



Universidad de Concepción

Dirección de Postgrado
Facultad de Ciencias Ambientales
Programa de Doctorado en Ciencias Ambientales mención Sistemas Acuáticos
Continetales

**Utilizando el conocimiento del desempeño fisiológico como
medida de adaptación del sistema socioecológico de la
industria mitilicultora frente a eventos ambientales extremos**

Tesis para optar al grado de

**Doctor en Ciencias Ambientales con mención en Sistemas Acuáticos
Continetales**

NICOLE CECILIA CASTILLO VILLAGRÁN

CONCEPCIÓN-CHILE
2024



Universidad de Concepción

Dirección de Postgrado
Facultad de Ciencias Ambientales
Programa de Doctorado en Ciencias Ambientales mención Sistemas Acuáticos
Continetales

**Utilizando el conocimiento del desempeño fisiológico como
medida de adaptación del sistema socioecológico de la
industria mitilicultora frente a eventos ambientales extremos**

Tesis para optar al grado de

**Doctor en Ciencias Ambientales con mención en Sistemas Acuáticos
Continetales**

NICOLE CECILIA CASTILLO VILLAGRÁN

CONCEPCIÓN-CHILE
2024

Profesor guía: Dr. Cristian A. Vargas Gálvez
Facultad de Ciencias Ambientales y Centro EULA
Universidad de Concepción
Profesor co-guía: Dr. Roberto D. Ponce Oliva
Escuela de Economía y Negocios
Universidad del Desarrollo

Esta tesis de Doctorado en Ciencias Ambientales con mención en Sistemas Acuáticos continentales fue realizada en el Laboratorio de Ecosistemas Costeros y Cambio Ambiental Global (ECCALab) de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad de Concepción.

Profesores Integrantes Comisión Evaluadora:

Dr. Cristian A. Vargas Gálvez

Profesor Guía
Facultad de Ciencias Ambientales
Universidad de Concepción, Chile

Dr. Roberto D. Ponce Oliva

Profesor Co-guía
Escuela de Economía y Negocios
Universidad del Desarrollo, Chile

Dr. Stefan Gelcich Crossley

Miembro Comité de Tesis
Departamento de Ecología
Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile

Dr. Alberto Araneda Castillo

Evaluador Interno
Facultad de Ciencias Ambientales
Universidad de Concepción, Chile

Dr. Hannes Baumann

Evaluador Externo
Department of Marine Sciences
University of Connecticut, Estados Unidos

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi querida **Universidad de Concepción**. Es un orgullo haber sido formada desde el pregrado por esta prestigiosa institución, que no solo ha sido fundamental en mi desarrollo profesional e inspiración en el mundo de la ciencia, sino que también ha formado académicamente a mis padres (Ricardo y Cecilia), hermanas (Daniela y Fernanda) y a Maite en el vóley (U15).

Asimismo, quiero destacar y agradecer todo el apoyo entregado por mi profesor guía, Dr. Cristian Vargas, quien ha sido mi mentor desde el pregrado y ha jugado un papel clave en mi desarrollo profesional. También extendiendo mi agradecimiento al Dr. Roberto Ponce (co-guía) por introducirme a temas que, hasta hace algún tiempo, eran muy complejos y distantes. Sin duda, este trabajo ha contado siempre con el respaldo de los integrantes del **Laboratorio de Ecosistemas Costeros y Cambio Ambiental Global (ECCALab)**, a quienes también agradezco de todo corazón.

Agradezco el apoyo y la confianza del **Instituto Milenio en Socio-Ecología Costera (SECOS)** - Código ICN2019_015, así como el financiamiento de la Beca de Doctorado Nacional de la ANID N° 21210703.

La familia es fundamental. Es por esto que quisiera agradecer enormemente a mi abuela, padres, Luis, Camelia, Nigga María, hermanas, Maite, Rosario y Máximo, cuñados, primo/as, tíos/as, Laguna, Don Conejo, Ramona y amigos/as por el apoyo extraordinario durante este proceso. Mención honrosa a mi Luis, quien me acompañó en terrenos, experimentos con intensos muestreos, entre otros y, siempre tuvo plena disposición en apoyarme en cada momento.

De igual manera, quisiera recordar aquellos que ya no están entre nosotros, pero que sin duda también me han acompañado y han sido parte de esta tremenda aventura.

CURRICULUM VITAE

- **Nombre:** Nicole Cecilia Castillo Villagrán
- **Fecha nacimiento:** 17 junio 1987
- **Nacionalidad:** Chilena
- **Dirección:** El Roble 330 Penco, Chile
- **Teléfono:** +56 9 9577 2041
- **Mail:** nicastillo.villagran@gmail.com / nicastillo@udec.cl

1. FORMACIÓN ACADÉMICA

- Año 2000 – 2004: Enseñanza media, The Wessex School, Concepción, Chile.
- Año 2009 – 2015: Grado Académico: Licenciada en Biotecnología Marina y Acuicultura, Universidad de Concepción, Concepción, Chile.
- Año 2019 – 2024: Postgrado: Candidata a Doctora en Ciencias Ambientales con mención en Sistema Acuáticos Continentales, Universidad de Concepción, Concepción, Chile.

2. LÍNEA DE INVESTIGACIÓN DE LA TESIS

- a) Principal: Cambio global, sociedad y agua
- b) Secundaria: Biodiversidad, servicios ecosistémicos y agua

3. PRODUCTIVIDAD DURANTE SU PERMANENCIA EN EL PROGRAMA

a) Artículos WOS relacionados con la tesis

- I. **Nicole Castillo**, Juan Diego Gaitán-Espitia, Julian F. Quintero-Galvis, Gonzalo S. Saldías, Sebastián Martel, Marco A. Lardies, Andrés Mesas, Iván Pérez-Santos, Stefan Gelcich, and Cristian A. Vargas, 2024. Small-scale geographic differences in multiple-driver environmental variability can modulate contrasting phenotypic plasticity despite high levels of gene flow. *Science of the Total Environment*, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176772>

- II. **Nicole Castillo**, Julián Andrés Díaz Tautiva and Roberto Ponce. Charting the Path: Unraveling the Research on Organizations and Certification Schemes (1999-2022). Aceptada en *Sage Open*.

b) Artículos WOS no vinculados a la tesis

- I. Cristian A. Vargas, Karen Garcés, L. Antonio Cuevas, **Nicole Castillo**, Erika Jorquera, Jorge Félez-Bernal & Mauricio Urbina, 2024. Diel variability and decoupling of dissolved oxygen and pH influence contrasting metabolism in kelp crabs across a coastal upwelling area. (*En preparación – Revista Philosophical Transactions of the Royal Society B*)
- II. Adonis Conejeros, Valeska A. San Martín, **Nicole Castillo**, L. Antonio Cuevas, Karen Garcés, Ricardo O. Barra, Víctor M. Aguilera and Cristian A. Vargas, 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. *Marine Environmental Research*, 106727, 0141-1136, <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2024.106727>
- III. Mauricio A. Urbina, Caroline da Silva Montes, Angela Schäfer, **Nicole Castillo**, Ángel Urzúa and Marcelo E. Lagos, 2023. Slow and steady hurts crab: The effects of chronic and acute microplastic exposures on a filter feeder crab. *Science of The Total Environment*, 857, 159135. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159135>
- IV. Marcelo E. Lagos, **Nicole Castillo**, Natalia Albarrán-Mélzer, Javier Pinochet, Paulina Gebauer and Mauricio A. Urbina, 2021. Age dependent physiological tolerances explain population dynamics and distribution in the intertidal zone: A study with Porcelain crabs. *Marine Environmental Research*, 169, 105343. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2021.105343>
- V. **Nicole Castillo**, Luisa M. Saavedra, Cristian A. Vargas, Cristian Gallardo-Escárate, Camille Détrée (2017). Ocean acidification and pathogen exposure modulate the immune response of the edible mussel *Mytilus chilensis*. *Fish & Shellfish Immunology*, 70, 149-155, <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2017.08.047>

c) Congresos Internacionales y Nacionales

- I. **Nicole Castillo**, Juan Diego Gaitán-Espitia, Julian F. Quintero-Galvis, Gonzalo S. Saldías, Sebastián I. Martel, Marco A. Lardies, Andrés Mesas, Iván E. Pérez-Santos, Stefan Gelcich, & Cristian A. Vargas (2024). “Variabilidad ambiental y su implicancia en la respuesta fisiología de organismos marinos de importancia socio-económica: Caso de estudio del

M. chilensis". XXX Reunión Anual Sociedad de Ecología de Chile, La Serena, Región de Coquimbo, Chile. 05 – 08 de Noviembre 2024. (Simposio).

- II. **Nicole Castillo**, Andrés Mesas, Sebastián Martel & Cristian A. Vargas (2022). "Physiological performance curves of the Chilean mussels, *Mytilus chilensis* from populations inhabiting coastal areas with different temperature, salinity and pH variability regimes". 4th International Symposium on Advances in Marine Mussel Research, Saunton Sands, Devon, UK. 21-23 de Noviembre 2022. (Presentación oral)
- III. **Nicole Castillo**, Andrés Mesas, Sebastián Martel & Cristian A. Vargas (2022). "Comparison of the environmental tolerance of different populations of MYTILUS CHILENSIS seeds against different environmental gradients of temperature, salinity and pH/pCO₂". 5th Symposium in a high CO₂ world, Lima, Perú. 13 – 16 de Septiembre 2022. (Póster)

d) Pasantía

- I. 26 de Noviembre – 11 de Diciembre (2019). Sven Löven Research Centre. Universidad de Gotemburgo. Suecia. Profesor anfitrión: Sam Dupont.

e) Financiamiento

- **Extensión de Beca para la redacción de tesis doctoral, 2023.** Otorgado por la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo de Chile (ANID).
- **Extensión de Beca por COVID-19, 2023.** Otorgado por la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo de Chile (ANID).
- **Beca ANID Gastos de Operaciones, 2022.** Beca otorgada por la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo para la ejecución de los gastos asociados al proyecto de tesis.
- **Beca ANID Doctorado Nacional, 2021.** Beca de Estudios de Doctorado en Chile, año académico 2021. Otorgado por la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo de Chile (ANID).
- **Beca de Postgrado, 2020.** Beca para el estudio de Doctorado en Ciencias Ambientales con mención en sistemas acuáticos continentales, otorgada por la Dirección de Postgrado de la Universidad de Concepción.
- **Beca de Postgrado, 2019.** Beca para el estudio de Doctorado en Ciencias Ambientales con mención en sistemas acuáticos continentales, otorgada por la Dirección de Postgrado de la Universidad de Concepción.

4. Resumen de Difusión

Los ecosistemas marinos son heterogéneos, presentando variaciones en sus parámetros bióticos y abióticos a lo largo de escalas espaciales y temporales. Ante estas fluctuaciones, los organismos pueden responder mediante la plasticidad fenotípica, es decir, la capacidad de modificar su fisiología, comportamiento o morfología, permitiéndoles sobrevivir en un entorno dinámico y de constante transformación. No obstante, en el contexto actual de cambio global, los océanos enfrentan alteraciones impulsadas principalmente por la actividad antropogénica, provocando implicancias en la frecuencia de eventos extremos y cambios en la respuesta de los organismos.

Las curvas de desempeño son una herramienta clave para comprender cómo los organismos responden a diferentes variables ambientales. Estas curvas describen la respuesta de un organismo en función de un gradiente ambiental, utilizando parámetros como el rendimiento máximo ($P_{m\acute{a}x}$), el óptimo (X_{opt}) y la amplitud (X_{br}). La forma de las curvas refleja el desempeño de los organismos en distintos escenarios ambientales y permite identificar si son más especialistas o generalistas: curvas más estrechas sugieren una especialización a condiciones específicas, mientras que curvas amplias indican una mayor tolerancia a diversas condiciones. Este conocimiento es fundamental para entender la persistencia de los organismos en el contexto del cambio global.

En el sur de Chile, la industria de cultivo del mejillón chileno o “chorito”, *Mytilus chilensis*, enfrenta desafíos debido a que depende totalmente de la captación de semillas a partir de bancos naturales. Esto hace que cambios en el ambiente, impacten directamente a la actividad, generando la necesidad de comprender las respuestas fisiológicas de los organismos ante las condiciones ambientales actuales y futuras.

Este estudio adopta un enfoque integrador centrado en semillas de *M. chilensis* con el objetivo de comprender su respuesta frente a la temperatura, salinidad y pH del agua de mar pudiendo utilizar esta información en el sistema socio-ecológico de la industria mitilicultora. Para ello, se analizaron tres sitios de importancia para la captación de semillas con datos de series de tiempo oceanográficas: Puelo (Fiordo), Metri (Seno) y Caleta El Manzano (Bahía) (**Figura**

1). Estos a pesar de encontrarse en una pequeña escala espacial poseen características ambientales contrastantes.

Los resultados destacan a la plasticidad fenotípica como un mecanismo clave que permite a los organismos ajustar sus óptimos según su procedencia, modulada por la interacción entre la variabilidad y la predictibilidad ambiental. Los análisis de series de tiempo revelaron que, aunque existe un patrón estacional común, el fiordo presenta las fluctuaciones más extremas y menos predecibles en temperatura y salinidad. Las curvas de desempeño mostraron diferencias significativas en la tasa de aclaramiento. Por ejemplo, los mejillones de Puelo mostraron un óptimo térmico (T_{opt}) y rendimiento máximo (P_{max}) más alto, mientras que los de Metri exhiben mayor amplitud térmica (T_{br}). En términos de salinidad, El Manzano mostró un P_{max} con un S_{br} estrecho de tolerancia, mientras que los del fiordo tuvieron una mayor S_{br} en salinidad, lo que sugiere ser más especialistas. Finalmente, los mejillones del fiordo mostraron el mayor P_{max} frente al pH, y los de El Manzano la mayor pH_{br} . Además, se detectó bajos niveles de diferenciación genética, atribuibles a la translocación de semillas por la mitilicultura y a la heterogeneidad de las mismas.

Chile, uno de los principales exportadores de mejillones, carece de definiciones comunes en la actividad, lo que obstaculiza prácticas sostenibles. La compra-venta de semillas ocurre mayormente de forma informal, limitando el poder de negociación y la protección de las partes. Para abordar esto, se indaga inicialmente sobre la certificación, incluyendo conceptos e información básica sobre las características de las semillas. Las entrevistas iniciales definieron la “calidad” de las semillas en términos de mortalidad. Sin embargo, en escenarios de cambio global, la calidad también podría depender de la tolerancia a condiciones ambientales extremas, como baja salinidad o de pH, información clave para la planificación espacial de la acuicultura.

Así, los resultados de esta tesis doctoral son fundamentales para integrar disciplinas como oceanografía, fisiología, genética y socioecología, contribuyendo a la planificación espacial de la mitilicultura. Esto permitiría optimizar la producción, reducir los riesgos asociados a eventos extremos y promover una gestión sostenible de los recursos.

