

En este estudio se evalúa el impacto de la variabilidad ambiental en zonas de cultivo de *Mytilus chilensis* en la Región de Los Lagos. Para ello, inicialmente se jerarquizan las variables ambientales más críticas para la especie (temperatura, salinidad, pH y clorofila). Posteriormente, se caracterizan los sitios de cultivo mediante análisis de variabilidad de estos parámetros, para finalmente, vincular esta información oceanográfica con umbrales fisiológicos de crecimiento óptimo, obtenidos a través de literatura científica. Todo este análisis permite identificar y cuantificar los periodos de riesgo, con el propósito de generar una herramienta de apoyo a la gestión productiva artesanal que fortalezca la adaptación de los mitilicultores frente al cambio climático.

1. Pregunta de investigación

En este contexto, surgen las preguntas centrales de esta investigación: ¿Qué relaciones existen entre las distintas variables ambientales y las respuestas biológicas de *Mytilus chilensis* en los centros de cultivo del sur de Chile? Y ¿Cómo el conocimiento de la variabilidad ambiental en los sitios de cultivo a través de una herramienta aplicada, puede proveer información ambiental de utilidad para la industria con el fin de planificar su actividad productiva, explicar fenómenos climáticos y generar adaptación al cambio climático?

2. Objetivo general

- Evaluar el impacto de la variación de los parámetros ambientales en la respuesta fisiológica de *Mytilus chilensis* en centros de cultivo del sur de Chile, y utilizar dicho conocimiento para la generación de herramientas de adaptación al cambio climático.

3. Objetivos específicos

- Identificar y jerarquizar las variables ambientales más relevantes para el cultivo de *Mytilus chilensis* en Acuicultura de Pequeña Escala (APE).
- Evaluar la variabilidad de los parámetros ambientales críticos que influyen en el cultivo de *Mytilus chilensis* en el sur de Chile.
- Relacionar la variabilidad oceanográfica local y los umbrales fisiológicos para un crecimiento óptimo, como herramienta de apoyo a la gestión productiva de la industria mitilicultora y como una medida de adaptación al cambio climático.

II. Antecedentes

1. Acuicultura de moluscos en Chile: La mitilicultura y su relevancia para la producción acuícola

1.1. Caracterización de la actividad acuicultora

Desde el punto de la industria acuícola, Chile cuenta con el privilegio de contar con una superficie marítima de 200 millas, caracterizada por una alta productividad otorgándole beneficios como productor de diversos recursos, concentrándose en cultivos marinos costeros de salmónidos y mitílidos principalmente en la Región de Los Lagos (Barrero, 2020). A lo largo del país se producen diversas especies de peces (destacando salmón y trucha) y moluscos, donde destacan los mitílidos, mejillón o “chorito” (“chorito común”, *Mytilus chilensis*), el ostión del Norte (*Argopecten purpuratus*), la ostra chilena (*Ostrea chilensis*), la cholga (*Aulacomya ater*), así como la especie de alga pelillo (*Gracilaria chilensis*) (CONICYT, 2007).

La producción acuícola se ha convertido en uno de los pilares fundamentales de la economía de Chile, generando más de 80.000 empleos directos e indirectos considerando las actividades productivas, de proceso, de servicios a la producción y de comercialización (UNTEC – U. de Chile y CORFO, 2016), que quedan a cargo de titulares de concesiones como personas naturales, sociedades anónimas, organizaciones, entre otros. Dentro de los principales sectores se encuentra la Acuicultura de Pequeña Escala (APE), que se encarga del cultivo de recursos hidrobiológicos realizada por micro y pequeñas empresas, según el Estatuto de Empresas de Menor Tamaño, del Ministerio de Economía, Fomento y Turismo donde, en esta escala, se encuentra el mayor número de titulares de centros de cultivo correspondiente a personas naturales (González et al.,2021).

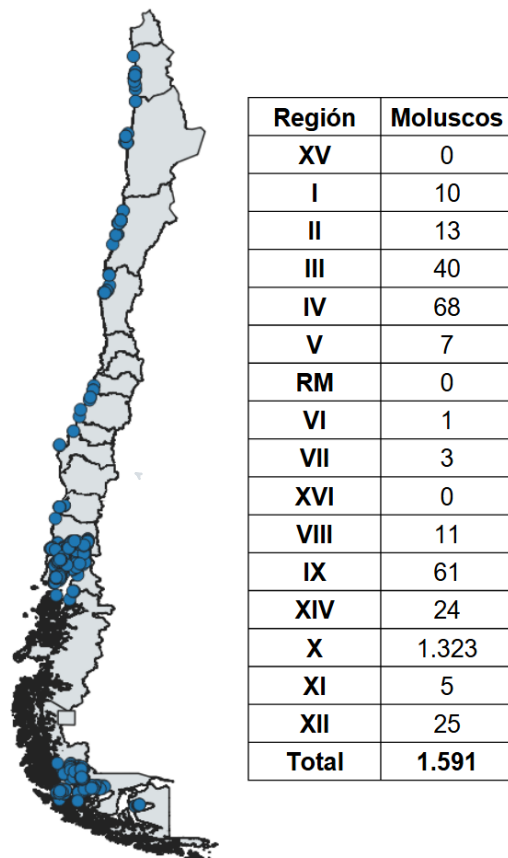


Figura 1. *Distribución espacial y cuantificación de los centros de cultivo de moluscos por región registrados en el Registro Nacional de Acuicultura al año 2024.*

Nota. Realizado con apoyo de software QGIS con información de SERNAPESCA, 2024; GEOPORTAL IDE-SUBPESCA.

Del total de centros de cultivo (4.709 centros al año 2024) cerca del 34% pertenece a cultivo de moluscos, registrando 1.591 centros, según los datos del Anuario Estadístico de Pesca y Acuicultura 2024 del SERNAPESCA, lo que ha implicado que (en particular mitílidos) la mitilicultura se convierta en la segunda actividad acuícola en importancia (Universidad Austral de Chile, 2016), reflejándose en una producción de 403,3 mil toneladas durante el 2024, donde el 100% de la cosecha fue realizada en la Región de Los Lagos y representó el 28,4% del total nacional de cosechas (SUBPESCA, 2025).

1.2. Importancia socio-ecológica de la actividad mitilicultora

Una de las ventajas del cultivo de mitílidos es su alimentación por filtración de fitoplancton, lo que disminuye su inversión y además su impacto ambiental, en comparación con los cultivos de peces y crustáceos, permitiendo proyectar una significativa expansión de este sector de la acuicultura (Uriarte et al., 2008). Además, los datos de producción demuestran que la mitilicultura ha tenido un crecimiento acelerado desde 1998, donde entre los años 1997 y 2006 las tasas de crecimiento interanual de producción variaron entre 12,18% y 44,21% (Bagnara y Maltrain, 2008).

En el año 2004, en Chile se registraron cerca de 80 mil toneladas de producción al año, valor que ha ido en aumento constante, registrando cifras de producción mucho mayores actualmente, logrando una producción de 403,3 mil toneladas durante el 2024, donde el 100% de la cosecha fue realizada en la Región de Los Lagos y representó el 28,4% del total nacional de cosechas (FAO, 2008; SUBPESCA, 2025). Esta información, sumada al estancamiento de la pesca de captura, permiten proyectar a futuro que la acuicultura en general se convertirá en la mayor fuente de proteína marina a nivel mundial (FAO, 2018).

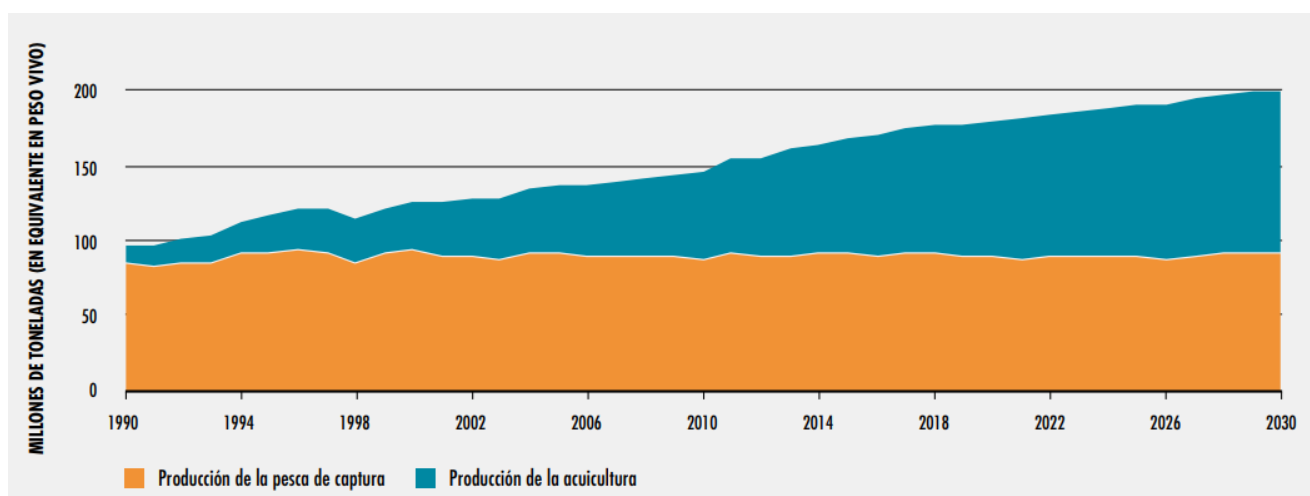


Figura 2. Producción mundial de la pesca de captura y la acuicultura, 1990-2030.

Fuente: FAO, 2018.

1.3. Etapas del ciclo productivo de la mitilicultura

El proceso de cultivo del mejillón chileno (*Mytilus chilensis*) consta de 4 grandes etapas:

Captación de semillas: El cultivo se realiza en sistemas suspendidos en estuarios, fiordos y canales, captando larvas del medio natural utilizando un sustrato de asentamiento de material reciclado o fabricado *ad-hoc* (colectores) que permiten el asentamiento. La captación presenta alta estacionalidad se realiza en áreas específicas (mayormente en Cochamó, Hualaihué, Estuario y Seno de Reloncaví).



Traslado: Una vez ya asentados, los colectores son retirados y puestos en sacos para acercarlos a la rampa de desembarque en la misma plataforma, cargándolos en camiones y/o lanchas para ser trasladados a las zonas de engorda, en el mar interior de la X región, desde el Seno de Reloncaví hasta Chiloé.



Siembra y engorda: Posteriormente, la semilla se desprende, se clasifica por tamaño y se introducen en cuelgas que aseguran su adherencia. Se “siembran” en líneas flotantes (*long-lines*) de 100 a 200 metros y se engordan por un periodo de 10 a 18 meses hasta alcanzar el tamaño de cosecha (aprox. 6 cm de longitud).



Proceso y comercialización: Las plantas de proceso poseen maquinaria para limpieza, selección, cocción, ultracongelación, envasado y empaque, almacenamiento, y despacho, pasteurización y enlatado en el caso de conservas, logrando que los mejillones se presenten principalmente como cocido y ultracongelado, y en menor proporción, como conservas para ser comercializados.



Nota. La definición de las etapas de cultivo se realizó con información y fotografías extraídas de FAO (2021) y AMICHILE.

2. Variables ambientales importantes para la actividad mitilicultora

A diferencia de los sistemas de producción de alimentos terrestres, el cultivo de especies en el mar se encuentra limitado por factores ambientales (como la temperatura, velocidad de la corriente, disponibilidad de alimento, etc..) en donde las regiones costeras se encuentran particularmente expuestas a altos cambios de las condiciones ambientales y alta exposición a múltiples factores antropogénicos (Oyinlola et al., 2018; Torres et al., 2025; Trégarot et al., 2024).

Los parámetros ambientales presentes en un cuerpo de agua varían según cada tipo de ecosistema, lo que condiciona el desarrollo de distintos organismos (Broitman, 2019), como es el caso de la temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, turbidez, intensidad del viento, frecuencia de marejadas, el nivel del mar, entre otros (Bindoff et al., 2019). Sin embargo, estos parámetros también dependen de varios otros factores como es la ubicación geográfica, los recursos pesqueros que se cultiven/extraigan, el desarrollo acuícola de la zona, el tipo de pesquería y las capacidades de realizar un monitoreo. Los parámetros importantes para la acuicultura son variados y existe una interdependencia entre dichas variables, ya que no se puede establecer una relación directa entre una única variable y una especie (FAO, 2021).

Para seleccionar las variables más relevantes, en primer lugar, se necesita entender qué procesos/fenómenos naturales pueden generar alteraciones en el tiempo y el espacio. Para este estudio, se consideraron las siguientes variables ambientales críticas para el cultivo de mitílicos:

- Temperatura: es la medida de la magnitud de calor que influye directamente en la cantidad y calidad de alimento disponible en el agua y en la fisiología de la especie (Pacheco et al., 2000) y, además, influyen en la supervivencia, la frecuencia cardíaca y el crecimiento de las especies de mejillones (Ganser et al., 2013).
- Salinidad: en Chile, los niveles de salinidad varían dependiendo de la latitud y la localidad de las desembocaduras, donde los máximos valores se encuentran en el norte y hacia el sur la salinidad tiende a disminuir, al igual que al encontrarse en costas o cerca de glaciares. Esto justifica que la distribución geográfica de mitílicos predomine en el sur de Chile, ya que allí se presentan marcadas variaciones de salinidad (Broitman, 2019). La salinidad es la variable ambiental con el mayor efecto en la idoneidad del hábitat de *M. chilensis*, sugiriendo que su asentamiento en el centro-sur de Chile, puede estar más vinculada a los patrones de salinidad que a los de temperatura (Torres et al., 2025).

- Oxígeno disuelto: la disminución de la concentración de oxígeno disuelto en el medio o zonas de hipoxia alteran la inmunidad de *Mytilus chilensis* suprimiendo su inmunocompetencia, donde se enfrentan al desafío crítico de suministro de energía reducido debido a la deficiencia de oxígeno (Montúfar- Romero et al., 2024).
- Turbidez: es un indicador de la cantidad relativa de material suspendido en el agua, lo que puede ser utilizado para estimar la presencia de alimento disponible para la especie (Pacheco et al., 2000). Además, la turbidez puede ser un indicador básico de calidad de agua, donde aguas más turbias absorben más calor y, en consecuencia, disminuye el oxígeno disuelto (Broitman, 2019).
- pH: es la medida de la acidez o alcalinidad de una solución, donde a pH más bajos se espera una reducción en el crecimiento de la concha y las tasas de calcificación, como consecuencia de la baja saturación de carbonatos (Grenier et al., 2020).
- Clorofila: las larvas de mejillón son omnívoras y su principal alimento son las partículas en la columna de agua de materia orgánica (bacterias, cianobacterias, fitoplancton) (Lara et al., 2016), las cuales pueden ser medidas mediante los niveles de clorofila. Se ha demostrado que la duración de esta fase omnívora está sincronizada con la disponibilidad de alimento adecuada, que se refleja en un asentamiento exitoso (Toupoint et al., 2012).
- Corrientes marinas: el movimiento del aire y las marejadas pueden afectar por varios días las actividades costeras, que debido al cambio climático, pueden intensificarse y ser más compleja su predicción (FAO, 2021). En general, los mejillones habitan en lugares protegidos de corrientes fuertes, por lo que es necesario conocer la velocidad y dirección de las corrientes en donde se realizará el cultivo (Pacheco et al., 2000).

3. Cambio climático en Chile

El cambio climático es una amenaza que advierte impactos en todos los continentes y océanos y va en constante aumento, donde la evidencia científica demuestra que el calentamiento ya alcanza 1 °C y que, con la tasa actual de emisiones globales de gases de efecto invernadero, los 1.5 °C se alcanzarían entre los años 2030 y 2052 (IPCC, 2018). Sus causas se atribuyen a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) que existen de forma natural en el planeta y regulan la temperatura, pero a causa de la actividad humana se han intensificado mediante

la quema de combustibles fósiles, tala de bosques, entre otros, iniciando un proceso de calentamiento (MMA, 2020).

Chile presenta una alta vulnerabilidad frente a los efectos del cambio climático, ya que cumple con 7 de los 9 criterios de vulnerabilidad (CMNUCC), donde la sequía es uno de los impactos más importantes, junto con inundaciones, aluviones, intensificación de incendios forestales, marejadas, acidificación de los océanos, entre otros, los cuales (en distinta medida) son de alcance mundial y a una escala sin precedentes, según el Informe del Estado del Medio Ambiente 2020.

El cambio climático tiene un fuerte impacto tanto en la zona continental como en la oceánica, afectando en distintas actividades productivas del país, especialmente en sectores como agricultura, pesca y minería. En Chile existe una alta dependencia económica, social y cultural de los océanos, sosteniendo la alimentación, el comercio, el turismo y el transporte, por lo que se vuelve urgente encontrar soluciones que enfrenten sus impactos, disminuir la vulnerabilidad e incrementar la capacidad adaptativa de las comunidades marinas y costeras en el futuro (Rojas et al., 2019).

4. Vulnerabilidad de la mitilicultura frente al cambio climático y la variabilidad ambiental

Los efectos del cambio climático no pueden atribuirse a una única variable, sino que son el resultado de múltiples factores directos e indirectos, donde se encuentra el calentamiento global, el aumento del nivel del mar, cambios en los patrones de circulación, aparición de fenómenos climáticos extremos, estrés hídrico (entiéndase por disminución de la disponibilidad de agua dulce) y cambios en los regímenes hidrológicos (De silva et al., 2009).

Un ejemplo clave de estos factores es el aumento de la surgencia costera, que implica consecuencias críticas para la acuicultura y, en particular, para *M. chilensis*, anticipando pequeños cambios latitudinales en la distribución del hábitat, pronosticada para el centro-sur de Chile, debido a que representa uno de los cuatro principales sistemas de surgencia del límite oriental (Torres et al., 2025). Según la FAO, la surgencia además podría afectar el cultivo debido al aumento de la turbidez, afloramiento de algas nocivas, el frío, la acidificación y el bajo oxígeno en la columna de agua. En este contexto, se predice que el aumento del cambio climático generará una acidificación progresiva del mar y de sus costas, disminuyendo la concentración de carbonato de calcio (CaCO_3), compuesto utilizado por los organismos marinos para construir sus conchas o exoesqueletos como estructuras de soporte y protección, por lo que se considera

que podría generar impactos más fuertes en organismos calcificadores como almejas, ostiones, peces, choritos y corales (Comité Científico COP25, 2019).

El aumento de la frecuencia de los fenómenos climáticos extremos surge como uno de los principales efectos del cambio climático que impactan en la mitilicultura, prediciendo que sus efectos aumentarán en intensidad y en frecuencia, generando daños en las instalaciones acuícolas ubicadas cerca de la costa y pérdida de poblaciones de cultivo, lo cual podría registrar una disminución de los días efectivos de cultivo y así pérdidas de producción (FAO, 2021).

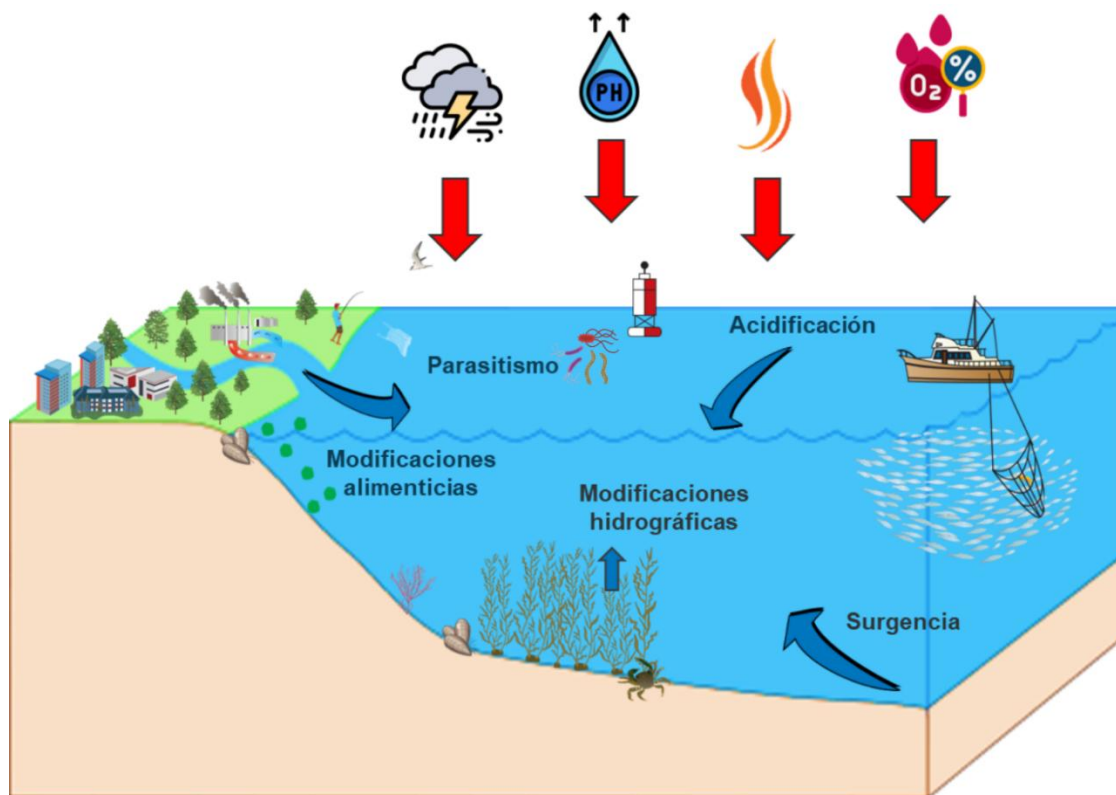


Figura 3. Principales efectos del cambio climático en la mitilicultura.

Nota. Adaptado de N. Castillo.

El conjunto de estos factores generará diversos efectos en la mitilicultura, donde el calentamiento global y el aumento de las temperaturas han registrado perturbaciones hidrográficas en las zonas de cultivo, en la sedimentación de materia en el fondo y podría causar eventos tóxicos más frecuentes como la eutrofización y la proliferación de algas, que en consecuencia, genera la disminución del oxígeno disponible, deteriora la producción, y aumenta el riesgo a la salud humana de consumo de moluscos (De silva et al., 2009).

Recientes estudios sugieren que puede existir riesgo en las etapas de captación y retención de las semillas de *M. chilensis*, y en el proceso de engorda y cosecha (Farías et al., 2019). Sin embargo, en la etapa de engorda se podría ver un impacto positivo por un aumento en la disponibilidad de alimento debido al aumento de la temperatura del agua. Por su parte, las repercusiones indirectas del cambio climático toman especial importancia la disponibilidad y los precios de los recursos necesarios para el cultivo de moluscos, además de las amenazas nuevas representadas por el parasitismo (Marcogliese, 2001), debido a un aumento de la difusión patógena en consecuencia del aumento de la temperatura del mar, donde en condiciones normales, los patógenos se mantenían inactivos (De Silva y Soto, 2009).

El cultivo de moluscos, y particularmente de mitílidos, depende directamente de la recolección de larvas de banco natural en zonas costeras de Chile. Estas áreas exhiben importantes cambios en la salinidad y el pH/ pCO_2 , sobre todo en áreas influenciadas por ríos (Pérez et al., 2015; Vargas et al., 2016). Asimismo, variables como la temperatura, el oxígeno, la clorofila total y el pH/ pCO_2 pueden variar drásticamente durante eventos de floraciones algales costeras (Torres y Ampuero, 2009; Vargas et al., 2016 ; Vargas et al., 2017).

Como se ha expuesto, las áreas para la mitilicultura se ven afectadas por los cambios en la química del agua y su efecto es diverso dependiendo de qué parámetro ambiental se analiza, refiriendo a una alta vulnerabilidad las cambiantes condiciones del mar y procesos ambientales (Lara et al., 2016). Por todo lo anterior, resulta fundamental la caracterización de la variabilidad temporal en las áreas de mitilicultivo, vinculándose directamente con las especies y en su desempeño, tanto en el presente como en su futuro potencial (Saavedra et al., 2020).

5. Adaptación al cambio climático del sector mitilicultor: Principales herramientas

5.1. Herramientas para la adaptación

Las estrategias de adaptación al cambio climático en la mitilicultura deben ser diseñadas según el contexto y zona de estudio, donde la medida general de la adaptación al cambio climático es una producción que sigue las mejores prácticas de manejo y gestión (De Silva y Soto, 2009, Soto et al., 2018).

En el siguiente cuadro resumen, se señalan las amenazas, efectos y algunas medidas o acciones prácticas generales con énfasis en los cultivos de Chile, extraído del Manual de capacitación en adaptación al cambio climático para pesca y acuicultura en Chile.

Amenaza principal	Efectos	Impactos	Medidas de adaptación <i>(Bueno y Soto, 2017, Soto et al., 2018)</i>
Todas las amenazas	Múltiples	Múltiples	<ul style="list-style-type: none"> • Planificación espacial basada en riesgos • Monitoreos ambientales y alertas tempranas • Optimas prácticas de manejo • Sistemas de manejo de mortalidades efectivos y amigables con el ambiente
Aumento de temperatura Aumento de salinidad Disminución de oxígeno	Se genera estrés, reduce crecimiento, alimentación	Aumento de mortalidad y disminución de la calidad de agua	<ul style="list-style-type: none"> • Seleccionar variedades y /o especies mejor adaptadas a las nuevas condiciones • Tecnologías para incrementar oxígeno disuelto disponible
-	Incremento de florecimiento algal	Aumento de mortalidad y de riesgo para el consumo humano	<ul style="list-style-type: none"> • Barreras físicas y biológicas • Variedades que detoxifican más rápido o mejor
-	Aumento de parasitismo y enfermedades	Disminución de la calidad del agua, aumento de mortalidad, riesgo para el consumo humano	<ul style="list-style-type: none"> • Monitoreo sanitario y alerta temprana • Reducción de densidades • Optimas prácticas de manejo y medidas de bioseguridad • Vacunas • Control biológico
-	Menos cantidad de semillas	Menor producción y exportación	<ul style="list-style-type: none"> • Protección especial a bancos parentales • Repoblamiento de bancos • Optimas prácticas de manejo de bancos y captación • Producción de semilla en hatcheries
Disminución de lluvias	Incremento de florecimiento algal	Menor producción de ovas y juveniles, aumento de mortalidad y de riesgo para el consumo	<ul style="list-style-type: none"> • Barreras físicas y biológicas • Variedades que detoxifican más rápido o mejo

Acidificación del mar	Deterioro de bancos parentales, semilla y engorda	Aumento de mortalidad, disminución del crecimiento y calidad de las especies	<ul style="list-style-type: none"> • Seleccionar variedades más resistentes a bajos niveles de pH
Aumento de oleaje y eventos extremos	Deterioro y pérdida de infraestructura, accesos, vidas humanas, etc.	Aumento de mortalidad y disminución de la cantidad de semillas	<ul style="list-style-type: none"> • Desarrollo e implementación de infraestructura más flexible y resistente

Tabla 1. Amenazas ambientales y medidas de adaptación para el cultivo de *Mytilus chilensis*.

Nota. A partir de información extraída de FAO y Centro-EULA, 2021a. Existen una serie de medidas que son indispensables para afrontar prácticamente todas las amenazas que pueden afectar la biomasa en cualquiera de las etapas productivas, las cuales se señalan en la primera fila.