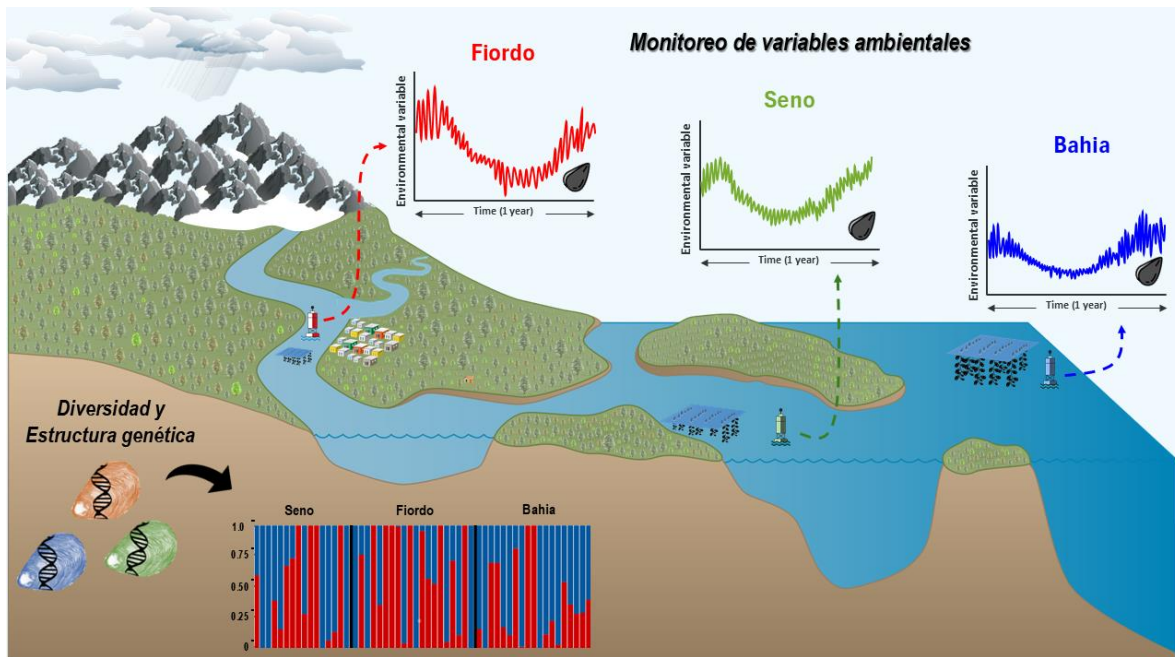


Figura 1: Diagrama resumen del objetivo específico 1, 2 y 3 asociado a la tesis doctoral.

Esta Tesis fue realizada con financiamiento otorgado por:

AGENCIA NACIONAL DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO (ANID)

Programa Formación de Capital Humano

Becas Doctorado nacional, Chile

Folio N° 21210703



Centro de excelencia del programa Milenio de la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID)

Instituto Milenio en Socio-Ecología Costera (SECOS)

Código ICN2019_015



Dirección de Postgrado

Universidad de Concepción



ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS	15
ÍNDICE DE TABLAS	18
RESUMEN	19
ABSTRACT	23
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN GENERAL	
1. Introducción	28
1.1 Variabilidad y predictibilidad ambiental en ambientes costeros heterogéneos	28
1.2 Plasticidad fenotípica de invertebrados marinos en un ambiente cambiante	31
1.3 Estructura y conectividad genética poblacional en invertebrados marinos	34
1.4 <i>Mytilus chilensis</i> como modelo biológico para estudiar el desempeño fisiológico bajo condiciones ambientales extremas	36
1.5 Sistema socioecológico de la industria mitilicultora	36
CAPÍTULO II: HIPÓTESIS Y OBJETIVOS	
2.1. Hipótesis	41
2.2. Objetivos	41
2.2.1 Objetivo general	41
2.2.2 Objetivos específicos	41
CAPÍTULO III: SMALL-SCALE GEOGRAPHIC DIFFERENCES IN MULTIPLE-DRIVER ENVIRONMENTAL VARIABILITY MODULATE PLASTICITY DESPITE HIGH LEVELS OF GENE FLOW	
3.1. Introduction	46
3.2. Material and methods	50
3.2.1 Animal collection and study sites	50
3.2.2 Characterization of environmental variability regimes and predictability	50

3.2.3 Experimental set-up	52
3.2.4 Physiological performance curves	52
3.2.5 Performance curve parameters and statistical analyses	53
3.2.6. DNA sample collection and processing	54
3.2.7 Genetic diversity, population structure, and bioinformatics analysis	55
3.3. Results	57
3.3.1 Environmental variability and predictability	57
3.3.2 Physiological performance	58
3.3.3 Genetic diversity and structure	62
3.4. Discussion	63
3.5. References	70
CAPÍTULO IV: CARACTERIZACIÓN DEL MERCADO DE LAS SEMILLAS	
4.1. Introducción	85
4.2. Materiales y Métodos	89
4.2.1 Caso de estudio	89
4.2.2 Antecedentes históricos	90
4.3.3 Entrevistas semi-estructuradas	93
4.3. Resultados	95
4.3.3.1. Sección 1	95
4.3.2.2. Sección 2	96
4.3.2.3. Sección 3	99
4.3.2.4. Sección 4	101
4.4. Discusión	104
4.5 Referencias	109
CAPÍTULO V: CHARTING THE PATH: UNRAVELING THE RESEARCH ON ORGANIZATIONS AND CERTIFICATION SCHEMES (1999-2022)	
5.1. Introduction	117
5.2. Data and Methods	121

5.3. Results	125
5.3.1. Basic Characteristics of the literature	125
5.3.1.1 Annual change in the number of publications	125
5.3.1.2 Distribution by world region and organizations	126
5.3.1.3 Journal analysis	129
5.3.1.4 Authors analysis	131
5.3.1.5 Cited References analysis	135
5.3.2. Conceptual Structure: A cluster Analysis	138
5.3.2.1. Business and economic category	138
5.3.2.2. Sustainability category	140
5.3.2.3. Engineering category	142
5.4. Implications, empirical gaps, and further research opportunities.	144
5.5. Conclusions and limitations	150
Appendix	152
Reference	153
CAPÍTULO VI: Discusión y Conclusión	161
CAPÍTULO VII: REFERENCIAS GENERALES	176

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama resumen del objetivo específico 1, 2 y 3 asociado a la tesis doctoral.

Figura. 1.1. Anomalía global de la temperatura superficial del agua de mar. Fuente: ClimateReanalyzer.org

Figura. 3.1. Sample Sites, Oceanographic Buoys, and Experimental Design. (A) Map showing the locations of mussel collection and the deployment of oceanographic buoys at the Sound (green), Fjord (red), and Embayment (blue) sites in Southern Chile. Mussel individuals were transferred to the Micro/Mesocosm Laboratory at the Marine Biology Station in Dichato, Chile, where they were exposed to common garden conditions for three weeks. Map Source: Created using the free and open-source software QGIS. (B) Performance curves of mussel physiology were designed based on the environmental variability in temperature, salinity, and pH recorded by the oceanographic buoys, as well as extreme conditions. (C) Following the clearance rate experiments, tissue samples from each mussel spat were extracted to assess and describe genetic diversity and population structure across the three sites using standard population genetic parameters.

Figura. 3.2. Natural environmental variability regime and predictability (β) across mussel study sites. (A) Map showing *M. chilensis* spat collection sites at the three different locations (represented by full circles; green = sound, red = fjord, and blue = embayment). Temporal series (line plots) and frequency analysis (bars plots) of surface (upper ~ 3.5 m depth) temperature, salinity, and pH for each site. Map Source: Landsat 9, United States Geological Survey, USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov/>), 2024. (B) Sound, (C) Fjord, and (D) Embayment. Analyses were based on 1-year data set for fjord (from Vergara-Jara et al. 2019), 6-years of data from the Reloncavi Marine Observatory (OMARE) from I-mar Research Centre (2018-2023), and unpublished data from an oceanographic buoy at the Coastal Monitoring Platform from SECOS Research Institute (2019-2023).

Figura. 3.3. Interpopulation variation in clearance rate performance under multiple-stressors. Clearance rate performance curves for mussels from the different studied sites (e.g., green= sound, red= fjord, and blue= embayment), across

a gradient of. A. Temperature, b. Salinity, and c. pH. Each dot represents one individual (N= 20 individuals population⁻¹). Tests were performed to evaluate the best fit for each performance curve, and detailed results are shown in Table 1.

Figura. 3.4. Population structure and principal component analysis (PCA) of *Mytilus chilensis* from the three studied sites. (A) Bartplot of individual ancestry proportions inferred with sNMF for different K values (2–4) using 30.093 SNPs. Each individual is represented by a vertical bar broken into different colored genetic clusters, with length proportional to the probability of assignment to each cluster. (B) PCA for *M. chilensis* from the three studied sites. The colour of points represents populations (Me = sound, Pu = fjord, and Ma = embayment). The percentage of variation explained by the two axes is indicated in brackets.

Figura. 4.1. Ciclo de vida del chorito o mejillón chileno (*Mytilus chilensis*).
Fuente: Contreras, J. y Godoy, C. 2021. Manual de procedimientos y buenas prácticas para la captación de semillas de chorito (*M. chilensis*) en Áreas de Manejo y Explotación de Recursos Bentónicos. Fortalecimiento de la capacidad de adaptación en el sector pesquero y acuícola chileno al cambio climático. Santiago de Chile.

Figura. 4.2. Proceso de certificación por tercera parte. Fuente: FAO, 2002; OESA, 2017.

Figura. 4.3. Entrevista semi-estructurada realizada en formato online dirigida a actores claves de la industria.

Figura 4.4. Parámetros de calidad expuestos por los entrevistados. Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.5. Diagrama de un tentativo proceso de certificación. Fuente: Elaboración propia.

Figura 5.1. PRISMA Protocol.

Figura 5.2. Publications trend 1999-2022.

Figura 5.3. Global distribution of publication density

Figura 5.4. Journals' co-citation network. Note: the first panel identifies the journal network, and the second panel identifies the network' density. Journals with 200 citations. Created using VOS Viewer version 1.6.17.

Figura 5.5. Co-authorship network. Note: the first panel identifies the co-authorship network, and the second panel identifies the network' density. 105 Authors with at least 3 publications. Created using VOS Viewer version 1.6.17.

Figura 5.6. Co-authorship network main component. Note: Created using VOS Viewer version 1.6.17.

Figura 5.7. Authors' co-citation network. Note: the first panel identifies the co-citations network, and the second panel identifies the network' density. 36 Authors with at least 70 co-citations. Created using VOS Viewer version 1.6.17.

Figure 5.8. Network of co-occurrence by authors' keywords- business and economics category. Note: the first panel identifies the co-occurrence network, and the second panel identifies the network' evolution. 24 keywords with at least 15 co-occurrences. Created using VOS Viewer version 1.6.17.

Figura 5.9. Network of co-occurrence by authors' keywords- sustainability category. Note: the first panel identifies the co-occurrence network, and the second panel identifies the network' evolution. 28 keywords with at least 10 co-occurrences. Created using VOS Viewer version 1.6.17. Figure 4.15. Main component network of co-occurrence by authors' keywords- engineering category. Note: the first panel identifies the co-occurrence network, and the second panel identifies the network' evolution. 11 keywords with at least 5 co-occurrences. Created using VOS Viewer version 1.6.17.

Figura 5.10. Main component network of co-occurrence by authors' keywords- engineering category. Note: the first panel identifies the co-occurrence network, and the second panel identifies the network' evolution. 11 keywords with at least 5 co-occurrences. Created using VOS Viewer version 1.6.17.

Figura 6.1. Diagrama de planificación espacial de la mitilicultura a partir de curvas de rendimiento representando la respuesta de organismos generalistas (curva naranja) y especialistas (curva morada) a distintos tipos de ambientes. Fuente: Elaboración propia.

ÍNDICE DE TABLAS

Table 3.1. Best model fitting for performance curves of clearance rate across a gradient of three environmental variables for *M. chilensis* juveniles from three different study sites.

Table 3.2. Results for variance analyses (for clearance rate) of the three studied sites of *Mytilus chilensis*.

Table 3.3. Genetic diversity indices based on SNPs for juvenile of *Mytilus chilensis* from three different geographic sites.

Tabla 4.1. Atributos del colector asociados a la calidad de semilla de *M. chilensis* y sus correspondientes niveles.

Table 4.2. Previous Literature Reviews

Table 4.3. Keywords

Table 4.4. Top 10 countries by published papers.

Table 4.5. Region distribution by published papers.

Table 4.6. Top 10 research organizations by published papers.

Table 4.7. Top 10 contributing journals

Table 4.8. Top 10 journals by co-citations

Table 4.9. Top 10 authors by citations

Tabla 4.10. Cluster of authors in the co-authorship main component

Tabla 4.11. Top 10 authors by co-citations

Tabla 4.12. Top 10 references by co-citation

Table 4.13. Cluster of Authors' Co-Citation Network

Tabla 4.14. Cluster of authors' keywords- business and economics category

Table 4.15. Cluster of authors' keywords- sustainability category

Tabla 4.16. Cluster of authors' keywords- engineering category

Table 4.17. Future research directions- business and economics

Tabla 4.18. Future research directions- engineering

Tabla 4.19. Future research directions- sustainability

RESUMEN

La plasticidad fenotípica se define como la capacidad de un genotipo para expresar diferentes fenotipos en respuesta a cambios ambientales, modificando su fisiología, comportamiento o morfología. Al mismo tiempo, este mecanismo permite a los organismos maximizar su aptitud en un entorno cambiante. Sin embargo, no todos los organismos responden de la misma forma, algunos desarrollan características especialistas, mientras que otros son generalistas, tolerando una gama más amplia de condiciones ambientales.

La variabilidad y la predictibilidad ambiental en los sistemas costeros han permitido que ciertos organismos, como los bivalvos marinos, desarrollen una amplia tolerancia a las condiciones oceanográficas diversas, acentuando diferencias intraespecíficas en la capacidad de adaptación (por ejemplo, plasticidad y potencial evolutivo) de poblaciones naturales. Bajo el contexto actual de cambio global, los océanos están experimentando diversas alteraciones, impulsadas principalmente por la actividad antropogénica, lo que ha provocado múltiples implicancias en la frecuencia de eventos extremos (por ejemplo, 'olas de calor', 'descargas extremas de agua dulce', 'eventos de acidificación costera', entre otros) y cambios en la respuesta de los organismos, entre otros.

En el sur de Chile, la mitilicultura se ha convertido en una de las industrias acuícolas de mayor importancia comercial, concentrada en la región de Los Lagos, donde se cultiva a gran escala el "mejillón chileno" o "chorito" (*Mytilus chilensis*). Esta industria proporciona una serie de beneficios económicos y son forma parte del estilo de vida de las comunidades locales. Su cadena productiva involucra a una diversidad de actores, desde grandes empresas hasta pescadores artesanales dedicados a la captación de semillas y al cultivo de este molusco.

El suministro clave para esta industria corresponde al abastecimiento de semillas desde bancos naturales, por lo que cualquier alteración en los parámetros ambientales (por ejemplo, temperatura, salinidad y pH/pCO₂) puede significar un riesgo para la actividad. En los últimos años, la mitilicultura se ha visto enfrentada a una serie de perturbaciones ambientales que han incidido en la actividad, lo que ha manifestado la necesidad de comprender la respuesta de los organismos a

escenarios ambientales actuales y futuros considerando el conocimiento distintas disciplinas. Esto es especialmente relevante considerando que la industria se abastece de semillas provenientes desde sitios con distintos regímenes de variabilidad ambiental.

Este estudio adopta un enfoque integrador del *Mytilus chilensis*, con el objetivo de comprender cómo estos organismos responden en un gradiente ambiental de temperatura, salinidad y pH del agua de mar pudiendo utilizar esta información como una posible medida de adaptación del sistema socioecológico de la industria mitilicultora frente a, por ejemplo, la exposición de eventos ambientales extremos. Para esto, se analizaron tres sitios de importancia para la captación de semillas, los cuales también contaron con la disponibilidad de datos de series de tiempo oceanográficas de al menos un año. Los sitios seleccionados fueron Puelo (fiordo), Metri (seno) y Caleta El Manzano (bahía), los cuales presentan condiciones ambientales contrastantes a pesar de encontrarse en una pequeña escala espacial.

Posteriormente, se realizaron experimentos de exposición para construir curvas de desempeño en respuesta a la exposición de diferentes temperaturas, salinidades y pH a partir de organismos extraídos de los lugares anteriormente mencionados. Además, se incluyeron análisis de diversidad y estructura genética, y entrevistas iniciales con actores clave de la industria.

Esta tesis doctoral se organiza en seis capítulos. Los primeros dos capítulos están dedicados a proveer al lector información general del estudio. En el **Capítulo I** se presenta una introducción general a la presente tesis doctoral, mientras que el **Capítulo II** está dedicado a exponer las hipótesis y objetivos de estudio.

En el **Capítulo III**, se caracterizaron los regímenes de variabilidad y predictibilidad ambiental utilizando los datos de series de tiempo de temperatura, salinidad y pH recopilados por medio de boyas y sensores desplegados en tres sitios de importancia para la captación de semillas en la Patagonia norte de Chile. Posteriormente, se construyeron curvas de rendimiento fisiológico, evaluando la tasa de aclaramiento de semillas recolectadas de las áreas geográficas seleccionadas. Estos datos ambientales y fisiológicos se complementaron con

análisis de estructura y diversidad genética de los individuos provenientes de cada sitio de estudio.

Los resultados mostraron que la variabilidad temporal, la predictibilidad y la exposición a eventos extremos (por ejemplo, pH bajo/salinidad baja) modulan la plasticidad y las condiciones óptimas de los mejillones. Sin embargo, a pesar de estas diferencias fenotípicas, observamos una alta diversidad genética, probablemente como resultado de un alto flujo genético inducido por la actividad acuícola y la fase larvaria de estos organismos. Nuestros hallazgos enfatizan la importancia de la variabilidad y la predictibilidad, en su conjunto, como factores esenciales que dan forma a la diversidad fenotípica, incluso en escalas espaciales pequeñas.

En el **Capítulo IV**, y considerando la importancia socioecológica de esta industria, se indagó en los esquemas de certificación. Lo anterior, considerando que estos sistemas están diseñados para entregar información relevante al mercado. En nuestro contexto, la implementación de un sistema de certificación de semillas, por ejemplo, con respecto al origen, permitiría informar a los compradores (empresas dedicadas al cultivo de mejillones) sobre la potencial plasticidad fenotípica de los individuos con respecto a diversas variables ambientales. Metodológicamente, esta investigación se llevó a cabo mediante entrevistas semiestructuradas con actores clave de la industria mitilicultora, con el objetivo de explorar y entender las relaciones comerciales entre zonas y agentes, y evaluar la viabilidad de un sistema de certificación.

El **Capítulo V** presenta una revisión sistemática de la literatura sobre certificación en distintas áreas productivas (1999-2022), analizando diversos sistemas de certificación incluidas las tendencias en productividad, principales países de publicación, distribución regional y categorías temáticas. Este análisis identificó tres categorías claves: sostenibilidad, ingeniería y negocios y economía, con clústeres temáticos en cada una de estas áreas. Esta revisión sistemática indica además que las organizaciones utilizan esquemas de certificación no solo para gestionar los riesgos ambientales o climáticos sino también para armonizar sus

operaciones en respuesta a las diversas presiones ejercidas por las múltiples partes interesadas y fomentar prácticas organizacionales más sostenibles.

Los efectos del cambio global en los ecosistemas son inevitables, por lo que estudios interdisciplinarios son esenciales para comprender mejor la interacción entre el ambiente, la fisiología y la genética de los organismos y las especies. Estos hallazgos tienen implicaciones en la gestión y sostenibilidad de la mitilicultura, proporcionando información valiosa para optimizar prácticas acuícolas y mejorar las estrategias de adaptación de la industria al cambio climático, en particular para especies de relevancia económica y seguridad alimentaria.

ABSTRACT.

Phenotypic plasticity is defined as the capacity of a genotype to express different phenotypes in response to environmental changes, adapting its physiology, behavior, or morphology. This mechanism allows organisms to maximize their fitness in changing environments. However, not all organisms respond in the same way; some develop specialist traits, while others are generalists, tolerating a broader range of environmental conditions.

Environmental variability and predictability in coastal systems have enabled certain organisms, such as marine bivalves, to develop broad tolerance to diverse oceanographic conditions, accentuating intraspecific differences in adaptive capacity (e.g., plasticity and evolutionary potential) within natural populations. In the current context of global change, oceans are experiencing various alterations, driven mainly by anthropogenic activity. This has led to multiple implications, including an increased frequency of extreme events (e.g., 'heat waves,' 'extreme freshwater discharges,' 'coastal acidification events') and shifts in organismal responses, among others.

In southern Chile, mussel farming has become one of the most commercially significant aquaculture industries, concentrated in the Los Lagos region, where the "Chilean mussel" or "chorito" (*Mytilus chilensis*) is cultivated on a large scale. This industry provides a range of economic benefits and is an integral part of the local communities' way of life. Its production chain involves a diversity of stakeholders, from large companies to artisanal fishermen dedicated to seed collection and mussel farming.

The key supply for this industry corresponds to the sourcing of seeds from natural banks, so any alteration in environmental parameters (e.g., temperature, salinity, and pH/pCO₂) may pose a risk to the activity. In recent years, mussel farming has faced a series of environmental disturbances that have impacted the activity, highlighting the need to understand the response of organisms to current and future environmental scenarios considering knowledge from various disciplines. This is particularly relevant given that the industry sources seeds from sites with different regimes of environmental variability.

This study adopts an integrative approach to *Mytilus chilensis*, aiming to understand how these organisms respond across an environmental gradient of temperature, salinity, and seawater pH, which may be utilized as a potential measure of adaptation within the socio-ecological system of the mussel farming industry in the face of, for example, exposure to extreme environmental events. To this end, three key seed harvesting sites were analyzed, which also had the availability of oceanographic time series data spanning at least one year. The selected sites were Puelo (fjord), Metri (inlet), and Caleta El Manzano (bay), which present contrasting environmental conditions despite being located within a small spatial scale.

Subsequently, exposure experiments were conducted to construct performance curves in response to different temperatures, salinities, and pH using organisms collected from the aforementioned locations. Additionally, analyses of genetic diversity and structure, as well as initial interviews with key industry stakeholders, were included.

This doctoral thesis is organized into six chapters. The first two chapters provide the reader with general information about the study. **Chapter I** presents a general introduction to this doctoral thesis, while **Chapter II** is dedicated to outlining the hypotheses and study objectives.

In **Chapter III**, the regimes of environmental variability and predictability were characterized using time series data of temperature, salinity, and pH collected via buoys and sensors deployed at three key seed harvesting sites in northern Patagonia, Chile. Subsequently, physiological performance curves were constructed, evaluating the clearance rate of seeds collected from the selected geographical areas. These environmental and physiological data were complemented with analyses of structure and genetic diversity of individuals from each study site.

The results showed that temporal variability, predictability, and exposure to extreme events (e.g., low pH/low salinity) modulate the plasticity and optimal conditions of mussels. However, despite these phenotypic differences, we observed high genetic diversity, likely a result of high gene flow induced by aquaculture activity and the larval phase of these organisms. Our findings emphasize the importance of

variability and predictability collectively as essential factors shaping phenotypic diversity, even at small spatial scales.

In **Chapter IV**, considering the socio-ecological importance of this industry, certification schemes were investigated. This is particularly relevant given that these systems are designed to provide relevant information to the market. In our context, implementing a seed certification system, for example, regarding origin, would allow buyers (companies engaged in mussel cultivation) to be informed about the potential phenotypic plasticity of individuals concerning various environmental variables. Methodologically, this research was conducted through semi-structured interviews with key stakeholders in the mussel farming industry, aiming to explore and understand commercial relationships between zones and agents, and to evaluate the feasibility of a certification system.

Chapter V presents a systematic review of the literature on certification in different productive areas (1999-2022), analyzing various certification systems, including trends in productivity, leading countries of publication, regional distribution, and thematic categories. This analysis identified three key categories: sustainability, engineering, and business and economics, with thematic clusters within each of these areas. This systematic review also indicates that organizations use certification schemes not only to manage environmental or climatic risks but also to harmonize their operations in response to the various pressures exerted by multiple stakeholders and to promote more sustainable organizational practices.

The effects of global change on ecosystems are inevitable; thus, interdisciplinary studies are essential to better understand the interaction between the environment, physiology, and genetics of organisms and species. These findings have implications for the management and sustainability of mussel farming, providing valuable information to optimize aquaculture practices and enhance the industry's adaptation strategies to climate change, particularly for economically relevant species and food security.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN GENERAL

1. Introducción

Los ecosistemas marinos constantemente experimentan una serie de cambios, influenciados tanto por procesos naturales como, la presión ejercida por factores como el cambio climático y la acidificación del océano (Burger et al., 2020; Doney et al., 2012; Harley et al., 2006). Estos cambios, tienen implicancias en la vida marina y los servicios ecosistémicos (Brierley & Kingsford, 2009; Doney et al., 2009, 2012).

Para comprender cómo responderán las especies marinas a futuras alteraciones en las condiciones del océano, es fundamental conocer el ambiente al cual se encuentran actualmente expuestos y cómo estas condiciones pudiesen variar en el tiempo (Doney et al., 2012; Harley et al., 2006). Este conocimiento es esencial porque los cambios ambientales y otros factores de presión no son uniformes y tienden a ocurrir a diferentes escalas, tanto globales como locales (Gissi et al., 2021), afectando dimensiones sociales y ecológicas, particularmente en sectores como la pesca y la acuicultura (Uribe, 2015).

1.1 Variabilidad y predictibilidad ambiental en ambientes costeros heterogéneos

Las variables ambientales en las zonas costeras no son constantes, sino que difieren en casi todas las escalas y patrones de tiempo (Wolfe et al., 2020), abarcando procesos que van desde segundos hasta siglos y desde milímetros hasta kilómetros (Dickey, 2003). Dentro de este paisaje ambiental, la temperatura, la salinidad, el pH/pCO₂ y el oxígeno disuelto presentan variaciones simultáneas en diversas escalas, influenciadas por diferentes procesos como el metabolismo local (es decir, la relación fotosíntesis: respiración) (Duarte & Cebrián, 1996; Gobler & Baumann, 2016), las descargas de agua dulce de los ríos (Vargas et al., 2016), la contaminación/eutroficación (Carstensen & Duarte, 2019) y eventos de surgencia costera (Kapsenberg & Hofmann, 2016), lo que da como resultado un paisaje marino heterogéneo (Rodríguez-Romero et al., 2022).

En los últimos años, diferentes estudios de campo y de laboratorio han documentado los impactos de la temperatura, la salinidad y el pH/pCO₂ en una

variedad de organismos marinos (Trueman et al., 2023; Vargas et al., 2017; Velasco et al., 2019), los cuales han mostrado efectos sobre el metabolismo, la reproducción, la calcificación, el crecimiento y otros rasgos fisiológicos en un amplio rango de escalas temporales (Doney et al., 2012; Lowe et al., 2019). Asimismo, especies geográficamente extendidas, deben hacer frente a estas diferencias ambientales entre los hábitats, presentando diferencias en su capacidad de responder a condiciones ambientales contrastantes (Calosi et al., 2017). A raíz de lo anterior, se podría imponer cierta selección que conduzca en el tiempo al desarrollo de diferencias en la morfología, fisiología, comportamiento, entre otros, proporcionando una ventaja de aptitud en condiciones locales (Sanford & Kelly, 2011).

De igual manera, los océanos están experimentando una serie de alteraciones estimuladas principalmente por la actividad antropogénica que ha ejercido una influencia sobre el sistema climático global (Gissi et al., 2021), provocando una serie de implicancias en cuanto a la frecuencia de eventos extremos, su resiliencia, funcionalidad y servicios ecosistémicos (Doney et al., 2012; Smale et al., 2019; Ummenhofer & Meehl, 2017).

Sin duda, los efectos del cambio climático han generado consecuencias directas en el océano como el aumento de la temperatura (ver **Figura 1.1**) (Bindoff et al., 2007; Cheng et al., 2021), olas de calor (Burger et al., 2022) y un incremento en la acidez del océano por un aumento del CO₂ atmosférico (Burger et al., 2020; Doney et al., 2009). Producto de lo anterior, las especies marinas están siendo desafiadas constantemente a importantes cambios en las condiciones abióticas y bióticas predominantes en el ambiente (Osorio et al., 2017).

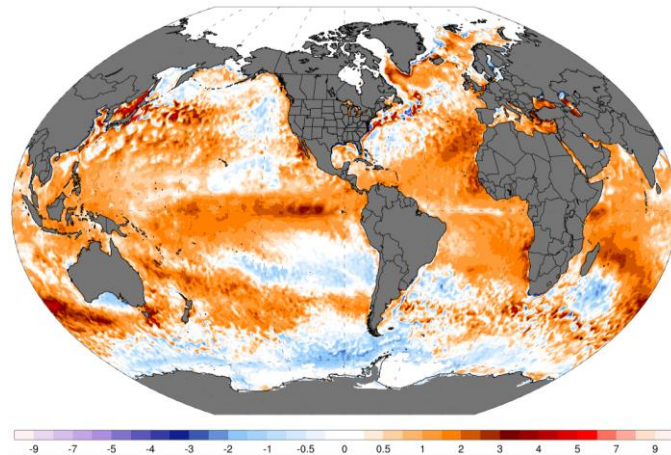


Figura. 1.1. Anomalía global de la temperatura superficial del agua de mar. Fuente: ClimateReanalyzer.org

Asimismo, durante la última época las tasas de cambio ambiental se han exacerbado, afectando la tolerancia y capacidad de los organismos a nuevas condiciones presentes en el ambiente (Doney et al., 2012, 2020; Rivera et al., 2021). Esto expone un desafío significativo para la gestión sostenible de recursos marinos, cómo los relacionados con la acuicultura (Drinkwater et al., 2010).

Considerando la ocurrencia de eventos extremos, junto con fluctuaciones ambientales regulares y predecibles, como los ciclos diarios y la estacionalidad, proporciona un contexto favorable para que tanto progenitores como sus descendientes puedan anticiparse o predecir la variabilidad ambiental en su entorno (Burgess & Marshall, 2011; Diaz et al., 2021). No obstante, los ecosistemas marinos presentan una variabilidad compleja que puede generar condiciones cambiantes e impredecibles, lo cual impacta la dinámica de las poblaciones. En este sentido, estudios sobre exponentes espectrales (β) han revelado diferentes niveles de predictibilidad ambiental en sitios específicos, lo que refleja la capacidad de los organismos para anticipar y adaptarse a tales variaciones cuando las condiciones son consistentes y regulares (Vasseur & Yodzis, 2004).

La predictibilidad ambiental, definida como la capacidad de anticipar condiciones futuras en un entorno natural (Bitter et al., 2021; Burgess & Marshall, 2011; Frölicher et al., 2020; Vasseur & Yodzis, 2004; Weis & Schwartz, 1988), es

clave para comprender cómo los cambios en el ambiente afectan la disponibilidad de recursos y la supervivencia de diversas especies (Nevoux et al., 2010; Tonkin et al., 2017). No obstante, es necesario aplicar con cautela el concepto de predictibilidad ambiental en el contexto de los argumentos evolutivos y ecológicos, ya que la misma magnitud de variabilidad en los patrones ambientales puede inducir efectos divergentes en distintas poblaciones y especies (Kellermann et al., 2019; Kingsolver et al., 2007).

Al presente, existe poca información aplicada sobre cómo la predictibilidad ambiental puede ser utilizada en la comprensión de los impactos en ecosistemas marinos y los sistemas socioeconómicos (Frölicher et al., 2020). Algunos de estos estudios teóricos exponen que es más probable que las respuestas plásticas al cambio ambiental evolucionen en hábitats más predecibles que, en hábitats impredecibles (Donelson et al., 2023; Schmitt & Antonovics, 1986), por lo que comprender la relación entre las condiciones ambientales locales y la predictibilidad ambiental es indispensable para conocer cómo el ambiente puede afectar las respuestas fisiológicas, particularmente bajo diversos escenarios climáticos.

Predicciones de los cambios en las variables ambientales como temperatura, salinidad y pH (entre otras), proporcionarían información relevante en la gestión de los recursos marinos (Gehlen et al., 2015; Hobday et al., 2016; Payne et al., 2017; Tommasi et al., 2017).

1.2 Plasticidad fenotípica de invertebrados marinos en un ambiente cambiante

Los ecosistemas marinos albergan una gran biodiversidad, enfrentando a diario cambios en el ambiente (Dube, 2024). En este entorno dinámico, los organismos responden a dicha variabilidad mediante la plasticidad fenotípica, es decir, expresando diversos fenotipos a partir de un mismo genotipo (Donelson et al., 2019; Pigliucci, 2001; Rodríguez-Romero et al., 2022). Esta plasticidad se considera tradicionalmente como un mecanismo importante de respuesta rápida, permitiendo en el tiempo la adaptación evolutiva a nivel poblacional (Donelson et al., 2019). En ecosistemas marinos, este mecanismo es relevante debido a la exposición de los organismos a la variabilidad natural y fluctuaciones de diversos factores

ambientales cómo la temperatura, salinidad, disponibilidad de nutrientes, entre otros (Pörtner & Farrell, 2008).