5.2. Monitoreo de variables ambientales y alertas tempranas

Los parámetros ambientales y su variabilidad natural determinan la adaptación de ciertas especies, por lo que se produce una estrecha relación entre estas variables y la biología de ellas. Esta interdependencia entrega un valor fundamental a los rangos “naturales” presentes en los ecosistemas que se encuentren, ya que cualquier alteración podría anticiparnos a los potenciales efectos. Es por ello la alta relevancia de contar con un monitoreo constante de las condiciones ambientales, que permite caracterizar la zona, dar paso a la elaboración de cualquier gestión ambiental, y resulta imprescindible para detectar y atribuir efectos del cambio climático sobre la mitilicultura y finalmente, evaluar la eficiencia de la gestión luego de ser aplicadas (FAO y EULA-CHILE, 2021b). Las ponencias de asociaciones gremiales de miticultores de Chiloé y de la Subsecretaría de Pesca concuerdan en que los monitoreos y estudios científicos regulares en las zonas de captación larval más importantes profundizan en la búsqueda de conocimiento orientado a desarrollar herramientas tecnológicas aplicables al desarrollo de la actividad miticultora, incluso se menciona la necesidad de contar con fondos de financiamiento para el desarrollo de estos estudios (Leiva et al., 2007). Reconocer las distintas variables y realizar recopilaciones de forma continua, puede contribuir a una mejor comprensión de los procesos biofísicos por parte de los acuicultores, donde la información se transforma en medidas de respuesta a corto plazo, medidas de adaptación a largo plazo y alertas tempranas, así como decisiones de inversión (Bueno & Soto, 2017).

III. Metodología

1. Área de estudio

Región de Los Lagos

El área de estudio se ubicará la Región de los Lagos, Chile, debido a su predominancia en la mitilicultura a nivel nacional. Según el Anuario Estadístico de Pesca y Acuicultura 2024, publicado por el SERNAPESCA, en esta región se concentran 1.323 centros de cultivo de moluscos, lo que representa más del 83% del total nacional. Esta predominancia justifica su elección como sitio de estudio, ya que permite un análisis representativo de la actividad productiva en el país.

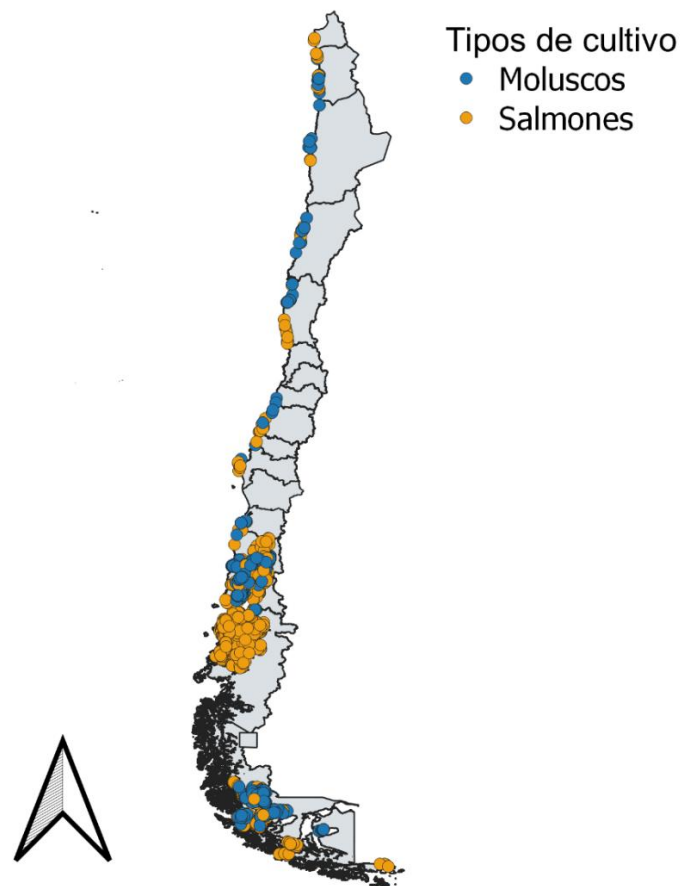


Figura 4. *Distribución espacial de las concesiones de acuicultura de moluscos y salmónes en Chile.*

Nota. Realizado con apoyo de software QGIS con información de GEOPORTAL IDE-SUBPESCA.

Para este estudio, se utilizarán datos de series temporales obtenidos del sistema de información oceanográfica CHONOS, implementado por el Instituto de Fomento Pesquero (IFOP) y datos del Instituto Milenio en Socio-Ecología Costera SECOS. Las boyas se distribuyen entre distintos sitios de cultivo en la Región de Los Lagos, incluyendo 2 boyas ubicadas en el mar interior de Chiloé y una tercera ubicada en el fiordo Reloncaví.

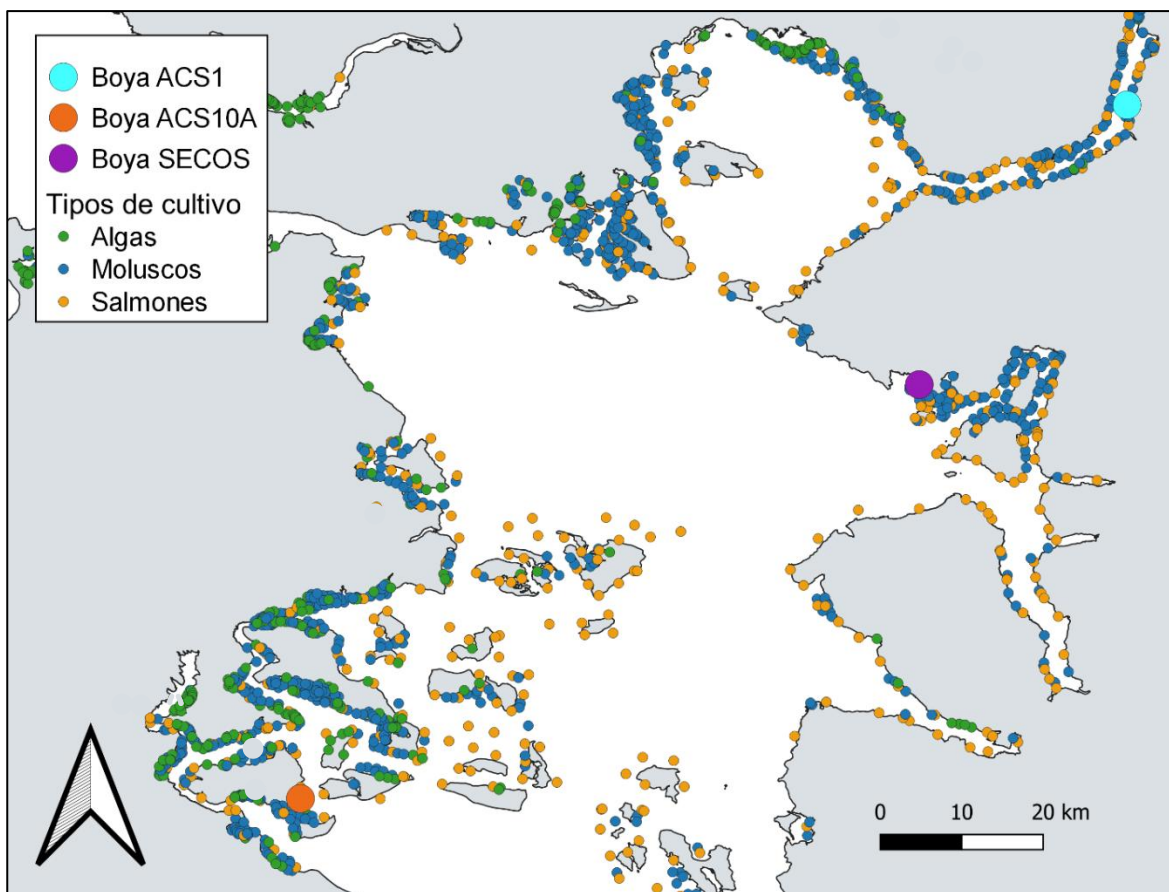


Figura 5. Mapa de distribución espacial y densidad de las concesiones de acuicultura en las áreas de cultivo de las estaciones de monitoreo (Boya ACS1, ACS10A y SECOS), en la Región de Los Lagos.

Nota. Realizado con apoyo de software QGIS con información de GEOPORTAL IDE-SUBPESCA.

En particular, el fiordo Reloncaví (ancho ~3–5 km, longitud 60 km, profundidad máxima ~450 m) es un sistema altamente estratificado debido a su morfología y altos aportes de agua dulce, siendo los principales afluentes los ríos Petrohué (280 m³/s), Cochamó (100 m³/s) y Puelo (640 m³/s), predominando el aporte del río Puelo (Soto et al., 2020; Valle-Levinson et al., 2007). Los altos niveles de aporte de agua dulce de los ríos tributarios generan altas variaciones de

salinidad que caracterizan las distintas masas de agua presentes en esta región, como canales y fiordos (León-Muñoz et al., 2013), especialmente en la zona superficial (González et al., 2010), presentando una columna de agua estratificada caracterizada por una pycnoclina marcada entre la capa superior e inferior (hasta los 5 m de profundidad). El fiordo junto con todos los sistemas estuarinos de la región representan una fuerte oferta de bancos naturales de semillas de *M. chilensis*, donde se estima que de Reloncaví se obtiene alrededor del 60% de la semillas demandadas por la miticultura de todo el país (Segura et al., 2022), por lo que se vuelve un sitio de alta importancia para la industria de mitílidos.

En la zona circundante a la boya ACS1 (fiordo Reloncaví) predomina el cultivo de moluscos y de salmones, debido a las condiciones ambientales que resultan beneficiosas para ello, además de ser una zona donde no existen asentamientos humanos de importancia en las cercanías del lugar, presentando el sector una actividad económica de carácter rural basado en la agricultura y pesquería (Leiva et al., 2007).

Por su parte, las boyas ACS10A y SECOS (ubicadas en Puqueldón y Caleta El Manzano respectivamente) se ubican en el mar interior de Chiloé, definido como un sistema semi-cerrado que comprende varias cuencas, micro-cuencas, fiordos y canales, convirtiéndolo en uno de los más extensos del mundo (Farmer y Freeland, 1983) incluyendo cuencas como el Seno del Reloncaví, el Golfo de Ancud, el Golfo Corcovado, la Boca del Guafo, el Canal Moraleda y el Estuario Elefante. El mar interior se conecta con aguas provenientes del océano Pacífico en la parte norte a través del Canal de Chacao (aprox. 40 km de largo y 4 km de ancho) y en la parte sur a través del Canal Moraleda (alrededor de 130 km de largo), mientras que las cuencas y micro-cuencas están conectadas por numerosos canales y constricciones. Además de la entrada de masas de agua oceánica, también ingresa agua dulce al sistema, donde en los principales aportes de ríos destacan 4; río Puelo ($\sim 711 \text{ m}^3/\text{s}$), río Palena ($\sim 762 \text{ m}^3/\text{s}$), río Aysén ($\sim 648 \text{ m}^3/\text{s}$), y el río Yelcho ($\sim 627 \text{ m}^3/\text{s}$) (Artal, 2019).

El intercambio entre el aporte de las aguas oceánicas y de agua dulce proveniente de los ríos permite una circulación general de tipo estuarina (Sievers, 2008), donde se han propuesto diversos esquemas de circulación que demuestran que la capa superior de $\sim 100 \text{ m}$ consiste en agua dulce más variable y estratificada, y la capa inferior o profunda es de agua salina más estable y cuasi-homogénea entre 100 m y el fondo (Caceres et al., 2003; Sievers, 2008; Silva y Valdenegro, 2008).

La distribución geográfica de *M. chilensis* comprende toda la costa chilena y parte de la costa argentina, avistando mayores densidades en zonas litorales. Dicha distribución se asocia principalmente a 1) el potencial recursivo de los estuarios de la X región que permite que *M. chilensis* se alimente del sestón que el mar provee y sus corrientes estuarinas ayudan a la re-suspensión de partículas orgánicas, 2) las características topográficas de la región proporcionan numerosas zonas protegidas de oleaje que permiten la instalación de los colectores y 3) las marcadas variaciones de salinidad por aporte de aguas lluvias y escurrimiento de ríos (Lorenzen et al., 1979).

Al igual que en el fiordo Reloncaví, la zona costera de Hualaihué presenta un gran provecho para la etapa de captación de semilla debido a su mayor concentración de larvas en lo que respecta la X Región, donde además del favorecimiento ambiental, se asocia a procesos de recirculación al interior del estero. En el sitio de Hualaihué no existen asentamientos humanos de importancia en las cercanías del lugar, presentando el sector una actividad económica de carácter rural, donde el impacto de los desechos humanos e industriales es muy reducido o no existente (riles, emisarios) (Leiva et al., 2007), permitiendo el cultivo predominante de moluscos, salmones y algas, como se presenta en la *Figura 5*.

2. Biología de la especie (*Mytilus chilensis*)

Mytilus chilensis es conocido comúnmente como “chorito”, habita naturalmente sustratos rocosos en las zonas intermareales y submareales a lo largo del Océano Pacífico sur, desde la latitud 38°S hasta los 53°S (Molinet y Flores et al., 2015; Oyarzún et al., 2011). La especie forma bancos naturales sobre fondos duros o de fango con subfondo sólido a los cuales se adhieren firmemente por un biso, encontrándose en zonas con marcadas variaciones de salinidad por influencia de aguas dulces, siendo común encontrarlos en fiordos y estuarios en la región sur y austral de Chile (Lorenzen et al., 1979).

Su ciclo de vida comienza en el medio acuático, tras la fecundación origina la primera larva que no posee concha (larva trocófora), que luego se transforma en larva véliger (ya se alimenta y nada de una estructura llamada velo). Transcurrido un periodo de 25 a 30 días en el plancton, estas larvas buscan donde asentarse desplazándose con una estructura llamada pie que genera un elemento filamentoso llamado biso que le brindará la capacidad de adherirse firmemente a un sustrato. Finalmente, se fija y ocurre la metamorfosis, donde la larva tomará apariencia de un adulto miniatura (juvenil) hasta alcanzar una talla de 1 a 2 cm, denominado semilla por los cultivadores (Clasing, Oñate y Arriagada, 1998).

El proceso en la mitilicultura consta básicamente de dos partes; captación de semillas y engorda. Estas se realizan independientemente una de la otra, y por lo general, el productor de la fase de engorda (adultos) compra las semillas a pequeños y medianos empresarios o productores artesanales. La etapa de “captación de semillas” corresponde al proceso de fijación de individuos que se encuentran naturalmente en el medio sobre un sustrato ya sea de paño de red de nylon o redes trenzadas denominadas “colectores” suspendidos en el agua colgando desde un sistema de cultivo denominado “long-line” (duración: entre 4 y 6 meses a partir de octubre). Luego de su captación, son trasladados a los centros de a partir del mes de febrero, utilizando boyas o flotadores equidistantes uno de otros, donde permanecerán alimentándose de fitoplancton por un periodo entre 8 a 11 meses, para finalmente ser cosechados y disponerlos a la venta y/o exportación (Furci, 2009).

3. Metodología para cada objetivo

A continuación, se presenta la metodología utilizada para cada uno de los objetivos específicos planteados.

3.1. Identificar y jerarquizar las variables ambientales más relevantes para el cultivo de *Mytilus chilensis* en Acuicultura de Pequeña Escala (APE).

Para la identificación y priorización de las variables más relevantes se realizó un análisis bibliográfico científico exhaustivo dividida en 3 etapas principales, basado en el modelo de metodología PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) (Matthew et al., 2021).

I. Identificación de registros

La búsqueda inicial se realizó en la base de datos Web of Science utilizando palabras clave como “*Mytilus chilensis*” y “*Mytilus*”, de donde se encontraron estudios entre los años 1981 y 2025, encontrando 370 registros iniciales, donde fueron excluidos 168 tras descartar aquellos que no fueran artículos/revisiones o por no corresponder a la especie objetivo.

II. Screening

De los 202 registros restantes se descartaron 66 registros que no presentaran estudios de respuestas fisiológicas o morfológicas de la especie expuesta a variables ambientales.

III. **Inclusión**

Finalmente, fueron seleccionados 136 artículos para la revisión definitiva que permiten la jerarquización de las variables, para realizar análisis bibliométrico, descriptivo y meta-análisis.

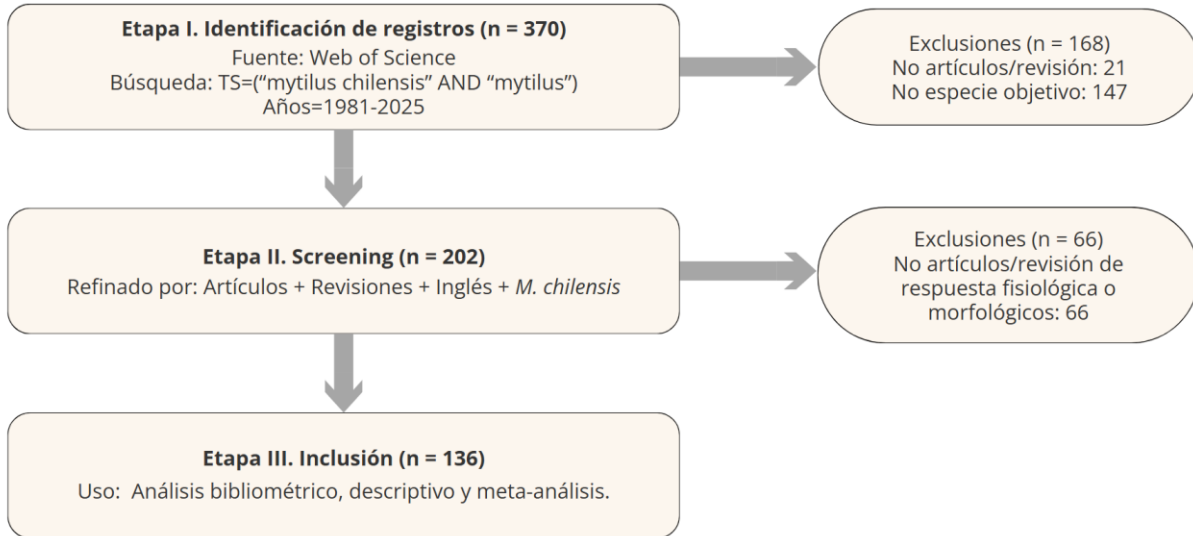


Figura 6. Esquema metodológico PRISMA de las etapas secuenciales de búsqueda, depuración e inclusión de la literatura científica utilizada para determinar y jerarquizar las variables ambientales más relevantes para el cultivo de la especie.

Una vez seleccionados los 136 artículos, se extrajeron los datos mediante una tabla de análisis registrando factor ambiental o estresor (e.g. temperatura, salinidad), nivel de análisis experimental, estadio de vida y origen de los ejemplares, metodología, rasgos de respuesta estudiados (tasa de aclaramiento, ingestión, absorción, crecimiento, etc.) y los principales resultados, obteniendo una tabla de análisis por cada estudio con el fin de tener un orden de la información y definir los efectos principales que genera cada variable ambiental en la especie.

Finalmente, para determinar la magnitud del efecto de las variables se utilizó el índice de respuesta logarítmica o Log Response Ratio ($LnRR$), el cual es el estadístico de tamaño del efecto más utilizado en metaanálisis en ecología (Nakagawa et al., 2022), donde relaciona una cantidad medida en los grupos experimental y de control, que se utiliza comúnmente como medida del efecto experimental, ya que cuantifica el cambio proporcional resultante de una manipulación experimental (Hedges et al., 1999).

Hedges lo define de la siguiente manera:

$$\ln RR = \ln \left(\frac{m_1}{m_2} \right)$$
$$v(\ln RR) = \frac{sd_1^2}{n_1 m_1^2} + \frac{sd_2^2}{n_2 m_2^2} = \frac{CV_1^2}{n_1} + \frac{CV_2^2}{n_2}$$

Fuente: Hedges, 1999.

Donde m_1 y m_2 son las medias de los grupos experimentales y de control, v representa la varianza de muestreo, sd y n son las DE y los tamaños de muestra correspondientes, respectivamente, y CV (sd/m) es el coeficiente de variación.

Particularmente para la jerarquización de las variables, se extrajeron los valores exclusivamente de rasgos fisiológicos y morfológicos (vélgase decir: tasa de aclaramiento, de ingestión, de absorción, de calcificación, de crecimiento, de respiración, de excreción, de disolución, de supervivencia, eficiencia de absorción, de asimilación, índice de crecimiento, peso y longitud de concha), además de solo incluir valores obtenidos experimentalmente en laboratorio en individuos en estado juvenil o adulto. En el caso de aquellos estudios que presentan estudios de efectos combinados, solo se incluyeron aquellos en los que se pudiera aislar el efecto, es decir, donde se pudiera establecer una situación de control de un parámetro y considerar el otro sus tratamientos. De este modo, se incluyeron en total 12 referencias bibliográficas, separándose por cada variable ambiental estudiada para poder evaluar su efecto.

El diseño experimental se basó en la simulación de escenarios ambientales proyectados para la zona sur de Chile, estableciendo como control las condiciones actuales con temperaturas más bajas, valores más altos de pH, salinidad, oxígeno disuelto y clorofila-a. En cuanto a las condiciones de tratamiento, se utilizaron los pronósticos del cambio climático con un aumento de la temperatura superficial del mar, una disminución del pH (acidificación), oxígeno disuelto (desoxigenación) y menor disponibilidad de alimento (clorofila-a) (Breitburg et al., 2018; Capet et al., 2013; Chandran et al., 2000; Conley et al., 2009; Feely et al., 2009; Haider et al., 2020; Houghton et al., 2001; IPCC, 2013; Navarro et al., 1988; Orr et al., 2005; Sagasti et al., 2001; Walther et al., 2002; Widdows et al., 1985). Debido a que en el área de estudio se presentan aguas bien oxigenadas (León-Muñoz et al., 2013; Yévenes et al., 2016) el oxígeno no fue incluido en la jerarquización, pero sí fueron definidos sus efectos.

Con los índices obtenidos, finalmente se ingresaron estos datos en la plataforma de programación y cálculo numérico *MATLAB*, donde se logró obtener la matriz variabilidad del tamaño del efecto (*LnRR*) para cuatro parámetros ambientales (temperatura, clorofila, pH y salinidad) en *Mytilus chilensis*.

3.2. Evaluar la variabilidad de los parámetros ambientales críticos que influyen en el cultivo de *Mytilus chilensis* en el sur de Chile.

Para la evaluación de la variabilidad ambiental en los sitios de muestreo, se descargaron datos históricos de 3 estaciones de boyas seleccionadas; 2 boyas con datos obtenidos del sistema de información oceanográfica CHONOS, implementado por el Instituto de Fomento Pesquero (Boya ACS1 y ACS10A) y 1 boya del Instituto Milenio en Socio-Ecología Costera SECOS (Boya SECOS). La plataforma digital CHONOS, es de libre acceso y contiene herramientas de visualización de variables oceanográficas de la Patagonia chilena, permitiendo visualizar a través de sus aplicaciones características de canales, fiordos y mares. Entre sus aplicaciones destaca el Proyecto Boyas, que incluye un visualizador de datos en tiempo real transmitidos por estaciones de monitoreo que registra y transmite indicadores de conductividad, salinidad, temperatura, profundidad, corrientes, densidad, fluorescencia y turbidez. En cuanto a los datos de SECOS, estos fueron solicitados directamente al instituto.

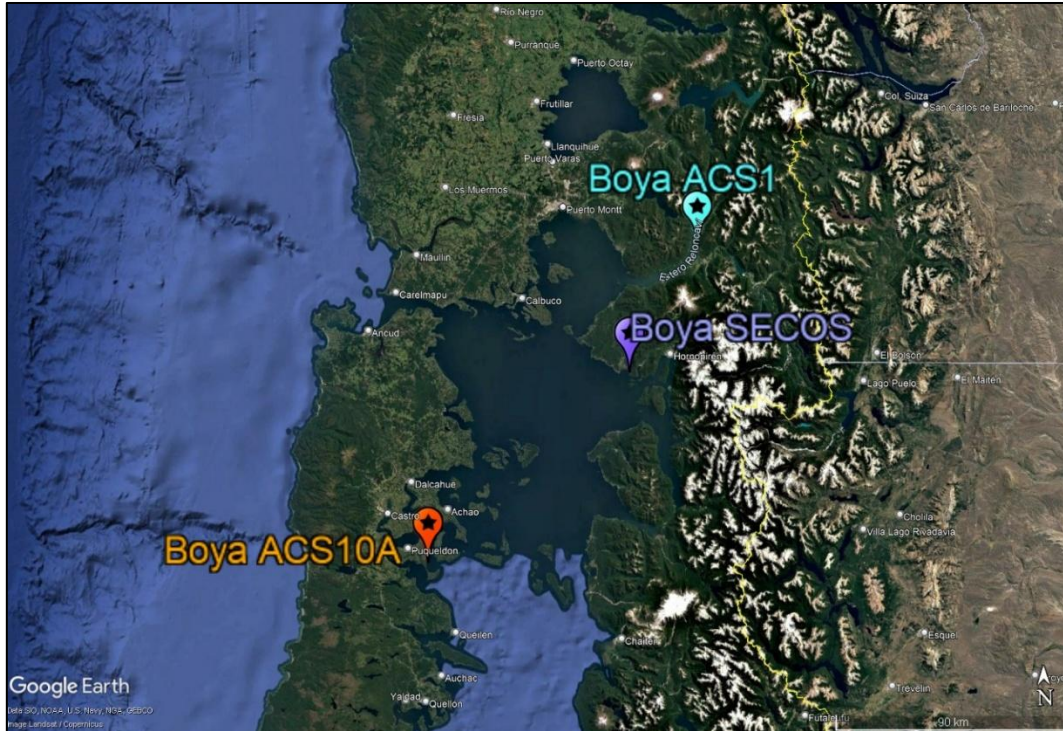


Figura 7. Ubicación geográfica de las estaciones de monitoreo (Boya ACS1, ACS10A y SECOS) en la región de Los Lagos.

Nota. Realizado con apoyo de Google Earth con información del sitio web de CHONOS e Instituto Milenio en Socio-Ecología Costera SECOS.

Para efectos de esta investigación, se utilizarán los datos registrados mediante una sonda multiparamétrica para el caso de datos CHONOS, la cual transmite el registro de variables fisicoquímicas clave como temperatura, salinidad, fluorescencia, entre otros parámetros importantes. En cuanto a los datos de SECOS fueron medidos mediante loggers instalados en la costa cerca de Caleta El Manzano, Puerto Montt. El periodo de estudio seleccionado corresponde al año 2024 y 2022 debido a que en aquellos años se presentan los periodos con menos datos faltantes y lo más actualizado posible. Las estaciones de monitoreo mediante boyas fueron estratégicamente ubicadas; boya ACS1 y SECOS (zonas de captación de semillas) y la boya ACS10A (zona de engorda). La selección temporal es justificada por presentar series de datos continua y representativa dentro de las estaciones seleccionadas y de las condiciones ambientales del área de interés y, además, la elección de estas estaciones en particular permite obtener información de distintos usos productivos en la industria mitilicultora.

Estaciones	Ubicación	Coordenadas	Registros
Boya ACS1	Fiordo Reloncaví	72.32953°O, 41.6037°S	2023/12/11 19:00 - actual
Boya ACS10A	Puqueldón (Chiloé)	73.5719°O, 42.6466°S	2022/11/02 14:21 - actual
Boya SECOS	Caleta El Manzano	72.64167°O, 42.02417°S	2018/08/30 16:00 - actual

Tabla 2. *Ubicación geográfica y periodos de registro del monitoreo oceanográfico utilizados para este estudio.*

Nota. Información extraída del sitio web de CHONOS e Instituto Milenio en Socio-Ecología Costera SECOS.