En ese sentido, la plasticidad fenotípica es esencial para entender cómo los organismos se desarrollan e interactúan en su entorno, pudiendo manifestarse como cambios en la morfología, fisiología, comportamiento, entre otros (Teplitsky et al., 2008). Diferentes estudios han demostrado la influencia de la plasticidad en los procesos ecológicos de muchas especies (Huey & Kingsolver, 1989; Pigliucci, 2005). Además, se espera que la plasticidad fenotípica cumpla un rol determinante en la persistencia de las especies frente el cambio climático, ya que es probable que la tasa de cambio ambiental exceda a la tasa a la que muchas especies pueden adaptarse (Visser, 2008). Por lo tanto, la plasticidad ofrece una respuesta rápida a estos cambios, permitiendo que las especies ajusten su fisiología y comportamiento para hacer frente a nuevas condiciones imperantes (Chown & Terblanche, 2006).

En sí, las especies pueden responder de distintas formas a los desafíos ambientales (Donelson et al., 2019), pudiendo adaptarse a nuevas condiciones del ambiente, ya sean de corta o larga duración e incluso, transmitir dichas adaptaciones fenotípicas a su descendencia (plasticidad transgeneracional) (Burgess & Marshall, 2011; Diaz et al., 2021). De hecho, se ha documentado que la plasticidad fenotípica implica que la aptitud de un individuo pueda ser adaptativa, no-adaptativa o neutral en función de las propiedades de su genotipo (Ghalambor et al., 2007). En ese sentido, se considera adaptativa cuando amplía la tolerancia genotípica a diversas condiciones ambientales, lo que resulta en una mayor aptitud a varios entornos (Ghalambor et al., 2007; Sultan, 1987). Asimismo, para que la plasticidad pueda ser adaptativa, requiere de señales ambientales confiables, es decir, información ambiental precisa sobre un rasgo determinado (Bonamour et al., 2019). La capacidad de los organismos para interpretar y responder a estas señales es indispensable para su supervivencia en un entorno cambiante. Esto da tiempo para que una población, donde la variación genética constante en combinación con la mutación y/o recombinación entre individuos pueda generar fenotipos que respondan a las presiones locales (Ghalambor et al., 2007). Finalmente, diversos mecanismos fisiológicos, como la transcripción, la traducción, y la regulación

enzimática también son parte del resultado de la plasticidad fenotípica (Beldade et al., 2011; Whitman & Agrawal, 2009). En los ecosistemas marinos, estos mecanismos permiten a los organismos ajustar sus procesos bioquímicos y fisiológicos para enfrentar los diversos desafíos ambientales (Pörtner & Farrell, 2008).

Para describir las respuestas de las especies y poblaciones a los cambios ambientales, las '*curvas de desempeño*' son un enfoque útil (Gaitán-Espitia et al., 2013). Estas representan el desempeño de rasgos fisiológicos, morfológicos o de historia de vida a través de un patrón de reacción no lineal continuo (es decir, curva de rendimiento) en una gráfica donde el valor del rasgo fenotípico varía en función de un gradiente ambiental (Fernández et al., 2020; Gaitán-Espitia et al., 2017; Huey & Kingsolver, 2011). Por ejemplo, en el ambiente frente a variaciones en la temperatura, las especies pueden trasladarse a nuevos sitios dentro de su nicho térmico, aclimatarse y/o adaptar su fisiología o comportamiento para ampliar su nicho térmico, o también pueden experimentar disminución de su rango (Donelson et al., 2019).

En el contexto de la biología del cambio global, para comprender las curvas de desempeño se utilizan elementos descriptores que comparan y describen el desempeño dentro y entre especies, poblaciones o genotipos (Gaitán-Espitia et al., 2013; Huey & Stevenson, 1979). Aquí, generalmente se incluye algunos parámetros claves como el rendimiento máximo ($P_{\text{máx}}$), el óptimo (X_{opt}) y la amplitud de rendimiento (X_{br}) (Angilletta, 2009; Kellermann et al., 2019). La forma de la curva y variación de los descriptores podría sugerir diferentes tipos de selección que actúan sobre los rasgos para producir curvas de desempeño más estrechas o amplias (Kellermann et al., 2019). Modelos teóricos sugieren que las curvas de desempeño debiesen depender de la frecuencia relativa y de la previsibilidad ambiental experimentada por la población (Kingsolver et al., 2007). Además, los organismos que se adaptan a ambientes variables tienden a desarrollar curvas de tolerancia más amplias, aunque menos pronunciadas, propias de los generalistas térmicos. En contraste, los especialistas que evolucionan en ambientes estables presentan

curvas de tolerancia más estrechas y marcadamente definidas (Schaum et al., 2022).

La plasticidad fenotípica no solo permite a los organismos marinos responder a las condiciones cambiantes del ambiente, sino que también desempeña un papel crucial en la persistencia de las especies frente al cambio ambiental (Burgess & Marshall, 2011; Ghalambor et al., 2007). La capacidad de los organismos para ajustar su fisiología y comportamiento es esencial para su persistencia en un planeta de rápida transformación y bajo el contexto actual (Hoffmann & Sgrò, 2011). Conocer cómo responderán los organismos a la variación de, por ejemplo, el cambio climático y los eventos extremos, será clave para comprender el impacto actual y futuro (Regan & Sheldon, 2023).

1.3 Estructura y conectividad genética poblacional en invertebrados marinos

La estructura genética de una población se refiere a la distribución y organización de la variación genética dentro y entre poblaciones, resultante de la interacción de procesos ecológicos y genéticos (Cheng et al., 2020). Esta estructura es modelada por diversos procesos evolutivos, tales como la mutación, la selección natural, la deriva genética y el flujo de genes (Wright, 1984). Comprender la estructura genética nos proporciona una base fundamental para interpretar las interacciones ecológicas de una especie con su entorno (Grosberg & Cunningham, 2001).

El estudio de las diferencias poblacionales y los patrones de diversidad genética son relevantes para la biología evolutiva (Hedrick, 2009; Slatkin, 1987), ya que profundizan en la comprensión de cómo las poblaciones divergen y cómo se mantienen conectadas a través del flujo de genes (Lenormand, 2002). Este análisis, ofrece información clave sobre la estructura poblacional y sobre las fuerzas evolutivas que actúan en ambientes heterogéneos (Kawecki & Ebert, 2004). Además de ayudar a entender las respuestas adaptativas de las especies en sus entornos actuales (Endler, 1986), es crucial para comprender cómo responderán las poblaciones a futuros cambios ambientales (Waldvogel et al., 2020). Conocer estos patrones de diversidad genética y las diferencias poblacionales es esencial para

anticipar las posibles respuestas adaptativas y la resiliencia de las especies frente a alteraciones significativas en su hábitat (Hoffmann & Sgrò, 2011).

En los ecosistemas marinos, la conectividad, entendida como el grado en que los individuos o sus genes se mueven entre diferentes poblaciones (Palumbi, 2003; Pineda et al., 2007). Está fuertemente influenciada por procesos como la dispersión de huevos, larvas y/o adultos móviles, las corrientes oceánicas y los patrones de reproducción de las especies (Cowen & Sponaugle, 2009; Gaines et al., 2007; Palumbi, 1994; Pineda et al., 2007). Esta conectividad es fundamental para la persistencia de las poblaciones, ya que facilita el flujo de genes y la recolonización de hábitats, promoviendo la diversidad genética y la adaptabilidad (Cowen & Sponaugle, 2009). Aunque el ambiente marino, en ausencia de barreras físicas aparentes, podría sugerir una alta conectividad genética entre poblaciones, estudios han demostrado que las poblaciones pueden presentar una significativa diferenciación genética (Grosberg & Cunningham, 2001; Palero et al., 2008). Esta diferenciación puede estar atribuida a la selección local, la historia evolutiva, las características de las especies como, por ejemplo, la capacidad de dispersión y los ciclos de vida (Gaines et al., 2007; Hedrick, 2009; Kawecki & Ebert, 2004). Asimismo, la conectividad en el ambiente marino no es uniforme y puede verse limitada por factores biológicos y físicos. Por otro lado, las condiciones oceanográficas, los eventos históricos, el comportamiento de las larvas y la disponibilidad del hábitat – entre otros – puede afectar la dispersión y la conectividad de las poblaciones marinas (Gaines et al., 2007). Por ejemplo, la mayoría de los invertebrados marinos tienen fase de larva planctónicas que pasan días o incluso meses en la columna de agua donde pueden ser transportadas a grandes distancias por las corrientes de agua, lo que facilita la conectividad genética entre poblaciones (Grosberg & Cunningham, 2001). Sin embargo, se ha demostrado que varias especies, incluso con alto flujo genético, presentan diferenciación espacial (Palero et al., 2008), lo que sugiere que otros factores, cómo las condiciones oceanográficas, el comportamiento de las larvas y la disponibilidad del hábitat (Gaines et al., 2007; Marshall et al., 2010; Palumbi, 1994; Pineda et al., 2007), también desempeñan un papel crucial en la conectividad (Palumbi, 1994, 2003;

Pineda et al., 2007). Estos factores, pueden moldear las subpoblaciones dando paso a la estructura genética (Balloux & Lugon-Moulin, 2002). Asimismo, es importante destacar que el transporte físico de individuos entre poblaciones no asegura el flujo genético, ya que se requiere que estos sobrevivan y se reproduzcan (Hamilton et al., 2008; Marshall et al., 2010).

1.4 *Mytilus chilensis* como modelo biológico para estudiar el desempeño fisiológico bajo condiciones ambientales extremas

Mytilus chilensis, 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 Flores et al., 2015; Oyarzún et al., 2016). Corresponde a una especie gonocórica, con ciclo gametogénico anual, donde su madurez sexual ocurre en primavera-verano (Oyarzún et al., 2011), seguido de varios estadios larvarios con una duración total de 30 a 45 días en la columna de agua (Toro et al., 2004), proporcionando un potencial de dispersión larval estimado de hasta 30 km (Barria et al., 2012). La mayoría de los estudios de estructura genética poblacional del *M. chilensis*, independiente del marcador molecular utilizado (aloenzimas, microsatélites, SNPs, entre otros), señalan que estos poseen una moderada a baja diferenciación genética en los sitios de cultivo de la Patagonia Norte (Araneda et al., 2016; Larraín et al., 2014; Toro et al., 2004). Esto se debe a que, además de la dinámica oceanográfica del ambiente, el impacto humano directo también tiene un efecto sobre los patrones genéticos observados en las especies marinas de interés comercial como, por ejemplo, el *M. chilensis*. De esta forma, las translocaciones de hábitat impulsadas por la actividad acuícola (Palero et al., 2008; Rivera et al., 2017; Yévenes et al., 2021), podrían aumentar el riesgo de pérdida de alelos adaptados localmente que puede afectar la aptitud de los individuos y la adaptación a entornos impredecibles (Laikre et al., 2020; Ottenburghs, 2021).

1.5 Sistema socioecológico de la industria mitilicultora

La acuicultura a nivel mundial ha alcanzado máximos históricos en su producción, con alrededor de 120,1 millones de toneladas métricas (Mt) el año 2019

(Verdegem et al., 2023). Los sistemas acuícolas son diversos, existiendo una producción a gran escala de alrededor de 425 especies (Naylor et al., 2021), destacando el cultivo de la carpa herbívora (*Ctenopharyngodon idellus*), camarón patiblanco (*Penaeus vannamei*), y diversos tipos de moluscos marinos (Mollusca), entre otros (FAO, 2022; Naylor et al., 2021).

Al presente, la dependencia e importancia de la acuicultura recae en satisfacer y garantizar la seguridad alimentaria (Ahmed et al., 2019; Broitman et al., 2017; FAO, 2022). Asimismo, el crecimiento demográfico ha impulsado una demanda extra en el consumo de alimentos provenientes de esta industria (FAO, 2022; Stevens et al., 2018).

En Chile, las condiciones ambientales han propiciado que la acuicultura presente un amplio desarrollo económico (SSPA, 2019), centrándose en el cultivo de peces (65%), mitílicos (33,7%) y, en menor proporción, algas (1,3%) (SUBPESCA, 2024), desarrollándose principalmente en las regiones de Los Lagos y de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo (SSPA, 2019). Actualmente, la industria chilena se ha focalizado en tres especies con alto valor económico (Poblete et al., 2019), destacándose los cultivos de salmón del atlántico (*Salmo salar*), salmón del pacífico (*Oncorhynchus kisutch*) y mejillón chileno (*Mytilus chilensis*) (SSPA, 2019).

La mitilicultura – o cultivo de mitílicos – ha incrementado significativamente sus niveles de producción (SSPA, 2019; SUBPESCA, 2024) y se centra en el cultivo a gran escala del comúnmente llamado “chorito” – *Mytilus chilensis*, Hupé 1854, una especie ecológica y socioeconómica clave del país que aumentando de 153.433 el año 2007 a 394.600 toneladas durante el 2023 (SUBPESCA, 2024), situando a Chile como uno de los principales países productores de mejillón a nivel mundial (FAO, 2022; Gonzalez-Poblete et al., 2018).

La industria mitilicultora es una de las que ha mostrado gran importancia desde la perspectiva económica, ecológica y social para la región de Los Lagos. Aquí, el sistema socio-ecológico de la mitilicultura incluye una variedad de actores a lo largo de la cadena de producción (Figueroa & Dresdner, 2016), con diversas características económicas y motivaciones (Rivera et al., 2017). Por ejemplo,

existen los pescadores encargados de la captación de semillas, quienes son un pilar fundamental de la industria ya que sustentan la materia prima para llevar a la cabo la actividad (Fernández et al., 2018; Leblanc et al., 2003; Rivera et al., 2017).

Sin embargo, a pesar de que las condiciones del sur del Chile son propicias para el cultivo de este bivalvo, el éxito de la producción acuícola se ve amenazado por una amplia gama de estresores (Blanc et al., 2018; Detree et al., 2016). Por ejemplo, se describe que las zonas de captación de semillas se encuentran expuestas a perturbaciones ambientales naturales como, por ejemplo, cambios en la temperatura, la salinidad, el pH/pCO₂ y el oxígeno disuelto mostrando cambios en diferentes procesos como las descargas de agua dulce de los ríos (Vargas et al., 2016) y la contaminación/eutrofización (Carstensen & Duarte, 2019), representando una amenaza para la actividad considerando que es una etapa decisiva y vulnerable a variaciones del ambiente (Vihtakari et al., 2013). En ese sentido, se ha evidenciado que estas alteraciones generarían consecuencias sobre la respuesta fisiológica de los organismos marinos (Cornwall & Hurd, 2016) pudiendo alterar no sólo a los ecosistemas marinos, sino que también a los sistemas sociales, por ejemplo, en las comunidades locales dependientes de las actividades costeras (Reyna-Fabián et al., 2018; Soto et al., 2019).

Procesos fundamentales, como la compra-venta de semillas, revelan el escaso poder de negociación y la falta de protección tanto para compradores como para vendedores, debido a la ausencia de una estandarización de criterios para definir conceptos clave que se utilizan comúnmente en la actividad. Por ejemplo, la percepción y comprensión del término "semilla de buena calidad" puede variar ampliamente entre los compradores, ya que este concepto se asocia a una multitud de contextos, además de una falta de homogenización del lenguaje en la producción. Un sistema de certificación, entendido como un conjunto de procesos que garantiza que un producto cumple con ciertos estándares de calidad y criterios específicos (Erazo-Killer, 2011; Saha, 2022), podría ser útil para certificar dicha 'calidad' o, al menos, proporcionar una aproximación estandarizada. Esto contribuiría a mejorar en las relaciones de compra-venta, incluyendo criterios importantes de 'calidad' como la heterogeneidad de tallas, el desprendimiento y la

tolerancia a condiciones ambientales extremas. Así, las empresas podrían seleccionar semillas más adecuadas para sus áreas de cultivo, promoviendo la sostenibilidad y una mejora en la planificación espacial.