La ubicación de las estaciones ACS1 y ACS10A se determinó según las especificaciones de la Resolución N° 3408 de 2021 (SUBPESCA), que establecen que la instalación debe realizarse en el sector más profundo y expuesto de la concesión, alejado de balsas jaulas.

Los datos recopilados por las 3 estaciones proporcionaron una base para realizar análisis estadísticos y visualizaciones espaciotemporales, permitiendo así la caracterización de la variabilidad ambiental en estas áreas productivas. En cuanto a esta variabilidad, en primer lugar, se realizó un filtro sobre los datos sometidos a análisis, donde se descargarán solo los aquellos monitoreados por las sondas multiparámetro y solamente de las variables críticas definidas en el objetivo anterior y, además, se limitaron los datos a 5m-10m de profundidad debido a que las cuerdas de cultivos generalmente alcanzan hasta los 8 metros de longitud (Pacheco et al., 2000).

Los datos descargados se ingresarán a la plataforma de programación y cálculo numérico *MATLAB* que permitirá determinar la variabilidad ambiental de las zonas en estudio mediante diversos análisis. Se realizaron Análisis Exploratorios de Datos (EDA) para obtener estadísticos descriptivos (medidas de tendencia central) y gráficos de series temporales sobre cada una de las variables críticas seleccionadas, sin la aplicación de filtros para omitir el efecto de las mareas o el efecto diurno, para lograr determinar el efecto ambiental real en la especie estudiada. En segundo lugar, se realizaron pruebas de normalidad para determinar la prueba estadística a utilizar para la comparación entre grupos, seleccionando así el análisis multivariado *PERMANOVA* debido a la no normalidad de los datos, que junto al *post-hoc* lograron evaluar

las diferencias entre variables y entre estaciones. En tercer lugar, se rellenaron los datos faltantes y fueron normalizados para obtener correlaciones, identificar ciclos y tendencias mediante diagramas de dispersión y regresión lineal de Pearson, incluyendo el factor oxígeno para identificar de manera más completa los procesos oceanográficos presentes en cada zona, incluyéndose solo en esta sección del análisis de datos. Además, se obtuvo el coeficiente de variación y en Análisis de Componentes Principales (PCA) para cuantificar y visualizar la variabilidad de los datos. Con la realización de estos análisis en *MATLAB*, se logró interpretar y evaluar la variabilidad de los parámetros ambientales críticos que influyen en la mitilicultura en el sur de Chile.

3.3. Relacionar la variabilidad oceanográfica local y los umbrales fisiológicos para un crecimiento óptimo, como herramienta de apoyo a la gestión productiva de la industria mitilicultora y como una medida de adaptación al cambio climático.

Para el análisis integrado de la variabilidad ambiental y la literatura científica, en primer lugar, se utilizaron los 12 artículos seleccionados en el objetivo 1 para la jerarquización de las variables críticas, manteniendo los criterios de inclusión previos (artículos y revisiones de carácter fisiológico o morfológico sobre *Mytilus chilensis*, estudios experimentales, individuos en estado juvenil o adulto). De estos textos se extrajeron los valores máximos y mínimos de las respuestas fisiológicas identificando, además, bajo qué condiciones ambientales se alcanzaban estos valores, los cuales fueron tabulados en Excel. Posteriormente, se cuantificó la frecuencia en la que estos valores extremos se presentaban en los diferentes rangos de cada variable ambiental, para así finalmente obtener rangos estimativos donde se potencien las respuestas fisiológicas, y en donde sean suprimidas, separándose por “Condición óptima” donde los rasgos fisiológicos se maximizan y “Condición de riesgo” donde los rasgos fisiológicos alcanzan sus valores más bajos o presentan inhibición.

Los rangos obtenidos de la revisión bibliográfica se compararon y promediaron con los umbrales definidos por expertos en biología de mitílidos, quienes participaron en la creación de límites mediante un proceso colaborativo, realizado en el marco del proyecto “Semáforo Ambiental para la mitilicultura” del Instituto Milenio en Socio-Ecología Costera (SECOS). Dicha comparación permitió identificar y analizar posibles discrepancias entre los umbrales, determinando así los rangos de condición óptima y de riesgo para las variables de temperatura, salinidad, pH y clorofila. Debido a la baja disponibilidad de estudios fisiológicos realizados bajo distintas concentraciones de clorofila, para este factor solo se presentan los rangos

establecidos según los expertos, considerándose los umbrales de “mortalidad”, “límite no definido” y “alto impacto” dentro de uno solo denominado “Condición de riesgo” en donde se induce el que induce estrés fisiológico o inhibición, para homogenizar los criterios con los utilizados para todas las demás variables, y la “Condición óptima” se mantuvo con el mismo nombre y significado.

Posteriormente, con el fin de visualizar los periodos de mayor exposición de riesgo y condiciones óptimas, se graficaron las series de tiempo en *MATLAB* incluyendo los umbrales fisiológicos definidos previamente, estableciendo de color verde los periodos donde se presenten los umbrales bajo condición óptima y de color rojo donde se presenten bajo los umbrales de condiciones de riesgo, según corresponda para cada variable. Este procesamiento permitió que, para cada etapa de cultivo, se cuantificara la frecuencia de condiciones óptimas y de riesgo, obteniendo una tabla resumen con sus respectivos porcentajes de riesgo para así detectar los periodos con mayor vulnerabilidad, donde además, se incluyeron las valoraciones de cada riesgo según la colorimetría y categorización de la ISO 31000, permitiendo visualizar e identificar las etapas del cultivo más sensibles y determinar cuáles presentan una mayor vulnerabilidad ambiental, considerando al igual que en el objetivo 1, solo las predicciones de las variables establecidas según el cambio climático, es decir, aumento de temperatura, y baja de salinidad, pH y clorofila.

Probabilidad del riesgo (%)	Categorización
0 – 20	Muy bajo
20 – 40	Bajo
40 – 60	Medio
60 – 80	Alto
80 - 100	Muy alto

Tabla 3. Categorización utilizada para la evaluación de la probabilidad del riesgo.

Nota. Información extraída de ISO, 2018.

La etapa final del estudio consta en definir las estrategias de adaptación al cambio climático para los sitios en estudio, por medio de revisión bibliográfica y documental para identificar las partes interesadas en la industria del mitilcultivo y estrategias de adaptación que tengan la capacidad de gestionar en Chile la pesca y cultivo de especies marinas. En este contexto,

fueron revisados sitios web de diversas instituciones públicas como la SUBPESCA, SERNAPESCA, entre otros, que exponen diversos informes diferenciados por sector productivo, cuentas públicas, publicaciones o en sí mismo, el Proyecto de Fondo de Investigación Pesquera y Acuicultura (FIPA) que en su sitio web presenta informes de monitoreos mensuales de distintas regiones del Chile, programas de vigilancia ambiental, desarrollo de programas para fomentar el cultivo, entre otros documentos de gran utilidad para el desarrollo de esta sección del estudio. Además, se incluyó la revisión de manuales de capacitación, de cultivo, o de implementación de sistemas de monitoreo que detallan a fondo cómo surgen las gestiones, como se clasifican y cuáles son sus principales implicancias que tienen en la industria mitilicultora, logrando así, definir las estrategias de gestión para los sitios puestos en estudio dependiendo de sus requerimientos frente al cambio climático.

IV. Resultados y discusión

1. Identificar y jerarquizar las variables ambientales para el cultivo de *Mytilus chilensis* en Acuicultura de Pequeña Escala (APE).

El mejillón chileno (*Mytilus chilensis*) es un molusco filtrador que obtiene su alimento del medio ambiente, por lo que el crecimiento y la reproducción quedan determinados por diversas variables ambientales (Peteiro et al., 2006; Lök et al., 2007; Celik et al., 2009). Además, el cultivo de este molusco al ser realizado en zonas costeras se encuentra particularmente expuestos a altos cambios de las condiciones ambientales y alta exposición a múltiples factores antropogénicos (Torres et al., 2025; Oyinlola et al., 2018; Trégarot et al., 2024). La calidad tanto del agua como de las interacciones ecológicas son determinantes en la capacidad de producción del cultivo de moluscos, por lo que las variables ambientales son fuertemente consideradas en las decisiones de localización de la producción (Mongruel y Thébaud, 2006).

Bajo este argumento, la identificación de las variables ambientales críticas para el cultivo de la especie objetivo resulta clave para comprender las limitaciones y oportunidades productivas de la mitilicultura a pequeña escala en el sur de Chile. En consecuencia, se realizó una revisión bibliográfica sistemática para identificar y jerarquizar las variables que impactan la actividad.

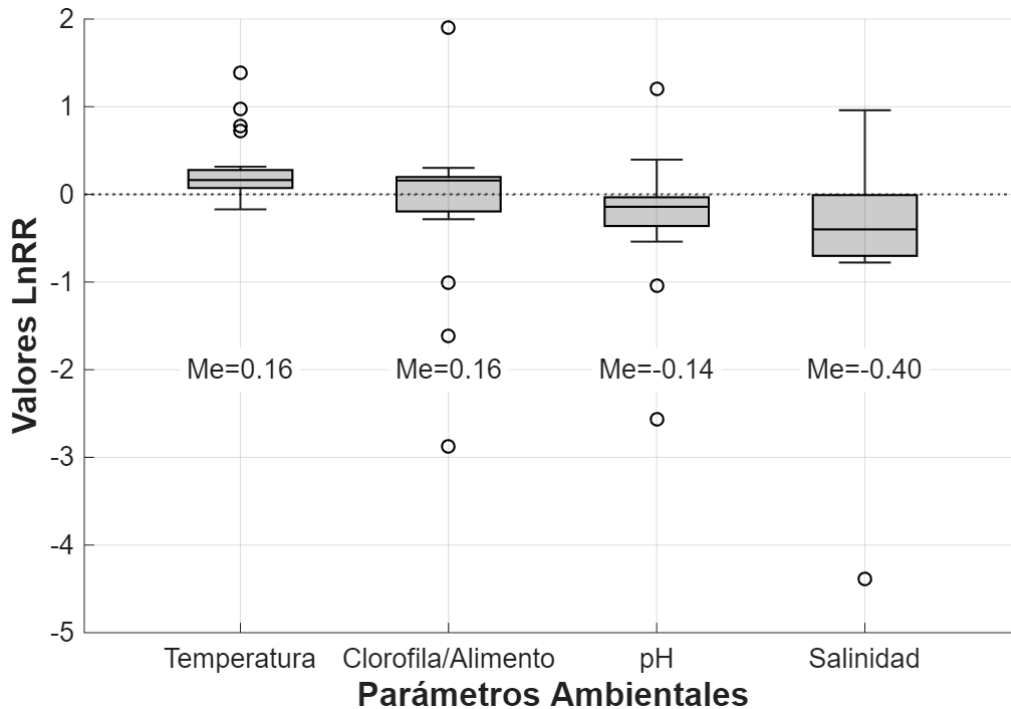


Figura 8. Diagramas de caja de valores Log Response Ratio (*LnRR*) para temperatura, clorofila, pH y salinidad.

Nota. Basado en estudios fisiológicos reportados por diversos autores (ver detalle en Anexo 1). Los valores sobre cero (línea punteada) indican un efecto promotor en los rasgos fisiológicos de *Mytilus chilensis*, mientras que los valores bajo cero representan un efecto estresor o inhibidor. Se incluyen valores de las medianas.

Los resultados, sintetizados mediante el Log Response Ratio (*LnRR*) en la Figura 8, presentan los valores que reflejan la respuesta del mejillón frente a condiciones experimentales que simulan escenarios proyectados según el cambio climático: aumento de temperatura, disminución de clorofila, pH y salinidad (Breitburg et al., 2018; Capet et al., 2013; Chandran et al., 2000; Conley et al., 2009; Feely et al., 2009; Haider et al., 2020; Houghton et al., 2001; IPCC, 2013; Navarro et al., 1988; Orr et al., 2005; Sagasti et al., 2001; Walther et al., 2002; Widdows et al., 1985). Bajo esta lógica, se identifica una jerarquía de impacto, en donde la reducción de la salinidad representa la variable más crítica (Me = - 0.40) junto con la disminución del pH (Me = - 0.14), que, desde una perspectiva fisiológica, actúan como estresores y afectan o inhiben directamente sus rasgos fisiológicos. En contraste a estos parámetros, la menor disponibilidad de alimento (clorofila, Me = 0.16) y el aumento térmico (Me = 0.16) actúan como promotores fisiológicos, permitiendo el desarrollo y sustento de la especie optimizado.

Particularmente, se observa que el impacto negativo de la disminución de salinidad y pH predomina sobre los efectos positivos del aumento térmico y menor disponibilidad de alimento. De este modo, se evidencia que *M. chilensis* presenta alta vulnerabilidad ante condiciones de baja salinidad y acidificación, pudiendo incluso contrarrestar los posibles efectos positivos del aumento térmico y la baja nutricional.

La acidificación costera es uno de los fenómenos oceanográficos que impactan fuertemente en la mitilicultura, que se produce por un aumento de CO₂ en el mar, conduciendo a una disminución de pH y de la disponibilidad de iones carbonato (Orr et al., 2005, Wolf-Gladrow et al., 1999). Ambos procesos pueden afectar negativamente a los organismos calcificantes marinos, complicando la formación de sus conchas o produciendo la desintegración de aquellas ya formadas (Caldeira y Wickett, 2003; Orr et al., 2005; Duarte et al., 2014). La alta concentración de CO₂ en diversos estudios ha indicado un efecto negativo en el crecimiento, sobrevivencia y obtención de energía en organismos calcificadores, además de deficiencias en el funcionamiento de los sistemas digestivos o un declive metabólico (Doney et al., 2009; Dupont y Thornduke, 2009; Duarte et al., 2014; Navarro et al., 2013). Incluso, Diaz (2018) determinó que tanto la longitud de la concha como la tasa de ingestión dependieron directamente de la exposición de CO₂, donde las condiciones ácidas generan incluso cambios en la composición mineral de la concha y alta desorganización mineral (Lagos et al., 2016; Lardies et al., 2017; Ramajo et al., 2016; Duarte et al., 2014; Greiner et al., 2020). Los efectos adversos del bajo pH se pronuncian con otros parámetros ambientales, como en la formación de la concha con bajas de salinidades (Pörtner, 2008; O'Donnell et al., 2009; Najjar et al., 2010; Ramajo et al., 2016) debido al estrés que se les somete al combinar estas variables. Sin embargo, existe evidencia de que al combinarse el efecto de pH/temperatura, el aumento de la temperatura puede ayudar a contrarrestar los efectos negativos presentados por un aumento en el CO₂ (Duarte et al., 2014; Navarro et al., 2016).

Por su parte, la salinidad emerge como una de las variables ambientales con mayor efecto en la idoneidad del hábitat de la especie que puede superar incluso el efecto del CO₂ (Duarte et al., 2018; Grenier et al., 2020), y que la temperatura (Torres, 2025). El efecto que tienen los cambios en la salinidad es diverso, afectando en la filtración y la eficiencia de absorción de la especie (Duarte et al, 2018), concordando con lo descrito para otras especies de bivalvos como *A. irradians*, *C. Chorus* y *A. purpuratus* (Loncon, 2014). Los gradientes verticales de salinidad también determinan la estructura espacial, el índice de crecimiento y la eficiencia de las poblaciones de *M. chilensis*, donde la haloclina funciona como una barrera química o física para

aquellas larvas que intentan migrar (Molinet et al., 2015). Esta variable, además, impulsa cambios en la cantidad de proteínas y polisacáridos en el periostraco, afectando directamente en la biomineralización de la concha (Grenier et al., 2020).

La baja de este factor al combinarse con otros factores estresores exagera la tensión fisiológica y desencadena cambios en los ecosistemas costeros (Bommarito et al., 2022), como es el caso de la combinación altas temperaturas con menor alimento y salinidad, limitando el éxito reproductivo y la distribución de los mejillones (Tan et al., 2021), o la combinación entre baja salinidad/bajo pH que aumenta la mortalidad y el costo energético, además de disminuir el crecimiento de tejidos blandos y las propiedades mecánicas de la concha, tanto en ostras como mejillones (Dickinson et al., 2012; Ramajo et al., 2016; Duarte et al., 2018). En definitiva, los procesos combinados afectan los procesos fisiológicos como la biomineralización de la concha, sin embargo, *M. chilensis* muestra una respuesta plástica a estos cambios, aunque de igual forma se presentan efectos negativos en su crecimiento (Grenier et al., 2020).

Según el estudio realizado por López (2013) exponiendo a *Mytilus chilensis* a distintas variables ambientales (temperatura, salinidad, sestón, clorofila, fitoplancton y número de partículas), se revela que el sestón total y la clorofila afectan significativamente en la ingestión, biodeposición, ingestión orgánica y la absorción de alimento, coincidente con lo descrito por Navarro y Thompson (1996) para el bivalvo *Modiolus modiolus*. Los mismos autores señalan que el sestón (también representado por la clorofila-a) se le considera una de las variables más importantes debido a que su cantidad y calidad puede afectar significativamente la respuesta fisiológica de los organismos filtradores. Además, la aparición de las larvas de mitílidos ocurre cuando las concentraciones de clorofila-a y sestón orgánico han aumentado significativamente, igual que la temperatura promedio del agua principalmente durante los meses de primavera (Leiva et al., 2007). Los resultados obtenidos y expuestos en *Figura 8*, indican que a menor cantidad de alimento la respuesta fisiológica se ve favorecida, lo que se explica por la forma, la dureza, el tipo de partícula y la especie de microalga (planctónica o bentónica) ya que determinan la eficiencia de retención de las partículas (Velasco et al., 2005). Autores han demostrado que la selección del alimento se realiza en base al tamaño de las partículas, donde aquellas de tamaños relativamente grandes son rechazadas preferentemente lo cual podría explicar este comportamiento (Velasco et al., 2002).

La temperatura muestra una influencia notable en diferentes fases del ciclo de vida, en particular la tasa de crecimiento y reproducción (Arrieche et al., 2020; Tan et al., 2021; Ericson et al., 2023; Fong et al., 2024), en donde cambios en los patrones de temperatura influencia el crecimiento

larvario y el balance energético de la especie, generado por un aumento en los procesos metabólicos (Lagos et al., 2012a, 2012b; Guenuman, 2014). Además, genera cambios significativos en distintas tasas fisiológicas como de aclaramiento, ingestión orgánica, absorción y crecimiento potencial (Guenuman, 2014; Lopez, 2013). Al realizarse combinaciones de temperatura con otros estresores (como cadmio y CO₂), la temperatura tuvo un claro efecto en el rendimiento fisiológico de las larvas (Díaz, 2018), y en estudios combinados con alzas de CO₂, se observó que disminuía la calcificación y el crecimiento corporal, mientras que el aumento de la temperatura compensaba estos efectos, aunque se siguieran presentando (Duarte et al., 2014). Resultados similares se encontraron en más estudios, en donde se afirma que el aumento de la temperatura reduce los efectos negativos generados por los niveles elevados de pCO₂ (Catarino et al., 2012; Byrne y Przeslawski, 2013; Wang et al., 2015). En definitiva, la temperatura tiene la capacidad de neutralizar parcialmente los efectos combinados con otros estresores, sin mitigar completamente los impactos negativos, coincidiendo con lo sugerido en este estudio sobre el efecto promotor que podría presentar la temperatura.

La determinación y jerarquización de variables realizada en esta sección demuestran que la salinidad y el pH representan los principales factores limitantes para el cultivo de *Mytilus chilensis*, mientras que la temperatura y el alimento actúan como promotores fisiológicos. Esta información resulta fundamental para la mitilicultura en el sur de Chile, donde la variabilidad oceanográfica y los eventos extremos asociados al cambio climático pueden intensificar estos efectos, estableciendo así los enfoques para la evaluación de las condiciones ambientales en las áreas de estudio.

A fin de profundizar la jerarquización anteriormente expuesta, en la *Tabla 4* se presenta una síntesis detallada de los principales efectos identificados en la literatura científica para el *Mytilus chilensis* que intervienen en sus procesos vitales. Esta recopilación permite observar de qué manera parámetros como la temperatura, la disponibilidad de alimento (clorofila), el pH, oxígeno y la salinidad actúan sobre esta especie, como por ejemplo el éxito reproductivo, el crecimiento larval, la capacidad de respuesta metabólica y la resiliencia frente a factores de estrés ambiental.

Parámetros	Efectos	Referencias
Temperatura	Genera efectos en la reproducción y ciclo de vida (limitación de desoves, reclutamiento, desarrollo gonadal, fecundación, maduración), crecimiento (ingestión, alimentación, procesos metabólicos larvales, rendimiento fisiológico, calcificación), respuesta al estrés (ayuda a compensar estrés heredado de padres, actividad enzimática, expresión génica) e interacciones ecológicas y sensibilidad (ataque de depredadores y podría intensificar efecto de insecticidas).	(Alarcón et al., 2015; Avendaño et al., 2011; Castillo et al., 2024; Conejeros et al., 2024; Díaz et al., 2018; Giarratano et al., 2011; Jahnsen et al., 2021; Lagos et al., 2012a, 2012b; Molinet et al., 2021; Navarro et al., 2016, 2024; Núñez-Acuña et al., 2012; Saavedra et al., 2021; Uzkiaga et al., 2022)
Clorofila	Genera efectos en la fisiología de <i>M. chilensis</i> (alimentación, filtración, ingestión, selección de alimento y producción de pseudoheces), en su desarrollo y reproducción (crecimiento, calcificación, heredabilidad, maduración gonadal y desove) y, además, genera cambios en el estrés oxidativo (actividad enzimática en tejidos blandos, acumulación de toxinas o cadmio).	(Blanc et al., 2023; Fernández-Reiriz et al., 2001, 2008; Giarratano et al., 2011; Jahnsen-Guzmán et al., 2021; Jaramillo et al., 1992; Labarta et al., 2002; Navarro et al., 1982, 2003, 2008, 2010, 2018; Núñez-Acuña et al., 2012; Saavedra et al., 2021; Toro et al., 1996; Velasco et al., 2002, 2003)
pH	Genera efectos en la estructura de la concha (dificulta calcificación, peso, color, saturación de carbonatos y contribuye a mayor corrosión en aguas), procesos fisiológicos (absorción, ingestión, crecimiento, consumo de oxígeno, efecto parental, crecimiento larval) y en respuesta a toxicidades/estrés (Inmunomodulación, intensificación de efectos de insecticidas y actividad enzimática de glándulas digestivas). Sus efectos pueden no ser letales, pero sí crónicos y, además, al combinarse con la salinidad incrementa el efecto en el crecimiento y desarrollo de la concha.	(Alarcón et al., 2015; Castillo et al., 2017, 2024; Conejeros et al., 2024; Díaz et al., 2019; Díaz, R. et al., 2018; Duarte, C. et al., 2014, 2018; Giarratano et al., 2011; Grenier et al., 2020; Jahnsen et al., 2021; Martin et al., 2019; Mellado et al., 2019; Navarro et al., 2013, 2016; Saavedra et al., 2021)

Salinidad	<p>Afecta en el metabolismo y fisiología (tasas fisiológicas, actividad enzimática, calcificación, crecimiento y plasticidad), en su estructura (composición/crecimiento de conchas, corrosión/formación de conchas), y en su demografía y distribución (abundancia larval, reproducción, reclutamiento, distribución hábitats, superposición espacial con especies, composición de taxones).</p>	<p>(Alarcón et al., 2015; Castillo et al., 2024; Duarte et al., 2018; Flores et al., 2015; Giarratano et al., 2011; Grenier et al., 2020; Jahnsen-Guzmán et al., 2021; Molinet et al., 2021a, 2025; Saavedra et al., 2021; Torres et al., 2025)</p>
Oxígeno	<p>Efectos en la fisiología de <i>M. chilensis</i> (metabolismo energético, activación de genes, crecimiento, absorción de nutrientes), en la inmunidad y respuesta al estrés (supresión inmunológica y activación de vías de apoptosis), en la microbiota de tejidos blandos como branquias y células digestivas (estructura, abundancia, composición, riqueza, diversidad de comunidades) y en el suministro larval.</p>	<p>(Giarratano et al., 2011; Jahnsen et al., 2021; Molinet et al., 2021; Montúfar-Romero et al., 2024, 2025; Saavedra et al., 2021)</p>

Tabla 4. *Síntesis de los principales efectos fisiológicos y morfológicos de los parámetros ambientales en Mytilus chilensis.*

2. Evaluar la variabilidad de los parámetros ambientales críticos que influyen en el cultivo de *Mytilus chilensis* en el sur de Chile.

2.1. Variabilidad temporal

Tras el análisis de las series temporales, los resultados exhiben que en los tres sitios de estudio se presenta una marcada estacionalidad con un gradiente latitudinal decreciente hacia el sur. Los máximos registros de temperatura fueron en la estación ACS1 (con 20°C), mientras el valor más bajo fue registrado en la estación SECOS con 8.8 °C. Estas fluctuaciones térmicas se acoplan con la dinámica del pH y los peaks de clorofila con una tendencia al aumento hacia fines de año (octubre-diciembre), especialmente en las estaciones ACS1 y ACS10A, con máximos de clorofila de 94.12 y 99 µg/L respectivamente, lo que sugiere una intensa actividad fotosintética (aunque mayor en ACS1) que eleva la alcalinidad del sistema mediante el consumo de CO₂ (Masojídek et al., 2021). Estas alzas favorecen la presencia de larvas en estos sitios cuando los niveles de clorofila y de temperatura han aumentado, como ya se ha afirmado por informes realizados en la X región (Leiva et al., 2007).

Variables	Mínimas			Máximas			Medias		
	ACS1	ACS10A	SECOS	ACS1	ACS10A	SECOS	ACS1	ACS10A	SECOS
Temperatura	9.26	9.49	8.8	20	15.23	19.2	13.42	11.04	12.26
Salinidad	3.54	3.98	19	32.74	40.42	32.6	23.50	29.92	30.78
pH	7.57	7.44	7.4	8.84	8.19	8.4	8.08	7.89	7.94
Clorofila	2.1	0	0.2	94.12	99	27.1	11.86	5.87	3.20

Tabla 5. *Medidas de tendencia central (valores mínimos, máximos y medias) para las variables oceanográficas críticas por cada sitio de estudio.*

En ACS1, este proceso es potenciado por el río Puelo, cuyo aporte de nutrientes es fundamental para el ecosistema y la acuicultura local (Aguayo et al., 2021), registrando los promedios más altos de pH (8.08) y clorofila (11.86 µg/L), en contraste las estaciones SECOS y ACS10A, donde registraron mínimos de clorofila cercanos a cero y promedios más bajos, lo que sugiere una menor actividad fotosintética en dichos puntos.

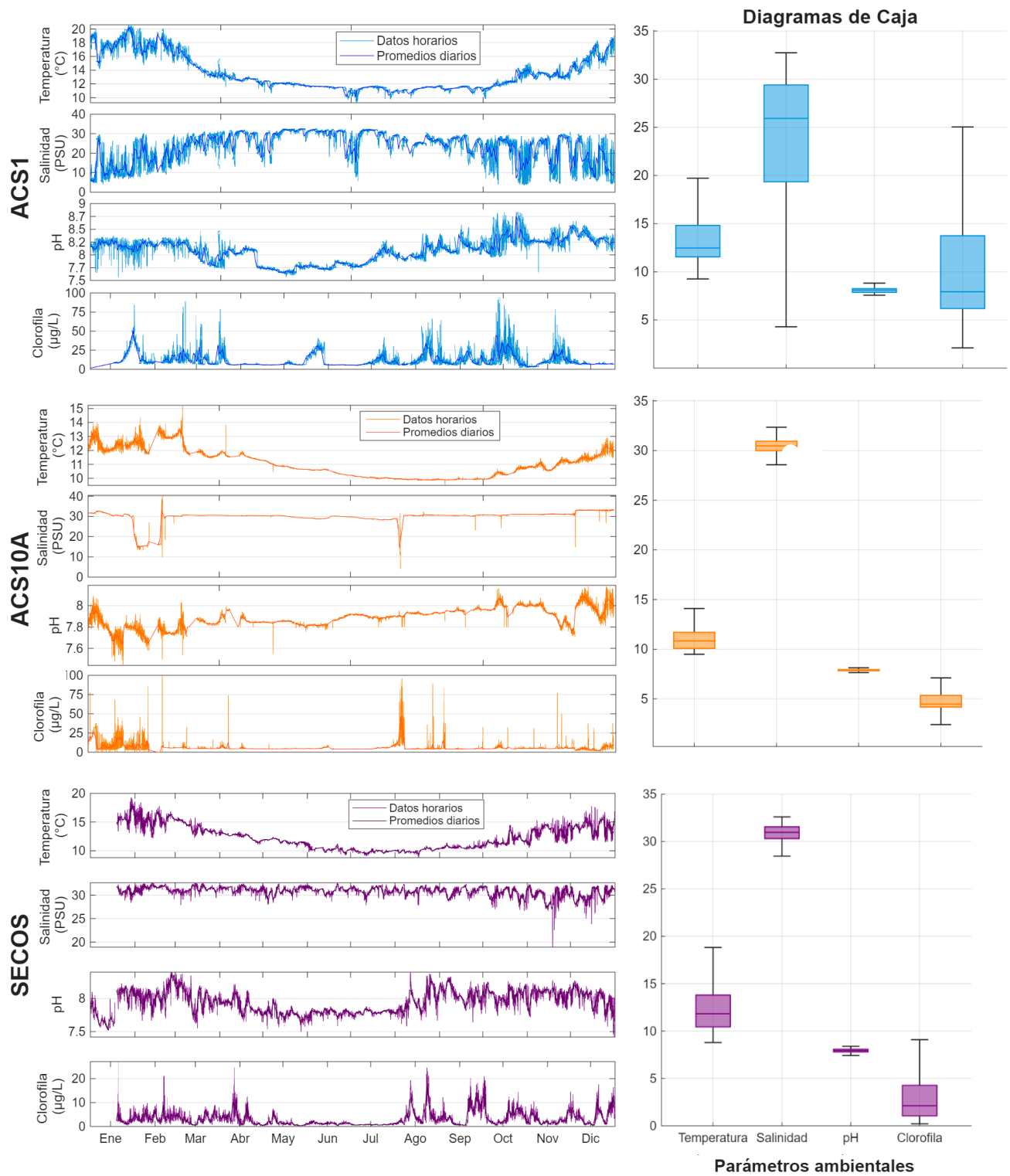


Figura 9. Series de tiempo y distribución de los parámetros ambientales críticos registrados en las estaciones ACS1, ACS10A y SECOS.

Nota. Realizado con apoyo de software *MATLAB*. En cada sitio (filas) se muestran las series temporales anuales de temperatura (°C), salinidad (PSU), pH y clorofila/fluorescencia (µg/L) registradas durante el período de estudio. Las líneas delgadas representan datos horarios, mientras que las líneas más gruesas corresponden a promedios diarios. A la derecha de cada conjunto se presentan diagramas de caja (*box-plots*) que resumen la distribución de cada variable en el sitio correspondiente, mostrando la mediana, el rango intercuartílico (Q1–Q3) y la extensión de los valores extremos. Estos paneles permiten comparar tanto la variabilidad temporal como la distribución estadística de las condiciones ambientales entre los tres sitios de estudio.

La salinidad por su parte se encuentra dominada por la geomorfología de cada sitio, definiendo un sistema estuarino-oceánico, en donde la estación ACS1 presenta la mayor inestabilidad, con caídas drásticas de salinidad (hasta 5 PSU) y un promedio de 23.50 PSU, nuevamente producto de las descargas de agua dulce del río Puelo (León-Muñoz et al., 2013; Sievers, 2008). Por el contrario, en las estaciones ACS10A y SECOS muestran bajadas salinas más puntuales con valores más altos y estables, siendo el máximo registro en la estación ACS10A con 40.42 PSU asociado a la influencia de aguas oceánicas que ingresan por los canales de Chacao y Moraleda (Artal, 2019). Aunque en estos sitios existen variaciones por escurrimientos locales y lluvias (Lorenzen et al., 1979), el ingreso de masas oceánicas genera una capa profunda más estable homogénea y una superior (~100 m) más estratificada, pero en menor medida que en comparación con la variabilidad del fiordo Reloncaví (estación ACS1) (Cáceres et al., 2003; Sievers, 2008; Silva y Valdenegro, 2008).

Variables	ACS1	ACS10A	SECOS
	CV (%)	CV (%)	CV (%)
Temperatura	17.5	8.7	16.7
Salinidad	30.3	10.4	3.4
pH	2.9	1.1	2.1
Clorofila	82.7	90.8	96.5

Tabla 6. Coeficientes de variación (CV) por parámetro ambiental para cada una de las estaciones monitoreadas.

Nota. Se define CV_t como el coeficiente de variación de la temperatura, CV_s el coeficiente de variación de salinidad, CV_p el coeficiente de variación de pH y CV_c el coeficiente de variación de la clorofila.

En general, ACS1 representa el sitio de mayor inestabilidad sobre todo en salinidad (CV_s : 30.3%) casi diez veces superior a la estación SECOS (3.4%) implicando un alto costo energético para *Mytilus chilensis* priorizando la regulación osmótica por sobre el crecimiento (Grenier et al., 2020). Estas compensaciones fisiológicas para hacer frente a las condiciones

ambientales repercuten negativamente en las tasas de crecimiento, rasgos reproductivos y la supervivencia del mitílido (Kinne et al., 1971; Dickinson et al., 2012; Sokolova et al., 2012; Duarte et al., 2018).

No obstante, la mayor variabilidad térmica y de salinidad en ACS1 y SECOS genera que estos sitios actúen como catalizador de eventos reproductivos, debido a que los cambios bruscos en estas dos variables son responsables de la liberación de gametos en *M. chilensis* (Avedaño et al, 2017), lo que puede contribuir a la mayor presencia de semillas en estas zonas de alta fluctuación ambiental. Por su parte, ASC10A representa el sitio más estable en temperatura (CV_t : 8.7%) y en pH (CV_p : 1.1%), lo que permite destinar más energía al crecimiento somático.

2.2. Análisis estadístico multivariado

El análisis multivariado *PERMANOVA*, expuesto en la *Tabla 7*, demuestra que existen diferencias significativas entre las tres estaciones, donde cada sitio tiene su propia huella ambiental estadísticamente única ($A \neq B \neq C$, $p < 0.001$ y $MS = 537.34$).

Variables	Prueba	df	MS	Pseudo-F	p-valor	post-hoc
Temperatura	<i>PERMANOVA</i>	2	97.24	119.70	<0.001	A > C > B
Salinidad	<i>PERMANOVA</i>	2	177.74	271.16	<0.001	C > B > A
pH	<i>PERMANOVA</i>	2	92.85	113.10	<0.001	A > C > B
Clorofila	<i>PERMANOVA</i>	2	169.52	252.44	<0.001	A > B > C
Multivariado	<i>PERMANOVA</i>	2	537.34	181.51	<0.001	R \neq C \neq M

Tabla 7. Resultados del análisis multivariado *PERMANOVA* y pruebas *post-hoc* para las variables ambientales entre los tres sistemas estudiados.

Nota. Siendo “A” (ACS1), “B” (ACS10A) y “C” (SECOS). El orden se basa en las medias de cada variable. Todas las comparaciones fueron significativas ($p < 0.001$).

En general, *PERMANOVA* por variable nos confirma que existen diferencias significativas entre las 3 estaciones en todas las variables. Además, los resultados del *post-hoc* permiten ordenar los sitios según la magnitud de sus medias; donde la temperatura ($p < 0.001$ y $MS = 97.24$) y el pH ($p < 0.001$ y $MS = 92.85$) muestran que ACS1 es el sitio más cálido y alcalino, siguiéndole la estación SECOS y finalmente en ACS10A. Por su parte, la salinidad presenta un patrón diferente, alcanzando mayores niveles en los sitios de mayores latitudes (SECOS y ACS10A; $C > B > A$, $p < 0.001$), mientras que la mayor disponibilidad de alimento disponible para *M. chilensis* (representado por la clorofila) se encuentra en ACS1 ($A > B > C$, $p < 0.001$), y además,

estas últimas variables mencionadas (salinidad y clorofila), son las que aportan más variabilidad a la distinción entre los sitios de monitoreo ($MS = 177.74$ y $MS = 169.52$ respectivamente).

A continuación, se presentan los resultados del Análisis de Componentes Principales (PCA) que nos muestra gráficamente las diferencias entre los sitios.

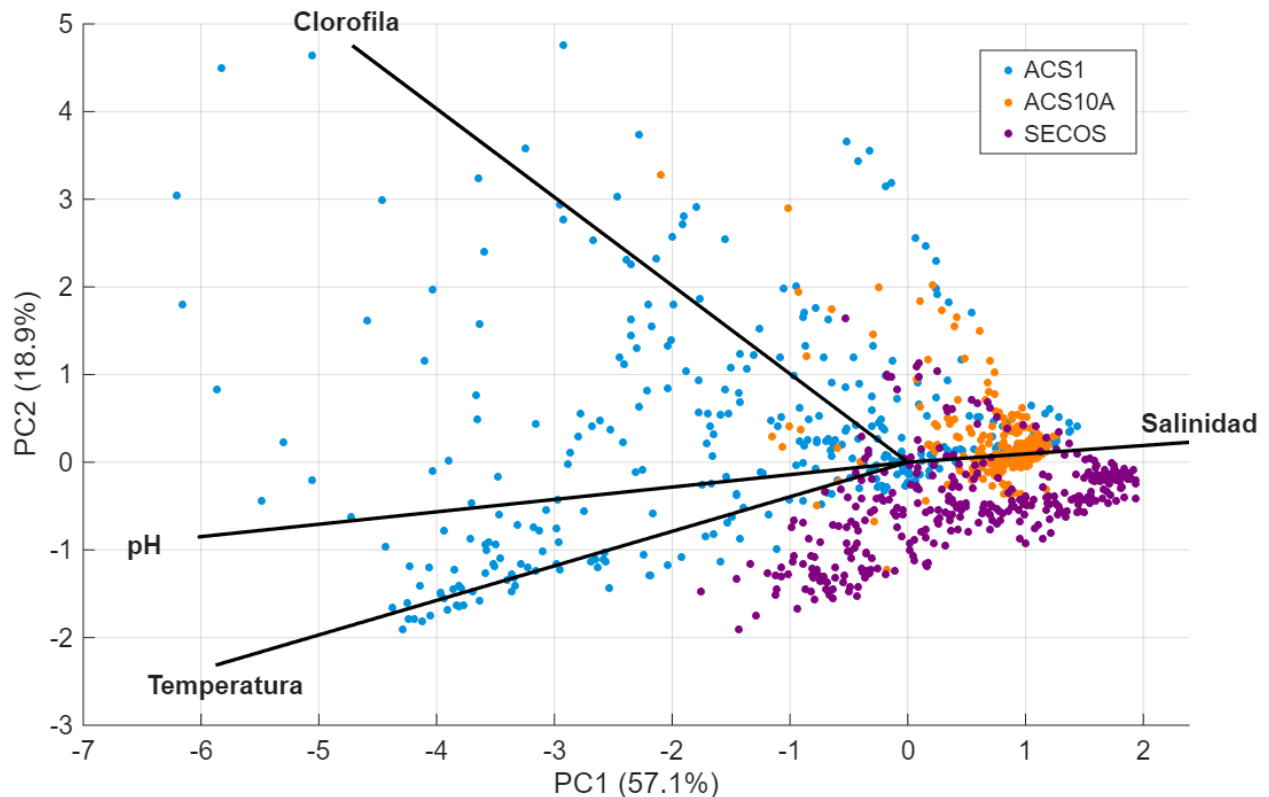


Figura 10. Ordenación mediante Análisis de Componentes Principales (PCA) de las variables ambientales en las 3 estaciones monitoreadas.

Nota. Realizado con apoyo de software *MATLAB*. El gráfico muestra la dispersión de las observaciones ambientales para los tres sitios de estudio, donde los vectores (líneas negras) indican la magnitud y dirección de la influencia de cada variable ambiental (temperatura, salinidad, pH y clorofila) sobre la distribución de los datos. El Componente Principal 1 (PC1), en el eje horizontal, explica el 57.1% de la varianza total y el Componente Principal 2 (PC2), en el eje vertical, explica el 18.9% de la varianza. Esta representación permite reducir la complejidad de los datos, visualizando en 2 dimensiones las variables que impulsan las diferencias entre sitios y evaluar interacciones simultáneamente.

El eje PC1 presenta una separación de las estaciones por su salinidad (derecha), temperatura y pH (izquierda), indicando el gradiente de diferenciación estuario-océano que explica más de la mitad de la variabilidad de los datos (57.1%), mientras que una menor parte (eje PC2 con

18.9%) describe la variabilidad biológica asociada a los cambios de clorofila. Si bien todas las variables presentan longitudes considerables, la salinidad nos demuestra el fuerte efecto del ingreso de agua dulce (bajas de salinidad) debido a la dirección opuesta de su vector comparado con la temperatura y pH. El PCA demuestra además que la variabilidad de la clorofila es independiente a las demás variables debido a la ortogonalidad de su vector y en particular, el eje PC2 tiende a distanciarse de las variables, sugiriendo que los peaks de alimento no dependen en su totalidad de las variables salinidad, temperatura y pH, sino de otros factores como ejemplo la luz solar o los nutrientes aportados por los ríos (Edding et al, 2006).

Los puntos de la estación ACS1 presentan una alta dispersión confirmando una vez más su alta variabilidad caracterizado por altas temperaturas, alto pH y peaks intensos de clorofila. ACS10A y SECOS presentan valores más agrupados y hacia el eje PC1, indicando un ambiente oceánico y con salinidades constantes. En particular, presenta totalmente una lejanía al vector clorofila, confirmando que es el sitio con menor disponibilidad de alimento (Media: 3.20 µg/L).

2.3. Acoplamiento de variables y procesos

Tras determinar que los 3 sitios presentan diferencias significativas en todas sus variables ambientales, a continuación, se profundiza en los mecanismos biogeoquímicos que caracterizan a dicha diferenciación, a través del análisis de coeficientes de correlación (r), permitiendo una comprensión e integración de los factores ambientales que modulan los distintos hábitats de *Mytilus chilensis*.

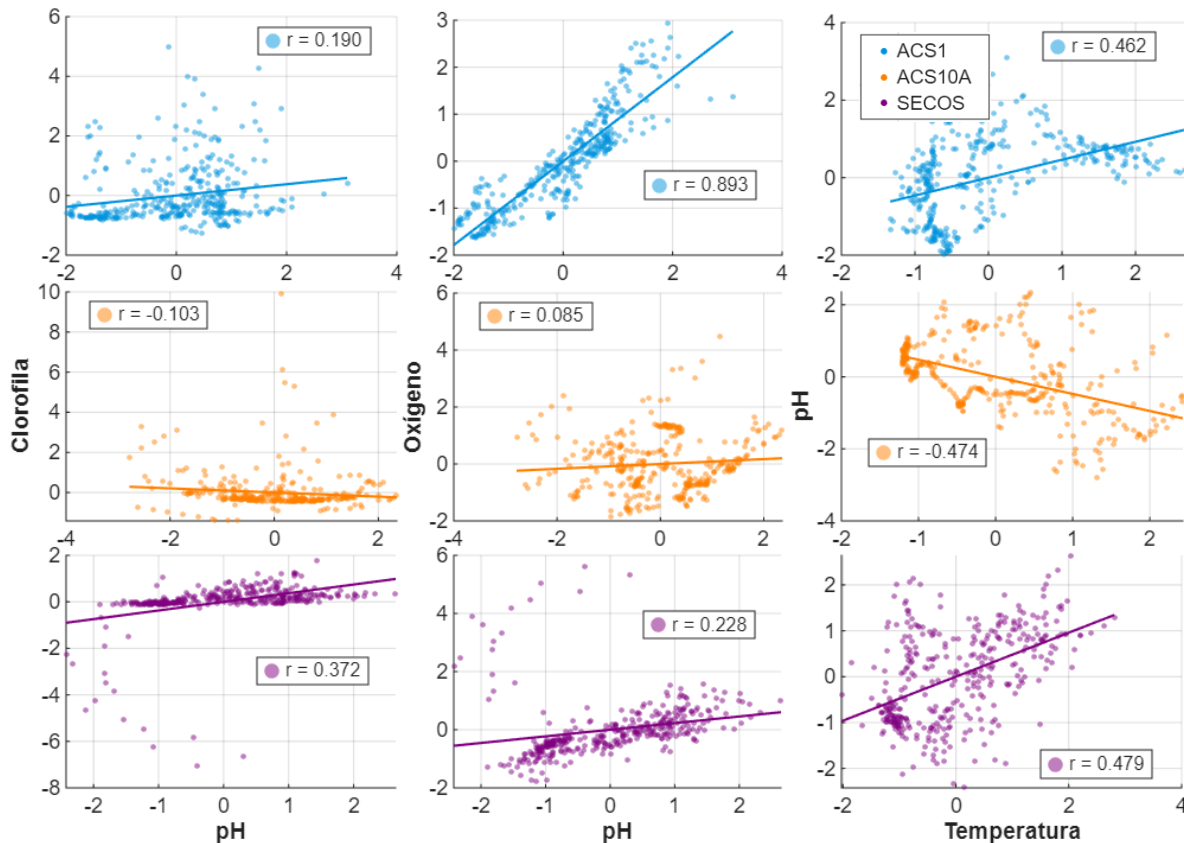


Figura 11. Gráficos de dispersión y correlación entre las principales variables oceanográficas para las estaciones ACS1, ACS10A y SECOS.

Nota. Realizado con apoyo de software *MATLAB*. Se relacionan pares de variables ambientales (clorofila, oxígeno, pH y temperatura) registradas durante el periodo de estudio. Las líneas rectas sobre los datos indican la tendencia lineal para cada cruce de variables y, además, se reporta el coeficiente de correlación de Pearson (r), cuantificando la fuerza y dirección de la relación lineal entre los parámetros evaluados. Esta representación permite visualizar el grado de acoplamiento de los procesos biogeoquímicos locales, facilitando la comprensión de cómo interactúan los factores ambientales que modulan el hábitat en cada sistema.

La fuerte correlación entre pH/ oxígeno ($r = 0.893$) y la relación moderada entre temperatura/pH ($r = 0.462$) presentes en ACS1 confirman que existe una fuerte actividad fotosintética (Masojidek et al., 2021), en donde CIEP (2007) indica que en el fiordo la biomasa autótrofa muestra una alta estacionalidad, siendo más abundante en estaciones productivas (primavera, verano y otoño) e incluso exhibe un gran potencial para exportar materia orgánica, lo que coincide con los resultados expuestos. En el caso contrario, ACS10A presenta un desacoplamiento entre pH/clorofila ($r = -0.103$) y pH/oxígeno ($r = 0.085$) (caso similar en SECOS) en donde la química del agua no está controlada por la fotosíntesis, sino

probablemente por procesos físicos como la mezcla de aguas dulces y oceánicas, o directamente la intrusión de aguas profundas (Caceres et al., 2003; Sievers, 2008; Silva and Valdenegro, 2008), donde además, la relación inversa entre temperatura/pH sugiere procesos de acidificación en la zona costera o “blooms” algales que puedan estar presentes en el sitio (NOAA, 2025).

Los eventos de FAN (Floración de Algas Nocivas) o mareas rojas se han presentado de forma cíclica durante las últimas cuatro décadas en Chiloé, donde el evento de marea roja ocurrido en 2016 causó fuerte daño al ecosistema marino y en otras localidades de la región de Los Lagos (Herrera, 2021), además de pérdidas económicas de la industria del salmón, de la pesca artesanal (Buschmann et al., 2016). Estos eventos implican un conflicto directo con la industrialización de la acuicultura por el aumento de acidificación en la zona afectada y la facilitación de propagación de microalgas (Vázquez, 2025), que contienen toxinas y su bioacumulación en los tejidos blandos de organismos filtradores como los mitílidos, provoca que alcancen concentraciones letales para el hombre y otros organismos vertebrados, e incluso, la normativa sanitaria actual impide el traslado de colectores de semilla desde lugares donde se ha detectado la presencia de FAN (Leiva et al., 2007). Sin embargo, la acidificación en zonas costeras no es solo impulsado por patrones de CO₂ o “blooms” algales; si bien la relación CO₂/pH puede ser un indicador clave, existe una interacción con factores locales como la descarga de los ríos, cargas de nutrientes y actividades humanas como el aumento de residuos, y cambios en el uso de suelo (Vargas y Gelcich, 2024). Esto sugiere que para este estudio, en las estaciones ACS10A y SECOS podría existir una acidificación costera, pero ésta sería solo una parte del total de factores involucrados sugiriendo una problemática más de fondo.

Por su parte, la extrema variabilidad de la clorofila en la estación SECOS (CV = 96.5%) sumada a los niveles medios más bajos del estudio (3.20 µg/L) y periodos de escasez casi total (0.2 µg/L), definen el sitio como el de más baja disponibilidad de alimento, pudiendo incluso indicar un riesgo para la industria mitilicultora. Diversos monitoreos realizados por el IFOP (2025) en la X región, respaldan esta sugerencia, donde se indica que en 2018 se registró un promedio de 7,7 µg/L y los valores descendieron sostenidamente hasta alcanzar una media de 2,87 µg/L en 2023, corroborando la disminución de la oferta alimenticia y lo posiciona como un posible factor limitante crítico para el cultivo en las zonas cercanas a la estación y la caleta El Manzano.

En síntesis, la caracterización oceanográfica de los sitios de estudio revela un marcado gradiente estuarino-oceánico en donde ACS1 destaca como el sistema más variable y

productivo, impulsado por el aporte de nutrientes del Río Puelo que se refleja en una intensa actividad fotosintética y los promedios más altos de pH y clorofila. En cambio, ACS10A y SECOS presentan condiciones oceánicas con mayor salinidad y estabilidad, aunque con una productividad (disponibilidad de alimento) significativamente menor. Mientras que en ACS10A el sistema está dominado por procesos físicos de mezcla de mezcla de agua dulce/salina y la posible acción de floraciones algales nocivas (FAN), en SECOS se caracteriza como un sitio de escasez alimenticia, registrando los niveles de clorofila más bajos y variables de todo el estudio.

3. Relacionar la variabilidad oceanográfica local y los umbrales fisiológicos para un crecimiento óptimo, como herramienta de apoyo a la gestión productiva de la industria mitilicultora y como una medida de adaptación al cambio climático.

3.1. Determinación de umbrales fisiológicos

Para evaluar la idoneidad del hábitat, se determinaron los umbrales fisiológicos óptimos y de riesgo para *Mytilus chilensis* frente a las cuatro variables ambientales críticas. La **Tabla 8** resume estos límites de tolerancia, contrastando los valores obtenidos mediante la literatura científica con los definidos empíricamente por el panel de expertos.

	Revisión Bibliográfica			Expertos		
	Condición óptima	Condición de riesgo		Condición óptima	Condición de riesgo	
Temperatura (°C)	12 - 18	<12	>18	10 - 18.25	1.5 – 5.7	23.6 - 30
Salinidad (PSU)	25 - 33.6	<25	>33.6	22.95 – 33.7	2 – 16.4	-
pH	7.82 – 8.1	<7.82	>8.1	7.7 – 8.2	7 - 7.5	-
Clorofila (µg/L)		-		5.35 – 19.45	0 - 1	30 - 35

Tabla 8. Umbrales fisiológicos óptimos y de riesgo para *Mytilus chilensis* establecidos mediante revisión bibliográfica y panel de expertos.

Nota. Basado en estudios fisiológicos reportados por diversos autores (ver detalle en Anexo 1). Se contrastan los rangos de tolerancia fisiológica de la especie frente a las cuatro variables ambientales críticas previamente establecidas (temperatura, salinidad, pH y clorofila). Se detallan los valores correspondientes a la "Condición óptima", que promueve el máximo rendimiento metabólico y crecimiento, y a la "Condición de riesgo", que induce estrés fisiológico o inhibición. Estos límites numéricos fueron determinados mediante dos enfoques metodológicos complementarios: una revisión sistemática de literatura basada en estudios experimentales, y el consenso de un panel de expertos en biología de mitílidos desarrollado en el marco del proyecto "Semáforo Ambiental para la mitilicultura" (SECOS). Esta comparación permite evidenciar las variaciones y diferencias entre los límites estrictos obtenidos en condiciones de laboratorio frente a la tolerancia observada de forma empírica en el medio natural.

Al contrastar los umbrales fisiológicos, se observa que el juicio de expertos amplía el rango de tolerancia térmica y salina en comparación con la revisión bibliográfica. Esta discrepancia puede atribuirse a diferencias metodológicas en la definición de los umbrales, en donde el grupo de expertos categorizó la respuesta biológica en cuatro niveles: (1) riesgo de mortalidad, (2)

límite no definido, (3) alto impacto y (4) condición óptima, mientras que la revisión bibliográfica se limitó a dos rangos más estrictos, definidos a partir de los puntos donde las tasas fisiológicas alcanzan su máximo rendimiento o sufren una supresión, explicando por qué resultan más estrechos los umbrales en comparación con los obtenidos mediante el conocimiento experto.

A pesar del valor de los umbrales establecidos, es necesario destacar la diferencia en la disponibilidad de antecedentes fisiológicos para *M. chilensis*; mientras que para el pH existe una base robusta de información científica, variables como el oxígeno disuelto presentan vacíos de información importantes, donde se habría requerido una extrapolación de los datos hacia especies similares como *M. galloprovincialis*, lo cual no fue necesario debido a que en los sitios de estudios se presentan aguas bien oxigenadas (León-Muñoz et al., 2013 ; Yévenes et al., 2016) por lo que no se consideró el oxígeno en la gran mayoría de los análisis realizados, pero sus efectos sí fueron definidos, lo que bastó para identificar la alta brecha de investigaciones fisiológicas que existe para esta variable y su conexión con la mitilicultura. Así mismo, la definición de umbrales óptimos para clorofila mostró limitaciones importantes por la baja disponibilidad de estudios experimentales fisiológicos y la falta de consenso en las unidades de medida reportadas, lo que dificultó su comparación directa con los estándares de monitoreo actuales. Estas brechas subrayan la necesidad urgente de profundizar en la investigación fisiológica local, permitiendo realizar análisis basados desde parámetros validados directamente para la oceanografía del sur de Chile, en vez de realizar inferencias basadas en especies similares.