Este estudio considera la integración imperativa de la investigación interdisciplinaria, que incluye comprender la historia del hábitat natural, incorporar rasgos fisiológicos adicionales, integrar información genética y la perspectiva socioecológica para tener una visión sistemática de la actividad considerando la implicancia para la gestión y la sostenibilidad de la industria del cultivo de mejillones. A raíz de la información entregada anteriormente, surgen las siguientes preguntas de investigación:

- a) ¿Existen diferencias en las curvas de desempeño fisiológico de diferentes poblaciones de semilleros en el principal cluster de la industria mitilicultora?
- b) ¿Semillas provenientes de ambientes cambiantes o con una alta variabilidad temporal, tienen un mayor grado de tolerancia frente a eventos extremos?
- c) ¿Cómo el sistema socio-ecológico de la mitilicultura puede utilizar esta información, a través de un sistema de certificación, como medida de adaptación al cambio climático u otro tipo de eventos ambientales extremos?

CAPÍTULO II

HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

2.1. HIPÓTESIS

Para llevar a cabo esta investigación, se han considerado las siguientes dos hipótesis:

H₁: Poblaciones de semillas de *Mytilus chilensis* provenientes de ambientes con una mayor variabilidad temporal (mayor fluctuación de temperatura, salinidad, pH/pCO₂), tendrán como respuesta un mayor grado de tolerancia ambiental frente a escenarios de eventos extremos.

H₂: La información generada a partir de las curvas de desempeño fisiológico de las semillas de mitílidos puede ser utilizada mediante un sistema de certificación por los centros de engorda como una medida de adaptación a eventos extremos y al cambio climático, al considerar las condiciones ambientales específicas de cada zona de cultivo.

2.2. OBJETIVOS

2.2.1. Objetivo general

Evaluar la respuesta plástica y la diversidad genética de individuos de *Mytilus chilensis* provenientes de distintos semilleros, expuestos naturalmente a regímenes contrastantes de variabilidad ambiental (temperatura, salinidad y pH/pCO₂), pudiendo utilizar esta información como una posible medida de adaptación del sistema socio-ecológico de la industria mitilicultora frente a la exposición de eventos ambientales extremos.

2.2.2. Objetivos específicos:

- I. Describir la variabilidad ambiental (temperatura, salinidad y pH/pCO₂) de las tres localidades donde se desarrolla la captación de semillas de *M. chilensis*, utilizando las series de tiempo ambientales disponibles en estos lugares.
- II. Determinar el grado de tolerancia ambiental de los organismos a partir de

curvas de desempeño de semillas de *M. chilensis* frente a distintos gradientes ambientales de temperatura, salinidad y pH/pCO₂.

- III. Comparar la diversidad y estructura genética de los organismos experimentales de *M. chilensis* procedentes de los sitios de estudio.
- IV. Explorar el mercado de semillas mediante el levantamiento de información primaria con énfasis en las relaciones de compra – venta entre distintas zonas y agentes.

CAPÍTULO III

Plasticidad fenotípica de semillas de *M. chilensis*

PUBLICACIÓN 1

Aceptada en Science of the Total Environment

Small-scale geographic differences in multiple-driver environmental variability can modulate contrasting phenotypic plasticity despite high levels of gene flow

Nicole Castillo^{1,2,11}, Juan Diego Gaitán-Espitia³, Julian F. Quintero-Galvis^{4,5}, Gonzalo S. Saldías^{2,6}, Sebastián Martel^{2,7}, Marco A. Lardies^{2,7}, Andrés Mesas¹, Iván Pérez-Santos⁸, Stefan Gelcich^{2,9}, and Cristian A. Vargas^{1,2, 10}

¹ Coastal Ecosystems & Global Environmental Change Lab (ECCALab), Faculty of Environmental Sciences, Universidad de Concepción, Concepción, Chile

² Coastal Social-Ecological Millennium Institute (SECOS), Universidad de Concepción, Concepción, Chile

³ The Swire Institute of Marine Science, School of Biological Sciences, The Hong Kong University, Hong Kong, Hong Kong SAR, China

⁴ Institute of Environmental and Evolutive Sciences, Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile.

⁵ Millennium Nucleus of Patagonian Limit of Life (LiLi), Valdivia, Chile.

⁶ Department of Physics, Faculty of Sciences, Universidad del Bío-Bío, Concepción 4051381, Chile

⁷ Department of Sciences, Faculty of Liberal Arts, Universidad Adolfo Ibáñez, Santiago, Chile

⁸ Centro i-mar, Universidad de Los Lagos, Casilla 557, Puerto Montt, Chile

⁹ Center of Applied Ecology and Sustainability (CAPES), Faculty of Biological Sciences, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile

¹⁰ Millennium Institute of Oceanography (IMO), Universidad de Concepcion, Concepción, Chile

¹¹ Corresponding author

Abstract

Climate change is altering not only the mean conditions of marine environments, but also their temporal variability and predictability. As these alterations are not uniform across seascapes, their biological effects are expected to accentuate intra-specific differences in the adaptive capacity (e.g., plasticity and evolutionary potential) of natural populations. To test this theoretical framework, we assessed the phenotypic and genetic profiles of mussel from three study sites across a multi-driver heterogeneous environmental mosaic in Chilean Patagonia. Our study reveals that temporal variability, predictability, and exposure to extreme events (low pH/low salinity), collectively, can modulate the plasticity and optimal conditions of mussels. Despite these phenotypic differences, we observed low genetic differentiation, likely resulting from significant gene flow induced by aquaculture, ultimately diminishing variation among individuals from different geographic areas. Our findings underscore how variability and predictability are essential factors shaping phenotypic diversity, even at small spatial scales. Balancing these factors could enhance species resilience and ecological success, crucial for biodiversity conservation amidst climate change.

Keywords: Climate Change, Environmental Mosaic, Environmental Predictability, Phenotypic plasticity, Genetic profiles, Extreme Environmental Events

3.1 Introduction

Understanding the capacity of marine organisms to cope with the increasing environmental pressure exerted by climate change and ocean acidification is a major challenge for ecologists, evolutionary biologists, policy makers, and stakeholders globally (Brierley and Kingsford, 2009; Doney et al., 2012). For such purposes, knowledge of present-day environmental exposures of marine populations is highly needed but often limited (Doney et al., 2012; Harley et al., 2006). Environmental conditions along coastal areas are extremely variable on almost every scale and pattern (Wolfe et al., 2020). For instance, temperature, salinity, pH/pCO₂, and concentration of dissolved oxygen show simultaneous variations across diverse scales, influenced by different processes, such as primary productivity (e.g., photosynthesis/respiration ratio) (Duarte and Cebrián, 1996; Gobler and Baumann, 2016), freshwater discharges from rivers (Vargas et al., 2016), pollution/eutrophication (Carstensen and Duarte, 2019), or coastal upwelling events (Kapsenberg and Hofmann, 2016). These spatial and temporal patterns ultimately shape the heterogeneous environmental seascapes observed along coastal regions worldwide (Pespeni et al., 2013).

Several field and laboratory studies have documented species- and population-specific responses to variable thermal, salinity, and pH/pCO₂ conditions on marine organisms, ultimately impacting fitness (Trueman et al., 2023; Vargas et al., 2017; Velasco et al., 2019). Contrasting responses among marine populations to such changing ocean conditions are typically associated with local adaptation at an evolutionary level and/or with phenotypic plasticity on an ecological timescale (Donelson et al., 2019; Vargas et al., 2017; Wood et al., 2016). Rapid evolution of such phenotypic plasticity is expected to be modulated by strong environmental fluctuations in coastal areas, playing a major role in the persistence of natural populations and preventing mortality and extinction as a consequence of extreme environmental events such as heat waves, extreme river runoff, and low pH conditions (Chevin and Hoffmann, 2017; Maynard et al., 2018). A key consensus from theoretical studies is that phenotypic plasticity is favored in environments that are not only variable but also predictable over time (Bitter et al., 2021a).

Environmental predictability refers to the consistency and regularity of conditions over time, allowing organisms to anticipate and adapt to changes (Vasseur & Yodzis, 2004). Plasticity tends to be advantageous when environments are both variable and predictable (Bitter et al., 2021b). The basic prerequisite is the presence of reliable environmental cues that enable organisms to use current information to develop phenotypes well-suited to future extreme and/or stressful conditions (Halali et al., 2021).

Coastal environmental variability can dictate the strength and direction of natural selection, regulating the fitness landscape, genetic diversity, and local adaptation of marine populations (Amos and Harwood, 1998; Hochachka and Somero, 2002; Sanford and Kelly, 2011). While other evolutionary forces such as gene flow can disrupt these characteristics by introducing non-adapted genotypes from foreign populations (Lenormand, 2002; Sanford and Kelly, 2011), mechanisms exist to mitigate such effects (e.g., selection against migrants), even for species with high larval dispersal, such as marine invertebrates (Chen and Hare, 2008). Consequently, populations across the species distribution in coastal areas can exhibit intrinsic differences in genetic diversity and adaptive potential driven by interplay between environmental variability, predictability, and selection (Donelson et al., 2019). While authors have suggested that greater genetic diversity in natural populations would maximize their adaptive potential to changing ocean conditions, recent studies have also demonstrated that marine populations may be able to adapt through additional mechanisms as rare genetic variation, balanced polymorphisms, epigenetic modification, despite low overall genetic diversity and differentiation (Brennan et al., 2019; Tepolt et al., 2022).

For coastal marine organisms, environmental variation drives fluctuating selection and can promote and maintain intraspecific genetic and phenotypic variation (Gaitán-Espitia et al., 2017b). However, the extent of this influence varies among populations due to differences in their local environmental variability regime and associated spatial-temporal gradients (Trueman et al., 2023; Vargas et al., 2016). These differences result in complex adaptive landscapes, even at small spatial scales (e.g., mesoscale) (Kurihara et al., 2021; Pespeni et al., 2013). Furthermore,

global change drivers are expected to profoundly impact these ecological and microevolutionary patterns by altering environmental variation and consequently, selection processes, including an increase in the frequency and intensity of extreme events (e.g., low salinity and pH, or heat waves) (Kurihara et al., 2021; Palumbi et al., 2019). Therefore, it is crucial to understand the extent to which current and past regimes of natural environmental variation and predictability of multiple factors experienced by populations influence their phenotypic and genetic characteristics along geographic regions. By studying and assessing this influence of environmental gradients – such as by evaluating intra-specific differences in phenotypic traits along geographic gradients – we can disentangle the simultaneous role of both environmental exposure and predictability modulating phenotypic variation, plasticity, and local adaptation (Palumbi et al., 2019). This approach allows us to understand the adaptive potential of marine populations, and, concomitantly, could be useful in predicting their evolutionary responses to current and future environmental regimes within the context of global change (Bitter et al., 2021a; Kelly et al., 2013).

Until now, few studies have considered the influence of spatial-temporal environmental fluctuations in more than one environmental factor as controlling drivers for geographic differences in phenotypic plasticity and genetic variation among populations of marine organisms (Aguilera and Bednaršek, 2022). In this study, we adopted an integrative approach to assess the relative capacities of *Mytilus chilensis* individuals collected from three distinct sites. This valuable farmed mussel in south Chile is naturally facing extreme environmental conditions and future ocean warming, freshening, and ocean acidification. We begin by characterizing the environmental variability regimes and predictability using oceanographic time-series data of temperature, salinity, and pH collected from buoys and sensors deployed near mussel farms in various geographic areas of Northern Chilean Patagonia. Next, we utilize present environmental variability (e.g., temperature, salinity, and pH) and extreme future scenarios to construct physiological performance curves of clearance/ingestion rate for mussel juvenile collected from these three contrasting geographic areas. Finally, the parameters of physiological performance curves were

analyzed in the context of their respective multiple-driver environmental variability regimes. Additionally, the structure of individuals from each study site was examined to explore whether potentially contrasting physiological performance could be explained by differences in genetic diversity and population structure. The results of the present study also hold significant implications for aquaculture vulnerability under changing ocean conditions and from a multiple-driver perspective. They provide valuable insights into how phenotypic plasticity can offer tools for spatial planning in aquaculture, as well as other sustainable practices for adaptation to the impacts of changing ocean conditions.

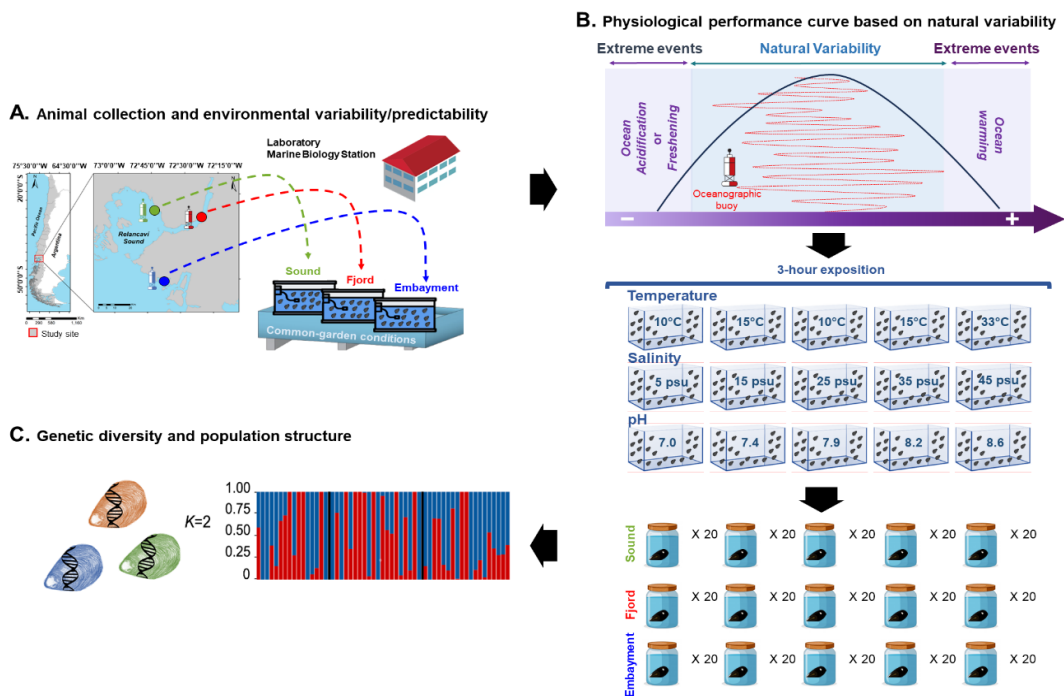


Figure 3.1. Sample Sites, Oceanographic Buoys, and Experimental Design. (A) Map showing the locations of mussel collection and the deployment of oceanographic buoys at the Sound (green), Fjord (red), and Embayment (blue) sites in Southern Chile. Mussel individuals were transferred to the Micro/Mesocosm Laboratory at the Marine Biology Station in Dichato, Chile, where they were exposed to common garden conditions for three weeks. Map Source: Created using the free and open-source software QGIS. (B) Performance curves of mussel physiology were designed based on the environmental variability in temperature, salinity, and pH recorded by the oceanographic buoys, as well as extreme conditions. (C) Following the clearance rate experiments, tissue samples from each mussel spat were extracted to assess and describe genetic diversity and population structure across the three sites using standard population genetic parameters.

3.2 Materials and Methods

3.2.1. Animal collection and study sites.

The common mussel *Mytilus chilensis* Hupé, 1854 is an intertidal bivalve that has a latitudinal distribution along the coasts of South America, between 35° and 55°S in the South of Chile (Hernandez and González, 1976). Additionally, it is a crucial economic and ecological species in Chile. Mussel aquaculture predominantly focuses on this species, and Chile holds the second position worldwide as the largest producer of mussels after China (FAO, 2022).

Our study focuses on northern Chilean Patagonia (**Figura 3.1**), encompassing a heterogeneous and complex seascape of fjords, sounds, and embayments, covering an area of approximately 4500 km². Three geographic sites were selected based on three main criteria; (a) the presence of mussel farming activity, especially juvenile collection sites, (b) the availability of environmental data from oceanographic buoys/sensors, which collect hourly data on temperature, salinity and pH/pCO₂ over at least an annual cycle, and (c) preliminary analyses of oceanographic information demonstrating contrasting environmental variability regimes due to the relative influence of different drivers of variability, such as river runoff (e.g. Vergara-Jara et al. 2019). Based on these criteria, we considered three main study areas and sites for animal collection, which were around 40 up to 70 km apart along coastline: (a) Puelo (41°35' S, 72°20' W), (b) Metri (41°38' S, 72°50' W), and (c) El Manzano (42°10' S, 72°38' W), which are key locations for juvenile collection in Chilean shellfish aquaculture.

3.2.2. Characterization of environmental variability regimes and predictability.

To characterize the natural variability within the study areas, we utilized high-resolution environmental measurements including temperature, salinity, and pH/pCO₂. These measurements were acquired from autonomous moored instruments deployed within each study area for at least one year. The instrumentation encompassed the use of SBE 37 MicroCat (manufactured by Seabird Electronics) and SAMI pH-sensors (provided by Sunburst Sensors, LLC) in

Puelo, AML Metrec XL in Metri, and a WQM – Water Quality Monitor (from Seabird Electronics), and SeaFET Ocean pH sensors in El Manzano (**Figura 3.2**). The predictability of the selected environmental variables (temperature, salinity, and pH) was assessed by conducting a spectral analysis on the residual time series after removing the seasonal trends. Here, we refer to predictability as the structure of the environmental variation around a given mean trend, which is often called the color of environmental noise (Vasseur and Yodzis, 2004). The residual time series were obtained by subtracting the seasonal harmonics (annual and semiannual cycles) through least square fitting (Thomson and Emery, 2014). Subsequently, a spectral analysis using Lomb-Scargle periodograms was performed on each residual time series to prevent any bias in the estimates of spectral densities due to missing values (Glynn et al., 2006; Marshall and Burgess, 2015). The spectral exponent (β) characterizes the frequency composition of environmental variance, indicating the relative contribution of high- and low-frequency environmental fluctuations to the overall environmental variability. It was determined by calculating the negative slope of the linear regression of \log_{10} spectral density against \log_{10} frequency and greater slopes indicate higher degree of low-frequency fluctuations (Vasseur and Yodzis, 2004). In simple terms, differences among sites in this spectral slope reflect variations in the predictability of low-frequency fluctuations relative to high-frequency variability (such as tidal variations and diel cycles), throughout our oceanographic time-series. We selected these environmental variables in our study due to their significance as key drivers of physiological performance in marine invertebrates (e.g., feeding, metabolism). Temperature is a critical factor for ectotherms (Angilletta, 2009; Navarro et al., 2016), and various studies have shown the effects of salinity and pH on Chilean mussel physiology (e.g., Navarro et al., 2013, 2016; Duarte et al., 2018). As this area is typically influenced by well-oxygenated freshwater discharges (León-Muñoz et al., 2013; Yevenes et al., 2016), oxygen concentration is not a limiting factor and was not included in our study. Unfortunately, not all oceanographic platforms have chlorophyll-a sensors, limiting our ability to analyze food availability.

3.2.3. Experimental set-up.

Mussel juveniles (*Mytilus chilensis*), with a shell length of approximately 15–20 mm, were collected from culture ropes in each mussel farming area (**Figura 3.2**), mostly located within an average radius of 1–5 km from the deployed oceanographic sensors. Individuals from each site were transported to the Marine Coastal Station of the Universidad de Concepcion in coolers under chilled conditions. Upon arrival at the laboratory, individuals from each geographic site were acclimated separately in plastic containers (100 L) under common-garden conditions of constant temperature ($11 \pm 1^\circ\text{C}$), pH (7.9), and salinity (31 ± 1 psu) using UV-filtered seawater and constant aeration for three weeks before experimental exposure. The selected temperature, salinity, and pH/ $p\text{CO}_2$ values for the common garden conditions correspond to the mean conditions averaged for the three mussel farming areas.

Three weeks of exposure to laboratory conditions were considered appropriate to standardize the juveniles' physiological condition following any stress from collection and transportation and to minimize any 'environmental signature' resulting from the local conditions at the collection site. Mussel juveniles were fed daily with a phytoplankton suspension (approximately 40×10^6 cell mL^{-1} , Phytogold-S), and 50% of the seawater volume was replaced every day to maintain stable salinity and pH conditions and to eliminate any accumulated ammonia.

3.2.4. Physiological performance curves.

Performance curves of clearance rates were independently constructed for *M. chilensis* individuals from three different geographic areas, each under varying conditions of temperature, salinity, and pH/ $p\text{CO}_2$. A total of 900 individuals were collected from the mussel farming areas (i.e., 300 juveniles from each site). The experimental design involved exposing 100 independent individuals to build geographic site-specific performance curves for each environmental variable (total: 300 individuals per site), with 20 individuals exposed to each of the five levels of the environmental variables. The selected levels were based on current environmental variability (as recorded by our oceanographic buoys) and potential future extreme

scenarios of low/high temperature, salinity, and pH. This methodological approach considered five different temperatures (10, 15, 20, 25, and 33°C), salinities (5, 15, 25, 35, and 45 psu), and pH levels (7, 7.2, 7.4, 7.9, 8.2, and 8.6). Temperature levels were manipulated using both a chiller and a heater, while salinity levels were achieved using artificial seawater. The different pH levels during the experiment were controlled by an Apex Aquacontroller (Neptune®) and solenoid valves to regulate the bubbling of air and pure CO₂ into each experimental tank. The incubation time for each environmental condition and variable was 3 hours.

Clearance rate (CR) was estimated in a static system, homogenized by aeration, and using a food concentration of 25×10^6 cells L⁻¹. One juvenile mussel was taken from each study site/experimental condition and placed in an experimental chamber (0.5 L), where the decrease in the number of particles was monitored after 45 min. Prior to the experiment, each individual was lengthened, and body mass was determined with an analytical balance (± 0.01 mg). A control aquarium without mussels was used for each treatment/level of temperature, salinity, and pH to account for the sedimentation of particles and the CR (mL g⁻¹ h⁻¹) was calculated according to Coughlan (1969). All experimental measurements of clearance rate were conducted according to the controlled temperature, salinity, and pH conditions/levels.

3.2.5. Performance curve parameters and statistical analyses.

The effect of temperature, salinity, and pH on clearance rate was described by performance curve (Huey et al., 1999). The fit of several models (Gaussian, Quadratic and Weibull) describing the performance at each study site as a function of temperature, salinity, and pH was analyzed using the Akaike Information Criterion (Angilletta, 2006). The AIC represents a balance between the likelihood explained by the model and the number of model parameters, with the best model minimizing AIC (Kingsolver et al., 2007).

The parameters (X_{opt} , P_{max} , and X_{br}) were extracted from the performance curve analysis and are described as follows: (1) the optimal performance (X_{opt}), which defines the optimized performance; (2) the maximal performance (P_{max}), which

defines the level of performance at the optimum; and (3) the breadth (X_{br}), also known as performance breadth, which is calculated as the range within which performance remains above an arbitrary threshold (e.g., 80–90%) (Angilletta, 2009). This breadth, traditionally used as a measure of specialization, indicates whether a genotype is more specialized or generalized. A narrow X_{br} suggests a specialist phenotype, while a broader X_{br} implies a generalist one (Angilletta, 2009; Huey et al., 2012). The Parameters: X_{opt} , P_{max} and X_{br} were extracted from the best-fit models using R 3.0.2 software and the package *rTPC* and *nls.multstart* (Padfield et al., 2021).

Curve shapes were evaluated using 95% confidence intervals (CI), and differences in the performance curves for each environmental variable and the respective collection site were assessed through a two-way ANOVA, with experimental conditions (i.e., temperature, salinity, or pH) and the collection site of the experimental organisms as categorical predictors. Statistical analyses were performed using R 3.0.2 and Prism (GraphPad Software).

3.2.6. DNA sample collection and processing.

To quantify genomic variation among *M. chilensis* juveniles from different study sites, we have used a double digest Restriction-Site Associated DNA sequencing analysis (ddRAD-Seq). Genomic DNA was extracted from tissue samples of the mussel juveniles after the clearance rate experiment. Twenty tissue samples were placed in 95% ethanol and stored at -20°C until DNA extraction. DNA was extracted using the Quick-DNA HMW Magbead Kit (Zymo Research) according to the manufacturer's guidelines.

We randomly selected 20 samples from each mussel study site ($N= 60$). After digesting all DNA samples with the restriction enzymes PstI and MspI, the fragments with P1 and P2 adapters were enriched by PCR amplification. The libraries were prepared using a RADseq protocol (Peterson et al., 2012) and then sequenced using Illumina TruSeq™ Nano DNA Sample Prep Kit. Pair-end sequencing was performed on Illumina Novaseq 6000 platform.

Subsequently, eligible reads were aligned to the reference genome *Mytilus chilensis* (Gallardo-Escárate et al., 2022) using BWA software (Li and Durbin, 2009) with default parameters, and duplicate removal was performed using SAMtools software (Li et al., 2009). The dataset was compiled and analyzed with STACKS v2 bioinformatics pipeline (Catchen et al., 2011; Rochette et al., 2019) for SNPs detection and assembled “ref_map.pl”. The SNPs were also screened for allele coverage, with any SNPs displaying a local and global minor allele frequency (MAF) threshold of less than 1% removed from the dataset. Individuals with < 95% loci genotyped were excluded, resulting in 55 individuals genotyped from three sites. The information about SNP detection was stored in the VCF files.

3.2.7. Genetic diversity, population structure, and bioinformatics analysis.

We assessed and described basic population genetic statistics for mussels from the three sites using standard population genetic parameters, including SNP nucleotide diversity [π], observed and expected heterozygosity estimates, and inbreeding coefficients ($[F_{IS}]$). These parameters were generated using the adegenet package (Jombart, 2008) and dartR (Gruber et al., 2018) in R v3.6 (R Core Team, 2013). We utilized LEA (Frichot and François, 2015) to estimate the most likely number of genetic clusters for each species by running the sNMF algorithm for values of K from 1 to 10. To visualize the distribution of the genetic variation among individual specimens, we performed a principal component analysis (PCA) using the dudi.pca function from the ade4 package (Dray and Dufour, 2007). Additionally, to quantify population differentiation among sites, we performed a hierarchical analysis of molecular variance (AMOVA) with the function poppr.amova in the poppr package (Kamvar et al., 2014) in R (R Core Team, 2013).

The F_{ST} value for each SNP was calculated using hierfstast R package, and the distribution of F_{ST} values for the three compared groups was plotted using the R package CMplot. Subsequently, we selected SNPs with F_{ST} values distributed within the top 1% and the top 5% as the top significant SNPs. These SNPs were chosen as elements in the discovery of differentially selected regions (DSRs).

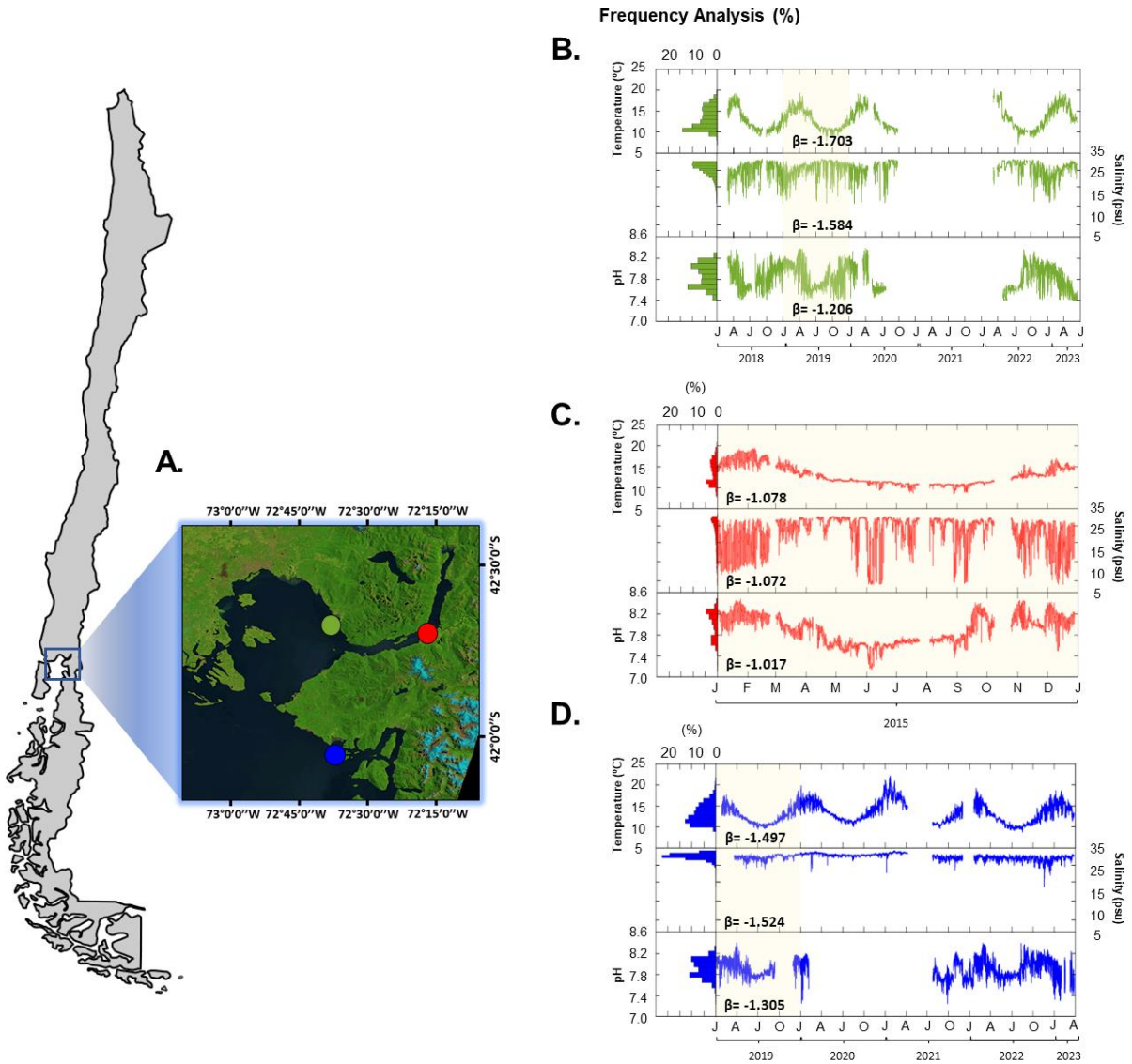


Figure 3.2. Natural environmental variability regime and predictability (β) across mussel study sites. (A) Map showing *M. chilensis* spat collection sites at the three different locations (represented by full circles; green = sound, red = fjord, and blue = embayment). Temporal series (line plots) and frequency analysis (bars plots) of surface (upper ~ 3.5 m depth) temperature, salinity, and pH for each site. Map Source: Landsat 9, United States Geological Survey, USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov/>), 2024. (B) Sound, (C) Fjord, and (D) Embayment.

Analyses were based on 1-year data set for fjord (from Vergara-Jara et al. 2019), 6-years of data from the Reloncavi Marine Observatory (OMARE) from I-mar Research Centre (2018-2023), and unpublished data from an oceanographic buoy at the Coastal Monitoring Platform from SECOS Research Institute (2019-2023).

3.3. Results

3.3.1. Environmental variability and predictability

Despite the contrasting types of the selected coastal sites/environments (e.g., a sound, a fjord ecosystem, and an embayment), and the different temporal coverage of the time-series (ranging from 1 to 3-4 years), the entire region can be characterized by a common seasonal pattern for all the studied environmental drivers. Overall, high values of temperature and salinity occur during spring-summer, while low values are present during the rainy autumn/winter months (see **Figura 3.2**). Furthermore, seawater pH also follows a seasonal pattern, with maximum values during summer (> 8.0), which in turn results in a bi-modal frequency distribution along the year at all studied sites (**Figura 3.2c**).