	Revisión Bibliográfica + expertos		
	Condición óptima	Condición de riesgo	
Temperatura (°C)	11 – 18.13	<11	>18.13
Salinidad (PSU)	23.98 – 33.7	<23.98	>33.7
pH	7.8 – 8.2	<7.8	>8.2
Clorofila (µg/L)	5.35 – 19.45	<5.35	>19.45

Tabla 9. Rangos de idoneidad ambiental y de riesgo de inhibición para *Mytilus chilensis* integrando revisión bibliográfica y consenso de expertos.

Nota. Basado en estudios fisiológicos reportados por diversos autores (ver detalle en Anexo 1). Los valores presentados corresponden al promedio obtenido entre los datos recopilados en la revisión bibliográfica y los criterios proporcionados por el panel de expertos consultados.

Tras incorporar los umbrales definidos por revisión bibliográfica y por el grupo de expertos, se obtuvieron los intervalos donde el metabolismo funciona con máxima eficiencia (color verde) y donde se induce el estrés fisiológico (color rojo), resumidos a continuación:

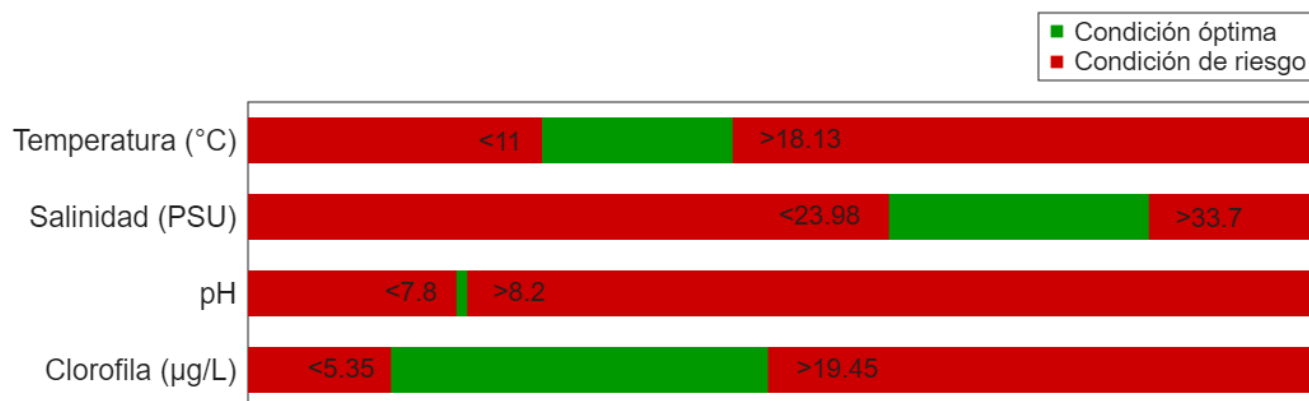


Figura 12. Representación visual de los rangos de tolerancia fisiológica y de riesgo de inhibición para *Mytilus chilensis*.

Nota. Realizado con apoyo de software *MATLAB*. Se ilustran los intervalos de idoneidad ambiental para las variables críticas evaluadas, donde las franjas de color verde delimitan la "Condición óptima" y las de color rojo indican "Condición de riesgo". Los valores numéricos señalados en las transiciones de color corresponden a los límites de tolerancia integrados previamente en este estudio (véase *Tabla 8*).

3.2. Variabilidad oceanográfica local

Los resultados expuestos en la *Figura 12* representan la dinámica temporal de condición óptima y de riesgo fisiológico para *M. chilensis*. En particular, de los 3 sitios solo en la estación ACS1 se registraron valores sobre el umbral óptimo térmico, por periodos cortos y valores no tan distantes del umbral, lo que podría favorecer la ocurrencia de desoves debido a los cambios drásticos de temperatura que aumentan los asentamientos (Díaz et al., 2018; 2022) explicando la mayor oferta de semillas en el fiordo Reloncaví. En las bajadas de temperatura, la estación ACS10A presentó el periodo más extenso (7 meses) por debajo del umbral fisiológico, principalmente por las diferencias latitudinales entre sitios. Las bajas temperaturas en invierno podrían implicar un menor crecimiento y asentamiento (Díaz et al., 2022; Lagos et al., 2012a; 2012b), sin embargo, a temperaturas bajas el mitílido aumenta tejido gonadal y la gametogénesis como estrategia de compensación al ambiente hostil (Oyarzún et al., 2011), siendo beneficioso para la producción. Por lo que, en definitiva, los efectos de estos periodos de disminución/aumento térmico son de muy bajo impacto debido principalmente a su poca lejanía del umbral óptimo.

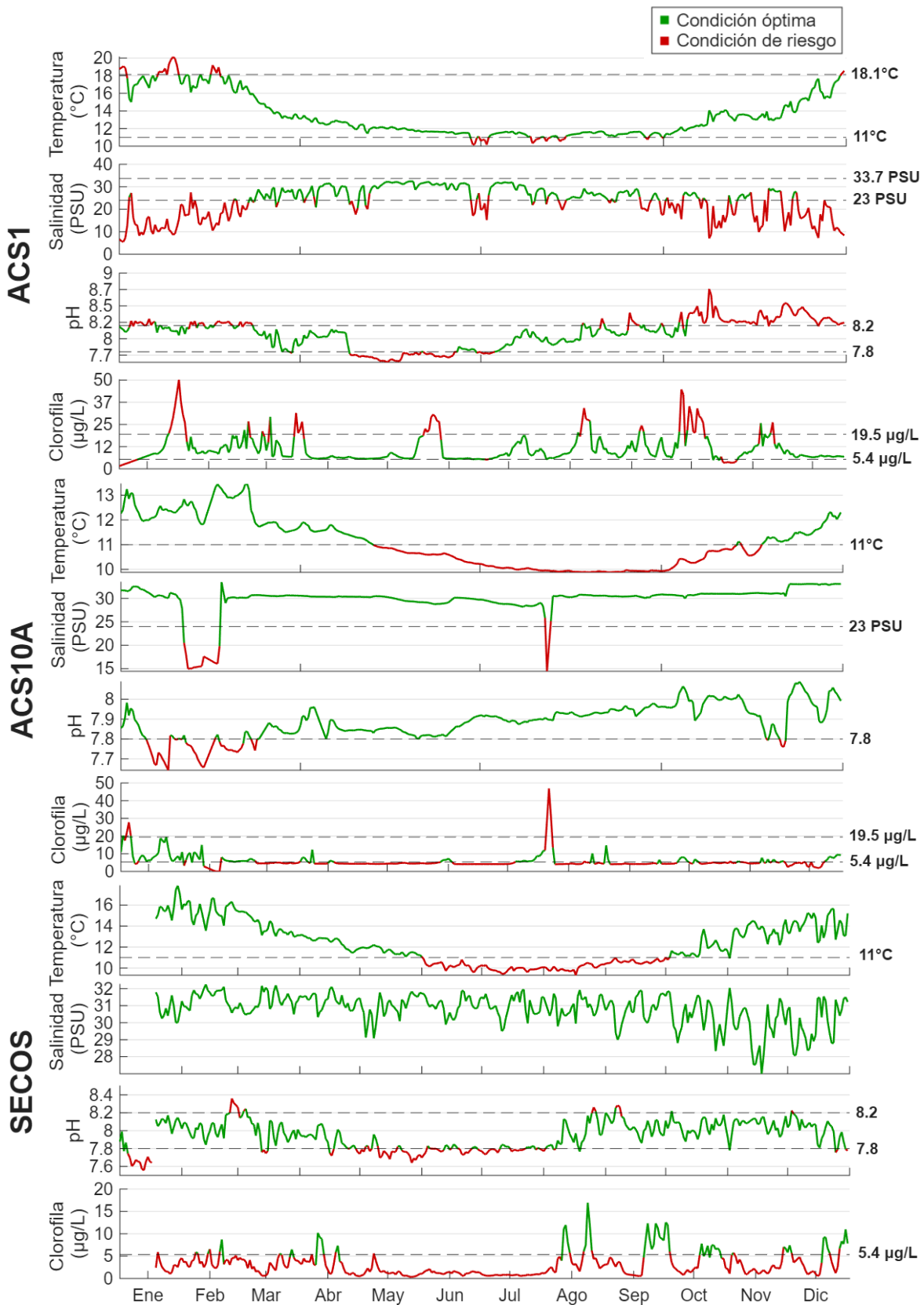


Figura 13. Series de tiempo oceanográficas divididas por condición óptima y de riesgo fisiológico para las estaciones ACS1, ACS10A y SECOS.

Nota. Realizado con apoyo de software *MATLAB*. Se presenta la variabilidad anual de la temperatura de temperatura (°C), salinidad (PSU), pH y clorofila/fluorescencia (µg/L) registradas durante el periodo de estudio. Las series de tiempo se encuentran diferenciadas por color según los umbrales de idoneidad para la especie: los segmentos en color verde representan los periodos en los que el parámetro ambiental se sitúa dentro de la “Condición óptima” para el desarrollo y crecimiento, mientras que los segmentos en color rojo representan los periodos en que la variable se encuentra en “Condición de riesgo” o estrés fisiológico. Se incluyen, además, los valores críticos (máximos y mínimos) que delimitan dichos rangos de tolerancia: temperatura (<11°C y >18.13°C), salinidad (<23 PSU y >33.7), pH (<7.8 y >8.2) y clorofila (<5.35 µg/L y >19.45 µg/L). Esta visualización permite identificar la frecuencia, duración y estacionalidad de los periodos de riesgo o vulnerabilidad fisiológica en el ciclo de cultivo dentro de cada área de estudio.

Particularmente en ACS1, se presentan valores constantes bajo el umbral óptimo **salino** establecido, especialmente durante eventos de invierno y primavera, donde presenta un 38% de riesgo presentar bajas salinidades en el periodo anual (según lo expuesto en *Tabla 10*), sometiendo a la especie a un gasto energético permanente para osmorregulación (Grenier et al., 2020). El riesgo actualmente es bajo, pero según las proyecciones futuras, se espera que el cambio climático promueva la reducción de los niveles de salinidad en las aguas superficiales debido al derretimiento de los hielos y una creciente frecuencia de tormentas relacionadas con los fenómenos del cambio climático (Groisman et al., 1999 ; IPCC, 2014), por lo que el riesgo de que se presenten periodos de muy baja salinidad está en constante incremento influyendo directamente en la idoneidad del hábitat, su distribución espacial, y la biomineralización de la concha (Grenier et al., 2020; Molinet et al, 2015) e incluso, podría provocar un desplazamiento de los sitios de cultivo a latitudes mayores (Torres et al., 2025) que, en consecuencia, desencadenará una menor productividad acuicultura.

Variables	% de riesgo		
	ACS1	ACS10A	SECOS
Salinidad	38.17%	4.17%	0.08%
pH	17.98%	12.77%	25.81%
Clorofila	3.8%	74.87%	81.82%
Temperatura	6.84%	0%	0.32%

Tabla 10. Porcentajes de exposición a riesgo ambiental considerando proyecciones futuras según variable para cada estación de estudio.

Nota. Se presentan los porcentajes de riesgo considerando las proyecciones del cambio climático, es decir, periodos sobre el umbral establecido para temperatura, y los periodos bajo el umbral establecido para clorofila, pH y salinidad.

La acidificación costera, en los 3 sitios presentó periodos de riesgos de baja-muy baja categoría, siendo el mayor riesgo en la estación SECOS con 26% aproximadamente. Si bien los periodos de bajadas de pH no tienen una alta duración, en la zona (Caleta El Manzano) el pH ha descendido desde 8.05 en 2018 hasta 7.71 en 2025, incluso alcanzando valores mínimos de 7.5 IFOP (2025). Esto combinado con las proyecciones futuras de acidificación del océano (incluyendo zonas costeras) que indican una intensificación debido al aumento creciente del CO₂ atmosférico (NOAA, 2025), se espera un aumento rápido de los periodos de riesgo, comprometiendo directamente el crecimiento y la calcificación de la concha de la *M. chilensis* y de los organismos calcificantes (Navarro et al., 2013; Clements y Hunt, 2015; Lardies et al., 2017).

Las estaciones ACS10A y SECOS se mantienen generalmente dentro de los límites salinos establecidos no presentando periodos de riesgo o solo en periodos puntuales, debido al constante aporte de aguas salinas que ingresan al mar interior de Chiloé (Artal, 2019), por lo que las bajadas de salinidad no implican un riesgo. Sin embargo, estos dos sitios son los mismos donde la clorofila permanece bajo el umbral mínimo de requerimiento alimenticio durante gran parte del ciclo anual (siendo aún más crítico en estación SECOS), representando un muy alto porcentaje de riesgo en disponibilidad de alimento (82%) con los niveles medios más bajos del estudio (3.20 µg/L) y periodos de escasez casi total (0.2 µg/L). Estos resultados indican que, aunque el ambiente es ideal para la calcificación de la concha (bajo riesgo de salinidad baja), el mitílido enfrenta una constante falta de alimento, dependiendo casi exclusivamente de pulsos esporádicos de fitoplancton en primavera/verano o de otras partículas suspendidas en el agua, como materia orgánica particulada (Cranford et al., 2007).

Los periodos de escasez casi totales de clorofila se pueden asociar a una sobrecarga en la capacidad de cultivo ejercido por la acuicultura en la zona, dada la alta densidad de centros de cultivo que presiona el sistema por una intensa alimentación por las distintas especies. CIEP (2021) define la capacidad de carga ecológica como el límite de cultivo que se puede mantener sin causar cambios inaceptables en el ecosistema, donde el límite es alcanzado cuando el consumo de fitoplancton es tan alto que altera los ciclos de los nutrientes. La capacidad de carga no es un número estático, sino que depende de la renovación de agua: cuando no es constante, el agotamiento es parejo en todo el periodo, pero cuando existe un dinamismo

regulado por las mareas e ingreso de agua dulce, como es el mar interior de Chiloé (Artal, O., 2019; Sievers, 2008), se generan pulsos repentinos de nutrientes (o en este caso de clorofila) seguido de periodos de agotamiento rápido debido a la alta densidad de cultivo. Este comportamiento se observa en las series de tiempo de las estaciones ACS10A y SECOS, por lo que se sugiere que estos sitios presenten limitaciones por disponibilidad de alimento, pudiendo incrementarse con el avance del cambio climático.

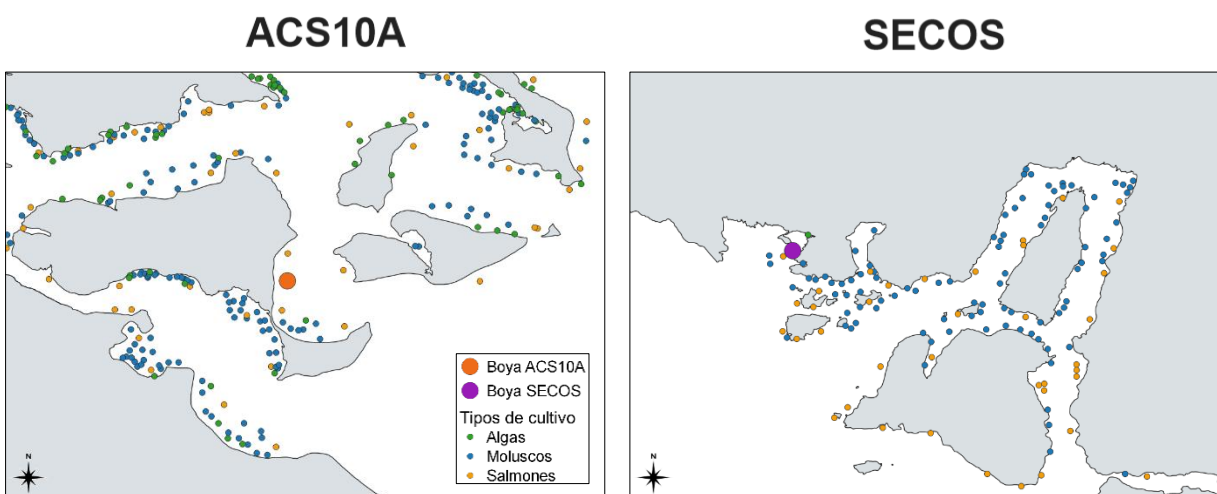


Figura 14. Mapas de distribución espacial y densidad de las concesiones de acuicultura en los sectores de las estaciones ACS10A y SECOS.

Nota. Realizado con apoyo de software QGIS.

Según los antecedentes de la zona, los mitilicultores encuestados por el IFOP en la zona sur austral de Chile, mencionan en diversas encuestas realizadas desde el año 2019 al 2022 como causa número 1 del desprendimiento de semillas el exceso de captación, siendo justamente los encuestados mitilicultores de las zonas de Reloncaví, Hualaihué, y Chiloé. Además, en Castro (Chiloé) se registró una drástica disminución en la colecta de semillas, donde la colecta de la temporada 2021-2022 se redujo en un 99% respecto de la temporada 2020-2021 (Segura, 2023). Sumado a ello, se ha sugerido además que particularmente para Hualaihué y Castro, existe mayor presencia de otras especies de mitílidos comparados con los colectores provenientes del fiordo Reloncaví (Segura et al., 2022), generando mayor competencia entre las especies por el sustrato. En este sentido, el fiordo Reloncaví parece representar la mejor área de captación en términos de la pureza (relativa a otras especies) de la semilla.

Estos resultados sugieren que la posible acidificación costera, la creciente y constante extracción de las especies en las zonas, la disminución constante de alimento (IFOP, 2025) y la interacción con otros organismos que compiten por sustrato, son la causa de la disminución

en la colecta en Chiloé y la evidencia de una posible sobrecarga en la capacidad de cultivo en las zonas cercanas a la estación ACS10A (Chiloé), con un efecto similar (y en mayor medida) en las zonas cercanas a la estación SECOS (El Manzano).

Cabe mencionar que la mayoría de información disponible en la literatura realizan estadísticas e informes sobre acuicultura dividida por región, como es el caso de SERNAPESCA, SUBPESCA y el IFOP. Existe una alta brecha sobre información estadística dividida por las principales zonas de cultivo de la región de Los Lagos (como por ejemplo Reloncaví, Chiloé centro, Chiloé Sur, Hualaihué, Puerto Montt, etc.) que permita realizar una caracterización y evaluación más profunda sobre el estado de estas zonas, así como la determinación por completo de la sugerencia de una sobrecarga en la capacidad de cultivo. Además, los bivalvos se alimentan de diversas fuentes de alimento en el medio debido a su capacidad de filtración, como por ejemplo material orgánico resultante de la descomposición o “detritus”, y de otras partículas orgánicas suspendidas (Bayne, 1993; Cranford et al., 2007), por lo que no dependen solamente por los registros obtenidos para clorofila. Sumado a ello, el efecto de la circulación oceánica y las corrientes marinas generan un flujo de larvas en el mar, donde pueden provenir de los bancos naturales que provienen de lugares más lejanos y son desplazadas por corrientes a los lugares donde se asientan finalmente (Oyarzún et al., 2011), por lo que todas estas razones expuestas podrían influir en las estadísticas de cada zona.

3.2. Riesgo por etapas de cultivo

La alta concentración de larvas de *Mytilus chilensis* en la X región, en específico Hualaihué y Cochamó (Leiva et al., 2007), es debido a que la pérdida de larvas causado por el transporte de las corrientes marinas es menos probable en mares interiores o estuarios con corrientes contrarias por mareas o vientos, que aumentan los tiempos de residencia (Sponaugle et al., 2002) y en particular en la capa límite costera (zona donde se debilitan las corrientes por fricción; Largier, 2003) fomenta una alta retención larval, por lo que en los sitios ACS1 y SECOS la principal etapa de cultivo realizada es captación de semillas. Parte fundamental de esta etapa es el desove, que requiere de alta calidad y oferta de alimento para convertirlo en energía, siendo este el factor más importante para su éxito (Gosling, 2021), que suele realizarse en los periodos de mayor disponibilidad de alimento (de primavera a otoño) y cambios bruscos de temperatura, por su efecto inductor de desoves (Avendaño et al., 2011; Diaz et al., 2018; Lagos et al., 2012a; 2012b), convirtiéndose en las variables más críticas para el inicio de los desoves y en la cantidad de larvas que finalmente lleguen a asentarse.

Bajo esta justificación, en la *Tabla 11* los niveles de riesgo obtenidos para pH, clorofila y temperatura en la estación ACS1 no representan una amenaza crítica inminente ni para el desove ni para la de captación de semillas. Aunque el sitio presenta una alta variabilidad ambiental, se asegura el sustento energético, térmico y de alcalinidad necesario para las larvas. Sin embargo, la salinidad presenta porcentajes de riesgo medios (casi altos, aproximadamente 59%) tanto en el periodo de desoves como en los de captación. Ya que el fiordo Reloncaví representa el 60% de la oferta total de semillas demandada por la mitilicultura chilena (Segura et al., 2022), su riesgo en salinidad se convierte en un punto crucial establecer nuevas estrategias de gestión e incorporar monitoreos preventivos en la zona ya que, si compromete las larvas, compromete críticamente todo el proceso de cultivo.

En la estación SECOS, el porcentaje de riesgo para clorofila se encuentra actualmente bajo, pero se sugiere que la densidad de cultivo actual está presionando la capacidad de carga del sistema, agotando la biomasa fitoplanctónica mediante un intenso pastoreo. No se presenta un riesgo crítico, pero si uno potencial hacia el futuro, lo que pone en riesgo también la producción industrial y exportaciones de este molusco debido a que el sitio es el fuerte banco semillero (Soto et al., 2020), por tanto, es prioritario gestionar nuevas estrategias de densidad de siembra y realizar estudios de renovación de aguas en esta localidad para prevenir el colapso en la industria del cultivo.

La situación en la estación SECOS y el alto porcentaje de riesgo para la clorofila, sugiere que la densidad de cultivo actual está presionando la capacidad de carga del sistema, agotando la biomasa fitoplanctónica mediante un intenso pastoreo, siendo este factor uno de los 3 factores ambientales más determinantes para la captación de semillas. Estos datos evidencian el riesgo de la producción industrial y exportaciones de este molusco debido a que el sitio es un fuerte banco semillero (Soto et al., 2020) y por tanto, es prioritario gestionar nuevas estrategias de densidad de siembra y realizar estudios de renovación de aguas en esta localidad para prevenir el colapso en la industria del cultivo.

Variables	Desove			Captación			Engorda		
	ACS1	ACS10A	SECOS	ACS1	ACS10A	SECOS	ACS1	ACS10A	SECOS
Salinidad	59.51%	8.03%	12.31%	58.31%	21.81%	10.81%	38.17%	4.17%	0.08%
pH	0.64%	20.59%	13.22%	8.70%	35.34%	16.02%	17.98%	12.77%	25.81%
Clorofila	6.53%	71.79%	85.57%	18.73%	84.08%	88.63%	3.8%	74.87%	81.82%
Temperatura	13.74%	0%	0.67%	11.79%	0%	0.57%	6.84%	0%	0.32%

Tabla 11. Frecuencia y contabilización de eventos de riesgo ambiental categorizados según etapas del ciclo productivo de *Mytilus Chilensis*.

Nota. Se considera periodo de desove entre septiembre y febrero (primavera y verano), periodo de captación de semillas de octubre a abril y periodo de engorda durante todo el año (12-14 meses después de adherirse al cultivo) (Chaparro & Winter, 1983; Feller, 2011 y FAO, 2021).

Según la jerarquización expuesta en la *Figura 8*, se indica que las variables que generan mayor impacto negativo sobre el cultivo son los bajos niveles de pH y salinidad, por sus efectos en la formación de conchas y en el crecimiento (Duarte et al., 2018; Grenier et al., 2020; Orr et al., 2005). De igual manera, una baja concentración de sestón influye en la ingestión total y biodeposición de ésta misma (López, J. 2013), donde las tres variables (salinidad, pH y clorofila), afectarían directamente la etapa de engorda. Por su parte, en las zonas cercanas a la estación ACS10A (Chiloé) se realiza precisamente la etapa de engorda del cultivo, debido a que estos sitios responden a factores biológicos y económicos estratégicos; las corrientes estuarinas ayudan a la re-suspensión de partículas orgánicas, y además, que no esté expuesta a rompientes ni corrientes débiles (condiciones de canales y fiordos de la X Región), proporcionando numerosas zonas protegidas de oleaje que permiten la instalación de colectores, donde los principales lugares de cultivo son Calbuco, Dalcahue, Puqueldón, Chonchi y Quellón (Feller, 2011).

La caracterización de variabilidad ambiental realizada para la estación ACS10A, las condiciones presentan una alta aptitud para la etapa de engorda, sustentada en porcentajes de riesgo bajos para salinidad y pH, que favorece los procesos de biomineralización y formación de la concha, reduciendo el estrés osmótico observado en otros sistemas. No obstante, esta “ventaja” se ve condicionada por un riesgo alto en la disponibilidad de clorofila; si bien en este sitio la oferta alimentaria no es el factor más determinante como para la captación (como ocurre en la estación ACS1, fiordo Reloncaví), este déficit de alimento representa un problema severo para el crecimiento de los individuos (Jahnsen-Guzmán et al., 2021), lo que exige una gestión productiva en cuanto a la densidad de cultivo para generar el funcionamiento óptimo de la producción del cultivo.

En síntesis, el sistema presentado en ASC1 actúa como semillero convirtiéndose en el sitio más importante para la captación de semillas debido a su alta retención larval, donde se enfrentan una amenaza significativa por presentar largos periodos de bajas salinidades (59% de riesgo), factor que puede comprometer la mayoría de la oferta de la semilla nacional. Por otro lado, la etapa de engorda realizada en zonas como Chiloé (estación ACS10A) se beneficia de una mayor estabilidad de pH y salinidad, favoreciendo la biomineralización (Grenier et al., 2020), pero se ve críticamente limitada por la baja disponibilidad de clorofila (72-84% de riesgo).

Este déficit alimentario, presente también en la estación SECOS, sugiriendo que la industria podría estar alcanzando el límite de la capacidad de carga del sistema, lo que revela la importancia de transitar hacia una gestión productiva basada en el control de densidades de siembra y el monitoreo preventivo de estresores ambientales para evitar el colapso de la biomasa fitoplanctónica y asegurar la sostenibilidad de las exportaciones.

3.4. Propuesta de manejo

Los resultados indican que la mitilicultura en el sur de Chile no debe gestionarse bajo un modelo único, donde los sitios de muestreo presentan diferencias significativas entre sí, caracterizándose cada uno por su propia huella ambiental, variabilidad y mecanismos biogeoquímicos, imponiendo cada uno desafíos fisiológicos distintos. La definición y gestión de las estrategias para adaptación al cambio climático y/o la variabilidad ambiental constituye de diversos actores públicos y privados, e involucran una diversidad de grupos de interés; como el sector productivo, sociedad civil, organismos públicos, distintos niveles de gobierno, entre otros.

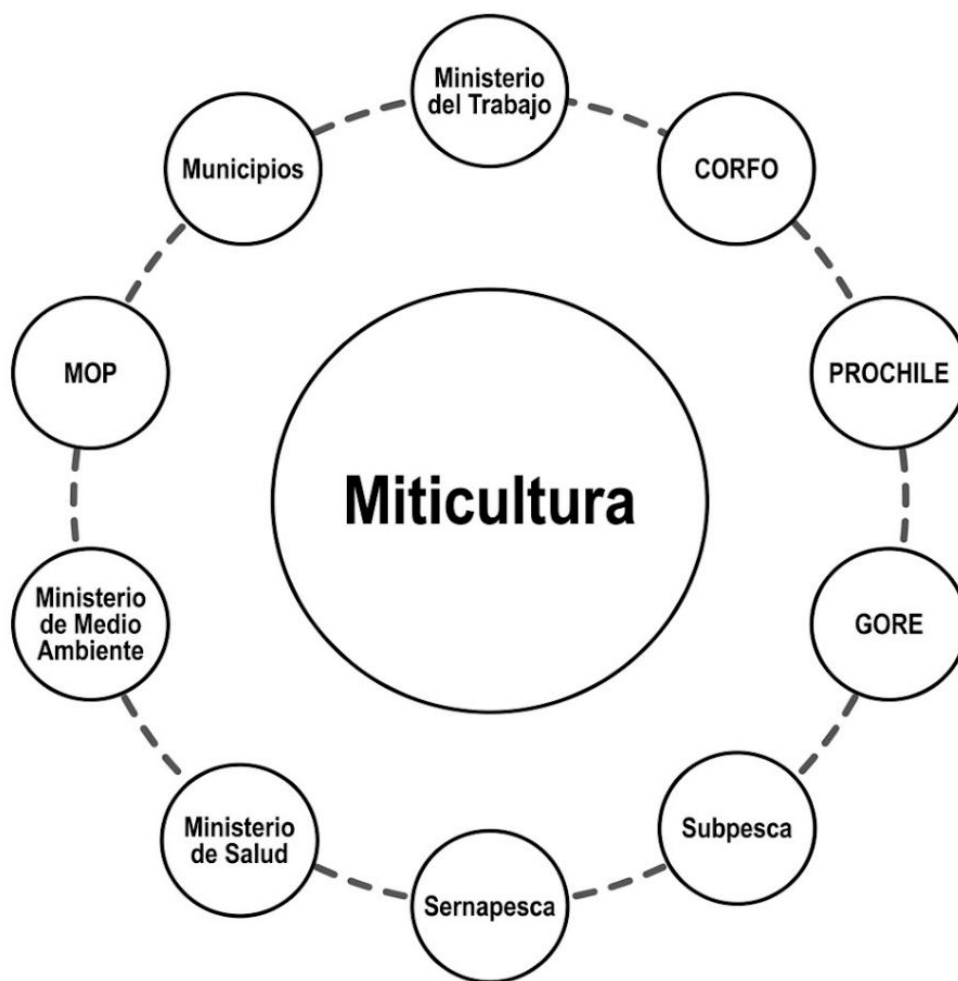


Figura 15. Actores públicos claves vinculantes al sector miticultor.

Nota. Realizado con información extraída de SUBPESCA, 2024.

Los arreglos realizados integrando a los diversos actores involucrados, logran definir colectivamente soluciones a un problema (Emerson y Nabatchi, 2015; Aguilar, 2007), que permite iniciar una negociación entre las diferentes partes interesadas sobre las maneras de funcionar y sobre los proyectos futuros, que en particular para la miticultura, permite asegurar la sustentabilidad ecológica y económica, donde esta industria (y la acuicultura en general) depende cada vez más de la colaboración y la definición de objetivos planteados a largo plazo, generando nuevas normas y enfoques para orientar el cultivo desde una perspectiva sustentable, donde el cambio climático complejiza este desafío.

Para afrontar los impactos del cambio climático a través de estrategias de adaptación, es necesario llevar a cabo un análisis de vulnerabilidad de los sistemas naturales ante eventos climáticos, reducir el esfuerzo pesquero, institucionalizar amenazas, establecer planes de

manejo y planificaciones a largo plazo considerando las proyecciones ambientales y reducir la incertidumbre asociada al cambio climático mediante actividades de monitoreo e investigación (FAO, 2021). Entre estas acciones, el monitoreo emerge como una herramienta clave para la gestión de riesgos identificados en los tres sitios evaluados. Esto cobra especial relevancia ante la brecha histórica de datos y la escasez de series temporales extensas en la Región de Los Lagos, donde existe una intensificación de los cultivos de especies marinas. Contar con registros continuos no solo permite profundizar en la caracterización de estos sistemas, sino también comprender los procesos locales que modulan su comportamiento, constituyéndose en el pilar fundamental para el diseño de estrategias de gestión, para reducir la vulnerabilidad y actúan como indicadores de capacidad de adaptación. El monitoreo es imprescindible para detectar y atribuir efectos del cambio climático sobre la mitilicultura, que, si se fortalece, resulta en una investigación estratégica favoreciendo la toma de decisiones públicas y privadas.

Bajo este contexto, como etapa final del estudio, se propone que los resultados obtenidos sirvan como aporte para estrategias de transferencia de la información ya en curso. Específicamente, se proyecta que los umbrales ambientales definidos puedan vincularse con la plataforma web “Semáforo Ambiental”, herramienta implementada (y en continuo desarrollo) por el Instituto Milenio en Socio-ecología Costera (SECOS) que procesa datos continuos de temperatura, salinidad, clorofila y pH provenientes de boyas oceanográficas, dirigido hacia pescadores y mitilicultores artesanales que participan en el desarrollo de la industria. Al integrar los hallazgos de este estudio con dicho sistema, se busca facilitar la consulta rápida fortaleciendo su adaptación al cambio climático, mediante la representación mediante códigos de colores para alertar sobre condiciones óptimas o de riesgo.

- Rango Óptimo (Verde): Valores que promueven el crecimiento máximo y minimizan el estrés metabólico.
- Rango de Riesgo (Rojo): Valores que comprometen la supervivencia de los ejemplares o indican condiciones letales.



Figura 16. Prototipo de plataforma “Semáforo Ambiental” para el monitoreo de variables oceanográficas.

Fuente: SECOS, 2025.

La plataforma está pensada para ofrecer una visualización simplificada, donde el usuario selecciona su área de cultivo y recibe un diagnóstico inmediato del estado de las variables críticas, facilitando la toma de decisiones preventivas ante eventos ambientales extremos.

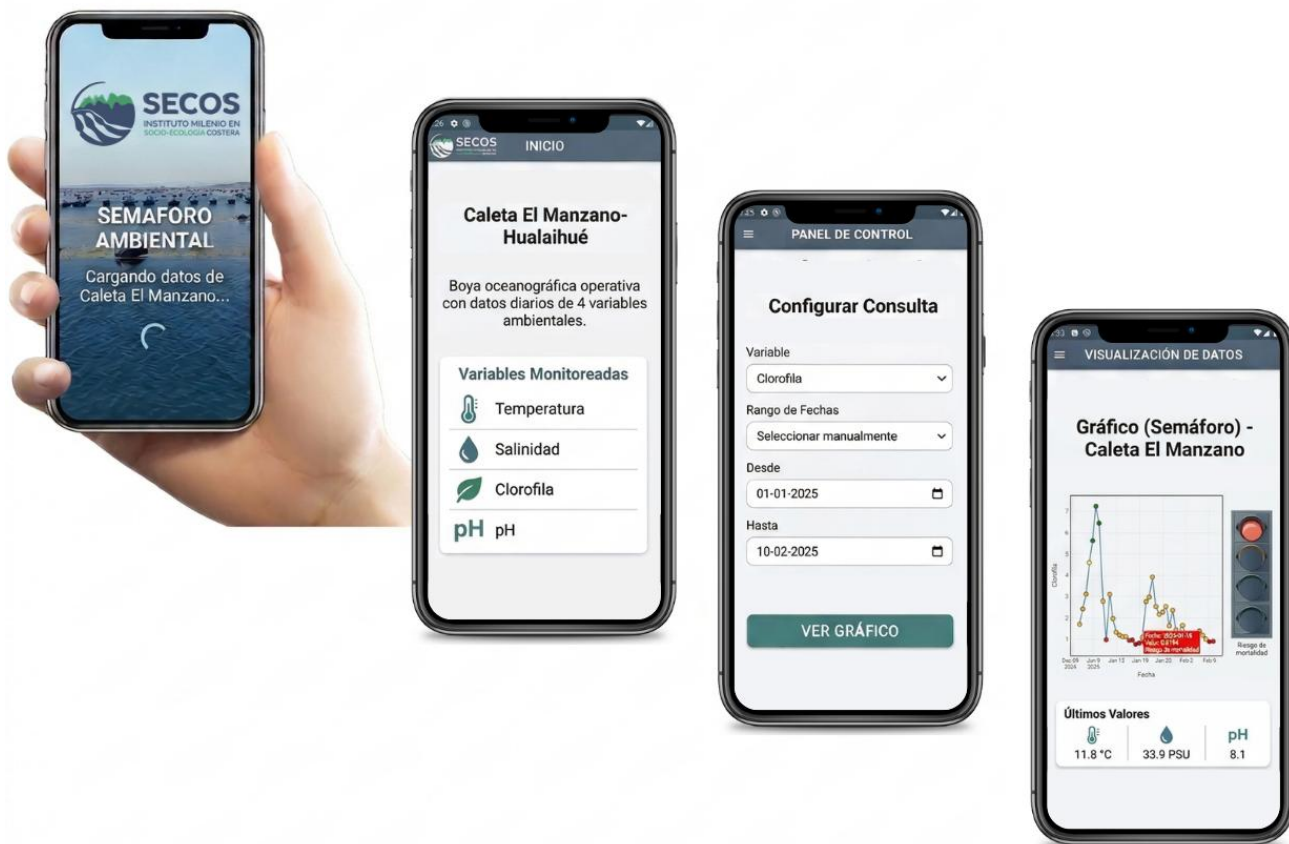


Figura 17. Prototipo de aplicación móvil para la visualización de datos oceanográficos en centros de cultivo de *Mytilus chilensis*.

Nota. Adaptado de FAO y Centro-EULA (2021a) con información de SECOS (2025).

Como propuesta complementaria de este estudio, se sugiere que la plataforma incorpore una sección de retroalimentación colaborativa, donde pescadores y miticultores pueden reportar observaciones directas en terreno (e.g. presencia de otras especies, mortalidad inusual o cambios en la coloración del agua, etc.), donde la función permita contrastar las mediciones de las boyas con la experiencia empírica local, volviendo más sólido el diagnóstico del “Semáforo Ambiental” y fomentando el monitoreo participativo. Adicionalmente, para optimizar la adopción de esta herramienta en los miticultores, se propone diseñar un protocolo de difusión basado en boletines informativos técnicos, que busquen explicar la relevancia de los rangos críticos (pH, oxígeno, clorofila) en el ciclo productivo del mejillón chileno y/o un manual de

acceso/navegación para la plataforma digital, promoviendo el uso de la tecnología en las áreas de interés.

Considerando las proyecciones para las distintas variables establecidas en el diseño experimental en el contexto de cambio climático (temperaturas más altas, valores más bajos de pH, salinidad, oxígeno disuelto y clorofila-a), la estación ACS1 (Fiordo Reloncaví) presenta riesgos osmóticos potencialmente altos, mientras que las estaciones ACS10A (Chiloé) y SECOS (El Manzano) enfrentan actualmente limitaciones altas por la baja disponibilidad de alimento. La determinación de una gestión adecuada para cada zona dependiendo de sus distintos desafíos, logrará la adaptación del sector mitilicultor al cambio climático de forma eficiente y sustentable, donde no es posible lograrlo sin realizar caracterización de los sitios y su vulnerabilidad mediante un monitoreo constante. La implementación de este “Semáforo Ambiental” resulta clave y fundamental para lograr los objetivos de producción propuesto por cada uno de los sectores productivos y en especial, al sector artesanal donde se les brindaría las herramientas y conocimiento de fácil acceso y comprensión para poder tomar decisiones productivas de manera informada y consciente, de modo en el que puedan establecer los periodos de colecta y de engorda donde se optimice su cultivo.

V. Conclusiones

En el presente estudio se evidenció que el aumento de la temperatura y la disminución de la clorofila actúan como factores que promueven la aceleración del metabolismo de *Mytilus chilensis*. En contraste, niveles bajos de pH y, especialmente, de salinidad generan efectos negativos sobre la especie, siendo esta última variable la de mayor impacto fisiológico.

Desde el punto de vista oceanográfico, los tres sitios analizados presentan diferencias significativas entre sí, lo que indica que cada uno posee una huella ambiental estadísticamente única, caracterizada además por una marcada estacionalidad en todas las variables evaluadas. Por su lado, las estaciones ACS10A y SECOS se encuentran dominadas por una fuerte influencia de aguas oceánicas más salinas que ingresan al mar interior, mientras que la estación ACS1 está principalmente influenciada por el aporte del río Puelo. Esta diferencia en las forzantes ambientales se traduce en una mayor variabilidad en ACS1, particularmente en las fluctuaciones de salinidad, las cuales pueden ser hasta casi diez veces más variables que en la estación SECOS. Esta alta inestabilidad implica que los organismos deben destinar una mayor cantidad de energía metabólica a la regulación osmótica, generando condiciones de estrés.

En términos de disponibilidad de alimento, tanto ACS10A como en SECOS se presenta una baja disponibilidad de clorofila, caracterizada por eventos puntuales de alta clorofila hacia finales del año, seguidos por periodos prolongados de escasez. Por el contrario, ACS1 muestra una mayor actividad fotosintética, reflejada en incrementos de pH que coinciden con los peaks de clorofila, fenómeno asociado al aporte de nutrientes provenientes del río Puelo. A diferencia de este sistema, en los otros dos sitios la química del agua no está controlada por la fotosíntesis, sino por procesos de mezcla entre aguas dulces y oceánicas o por la intrusión de aguas profundas y, además, podría presentar “blooms” algales.

Cabe destacar que el fiordo Reloncaví provee aproximadamente el 60% de la semilla para la mitilicultura chilena y la estación ubicada en esta zona (ACS1) enfrenta un alto riesgo asociado a la baja salinidad, especialmente durante las etapas críticas de desove y captación de semillas, donde cualquier alteración significativa en este parámetro podría comprometer el inicio del proceso productivo a nivel nacional. Por otro lado, el riesgo alto asociado a la baja disponibilidad de clorofila en ACS10A y SECOS sugiere que la densidad de cultivo actual podría estar superando la capacidad de carga del ecosistema, generando un agotamiento del fitoplancton debido a un pastoreo excesivo.

En este contexto, se concluye que no existe una solución única para mitigar los riesgos asociados a la mitilicultura en el sur de Chile, siendo necesario implementar estrategias de gestión específicas para cada localidad, en función de sus desafíos ambientales y fisiológicos. La adaptación al cambio climático en este sector dependerá en gran medida de la colaboración entre actores públicos, privados y la sociedad civil, cuyos acuerdos serán clave para establecer nuevas normativas, impulsar proyectos y asegurar la sostenibilidad económica y socio-ecológica de la industria en el largo plazo.

Finalmente, el monitoreo continuo de variables ambientales mediante boyas oceanográficas se posiciona como una herramienta fundamental para reducir la incertidumbre climática, detectar anomalías de manera temprana y mejorar la toma de decisiones en el proceso productivo. En esta línea, la integración de los umbrales ambientales definidos en este estudio con la plataforma “Semáforo Ambiental”, desarrollada por el Instituto Milenio SECOS, representa un avance significativo al traducir información compleja de temperatura, salinidad, pH y clorofila en un lenguaje visual simple y accesible. Esta herramienta permite su aplicación directa por parte de pescadores y miticultores artesanales en el manejo y planificación de sus cultivos, contribuyendo así a enfrentar los desafíos del cambio climático y optimizar la producción miticultora.

VI. Referencias bibliográficas

Aguayo, R., León-Muñoz, J., Garreaud, R. et al. (2021). Hydrological droughts in the southern Andes (40–45°S) from an ensemble experiment using CMIP5 and CMIP6 models. *Sci Rep* 11, 5530. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84807-4>

Aguilar, L. F. (2007). “El aporte de la política pública y de la nueva gestión pública a la gobernanza”, *Revista del CLAD Reforma y Democracia* 39: 5-32. <https://www.redalyc.org/pdf/3575/357533693001.pdf>

Alarcón E., Valdés N., Torres R. (2015). Calcium carbonate saturation state in an area of mussels culture in the Reloncaví Sound, northern Patagonia, Chile. <https://doi.org/10.3856/vol43-issue2-fulltext-1>

Asociación de Mitilcultores de Chile AMICHILE (s.f.). Región de Los Lagos, Chile. Recuperado en marzo de 2026. <https://amichile.com/miticultura/>

Arnold, K. E., Findlay, H. S., Spicer, J. I., Daniels, C. L., and Boothroyd, D. (2009). Effect of CO₂-related acidification on aspects of the larval development of the European lobster, *Homarus gammarus* (L.), *Biogeosciences*, 6, 1747–1754, <https://doi.org/10.5194/bg-6-1747-2009>.

Arrieche, D., Maeda-Martínez, A., Acosta-Balbás, V., Freites, L., Acosta-Salmón, H., Lodeiros-Seijo, C., (2020). Optimum temperature for growth of an invasive green mussel *Perna viridis* population from Venezuela, determined in an open-flow system. *Aquac. Rep.*, 16, Article 100284. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2020.100284>

Artal, O. (2019). Circulación oceánica y mezcla en el mar interior de Chiloé. Universidad de Concepción. <https://www.scribd.com/document/670148230/2019-Artal-tesis-Circulacion-oceanica-y-mezcla-en-el-mar-interior-de-Chiloe>

Avendaño, M., Cantillánez, M., Le Pennec, M., Varela, C., & Garcías, C. (2011). Temporal distribution of larvae of *Mytilus chilensis* (Hupé, 1854) (Mollusca: Mytilidae), in the interior sea of Chiloé, southern Chile. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 39(3), 416-426. <http://dx.doi.org/10.3856/vol39-issue3-fulltext-3>

Bagnara, M., Maltrain, G. (2008). Descripción del sector mitilicultor en la región de Los Lagos, Chile: evolución y proyecciones. En A. Lovatelli, A. Farías e I. Uriarte (eds). Estado actual del cultivo y manejo de moluscos bivalvos y su proyección futura: factores que afectan su sustentabilidad en América Latina. Taller Técnico Regional de la FAO. 20-24 de agosto de 2007, Puerto Montt, Chile. FAO Actas de Pesca y Acuicultura. No. 12. Roma, FAO. pp. 189-198. <https://www.vliz.be/imisdocs/publications/ocrd/146885.pdf>

Baquedano, M., Chávez, C., Dresdner, J., Eggert, J. (2025). The Rise of Mussel Aquaculture in Chile: Causes, Effects, and Challenges,” *Reviews in Aquaculture* 17, no. 3: e70045. <https://doi.org/10.1111/raq.70045>.

Bayne, B. (1993). *Feeding behaviour of the mussel Mytilus edulis*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*. [10.1017/S0025315400034743](https://doi.org/10.1017/S0025315400034743)

Bindoff, N.L., Cheung, W.W.L, Kairo, J.G., Arístegui, J., Guinder, V.A., Hallberg, V., Hilmi, N., Jiao, N. Karim, M.S., Levin, L., O’Donoghue, S., Purca Cuicapusa, S.R., Rinkevich, B., Suga, T., Tagliabue, A. & Williamson, P. (2019). Changing Ocean, Marine Ecosystems, and Dependent Communities. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. <https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/chapter-5/>

Blanc, J.M., Subiabre, R., Duemler, J., Oyarzún, L.C., Díaz, P.A. (2023). Nocturnal seston: A key to explain the cadmium transfer from seawater to mussels (*Mytilus chilensis*). <https://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115544>

Bommarito C, Khosravi M, Thieltges DW, Pansch C, Hamm T, Pranovi F, Vajedsamiei J (2022) Combined effects of salinity and trematode infections on the filtration capacity, growth and condition of mussels. *Mar Ecol Prog Ser* 699:33-44 <https://doi.org/10.3354/meps14179>

Breitburg, D., Levin, L., Oschlies, A., Grégoire, M., Chavez, F., Conley, D., Garçon, V., Gilbert, D., Gutiérrez, D., Isensee, K., et al. (2018). Declining oxygen in the global ocean and coastal waters. *Science* 2018, 359, eaam7240. <https://doi.org/10.1126/science.aam7240>

Briffa, M., de la Haye, K., Munday, P.L., 2012. High CO2 and marine animal behaviour: potential mechanisms and ecological consequences. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.05.032>

Broitman, B. (2019). Guía técnica para el estudiante de acuicultura: Parámetros ambientales, biología de los organismos, tecnología de cultivos y principios para la adaptación al cambio climático. Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas (CEAZA). <https://ceaza.cl/wp-content/uploads/2019/04/GuiaTecnicaAcuicultura.pdf>

Bueno, P & Soto, D. (2017). Adaptation strategies of the aquaculture sector to the impacts of climate change. FAO Fisheries and Aquaculture Circular No. 1142. FAO, Rome. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/d2f26cb2-a768-447b-914092a637d163fe/content>

Buschmann, A., Farías, L., Tapia, F., Varela, D., y Vásquez, M. (2016). Informe final. Comisión Marea Roja.

http://www.economia.gob.cl:http://www.economia.gob.cl/wpcontent/uploads/2016/11/InfoFinalComisionMareaRoja_24Nov2016-1.compressed.pdf

Caceres, M., Valle-Levinson, A., and Atkinson, L. (2003). Observations of cross-channel structure of flow in an energetic tidal channel. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 108(C4). <https://doi.org/10.1029/2001JC000968>

Caldeira, K., Wickett, Michael, E. (2003). Anthropogenic carbon and ocean pH. *Nature*, 425 (2003), p. 365. <https://doi.org/10.3402/tellusb.v51i2.16324>

Capet, A., Beckers, J., Grégoire, M. (2013). Drivers, mechanisms and long-term variability of seasonal hypoxia on the Black Sea northwestern shelf—Is there any recovery after eutrophication? *Biogeosciences* 2013, 10, 3943–3962. <https://doi.org/10.5194/bg-10-3943-2013>

Castillo, N., Gaitán-Espitia, J. D., Quintero-Galvis, J. F., Saldías, G. S., Martel, S. I., Lardies, M. A., Vargas, C. A. (2024). Small-scale geographic differences in multiple-driver environmental variability can modulate contrasting phenotypic plasticity despite high levels of gene Flow. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176772>

Castillo, N., Saavedra, L.M., Vargas, C.A., Gallardo-Escárate, C., Détrée, C. (2017). Ocean acidification and pathogen exposure modulate the immune response of the edible mussel *Mytilus chilensis*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fsi.2017.08.047>

Celik, M. Y., Karayücel, S., & Karayücel, İ. (2009). Effects of environmental factors on growth and mortality of raft cultivated mussel (*Mytilus galloprovincialis* L.) cultivated in lantern nets in Black Sea. *AACL Bioflux*, 2(2), 97-108. <https://www.researchgate.net/publication/41506190>

Chandran, R.V., Damodaran, R., (2000). Oxygen consumption, ammonia excretion and total ninhydrin positive substances in black clam *Villorita cyprinoides* (Pelecypoda) exposed to various salinities. *Indian J. Mar. Sci.* 29, 80e82. <https://www.scopus.com/pages/publications/0033914677>

Chaparro, O. R., & Winter, J. E. (1983). Efectos de una pobre oferta alimentaria en *Mytilus chilensis* sobre el crecimiento, reproducción y standing stock en la mitilicultura de Yaldad (Chiloé, Sur de Chile). In *V Simposio de la Asociación Latinoamericana de Acuicultura. Asociación Latinoamericana de Acuicultura, Valdivia, Chile* (pp. 190–203).

CIEP (2021). Evaluación de la capacidad de carga del estuario Reloncaví, X región. Proyecto FIP 2007-21. Universidad Austral de Chile. https://www.subpesca.cl/fipa/613/articles-89194_informe_final.pdf

Clasing, E., Oñate, A. y Arriagada, H. (1998). Cultivo de choritos en Chile. Editado por la Dirección de Investigación y Desarrollo de la Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. 36 págs.

Clements, J., Hunt, H., (2015). Marine animal behaviour in a high CO₂ ocean. *Mar. Ecol.: Prog. Ser.* 536, 259e279. <https://doi.org/10.3354/meps11426>

Comité Científico COP25 (2019). Océano y cambio climático: 50 preguntas y respuestas, Santiago, Chile. https://minciencia.gob.cl/uploads/filer_public/40/da/40da2f97-2af6-4f3a-b3fc-fb2bcfdf8913/oceano_y_cambio_climatico.pdf

Conejeros, A., Martín, V., Castillo, N., Cuevas, L.A., Garcés, K., Barra, R., Aguilera, V., Vargas, C. (2024). Interactive impact of residual pyrethroid compounds used in the Chilean salmon farming industry and coastal acidification conditions on the feeding performance of farmed mussels in northern Patagonia. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marenvres.2024.106727>

CONICYT (2007). Los sectores pesca y acuicultura en Chile; capacidades de investigación y áreas de desarrollo científico-tecnológico. https://www.conicyt.cl/documentos/dri/ue/Pesca_Acuic_Fishery_Aquac_BD.pdf

Conley, D., Carstensen, J., Vaquer-Sunyer, R., Duarte, C. (2009). Ecosystem thresholds with hypoxia. *Hydrobiologia* 2009, 629, 21–29. <https://doi.org/10.1007/s10750-009-9764-2>

CORFO y UNTEC- U. de Chile. (2016). Hoja de Ruta de Programa Estratégico Nacional Acuicultura. Universidad y Tecnología, Fundación para la Transferencia Tecnológica.

<https://www.corfo.cl/sites/Satellite?blobcol=urldata&blobkey=id&blobtable=MungoBlobs&blobwhere=1475166386559&ssbinary=true>

Cranford, P. et al. (2007). Influence of mussel aquaculture on nitrogen dynamics in a coastal embayment. <https://www.int-res.com/articles/meps2007/347/m347p061.pdf>

Cubillos, L., Norambuena, R., Soto, D., Jacques, M., Simon, J., Carmona, M. (2021). Manual de capacitación en adaptación al cambio climático para pesca y acuicultura en Chile. Santiago de Chile, FAO y Universidad de Concepción. <https://doi.org/10.4060/cb5556es>

De Silva, S. S., & Soto, D. (2009). El cambio climático y la acuicultura: repercusiones potenciales, adaptación y mitigación. Consecuencias del cambio climático para la pesca y la acuicultura: visión de conjunto del estado actual de los conocimientos científicos. Documento técnico de pesca y acuicultura, 530. <https://www.fao.org/4/i0994s/i0994s03.pdf>

Díaz, C., Sobenes, C., Cruz, J.J., Riera, R. (2022). Settlement experiment of spat using three different collectors in two contrasting coastal sites from Chile (SE Pacific Ocean). *Front. Mar. Sci.* 9:1068305. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.1068305>

Díaz, C., Sobenes, C., Machino, S. (2019). Comparative growth of *Mytilus chilensis* (Hupe 1854) and *Mytilus galloprovincialis* (Lamarck 1819) in aquaculture longline system in Chile. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.03.057>

Díaz, R. (2018). Efecto transgeneracional de la acidificación del océano en larvas de *Mytilus chilensis* y su respuesta fisiológica a estresores ambientales: temperatura y cadmio disuelto. Universidad de Concepción. Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas. <https://repositorio.udec.cl/handle/11594/3197>

Díaz, R., Lardies, M.A., Tapia, F.J., Tarifeño, E., Vargas, C.A. (2018). Transgenerational Effects of pCO₂-Driven Ocean Acidification on Adult Mussels *Mytilus chilensis* Modulate Physiological Response to Multiple Stressors in Larvae. *Front. Physiol.* 9:1349. <https://doi.org/10.3389/fphys.2018.01349>

Dickinson, G.H., Ivanina, A.V., Matoo, O.B., Portner, H.O., Lannig, G., Bock, C., Sokolova, I.M., (2012). Interactive effects of salinity and elevated CO₂ levels on juvenile eastern oysters, *Crassostrea virginica*. *J. Exp. Biol.* 215, 29e43. <https://doi.org/10.1242/jeb.061481>

Doney, S., Fabry, V., Feely, R., y Kleypas, J. (2009). Ocean Acidification: The Other CO₂ Problem. *Annu. Rev. Mar. Sci.* 1:169–92. <https://doi.org/10.1146/annurev.marine.010908.163834>

Doney, S., Ruckelshaus, M., Emmett Duffy, J., Barry, J., Chan, F., English, C., Galindo, H., Grebmeier, J., Hollowed, A., Knowlton, N., (2012). Climate change impacts on marine ecosystems. *Ann. Rev. Mar. Sci.* 4, 11–37. [https://doi.org/ 10.1146/annurev-marine-041911-111611](https://doi.org/10.1146/annurev-marine-041911-111611).