Despite the occurrence of extreme events, regular and predictable environmental fluctuations, such as diel cycles and/or seasonality, can create a conducive scenario that facilitates predictability in parental–offspring environments (Burgess and Marshall, 2011; Marshall & Burgess, 2015), and may facilitate adaptive trans-generational plasticity (Diaz et al., 2021). Higher values of spectral exponents (β) along our time series suggest the dominance of temporal frequencies within a specific range, thereby indicating increasing environmental predictability. Our analyses revealed slightly different β values among environmental factors (i.e. temperature, salinity and pH) and among sampling sites (see **Suppl. Table 3.1**). However, a consistent pattern of variation in predictability was observed among the three coastal sites for all factors. Our results confirmed that the fjord ecosystem exhibited the lowest β values for all environmental factors and, consequently, high unpredictability dominated by random short-term environmental fluctuations compared to the other locations (see **Suppl. Table 3.1**). This implies that the occurrence of extreme events, especially low salinity/low pH waters, might be more unpredictable and random in the fjord ecosystem than in any of the other studied sites. Although our temporal series data were collected across different years, with some consisting of only one year of data, it is crucial to highlight their consistent pattern of predictability. When we estimate β for only a single year (β_{2019}), at least

for sound and embayment, and compare it with β across the entire time series, we observe relatively the same level of predictability.

3.3.2 Physiological performance

The effect of temperature, salinity, and pH on the clearance rate of juvenile mussels was described by performance curve (e.g., Weibull and Gaussian functions, **Table 3.1** and see **Figure 3.3**), representing the influence of these factors on organismal performance (a proxy of phenotypic plasticity). The shapes and position of this performance curve varied among individuals from the different sites in response to the corresponding regime of environmental variability (see **Figure 3.2**).

Clearance rate performance across experimental temperatures differed significantly among sites (Two-Way ANOVA, temperature \times site interaction, $F_{(8,278)} = 2.562$, $p = 0.01$) (**Table 3.2**), evidencing that the impact of temperature varied significantly among organisms from different sites. Optimal temperature values (T_{opt}) ranged between 15.8°C and 18.6°C, for the fjord and the embayment, respectively (**Table 3.1**). Moreover, a comparison of maximal performance/clearance (P_{max}) and thermal breadth (T_{br}) for individuals from the different sites revealed opposite patterns between these two parameters. The Fjord exhibited the highest P_{max} but the lowest T_{br} ($P_{max} = 182 \text{ mL g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ and $T_{br} = 15.5 \text{ }^\circ\text{C}$), while embayment showed the lowest P_{max} but a higher T_{br} ($P_{max} = 138 \text{ mL g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ and $T_{br} = 20.7 \text{ }^\circ\text{C}$), with sound in an intermediate condition (**Table 3.1**). To determine the reliability of these findings, confidence intervals for P_{max} were calculated (**Suppl. Table 3.5**), suggesting that the performance curve for the embayment slightly overlaps with those exhibited by individuals from the sound.

Response of clearance rate to salinity varied significantly among the three sites (Two-Way ANOVA, salinity \times site interaction, $F_{(8,284)} = 8.669$, $p < 0.001$) (**Table 3.2**). Significant differences were observed in the performance of individuals between the sound and the embayment (Tukey's HSD tests, $p < 0.001$), as well as between the individuals from the sound and the fjord (Tukey's HSD tests, $p < 0.001$). Our analysis showed that the Weibull model exhibited the best fit based on AIC only for the

embayment (**Suppl. Table 3.3**). However, the obtained S_{opt} value ($S_{opt} = 35.2$ psu) appeared to deviate from environmental conditions, suggesting a potential limitation of the Weibull model in forecasting descriptors within the environmental context (i.e. salinities > 34.5 psu are not observed in coastal areas at this latitude, especially those affected by high runoff). S_{opt} values differed among the three studied sites (**Table 3.1**), with lower observed S_{opt} values in individuals from the fjord ($S_{opt} = 18.4$ psu) and higher ones for those from embayment ($S_{opt} = 33.6$ psu). Additionally, S_{br} was relatively narrow in individuals from the embayment, and extremely wide in mussels from the fjord ($S_{br} = 8.93$ and 25.7 psu, respectively). These performance curve parameters seem to be related to the observed regimes of environmental variability and predictability. Specifically, the high breadth (S_{br}) in clearance performance observed among individuals from the fjord is consistent with the occurrence of extreme and less predictable low salinity events and a greater amplitude in the salinity range in this area, especially during the winter and spring months (i.e. ~ 5 up to 32.5 psu, **Figura 3.2c**). Additionally, the fjord is the geographic area experiencing lower environmental predictability for salinity conditions among the studied sites (i.e. $\beta = -1$, **Suppl. Table 3.1**).

Table 3.1. Best model fitting for performance curves of clearance rate across a gradient of three environmental variables for <i>M. chilensis</i> juveniles from three different study sites.						
Environmental Variable	Study site	Function	AIC	$P_{max}(mL \cdot g^{-1} \cdot h^{-1})$	X_{opt}	X_{br}
Temperature	Sound	Gaussian	1059	156	17.5 °C	22.0 °C
	Fjord	Gaussian	1086	182	18.6 °C	15.5 °C
	Embayment	Gaussian	1054	138	15.8 °C	20.7 °C
Salinity	Sound	Gaussian	1197	174	24.7 psu	22.2 psu
	Fjord	Gaussian	1266	252	18.4 psu	25.7 psu
	Embayment	Gaussian	1281	425	33.6 psu	8.93 psu
pH	Sound	Weibull	1212	241	8.10	0.65
	Fjord	Gaussian	1247	350	7.82	0.52
	Embayment	Weibull	1251	234	7.91	0.81

The maximal performance (P_{max}), the optimal value (X_{opt}), and performance breadth (X_{br}) are used to mechanistically describe the response of a population exposed to different temperatures, salinity, and pH levels.

According to AIC, the Gaussian function was the best model for explaining clearance rate performance across the pH range in the fjord, while the Weibull function was

selected for the sound and the embayment (**Suppl. Tabla 3.4**). Significant differences were observed in the interaction between the studied sites and experimental pH (Two-Way ANOVA, pH × site interaction, $F_{(8,285)} = 5.220$, $p < 0.001$) (**Tabla 3.2; Figura 3.2c**). The pH_{opt} was relatively similar across sites, although lower values were observed in mussels from the fjord ($pH_{opt} = 7.8$), and higher ones in those from the embayment ($pH_{opt} = 8.1$). Although individuals from the fjord exhibited the highest P_{max} ($350 \text{ mL g}^{-1} \text{ h}^{-1}$), mussels from the embayment showed less sensitivity in their clearance rate response to pH changes, suggesting a high tolerance to changing pH conditions. This is evidenced by a pH_{br} approximately 30% higher in the embayment ($pH_{br} = 0.81$) compared to the other studied sites.

Tabla 3.2. Results for variance analyses (for clearance rate) of the three studied sites of <i>Mytilus chilensis</i>.					
	SS	d.f.	MS	F	P-value
ANOVA Temperature					
Temperature	135738	4	33934	7.838	5.35 e^{-6}
Population	23138	2	11569	2.672	0.0709
Temperature × Site	88741	8	11093	2.562	0.0104
Residuals	1203632	278	4330		
ANOVA Salinity					
Salinity	830424	4	207606	12.691	1.63 e^{-9}
Population	234552	2	117276	7.167	0.0009
Salinity × Site	1134444	8	141806	8.669	1.38 e^{-10}
Residuals	4645789	284	16358		
ANOVA pH					
pH	1358619	4	339655	26.968	$<2 \text{ e}^{-16}$
Population	18056	2	9028	0.717	0.4890
pH × Site	525906	8	65738	5.220	4.19 e^{-6}
Residuals	3589469	285	12595		
SS = sums of squares; d.f. = degrees of freedom; MS = mean square.					

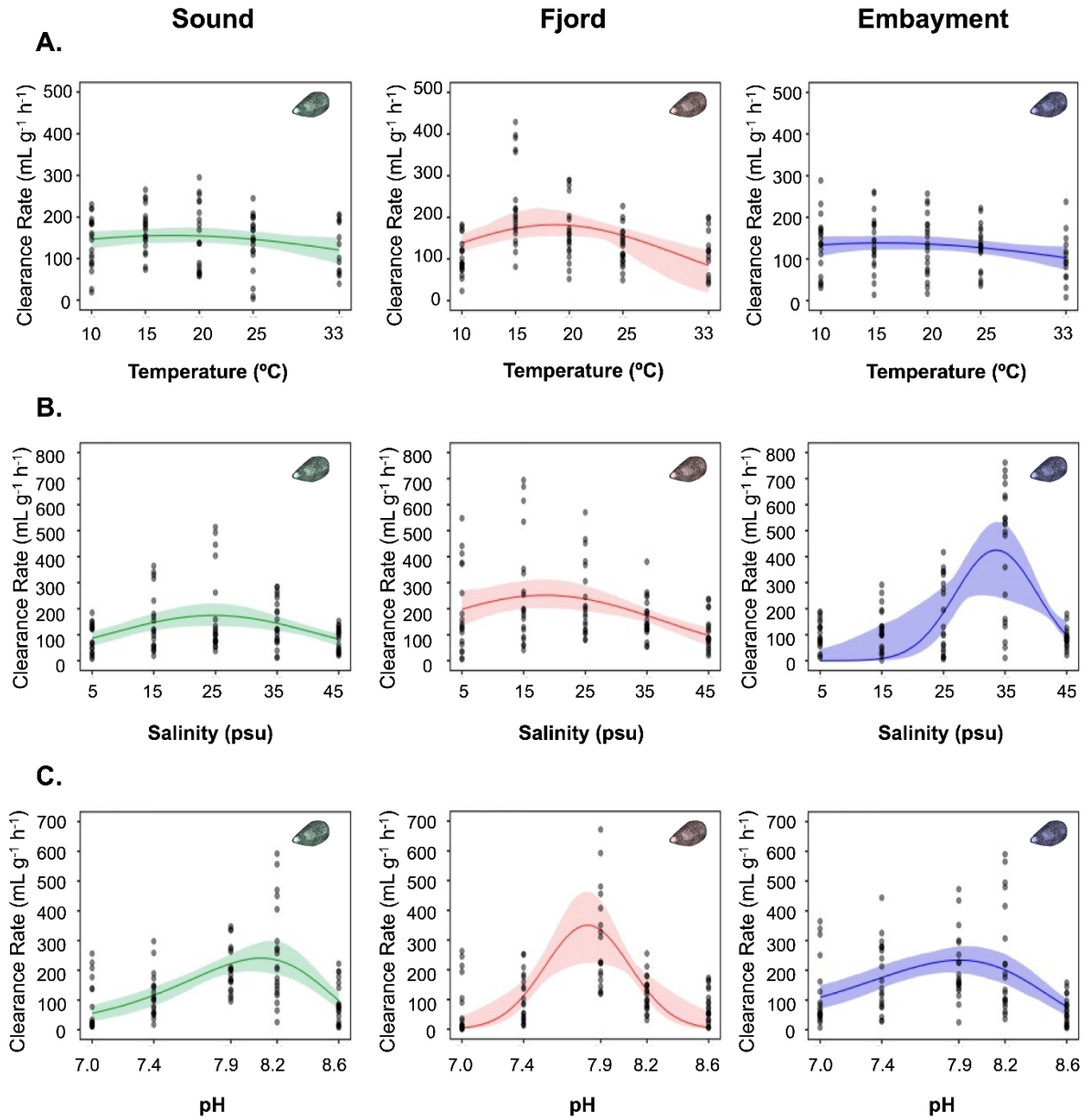


Figure 3.3. Interpopulation variation in clearance rate performance under multiple-stressors. Clearance rate performance curves for mussels from the different studied sites (e.g., green= sound, red= fjord, and blue= embayment), across a gradient of. a. Temperature, b. Salinity, and c. pH. Each dot represents one individual (N= 20 individuals population-1). Tests were performed to evaluate the best fit for each performance curve, and detailed results are shown in Table 1.

3.3.3 Genetic diversity and structure

Samples from 55 individuals passed the filters used at three analyzed sites. A total of 1,522,188 reads of 101 bp were obtained from ddRADseq. The average number of sequences per sample was 601,943 and passed population filter constraints. Of these, 30,093 loci were variable. The summary statistics for every site, including observed heterozygosity (H_o), expected heterozygosity (H_e), nucleotide diversity (P_i), and Inbreeding coefficient (F_{IS}) are presented in **Table 3.3**. The values of P_i were similar across the sampled sites, supporting the lack of significant genetic differentiation among populations. Results from sMNF genetic clustering and PCA revealed a lack of genetic structure among the three sampled sites (**Figure 3.4**).

Tabla 3.3. Genetic diversity indices based on SNPs for juvenile of <i>Mytilus chilensis</i> from three different geographic sites.				
Animals collection	H_o	H_e	P_i	F_{IS}
Sound	0,1623	0,2386	0,2472	0,3196
Fjord	0,1632	0,2425	0,2494	0,3271
Embayment	0,1639	0,2419	0,2491	0,3222

H_o : observed heterozygosity, H_e : expected heterozygosity, P_i : nucleotide diversity and F_{IS} : inbreeding coefficient.

The hierarchical analysis of molecular variance (AMOVA) (see **Suppl. Table 3.6**) revealed that the majority of genetic variation resides within individual samples (65.76%), followed by variation among samples within genetic groups (34.27%). However, variation among genetic groups was minimal (0.03%), suggesting a lack of significant genetic differentiation among individuals from each site.

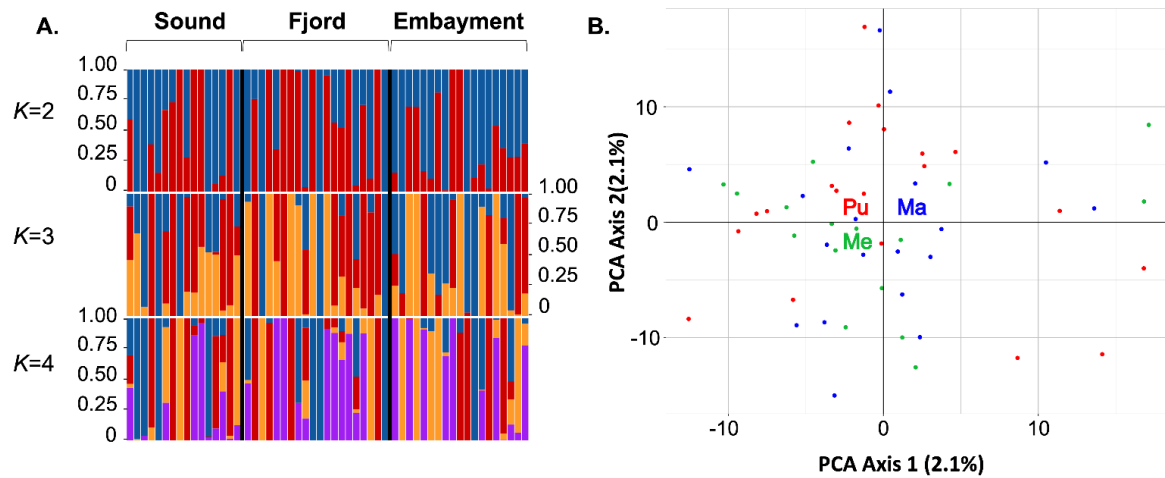


Figure. 3.4. Population structure and principal component analysis (PCA) of *Mytilus chilensis* from the three studied sites. (A) Bartplot of individual ancestry proportions inferred with sNMF for different K values (2–4) using 30,093 SNPs. Each individual is represented by a vertical bar broken into different colored genetic clusters, with length proportional to the probability of assignment to each cluster. (B) PCA for *M. chilensis* from the three studied sites. The color of points represents populations (Me = sound, Pu = fjord, and Ma = embayment). The percentage of variation explained by the two axes is indicated in brackets.