Duarte, C., Navarro, J., Acuña, K., Torres, R., Manríquez, P, Lardies, M., Vargas, C., Lagos, N., Aguilera, V. (2014). Combined effects of temperature and ocean acidification on the juvenile individuals of the mussel *Mytilus chilensis*. *Journal of Sea Research*, Volume 85. Pages 308-314. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2013.06.002>.

Duarte, C; Navarro, JM; Acuña, K; Torres, R; Manríquez, PH; Lardies, MA; Vargas, CA; Lagos, NA; Aguilera, V. (2015). Intraspecific Variability in the Response of the Edible Mussel *Mytilus chilensis* (Hupe) to Ocean Acidification. <http://dx.doi.org/10.1007/s12237-014-9845-y>

Duarte, C., Navarro, J., Quijón, P., Loncon, D., Torres, R., Manríquez, P., Lardies, M., Vargas, C., Lagos, N. (2018). The energetic physiology of juvenile mussels, *Mytilus chilensis* (Hupe): The prevalent role of salinity under current and predicted pCO₂ scenarios, *Environmental Pollution*, Volume 242, Part A, 2018, Pages 156-163. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.06.053>.

Dupont, S., Thornduke, M. (2009). Impact of CO₂ driven ocean acidification on invertebrates early life-history – What we know, what we need to know and what we can do. *Biogeoscience*. 6, 3109-3131. Discussion Paper. <https://doi.org/10.5194/bgd-6-3109-2009>

Edding, M., Tala, F., Vásquez, J. (2006). Fotosíntesis, productividad y algas marinas. *Fisiología Vegetal* (F.A. Squeo & L. Cardemil, eds.) Ediciones Universidad de La Serena, La Serena, Chile. http://www.biouls.cl/librofv/web/pdf_word/Capitulo%2011.pdf

Emerson, K. & Nabatchi, T. (2015). Evaluating the Productivity of Collaborative Governance Regimes: A Performance Matrix, *Public Performance & Management Review* 38(4): 717-747, <https://doi.org/10.1080/15309576.2015.1031016>

Ericson, J., Venter, L., Copedo, J., Nguyen, V., Alfaro, A., Ragg, N. (2023). Chronic heat stress as a predisposing factor in summer mortality of mussels, *Perna canaliculus*. *Aquaculture*, 564, 738986. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2022.738986>

FAO (2018). El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2018. Cumplir los objetivos de desarrollo sostenible. Roma. Licencia: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.

<https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/26cd480f-6cf1-40bf-a565-200d11e01ef1/content>

FAO (2021). Procedimientos y buenas prácticas para la captación de semillas de chorito (*Mytilus chilensis*) en Áreas de Manejo y Explotación de Recursos Bentónicos. Santiago de Chile. https://www.subpesca.cl/portal/617/articles-97384_manual_procedimientos_choritos.pdf

FAO (2022). The State of World Fisheries and Aquaculture 2022. Towards Blue Transformation. Rome, FAO. <https://doi.org/10.4060/cc0461en>

FAO y Centro-EULA (2021a). Manual para un sistema de monitoreo ambiental participativo, que mejore la capacidad de adaptación al cambio climático de las comunidades pesqueras y acuícolas en Chile. Santiago de Chile. <https://doi.org/10.4060/cb3579es>

FAO y Centro-EULA (2021b). Manual de capacitación en adaptación al cambio climático para pesca y acuicultura en Chile. Santiago de Chile. <https://doi.org/10.4060/cb5556es>

Farías, L. et al. (2019). Propuestas para la actualización del Plan de Adaptación en Pesca y Acuicultura. Mesa Océanos-Comité Científico COP25; Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación. 88 páginas. <https://www.cr2.cl/wpcontent/uploads/2019/12/Propuesta-de-actualizaci%C3%B3n-para-Plan-deAdaptaci%C3%B3n.pdf>

Farmer, D. M., Freeland, H. J. (1983). The physical oceanography of fjords. *Progress in Oceanography*, 12(2):147–219. [https://doi.org/10.1016/0079-6611\(83\)90004-6](https://doi.org/10.1016/0079-6611(83)90004-6)

Feely, R.A., Doney, S.C., Cooley, S.R., (2009). Ocean acidification: present conditions and future changes in a high-CO₂ world. *Oceanography* 22 (4), 36e47. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2009.95>

Feller, V. (2011). Módulo de cultivo para la etapa de engorda en la mitilicultura. Universidad de Chile. Facultad de Arquitectura y Urbanismo. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/100405>

Fernández-Reiriz, M.; Labarta, U., Navarro, J., Velasco, A. (2001). Enzymatic digestive activity in *Mytilus chilensis* (Hupe 1854) in response to food regimes and past feeding history. <https://doi.org/10.1007/s003600100194>

Fernández-Reiriz, M., Navarro, J., Contreras, A., Labarta, U. (2008). Trophic interactions between the toxic dinoflagellate *Alexandrium catenella* and *Mytilus chilensis*: Feeding and digestive behaviour to long-term exposure. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aquatox.2008.02.011>

Figuroa, Y. (2015). Factores determinantes en la oferta de colectores de semilla de chorito (*Mytilus chilensis*) producidos en Áreas de Manejo y Explotación de Recursos Bentónicos, en la Región de los Lagos, Chile. Universidad de Concepción. <https://repositorio.udec.cl/handle/11594/1916>

Flores, C., Gomez, M., Muñoz, C., Pérez, L., Arribas, S., Opazo, M., Huaquin, E. (2015). Spatial distribution pattern of *Mytilus chilensis* beds in the Reloncavi fjord: hypothesis on associated processes. <http://dx.doi.org/10.1186/s40693-015-0041-7>

Fong, C., DeCesaro, J., Clawson, G., Frazier, M., Halpern, B., Froehlich, H. (2024). Winners and losers in US marine aquaculture under climate change. *Environmental Research Letters*, 19(11), 114024. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad76c0>

Froehlich, H., Gentry, R., Halpern, B. (2018) Global change in marine aquaculture production potential under climate change. *Nat Ecol Evol* 2, 1745–1750. <https://doi.org/10.1038/s41559-018-0669-1>

Furci, G (2009). Cultivo de moluscos en Chile. APP N°50. Publicaciones fundación terram. https://www.terram.cl/descargar/recursos_naturales/salmonicultura/app_-_ analisis_de_politicas_publicas/APP-50-Cultivo-de-moluscos-en-Chile.pdf

Gallardo A., Aguilar J., Norambuena R., Mienert A., Ivanovic C. (2023). Caracterización de la pesca y la acuicultura artesanal en pequeña escala en América del Sur y recomendaciones de políticas públicas. Documento Técnico de Pesca y Acuicultura de la FAO N.º 692. Santiago de Chile, FAO. <https://doi.org/10.4060/cc4612es>

Ganser, A., Newton, T., Haro, R. (2013). The effects of elevated water temperature on native juvenile mussels: implications for climate change. *Freshwater Science*. <https://doi.org/10.1899/12-132.1>

Gazeau, F., Gattuso, J.-P., Dawber, C., Pronker, A. E., Peene, F., Peene, J., Heip, C. H. R., & Middelburg, J. J. (2010). Effect of ocean acidification on the early life stages of the blue mussel *Mytilus edulis*. *Biogeosciences*, 7(7), 2051–2060. <https://doi.org/10.5194/bg-7-2051-2010>

GEOPORTAL IDE-SUBPESCA, (2026). División de Acuicultura, Subsecretaría de Pesca y Acuicultura. Ministerio de Economía, Fomento y Turismo. <https://geoportal.subpesca.cl/portal/apps/sites/#/geoportal/pages/acuicultura>

Giarratano, E., Gil, M., Malanga, G. Seasonal and pollution-induced variations in biomarkers of transplanted mussels within the Beagle Channel. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.03.037>

González, H.E., Calderón, M.J., Castro, L., Clément, A., Cuevas, L.A., Daneri, G., Iriarte, J.L., Lizárraga, L., Martínez, R., Menschel, E., Silva, N., Carrasco, C., Valenzuela, C., Vargas, C.A., Molinet, C., (2010). Primary production and plankton dynamics in the Reloncaví Fjord and the Interior Sea of Chiloé, Northern Patagonia, Chile. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 402, 13–30. <https://doi.org/10.3354/meps08360>

González E., et al. (2021). Actualización del diagnóstico socio económico de la acuicultura de pequeña escala en Chile. Proyecto Fondo de Investigación Pesquera y de Acuicultura, Subsecretaría de Pesca y Acuicultura. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. https://www.subpesca.cl/fipa/613/articles-116514_informe_final.pdf

Greiner C., Román R., Duarte C., Navarro J.M., Rodriguez-Navarro A.B., Ramajo L. (2020). The combined effects of salinity and pH on Shell biomineralization of the edible mussel *Mytilus chilensis*. *Environmental Pollution*, 263, 114555. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114555>

Groisman, P. Y., Karl, T. R., Easterling, D. R., Knight, R. W., Jamason, P. F., Hennessy, K. J., Zhai, P. M. (1999). Changes in the probability of heavy precipitation: important indicators of climatic change. *Climatic change*, 42(1), 243-283. <https://doi.org/10.1023/A:1005432803188>

Guenuman, M. (2014). Efectos del cambio en la temperatura del agua de mar sobre el balance energético en adultos de *Mytilus chilensis*, *Mytilus galloprovincialis* y sus híbridos, bajo condiciones de laboratorio. Universidad Austral de Chile. <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2014/fcg927e/doc/fcg927e.pdf>

Harley, C., Randall Hughes, A., Hultgren, K., Miner, B., Sorte, C., Thornber, C., Rodriguez, L., Tomanek, L., Williams, S. (2006). The impacts of climate change in coastal marine systems. *Ecol. Lett.* 9, 228–241. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2005.00871.x>.

Haider, F., Falfushynska, H., Timm, S., Sokolova, I. (2020). Effects of hypoxia and reoxygenation on intermediary metabolite homeostasis of marine bivalves *Mytilus edulis* and *Crassostrea gigas*. *Comp. Biochem. Physiol. Part A Mol. Integr. Physiol.* 242, 110657. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2020.110657>

Hedges, L., Gurevitch, J., Curtis, P. (1999). The Meta-Analysis of Response Ratios in Experimental Ecology. <https://doi.org/10.2307/177062>

Herrera, M. (2020). Controversias socioambientales al sur de Chile: el caso de la crisis de la marea roja en la Isla Grande de Chiloé. *Región y sociedad*, 32, e1343. <https://doi.org/10.22198/rys2020/32/1343>

Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguer, M., van der Linden, P.J., Dai, X., Maskell, K., Johnson, C.A., (2001). Climate change 2001: the scientific basis. In: Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881 pp. https://books.google.com/books?hl=es&lr=&id=k9leRDEbanYC&oi=fnd&pg=PP9&ots=a_Q0meT_28&sig=t74RXTFUnp6xayhvRWzyq2wLoiQ

Barrero, C. (2020). El mercado de la acuicultura en Chile. ICEX. Oficina Económica y Comercial de la Embajada de España en Santiago de Chile. <https://www.ivace.es/Internacional/Informes-Publicaciones/Pa%C3%ADses/Chile/Chileacuiculturasicex2020.pdf>

IFOP (s.f.-a). Centro de datos Ambientales de la Acuicultura: Sistema de información oceanográfica CHONOS <https://chonos.ifop.cl/acs/start/>

IFOP (s.f.-a). Monitoreo larvas de mitílidos. Instituto Tecnológico CORFO / Instituto Tecnológico Público. <https://www.ifop.cl/monitoreo-larvas-de-mitilidos/>

IPCC (2014). Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_es.pdf

IPCC (2013). The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge. www.cambridge.org/9781107661820

IPCC (2018). Calentamiento global de 1,5 °C. Resumen para responsables de políticas. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/IPCC-Special-Report-1.5-SPM_es.pdf

ISO (2018). Norma internacional ISO 31000. Gestión del riesgo. Directrices. <https://biblioteca.dgmm.gob.hn/wp-content/uploads/2024/05/GC.D.07-ISO-31000-2018.pdf>

Jahnsen-Guzmán, N., Lagos, N., Lardies, M., Vargas, C., Fernández, C., San Martín, V., Saavedra, L., Cuevas, A., Quijón, P. Duarte, C.(2021). Environmental refuges increase performance of juvenile mussels *Mytilus chilensis*: Implications for mussel seedling and farming strategies. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141723>.

Jaramillo, E., Bertran, C., Bravo, A. (1992). Mussel biodeposition in an estuary in southern Chile. <http://dx.doi.org/10.3354/meps082085>

Kapsenberg, L., Miglioli, A., Bitter, M. C., Tambutté, E., Dumollard, R., & Gattuso, J.-P. (2018). Ocean pH fluctuations affect mussel larvae at key developmental transitions. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 285(1893), 20182381. <https://doi.org/10.1098/rspb.2018.2381>

Labarta, U., Fernández-Reiriz, M., Navarro, J., Velasco, A. (2002). Enzymatic digestive activity in epifaunal (*Mytilus chilensis*) and infaunal (*Mulinia edulis*) bivalves in response to changes in food regimes in a natural environment. <http://dx.doi.org/10.1007/s00227-001-0742-0>

Lagos, N., Benítez, S., Duarte, C., Lardies, M., Broitman, B., Tapia, C., Vargas, C. (2016). Effects of temperature and ocean acidification on shell characteristics of *Argopecten purpuratus*: implications for scallop aquaculture in an upwelling-influenced area. *Aquaculture Environment Interactions*, 8, 357-370. <https://doi.org/10.3354/AEI00183>

Lagos, L; Uriarte, I; Yany, G; Astorga, M. (2012a). Effect of temperature on the culture of larvae of the bivalve *Mytilus chilensis* originated from broodstocks from different latitudes in a controlled environment. <http://dx.doi.org/10.7773/cm.v38i3.2081>

Lagos, L., Uriarte, I., & Yany, G. (2012b). Assessment of the reproductive potential of the mussel (*Mytilus chilensis*) from two natural populations subjected to different conditioning temperatures. <https://doi.org/10.3856/vol40-issue2-fulltext-13>

Lara, C., Saldías, G. S., Tapia, F. J., Iriarte, J. L., & Broitman, B. R. (2016). Interannual variability in temporal patterns of Chlorophyll-a and their potential influence on the supply of mussel larvae to inner waters in northern Patagonia (41–44°S). *Journal of Marine Systems*, 155, 11-18. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2015.10.010>

Lardies, M.A., Benítez, S., Osoreo, S., Vargas, C.A., Duarte, C., Lohrmann, K.B., Lagos, N.A., (2017). Physiological and histopathological impacts of increased carbon dioxide and

temperature on the scallops *Argopecten purpuratus* cultured under upwelling influences in northern Chile. *Aquaculture* 479, 455e466. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2017.06.008>

Largier, J. L. (2003). Considerations in Estimating Larval Dispersal Distances from Oceanographic Data. *Ecological Applications*, 13(1), S71–S89. <http://www.jstor.org/stable/3099999>

Leal, M. (2014). Evaluación de Bancos del recurso chorito (*M. chilensis*) en las comunas de Cochamó y Hualaihué. Proyecto Innova Chile CORFO, Bienes Públicos para la competitividad “Modelo de Gestión para áreas Proveedoras de Semilla de Mejillón” 12BPC”-13497. <http://www.fundacionchinquihue.cl/web/wpcontent/uploads/2014/12/EVALUACION-DE-BANCOS-COCHAMO-HUALAIHUEModo-de-compatibilidad.pdf>

Leiva, G., Santibañez, C., Bartheld, J. (2007). Definición de criterios biológicos, ambientales, sanitarios y operativos para la instalación de colectores de moluscos bivalvos en la X región. Proyecto FIP 2005-18. https://www.subpesca.cl/fipa/613/articulos-90352_archivo_01.pdf

León-Muñoz, J., Marcé, R., Iriarte, J.L., (2013). Influence of hydrological regime of an Andean river on salinity, temperature and oxygen in a Patagonia fjord, Chile. *N. Z. J. Mar. Freshw. Res.* 47 (30), 515–528. <https://doi.org/10.1080/00288330.2013.802700>

Lök, A., Acarlı, S., Serdar, S., Köse, A., & Yıldız, H. (2007). Growth and mortality of Mediterranean mussel *Mytilus galloprovincialis* Lam., 1819, in relation to size on longline in Mersin Bay, Izmir (Turkey–Aegean Sea). *Aquaculture Research*, 38(8), 819-826. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2007.01717.x>

Loncon, D. (2014) Efecto combinado del CO₂ y salinidad sobre la fisiología energética en juveniles de *Mytilus chilensis*. Universidad Austral de Chile. <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2014/fcl738e/doc/fcl738e.pdf>

López, J. (2013). Respuesta fisiológica de *Mytilus chilensis* (chorito) en el cultivo suspendido (Dalcahue, Chiloé) y su relación con las variables ambientales. Universidad Austral de Chile. <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2013/fcl864r/doc/fcl864r.pdf>

Lorenzen S, Gallardo C, Jara C, Clasing E, Pequeño G, C.A. M (1979) Mariscos y peces de importancia comercial en el sur de Chile. Universidad Austral de Chile, Valdivia.

Marcogliese, D.J. (2001). Implications of climate change for parasitism of animals in the aquatic environment. *Canadian Journal of Zoology*, 79: 1331–1352. https://www.researchgate.net/publication/249542518_Implication_of_climate_change_for_parasitism_of_animals_in_the_aquatic_environment

Martin, V. A. S., Gelcich, S., Vásquez Lavín, F., Ponce Oliva, R. D., Hernández, J. I., Lagos, N. A., Vargas, C. A. (2019). Linking social preferences and ocean acidification impacts in mussel aquaculture. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-41104-5>

Masojídek, J.; Ranglová, K.; Lakatos, G.E.; Silva Benavides, A.M.; Torzillo, G. (2021). Variables Governing Photosynthesis and Growth in Microalgae Mass Cultures. *Processes* 2021, 9, 820. <https://doi.org/10.3390/pr9050820>

Matthew, J. et al. (2021). Declaración PRISMA 2020: una guía actualizada para la publicación de revisiones sistemáticas, *Revista Española de Cardiología*, Volume 74, Issue 9, 2021, Pages 790-799, ISSN 0300-8932, <https://doi.org/10.1016/j.recesp.2021.06.016>.

Mellado, C., Chaparro, O.R., Duarte, C., Villanueva, P.A., Ortiz, A., Valdivia, N., Torres, R., Navarro, J.M. (2019). Ocean acidification exacerbates the effects of paralytic shellfish toxins on the fitness of the edible mussel *Mytilus chilensis*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.399>

MMA (2020). INFORME DEL ESTADO DEL MEDIO AMBIENTE 2020. Capítulo 15: Cambio Climático. Ministerio del Medio Ambiente, Gobierno de Chile. <https://sinia.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2021/04/15-cambio-climatico.pdf>

Molinet, C., Astorga, M., Cares, L., Diaz, M., Hueicha, K., Marín, S., Matamala, T., Soto, D. (2021). Vertical distribution patterns of larval supply and spatfall of three species of Mytilidae in a Chilean fjord used for mussel farming: Insights for mussel spatfall efficiency. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.736341>

Molinet, C., Díaz Gomez, M. A., Arriagada Muñoz, C. B., Cares Pérez, L. E., Marín Arribas, S. L., Astorga Opazo, M. P. & Niklitschek Huaquin, E. J. E. (2015). Spatial distribution pattern of *Mytilus chilensis* beds in the Reloncaví fjord: hypothesis on associated processes. *Revista Chilena de Historia Natural*, 88, 1–12. <http://dx.doi.org/10.1186/S40693-015-0041-7>

Molinet, C., Soto, D., León-Muñoz, J., Díaz, M., Espinoza, K., Henríquez, J., Matamala, T. (2025). Climate-driven changes in freshwater inputs to a Northern patagonia Fjord and

overfishing of wild mussel seed could threaten Chilean mussel farming.
<http://dx.doi.org/10.1007/s10584-025-03956-x>

Mongruel, R., Thébaud, O. (2006). Externalities, institutions and the location choices of shellfish producers: the case of blue mussel farming in the Mont-Saint-Michel bay (France). *Aquaculture Economics & Management*, 10(3), 163-181.
<https://doi.org/10.1080/13657300600985173>

Montúfar-Romero M., Valenzuela V.D., Gallardo C. (2024). Hipoxia in the Blue Mussel *Mytilus chilensis* Induces a Transcriptome Shift Associated with Endoplasmic Reticulum Stress, Metabolism, and Immune Response. *Genes*, 15(6). <https://www.mdpi.com/20734425/15/6/658>

Montúfar-Romero, M., Valenzuela-Miranda, D., Valenzuela-Muñoz, V., Morales-Rivera, M.F., Gallardo-Escárate, C. (2025). Microbiota Dysbiosis in *Mytilus chilensis* Is Induced by Hypoxia, Leading to Molecular and Functional Consequences.
<http://dx.doi.org/10.3390/microorganisms13040825>

NOAA (2025). Ocean acidification. Revisado en marzo 2026.
<https://www.noaa.gov/education/resource-collections/ocean-coasts/ocean-acidification>

Najjar, R. G., Pyke, C. R., Adams, M. B., Breitburg, D., Hershner, C., Kemp, M., Wood, R. (2010). Potential climate-change impacts on the Chesapeake Bay. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 86(1), 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2009.09.026>

Navarro, J., (1988). The effects of salinity on the physiological ecology of *Choro mytilus chorus* (Molina,1782) (Bivalvia: mytilidae). *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*122 (1), 19e33.
[https://doi.org/10.1016/0022-0981\(88\)90209-2](https://doi.org/10.1016/0022-0981(88)90209-2)

Navarro, J., Cárdenas, L., Ortiz, A., Figueroa, A., Morley, S.A., Vargas-Chacoff, L., Leclerc, J., Détrée, C. (2024). Testing the physiological capacity of the mussel *Mytilus chilensis* to establish into the Southern Ocean. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170941>

Navarro, J., Contreras, A. (2010). An integrative response by *Mytilus chilensis* to the toxic dinoflagellate *Alexandrium catenella*. <http://dx.doi.org/10.1007/s00227-010-1465-x>

Navarro, J., Contreras, A., Chaparro, O. (2008). Short-term feeding response of the mussel *Mytilus chilensis* exposed to diets containing the toxic dinoflagellate *Alexandrium catenella*.
https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0716-078X2008000100004&lng=es&nrm=iso&tlng=en

Navarro, J. M., Duarte, C., Manríquez, P., Lardies, M., Torres, R., Acuña, K., Vargas, C. A., Lagos, N. (2016). Ocean warming and elevated carbon dioxide: multiple stressor impacts on juvenile mussels from southern Chile. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsv249>

Navarro, J., Labarta, U., Fernández-Reiriz, M., Velasco, A. (2003). Feeding behavior and differential absorption of biochemical components by the infaunal bivalve *Mulinia edulis* and the epibenthic *Mytilus chilensis* in response to changes in food regimes. [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-0981\(02\)00501-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-0981(02)00501-4)

Navarro, J., Thompson, R. (1996). Physiological energetics of the horse mussel *Modiolus modiolus* in a cold ocean environment. *Mar. Eco. Pro. Ser* 138: 135. <https://www.int-res.com/articles/meps/138/m138p135.pdf>

Navarro, J., Torres, R., Acuña, K., Duarte, C., Manríquez, P., Lardies, M., Lagos, N., Vargas, C., Aguilera, V. (2013). Impact of medium-term exposure to elevated pCO₂ levels on the physiological energetics of the mussel *Mytilus chilensis*. *Chemosphere*. 90: 1242-1248. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.09.063>

Navarro, J., Widdows, J., Chaparro, O., Ortíz, A., Mellado, C., Villanueva, P. (2018). Pre-ingestive selection capacity and endoscopic analysis in the sympatric bivalves *Mulinia edulis* and *Mytilus chilensis* exposed to diets containing toxic and non-toxic dinoflagellates. <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0193370>

Navarro, J., Winter, J. (1982). Ingestion rate, assimilation efficiency and energy-balance in *Mytilus chilensis* in relation to body size and different algal concentrations. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00397666>

Núñez-Acuña, G., Tapia, F., Haye, P., Gallardo-Escárate, C. (2012). Gene expression analysis in *Mytilus chilensis* populations reveals local patterns associated with ocean environmental conditions. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jembe.2012.03.024>

O'Donnell, M.J., Hammond, L.M. & Hofmann, G.E. (2009). Predicted impact of ocean acidification on a marine invertebrate: elevated CO₂ alters response to thermal stress in sea urchin larvae. *Mar Biol* **156**, 439–446. <https://doi.org/10.1007/s00227-008-1097-6>

ONU (2015). Agenda 2030 sobre el Desarrollo Sostenible. Naciones Unidas. <https://www.fundacioncarolina.es/wp-content/uploads/2019/06/ONU-Agenda-2030.pdf>

Orr, J.C., Fabry, V.J., Aumont, O., Bopp, L., Doney, S.C., Feely, R.A., Gnanadesikan, A., Gruber, N., Ishida, A., Joos, F., et al., (2005). Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. *Nature* 437, 681e686. <https://doi.org/10.1038/nature04095>

Oyarzún, P. A., Toro, J. E., Jaramillo, R., Guiñez, R., Briones, C. & Astorga, M. (2011). Ciclo gonadal del chorito *Mytilus chilensis* (Bivalvia: Mytilidae) en dos localidades del sur de Chile. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 39(3), 512–525. <https://doi.org/10.3856/vol39-issue3-fi11text-11>

Oyinlola, M. A., Reygondeau, G., Wabnitz, C. C., Troell, M., Cheung, W. W. (2018). Global estimation of areas with suitable environmental conditions for mariculture species. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0191086>

Pacheco, E., Olave, S. (2000). Curso: Cultivo de choritos en la zona sur de Chile. Proyecto “Innovaciones en la tecnología de cultivo de chorito (*Mytilus chilensis*), tendientes a mejorar la calidad y rentabilidad de la actividad mitícola en la X Región”. División de Acuicultura. Instituto de Fomento Pesquero (IFOP). https://www.ifop.cl/wpcontent/contenidos/uploads/biblioteca/libros_digitales/Curso_Cultivo_de_choritos.pdf

Peteiro, L. G., Babarro, J. M., Labarta, U., & Fernández-Reiriz, M. J. (2006). Growth of *Mytilus galloprovincialis* after the Prestige oil spill. *ICES Journal of Marine Science: Journal du Conseil*, 63(6), 1005-1013. <https://doi.org/10.1016/j.icesjms.2006.03.010>

Pörtner, H. O. (2008). Ecosystem effects of ocean acidification in times of ocean warming: a physiologist's view. *Marine Ecology Progress Series*, 373, 203-217. <https://doi.org/10.3354/meps07768>

Ramajo, L., Prado, L., Rodríguez, A., Lardies, M., Duarte, C., Lagos, N. (2016). Plasticity and trade-offs in physiological traits of intertidal mussels subjected to freshwater-induced environmental variation. <https://doi.org/10.3354/meps11764>

Rojas M., Aldunce P., Farías L., González H., Marquet P. A., Muñoz J. C., Palma-Behnke R., Stehr A., Vicuña S. (2019). Evidencia científica y cambio climático en Chile: Resumen para tomadores de decisiones. Santiago: Comité Científico COP25; Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación.

<https://cambioclimatico.mma.gob.cl/wpcontent/uploads/2020/04/Evidencia-cientifica-y-cambio-climatico-en-ChileResumen.pdf>

Saavedra, L. M., Saldías, G. S., Broitman, B. R., and Vargas, C. A. (2021). Carbonate chemistry dynamics in shellfish farming areas along the Chilean coast: natural ranges and biological implications. *ICES Journal of Marine Science*, 78: 323–339. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsaa127>

Sagasti, A.; Schaffner, L.; Duffy, J. Effects of periodic hypoxia on mortality, feeding and predation in an estuarine epifaunal community. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 2001, 258, 257–283. [https://doi.org/10.1016/S0022-0981\(01\)00220-9](https://doi.org/10.1016/S0022-0981(01)00220-9)

Segura, C., Stuardo, C., Herrera, M., Oyarzún, M., Opazo, D. (2022). Programa de monitoreo y vigilancia sobre La disponibilidad Larval de Mitílidos Para La sustentabilidad de La actividad de acuicultura En La Zona Sur Austral de Chile. IX Etapa 2021-22. Informe final. Convenio de Desempeño entre La subsecretaría de economía y empresas de Menor Tamaño y El Instituto de fomento Pesquero. Instituto de Fomento Pesquero. https://ifop-primotc.hosted.exlibrisgroup.com/permalink/f/nq4020/56IFOP_Aleph000019267

Segura, C., Stuardo, C., Opazo, D., Herrera, M., Oyarzún, M., Videla, M. (2023). Programa de monitoreo y vigilancia sobre la disponibilidad larval de mitílidos para la sustentabilidad de la actividad de acuicultura en la zona sur austral de Chile, X etapa 2022-23. (Informe Final – Convenio de Desempeño entre la Subsecretaría de Economía y Empresas de Menor Tamaño y el Instituto de Fomento Pesquero, 2022). https://ifop-primotc.hosted.exlibrisgroup.com/permalink/f/nq4020/56IFOP_Aleph000019392

SERNAPESCA (2023). Anuario Estadístico de Pesca y Acuicultura 2023; Subsector Acuicultura. Ministerio de Economía, Fomento y Turismo. <https://www.sernapesca.cl/informacion-utilidad/anuarios-estadisticos-de-pesca-yacuicultura/>

SERNAPESCA (2024). Anuario Estadístico de Pesca y Acuicultura 2024; Subsector Acuicultura. Ministerio de Economía, Fomento y Turismo. <https://www.sernapesca.cl/app/uploads/2025/12/SUBSECTOR-ACUICULTURA-2024.pdf>

Shanks, A. L. (2009). Pelagic Larval Duration and Dispersal Distance Revisited. *The Biological Bulletin*, 216(3), 373–385. <https://doi.org/10.1086/BBLv216n3p373>

Sievers, H. (2008). Water masses and circulation in austral chilean channels and fjords. Progress in the oceanographic knowledge of Chilean interior waters, from Puerto Montt to Cape

Horn, pages 53–58. <https://www.semanticscholar.org/paper/Water-masses-and-circulation-in-austral-Chilean-and/d6ef8d872a1f047b1d34c7e0e61042021729aae5>

Silva, N., Valdenegro, A. (2008). Caracterización oceanográfica de canales australes chilenos entre la boca del guafo y los canales pulluche-chacabuco (cimar 8 fiordos). *Ciencia y Tecnología del Mar*, 31(1):5–44. <https://www.researchgate.net/publication/43070583>

Sokolova, I.M., Frederich, M., Bagwe, R., Lannig, G., Sukhotin, A.A., (2012). Energy homeostasis as an integrative tool for assessing limits of environmental stress tolerance in aquatic invertebrates. *Mar. Environ. Res.* 79, 1e15. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2012.04.003>

Soto, D., León-Muñoz, J., Molinet, C., Soria-Galvarro, Y., Videla, J., Opazo, D., Díaz, P., Tapia, F., Segura, C. (2020). Informe Proyecto ARClím: Acuicultura. INCAR, Universidad de Concepción, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Universidad Austral de Chile, IFOP, 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. https://arclim.mma.gob.cl/media/informes_consolidados/01_ACUICULTURA.pdf

Soto, D., Ross, L.G., Handisyde, N., Bueno, P., Beveridge, M.C.M., Dabbadie, L., AguilarManjarrez., Cai, J. & Pongthanapanich, T. (2018). Impacts of climate change on fisheries and aquaculture: synthesis of current knowledge, adaptation and mitigation options. Chapter 21: Climate change and aquaculture: vulnerability and adaptation options. *FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 627*. Rome, FAO. pp 465490. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/9aeb8ade-a623-4954-8adf-204daae3b5de/content>

Sponaugle, S., Cowen, R., Shanks, A., Morgan, S., Leis, J., Pineda, J., Boehlert, G., Kingsford, M., Lindeman, K., Grimes, C., & Munro, J. (2002). Predicting self-recruitment in marine populations: Biophysical correlates and mechanisms. *Bulletin of Marine Science*, 70, 341–375.

SUBPESCA (2023). Informe Técnico (DAC) N°838: Propuesta de cronograma, lugar de instalación y profundidad de instalación de sensores, para el cumplimiento de las obligaciones que establece el reglamento por parte de las agrupaciones de concesiones. Gobierno de Chile. https://www.subpesca.cl/portal/615/articles-113248_documento.pdf

SUBPESCA (2023). Informe Técnico D.Ac. N°236: Propuesta de cronograma, lugar de instalación y profundidad de instalación de sensores, para el cumplimiento de las obligaciones que establece el reglamento por parte de las agrupaciones de concesiones.

Gobierno de Chile. https://www.subpesca.cl/portal/615/articles-118177_documento.pdf

SUBPESCA (2025). INFORME SECTORIAL DE PESCA Y ACUICULTURA 2024. Departamento de Análisis Sectorial. Subsecretaría de Pesca.

https://www.subpesca.cl/portal/618/articles-124435_documento.pdf

SUBPESCA (2024). Caracterización de la miticultura en Chile. https://www.ifop.cl/wp-content/uploads/prensa/2024/taller_mitilidos/Caracterizaci%C3%B3n%20mit%C3%ADidos.pdf

Tan, A., Cheng, M., Giacoletti, A., Chung, J., Liew, J., Sarà, G., Williams, G. (2021). Integrating mechanistic models and climate change projections to predict invasion of the mussel, *Mytilopsis sallei*, along the southern China coast. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143097>.

Toro, J., Paredes, L. (1996). Heritability estimates of larval shell length in the Chilean blue mussel *Mytilus chilensis*, under different food densities. <http://dx.doi.org/10.1051/alr:1996037>

Torres F. I., Lara C., Sillero N., Broitman B. R. (2025). Climate-induced habitat shifts of farmed mussel species. *Aquaculture*, 602, 742304. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2025.742304>

Torres, R., Ampuero, P. (2009). Strong CO₂ outgassing from high nutrient low chlorophyll coastal waters off central Chile (30S): the role of dissolved iron. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 83: 126–132. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2009.02.030>

Trégarot, E., D'Olivo, J. P., Botelho, A. Z., Cabrito, A., Cardoso, G. O., Casal, G. et al. (2024). Effects of climate change on marine coastal ecosystems—A review to guide research and management. *Biological Conservation*, 289, 110394. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2023.110394>

Universidad Austral de Chile (2016). Prospección y evaluación de la condición de bancos naturales de mitílidos en la zona sur-austral de Chile. Proyecto FIPA 2014-57. Puerto Montt. https://www.subpesca.cl/fipa/613/articles-89415_informe_final.pdf

Uriarte, I. (2008). Estado actual del cultivo de moluscos bivalvos en Chile. En A. Lovatelli, A. Farías e I. Uriarte (eds). Estado actual del cultivo y manejo de moluscos bivalvos y su proyección futura: factores que afectan su sustentabilidad en América Latina. Taller Técnico Regional de la FAO. 20–24 de agosto de 2007, Puerto Montt, Chile. FAO Actas de Pesca y Acuicultura. No. 12. Roma, FAO. pp. 61–75.

https://www.fao.org/fishery/docs/DOCUMENT/aquaculture/aq2008_09/root/i0444s.pdf

Uriarte, I., Lovatelli, A., Farías, A., Astorga, M., Molinet, C., Medina, M., Avendaño, M., Lodeiros, C., Velasco, L.A., Rupp, G., Cáceres-Martínez, J. y Mendo, J. (2008). Cultivo y manejo de moluscos bivalvos en América Latina: resultados y conclusiones del primer taller - ACUIBIVA 2007. En A. Lovatelli, A. Farías e I. Uriarte (eds). Estado actual del cultivo y manejo de moluscos bivalvos y su proyección futura: factores que afectan su sustentabilidad en América Latina. Taller Técnico Regional de la FAO. 20–24 de agosto de 2007, Puerto Montt, Chile. FAO Actas de Pesca y Acuicultura. No. 12. Roma, FAO. pp.

1–23. https://www.fao.org/fishery/docs/DOCUMENT/aquaculture/aq2008_09/root/i0444s.pdf

Uzkiaga, N., Gebauer, P., Niklitschek, E., Montory, J., Paschke, K., Garcés, C., Lázaro-López, O. (2022). Predation of the crab *Acanthocyclus albatrossis* on seeds of the bivalve *Mytilus chilensis* under different environmental conditions: Importance of prey and predator size. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jembe.2022.151730>

Valdevenito, P., San Martín, J., Vellojin, J. (2025). Informe Final: Programa de centro de datos oceanográficos y ambientales en la zona sur-austral de Chile, 2024 - 2025.

Subsecretaría de Economía y EMT. IFOP.

http://biblioteca.ifop.cl/exlibris/aleph/u23_1/adam_objects/ifp01/view/5/Programadecentrodedatos_000041801.pdf

Valle-Levinson, A., Sarkar, N., Sanay, R., Soto, D., Leon, J. (2007) Spatial structure of hydrography and flow in a Chilean fjord, estuario reloncaví. *Estuar Coast* 30:113–126. <https://doi.org/10.1007/BF02782972>.

Vargas, C.A., Contreras, P.Y., Pérez, C.A., Sobarzo, M., Saldías, G.S., Salisbury, J., (2016). Influences of riverine and upwelling waters on the coastal carbonate system off Central Chile and their ocean acidification implications. *Eur. J. Vasc. Endovasc. Surg.* 121, 1468–1483. <https://doi.org/10.1002/2015JG003213>.

Vargas, C.A., Gelcich, S. (2024). Integrated actions across multiple sustainable development goals (SDGs) can help address coastal ocean acidification. *Commun Earth Environ* 5, 319. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01485-6>

Vargas, C.A., Lagos, N.A., Lardies, M.A., Duarte, C., Manríquez, P.H., Aguilera, V.M., Broitman, B., Widdicombe, S., Dupont, S., (2017). Species-specific responses to ocean acidification should account for local adaptation and adaptive plasticity. *Nat. Ecol. Evol.* 1, 0084. <https://doi.org/10.1038/s41559-017-0084>.

Vázquez, F., Chica, J., Barragán, J. (2025). Climate Change in Chiloé (Chile): Trends, Coastal Zones and Socio-Ecological Conflicts. *Island Studies Journal*, Early access. <https://doi.org/10.24043/001c.138657>

Velasco, L., Navarro, J. (2002). Feeding physiology of infaunal (*Mulinia edulis*) and epifaunal (*Mytilus chilensis*) bivalves under a wide range of concentrations and qualities of sestón. <http://dx.doi.org/10.3354/meps240143>

Velasco, L., Navarro, J. (2003). Energetic balance of infaunal (*Mulinia edulis* King, 1831) and epifaunal (*Mytilus chilensis* Hupe, 1854) bivalves in response to wide variations in concentration and quality of sestón. [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-0981\(03\)00316-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-0981(03)00316-2)

Velasco, L., Navarro, J. (2005). Feeding physiology of two bivalves under laboratory and field conditions in response to variable food concentrations. <http://dx.doi.org/10.3354/meps291115>

Ventura, A., Schulz, S., & Dupont, S. (2016). Maintained larval growth in mussel larvae exposed to acidified under-saturated seawater. *Scientific Reports*, 6(1), 23728. <https://doi.org/10.1038/srep23728>

Waldbusser, G. G., Hales, B., Langdon, C. J., Haley, B. A., Schrader, P., Brunner, E. L., Gray, M. W., Miller, C. A., Gimenez, I., & Hutchinson, G. (2015). Ocean Acidification Has Multiple Modes of Action on Bivalve Larvae. *PLOS ONE*, 10(6), e0128376-. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0128376>

Walther, G.R., Post, E., Convey, P., Menzel, A., Parmesan, C., Beebee, T., Fromentin, J-M., et al. (2002). Ecological responses to recent climate change. *Nature*, 416: 389–395. <https://doi.org/10.1038/416389a>

Widdows, J. (1985). Physiological procedures. In: Bayne, B.L. (Ed.), *The Effect of Stress and Pollution on Marine Animals*. Praeger, New York, pp. 161e178.

Widdicombe, S., Spicer, J.I., 2008. Predicting the impact of ocean acidification on benthic biodiversity: what can animal physiology tell us? *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 366, 187e197. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2008.07.024>.

Wolfe, K., Nguyen, H.D., Davey, M., Byrne, M., (2020). Characterizing biogeochemical fluctuations in a world of extremes: a synthesis for temperate intertidal habitats in the face of global change. *Glob. Chang. Biol.* 26, 3858–3879. <https://doi.org/10.1111/qcb.15103>.

Wolf-Gladrow, D., Riebessel, U., Brukhardt, S., Bijma, J. (1999). Direct effects of CO₂ concentration on growth and isotopic composition of marine plankton. *Tellus B*, 51 (1999), pp. 461-476. <https://doi.org/10.3402/tellusb.v51i2.16324>

Yevenes, M.A., Bello, E., Sanhueza-Guevara, S., Farías, L., (2016). Spatial distribution of nitrous oxide (N₂O) in the Reloncaví estuary–sound and adjacent sea (41 °–43 ° S). *Chilean Patagonia. Estuar Coast* 40 (3), 807–821. <https://doi.org/10.1007/s12237-016-0184-z>.

IX. Anexos

1. Anexo 1.

Autores y año de publicación	Título	DOI link
Castillo et al., 2024	Small-scale geographic differences in multiple-driver environmental variability can modulate contrasting phenotypic plasticity despite high levels of gene flow	https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176772
Navarro et al., 2024	Testing the physiological capacity of the mussel <i>Mytilus chilensis</i> to establish into the Southern Ocean	http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170941
Grenier et al., 2020	The combined effects of salinity and pH on shell biomineralization of the edible mussel <i>Mytilus chilensis</i> .	http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114555
Mellado et al., 2019	Ocean acidification exacerbates the effects of paralytic shellfish toxins on the fitness of the edible mussel <i>Mytilus chilensis</i>	http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.399
Diaz et al., 2018	Transgenerational Effects of pCO ₂ -Driven Ocean Acidification on Adult Mussels <i>Mytilus chilensis</i> Modulate Physiological Response to Multiple Stressors in Larvae	http://dx.doi.org/10.3389/fphys.2018.01349
Duarte et al., 2018	The energetic physiology of juvenile mussels, <i>Mytilus chilensis</i> (Hupe): The prevalent role of salinity under current and predicted pCO ₂ scenarios	http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2018.06.053

Navarro et al., 2016	Ocean warming and elevated carbon dioxide: multiple stressor impacts on juvenile mussels from southern Chile	http://dx.doi.org/10.1093/icesjms/fsv249
Duarte et al., 2015	Intraspecific Variability in the Response of the Edible Mussel <i>Mytilus chilensis</i> (Hupe) to Ocean Acidification	http://dx.doi.org/10.1007/s12237-014-9845-y
Duarte et al., 2014	Combined effects of temperature and ocean acidification on the juvenile individuals of the mussel <i>Mytilus chilensis</i>	http://dx.doi.org/10.1016/j.seares.2013.06.002
Navarro et al., 2013	Impact of medium-term exposure to elevated pCO ₂ levels on the physiological energetics of the mussel <i>Mytilus chilensis</i>	http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.09.063
Velasco et al., 2005	Feeding physiology of two bivalves under laboratory and field conditions in response to variable food concentrations	http://dx.doi.org/10.3354/meps291115
Navarro et al., 1982	Ingestion rate, assimilation efficiency and energy-balance in <i>Mytilus chilensis</i> in relation to body size and different algal concentrations	http://dx.doi.org/10.1007/BF00397666

Tabla 12. *Listado de referencias bibliográficas utilizadas para la jerarquización de variables ambientales y determinación de umbrales óptimos.*

2. Anexo 2.

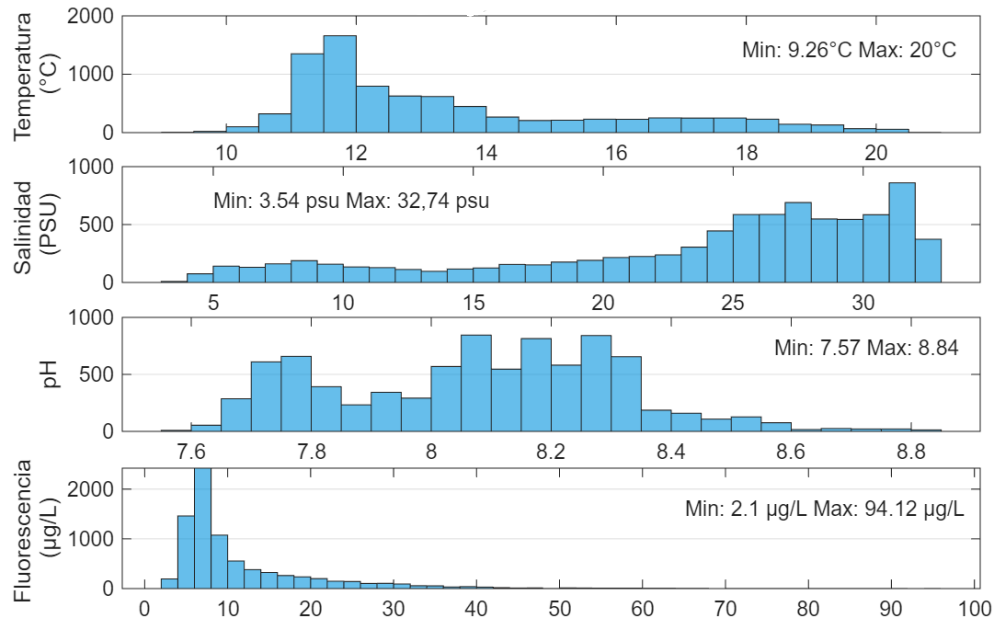


Figura 18. Distribución de frecuencias y valores extremos de los parámetros ambientales registrados en la estación Reloncaví.

Nota. Realizado con apoyo de software MATLAB.

3. Anexo 3.

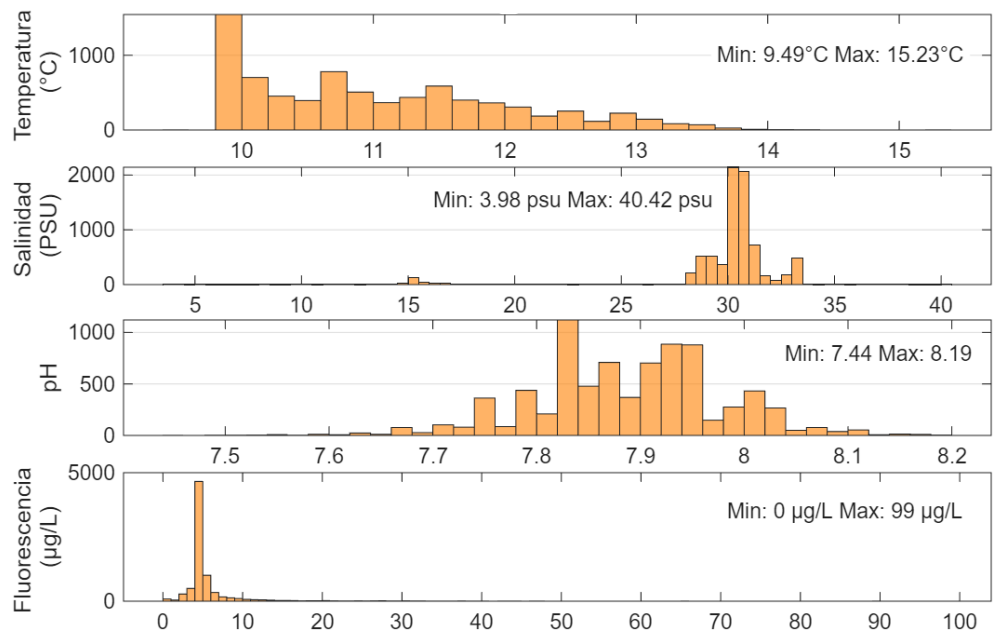


Figura 19. Distribución de frecuencias y valores extremos de los parámetros ambientales registrados en la estación Chiloé.

Nota. Realizado con apoyo de software MATLAB.

4. Anexo 4.

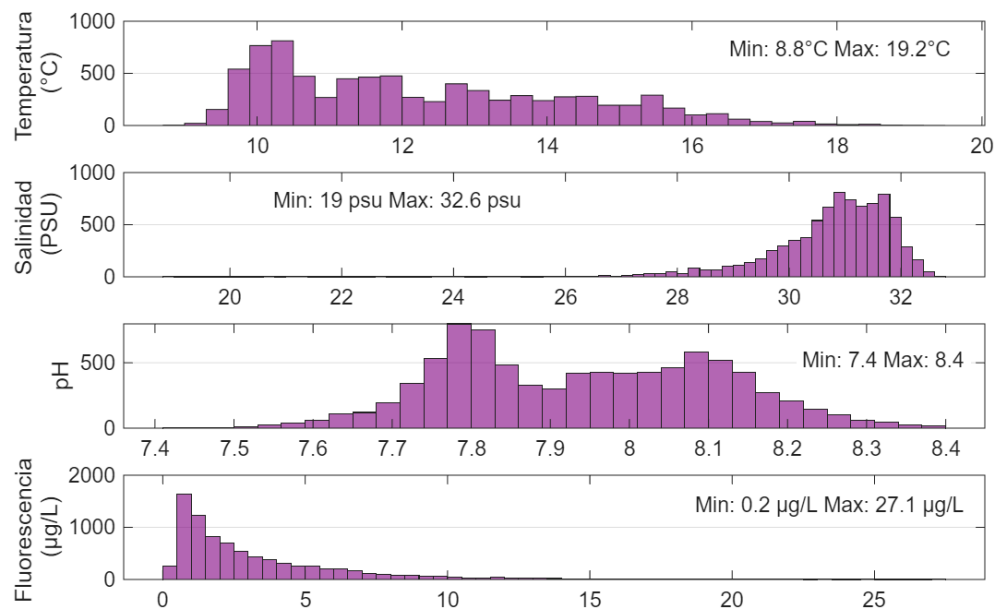


Figura 20. Distribución de frecuencias y valores extremos de los parámetros ambientales registrados en la estación El Manzano.

Nota. Realizado con apoyo de software *MATLAB*.

5. Anexo 5.

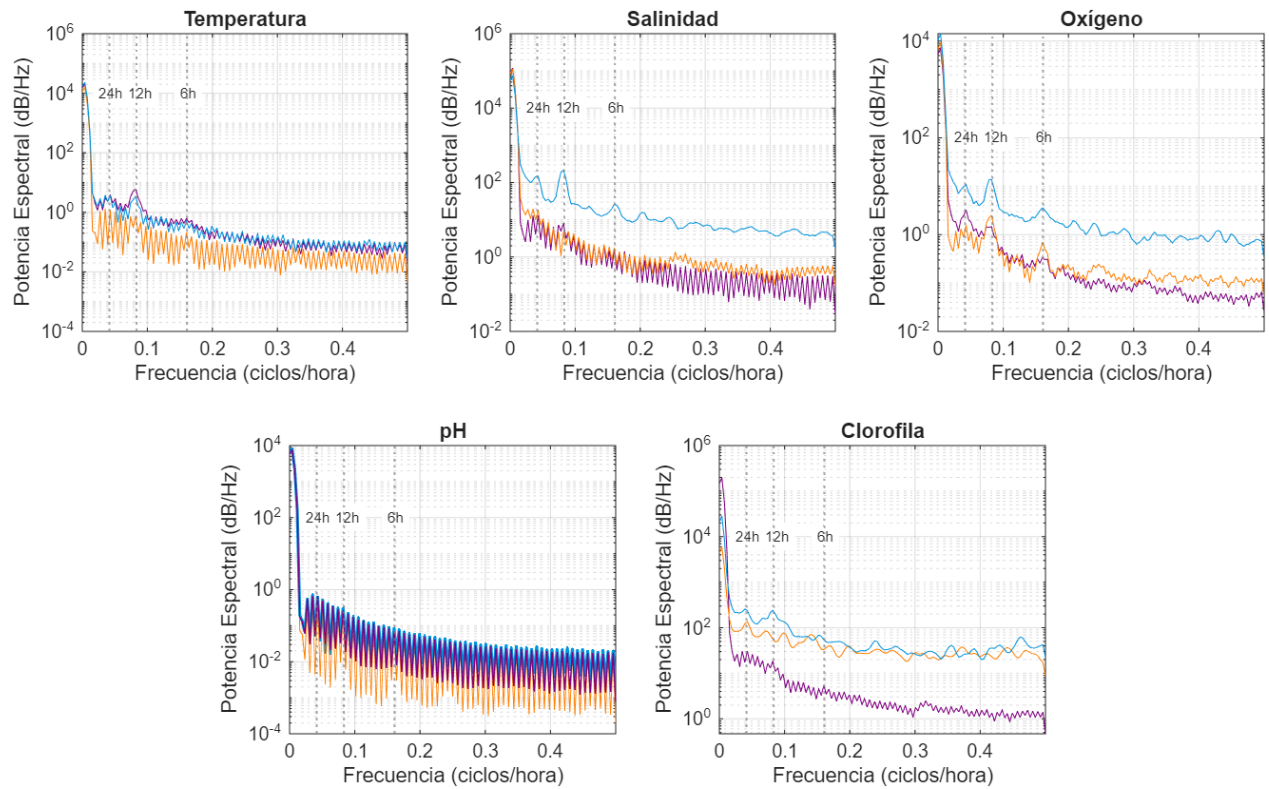


Figura 21. Densidad de Potencia Espectral (PSD) para la identificación de ciclos temporales de las variables ambientales en las tres estaciones de monitoreo.

Nota. Realizado con apoyo de software MATLAB.