3.4. Discussion

Understanding and predicting how organisms will respond to changing environments, particularly in terms of the magnitude and frequency of extreme events (Ummenhofer and Meehl, 2017), is essential for comprehending physiological performance, genetic diversity, and structure in marine populations. In this context, phenotypic plasticity emerges as a pivotal mechanism enabling organisms to adjust their behavior, physiology, and performance to fluctuations in the heterogeneous seascape of coastal environments (Donelson et al., 2023; Luhring and DeLong, 2016; Pigliucci, 2001). Various studies have explored this issue, with a particular focus on the thermal tolerance response of different marine species (Gaitán-Espitia et al., 2014; Luhring and DeLong, 2016; Rodríguez-Romero et al., 2022). However, there are almost scarce empirical studies documenting the influence of different environmental drivers on the physiological performance of individuals from diverse marine environments. Here, through an integrative

approach, we explored whether and how phenotypic plasticity and tolerance under independent multiple environmental factors is modulated by different regimes of environmental variability (i.e. frequency of extreme events) and predictability levels (i.e. frequency composition of environmental variance) experienced by mussel from different geographic areas within a complex mosaic of coastal heterogeneity. Unfortunately, testing the prediction about the relative role of environmental variability vs. environmental predictability is not fully possible with the present experimental approach, primarily due to the limited number of sampled sites and the magnitude of differences in predictability among sites. However, we have analyzed the combined effect of both drivers, considering it has been previously suggested that the combination of both environmental components ('amplitude/variability' and 'predictability') could co-influence the degree of phenotypic plasticity and tolerance in natural populations (Bitter et al. 2021b).

The studied area is characterized by a seasonal environmental pattern, not only in temperature and salinity but also in seawater pH, which reaches a maximum during summer (> 8.0) due to high photosynthetic productivity, and then decreases during the fall and winter months due to a low photosynthesis-to-respiration ratio (Vargas et al., 2017; Vergara-Jara et al., 2019). However, our time-series analyses showed different regimes in temporal variability in temperature, salinity, and pH among sites despite the shared regional pattern of seasonal cycles (Narváez et al., 2019; Vergara-Jara et al., 2019). For instance, mussels inhabiting the fjord area are influenced by recurring and intense riverine discharges, leading to extreme conditions and significant fluctuations in salinity and pH, especially during the fall and winter months (Narváez et al., 2019). The complexity and heterogeneity of the marine landscape are not confined to Southern Chile but extend to numerous regions worldwide, enabling the replication of similar studies across almost all continents. Typically, fjords, island archipelagos, and inner seas, all ecosystems influenced by high freshwater runoff and oceanic water intrusion, as well as a productive mussel and salmon farming industry, dominate coastal margin areas of many temperate regions worldwide. Similar coastal environments can be found in regions such as Norway, New Zealand, and the Northwest Pacific (e.g., Alaska and

British Columbia) (Bianchi et al., 2020; Froehlich et al., 2018; Hill et al., 2015; Pawlowicz, 2017).

The analysis of spectral exponents (β) indicates varying degrees of environmental predictability across the study sites. The fjord ecosystem exhibits the lowest environmental predictability for all variables. This finding implies the occurrence of random high-frequency fluctuations driven by diel or tidal cycles in this estuarine system, but also intra-seasonal and synoptic variability associated to the hydrological cycle from the Puelo River, the main freshwater source to the Reloncaví Fjord (Puelo) (León-Muñoz et al., 2021). These factors can lead to events of low/high temperature, salinity, and pH throughout the year (Leung et al., 2020).

The recurrent exposure of mussels from fjord sites to such variable conditions suggest a higher likelihood of encountering unpredictable extreme events (e.g., warm events and episodes of low salinity/low pH), compared to other areas. This exposure to low salinity can explain the lower plasticity in clearance rate and higher tolerance upon low salinity conditions, as well as an optimal salinity for the studied trait at relatively low levels ($S_{opt}= 18.4$ psu) (**Table 3.1**). Previous studies suggest the presence of multiple relevant time scales potentially influencing feeding flexibility in mussels, primarily associated with predictable fluctuations ranging from tidal variations to higher-frequency cycles (Bayne, 2004). Indeed, an increasing body of research indicates that phenotypic plasticity can evolve in response to environmental predictability (Leung et al., 2020). Consequently, organisms exposed to environments where changes occur predictably may be more inclined to exhibit plastic responses, potentially fostering local adaptation and/or the evolution of phenotypic plasticity (Burgess and Marshall, 2011; Palumbi et al., 2019; Schmitt and Antonovics, 1986; Vargas et al., 2017). This could be advantageous because it allows individuals to adjust their phenotypes to match the prevailing environmental conditions, thereby enhancing their survival and reproductive success (Leung et al., 2020).

In the context of global change biology, performance curves are a useful approach for understanding how organisms respond to environmental changes and extreme conditions (Fernández et al., 2020; Gaitán-Espitia et al., 2017a; Huey and

Kingsolver, 2011). Our findings suggest that the observed intra-specific variation in physiological estimates and the shape described by the performance curves may indicate diverse influences of local environmental conditions and selection, shaping contrasting patterns of phenotypic plasticity at small spatial scales (Angilletta, 2006; Kellermann et al., 2019). Given the fundamental role of feeding in the growth and survival of mussel populations (Gosling, 2015), the observed differences in clearance performance not only carry ecological implications but also offer valuable insights for managing the mussel farming industry and spatial aquaculture planning. The performance curves reveal that mussels from the fjord exhibit the highest thermal optimum ($T_{opt} = 18.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$) and maximum clearance rate ($P_{max} = 182 \text{ mL g}^{-1} \text{ h}^{-1}$) compared to those from the sound and embayment. However, mussels from the sound may exhibit less plasticity to temperature gradients, as indicated by their wider thermal breadth ($T_{br} = 22^{\circ}\text{C}$). Conversely, mussels from the embayment demonstrate high plasticity regarding salinity, as evidenced by the curve shape, with the highest clearance rate ($P_{max} = 425 \text{ mL g}^{-1} \text{ h}^{-1}$) under high salinity conditions ($S_{opt} = 33.6 \text{ psu}$) and a relatively narrow salinity range ($S_{br} = 8.93 \text{ psu}$). They show lower plasticity but higher tolerance to changes in pH conditions ($\text{pH}_{br} = 0.81$). In contrast, mussels from the fjord exhibit extreme tolerance across a wide salinity gradient ($S_{br} = 25.7 \text{ psu}$), with an S_{opt} skewed towards low salinity conditions ($S = 18.4 \text{ psu}$). The significant site \times environmental variables (pH, temperature, and salinity) interaction in clearance rate suggests that there is population variation for metabolic flexibility in response to variable pCO_2 , temperature or salinity levels in seawater. Natural selection has played a crucial role in enabling populations to adapt to environmental stress. However, evolutionary rescue depends on sufficient population size, as well as the presence of both phenotypic diversity and the underlying genetic variation. Our findings indicate significant variability in acclimation ability both within and among populations. Understanding these variations will be essential for accurately predicting the impacts of global ocean change. The feeding performance in mussels from different geographic sites is also closely linked with the environmental variability regime they experience in their respective habitat or recruitment area. This is particularly noteworthy given recent findings

indicating that changes in salinity play a predominant role in the physiology of these populations (Araneda et al., 2016). However, the migration rate resulting from the translocation of juveniles to growing centers undermines both temporal and spatial differentiation, posing a risk of losing locally adapted alleles (Yévenes et al., 2022). This is a crucial point, as part of the production cycle of the Chilean mussel, *M. chilensis*, involves transporting juveniles from collection sites to growing centers (Rivera et al., 2017). At these centers, mussels are placed in culture systems until they reach market size, typically around 5 cm. This practice could impact population structure; potentially leading to the replacement of local genotypes, thereby jeopardizing the population ability to cope with present or future environmental disturbances or extreme climatic events (Yévenes et al., 2022).

Our results, comparing genetic diversity and population structure among the three respective sites, have revealed low values of heterozygosity. Additionally, we observed minimal variation in nucleotide diversity, and low values of F_{IS} and F_{ST} . These low F_{ST} values are consistent with studies conducted by various authors using allozymes and microsatellites (Araneda et al., 2016; Larraín et al., 2014). Furthermore, these results align with the high gene flow within this region, facilitated by the exchange of juvenile stocks among aquaculture facilities (Pantoja et al., 2011). Variations in the environment can limit gene flow, resulting in geographical distinctions among populations (Hughes et al., 2008). Despite substantial gene flow, it appears that the ability of *M. chilensis* juveniles to acclimate to diverse environmental settings, such as notable phenotypic plasticity, as evidenced in fjord for salinity, is linked to the selection of genotypes suited to particular habitats (Kawecki and Ebert, 2004), at least during their initial stages of development (within the scope of this study). High gene flow does not preclude variation in plasticity; local selective pressures can drive different plastic responses among mussel populations exposed to distinct environmental heterogeneity. This facilitates local adaptation through phenotypic plasticity without necessarily leading to significant genetic divergence among populations. This pattern is an evolutionary consequence of marine larval dispersal over broad spatial scales, which homogenizes genetic differences and promotes the evolution of generalist and plasticity (Sotka 2012).

Further research on whether this pattern persists following the transfer of mussels to sites where the growth phase of aquaculture takes place is a critical next step. Genetic diversity is crucial for population adaptation and evolution (Hughes et al., 2008; Yévenes et al., 2022). Monitoring variability across functional loci aids in assessing the impacts of translocations and can provide ways to improve the mussel industries practices (Lenormand, 2002). This is especially important in the context of more frequent and unpredictable stress events due to climate change (Gaitán-Espitia et al., 2013; Rodríguez-Romero et al., 2022). The results can assist in identifying seeding areas that are more or less resilient to different stressors, potentially informing on the heterogeneous attributes of juveniles within mussel seed markets and enhancing the industry's capacity to anticipate, respond to, and recover from changes associated with diverse environmental stressors (Thomson and Emery, 2014). Such information is also crucial for helping to restore areas with impoverished genetic diversity (Astorga et al., 2020). Therefore, this information can facilitate further discussions on food system adaptability, management, and policy. Predictions derived from physiological performance curves enhance our understanding of the interplay between the natural environmental regime and organismal physiology (Gaitán-Espitia et al., 2013; Rodríguez-Romero et al., 2022). Our study highlights the imperative integration of interdisciplinary research, which includes understanding natural habitat history, incorporating additional physiological traits, and integrating genetic information. These findings carry important implications for the management and sustainability of the mussel farming industry, offering valuable insights to optimize farming practices, juvenile selection, and industry adaptation strategies to climate change. While the study is conducted in Chile, the approach presented can inform other countries and regions interested in exploring similar issues to support their aquaculture sectors. Ultimately, these interdisciplinary efforts can inform and facilitate the development of novel approaches and programs aimed at enhancing the adaptive capacity of shellfish farming industries globally.

Acknowledgments

The Coastal Social-Ecological Millennium Institute (SECOS), Millennium Science Initiative Program – Code ICN2019_015 and the Millennium Institute of Oceanography (IMO) funded by Millennium Science Initiative-ANID Program (Grant ICN12_019-IMO), supported this work. During the analysis and preparation of the manuscript, NC was fully supported by a Doctoral scholarship from ANID N° 21210703. We appreciate and acknowledge all the technical support provided by Miss Tamara Cuevas at the mesocosm laboratory and by Lorena Arias at the carbonate chemistry lab (ECCALab). FONDECYT 1210171 to CV also supported chemical and data analyses. Finally, we would like to thank the three anonymous reviewers for their extremely valuable work, which helped create a much more enriching version of this study.

Author contributions

N.C. and C.V. collected the samples, developed the methodology, generated figures, and wrote the original draft. J.D.G. supported the analysis of physiological performance curve data, conducted statistical analyses, and contributed to the writing of the final manuscript version. J.Q.-G. collaborated on the analysis of genetic data. G.S.S. processed environmental predictability data and prepared figures. S.M. collected the samples, collaborated during experimentation in the laboratory, and contributed to the edition of the final version of the manuscript. M.L. and A.M. supported the analysis of performance curve data. I.P-S. and S.G. worked on the edition of the final version of the manuscript. C.V. conceived the scientific idea. All authors reviewed and contributed critically to the development of the final manuscript.

Competing interests: The authors declare that they have no competing interests.

Data and materials availability: All data needed to evaluate the conclusions in the paper are present in the paper and/or the Supplementary Materials. Additional data related to this paper may be requested from the authors.

Additional information

Supplementary information

3.5 References

- Aguilera, V.M., Bednaršek, N., 2022. Variations in phenotypic plasticity in a cosmopolitan copepod species across latitudinal hydrographic gradients. *Front. Ecol. Evol.* 10, 925648. <https://doi.org/10.3389/fevo.2022.925648>
- Amos, W., Harwood, J., 1998. Factors affecting levels of genetic diversity in natural populations. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B. Biol. Sci.* 353, 177–186. <https://doi.org/10.1098/rstb.1998.0200>
- Angilletta, M.J., 2006. Estimating and comparing thermal performance curves. *J. Therm. Biol.* 31, 541–545. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2006.06.002>
- Angilletta, M. J. 2009. *Thermal Adaptation: A Theoretical and Empirical Synthesis*. Oxford: Oxford University Press.
- Araneda, C., Larraín, M.A., Hecht, B., Narum, S., 2016. Adaptive genetic variation distinguishes Chilean blue mussels (*Mytilus chilensis*) from different marine environments. *Ecol. Evol.* 6, 3632–3644.
- Astorga, M.P., Cárdenas, L., Pérez, M., Toro, J.E., Martínez, V., Farías, A., Uriarte, I., 2020. Complex spatial genetic connectivity of mussels *Mytilus chilensis* along the southeastern Pacific coast and its importance for resource management. *J. Shellfish Res.* 39, 77–86. <https://doi.org/10.2983/035.039.0108>
- Bayne, B.L., 2004. Phenotypic flexibility and physiological tradeoffs in the feeding and growth of marine bivalve molluscs. *Integr. Comp. Biol.* 44, 425–432. <https://doi.org/10.1093/icb/44.6.425>
- Bianchi, T.S., Arndt, S., Austin, W.E.N., Benn, D.I., Bertrand, S., Cui, X., Faust, J.C., Koziorowska-Makuch, K., Moy, C.M., Savage, C., 2020. Fjords as aquatic critical zones (ACZs). *Earth Sci. Rev.* 203, 103145. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103145>
- Bitter, M.C, Kapsenberg, L., Silliman, K., Gattuso, J.-P., Pfister, C.A., 2021a. Magnitude and predictability of pH fluctuations shape plastic responses to ocean acidification. *Am. Nat.* 197, 486–501. <https://doi.org/10.5061/dryad.tqjq2bvxc>
- Bitter, M.C, Wong, J.M., Dam, H.G., Donelan, S.C., Kenkel, C.D., Komoroske, L.M., Nickols, K.J., Rivest, E.B., Salinas, S., Burgess, S.C., 2021b. Fluctuating selection and global change: a synthesis and review on disentangling the roles of climate amplitude, predictability and novelty. *Proc. Roy. Soc. B* 288, 20210727. <https://doi.org/10.1098/rspb.2021.0727>
- Brennan, R.S., Garrett, A.D., Huber, K.E., Hargarten, H., Pespeni, M.H., 2019. Rare genetic variation and balanced polymorphisms are important for survival in global change conditions. *Proc. Roy. Soc. B* 286, 20190943. <https://doi.org/10.1098/rspb.2019.0943>
- Brierley, A.S., Kingsford, M.J., 2009. Impacts of climate change on marine organisms and ecosystems. *Curr. Biol.* 19, R602–R614. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2009.05.046>

- Burgess, S.C., Marshall, D.J., 2011. Temperature-induced maternal effects and environmental predictability. *Journal of Experimental Biology* 214, 2329–2336. <https://doi.org/10.1242/jeb.054718>
- Carstensen, J., Duarte, C.M., 2019. Drivers of pH variability in coastal ecosystems. *Environ. Sci. Technol.* 53, 4020–4029. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b03655>
- Catchen, J.M., Amores, A., Hohenlohe, P., Cresko, W., Postlethwait, J.H., 2011. Stacks: building and genotyping loci de novo from short-read sequences. *G3: Genes|genomes|genetics* 1, 171–182. <https://doi.org/10.1534/g3.111.000240>
- Chen, G., Hare, M.P., 2008. Cryptic ecological diversification of a planktonic estuarine copepod, *Acartia tonsa*. *Mol. Ecol.* 17, 1451–1468. <https://doi.org/10.1111/j.1365-294X.2007.03657.x>
- Chevin, L.-M., Hoffmann, A.A., 2017. Evolution of phenotypic plasticity in extreme environments. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B. Biol. Sci* 372, 20160138. <https://doi.org/10.1098/rstb.2016.0138>
- Diaz, F., Kuijper, B., Hoyle, R.B., Talamantes, N., Coleman, J.M., Matzkin, L.M., 2021. Environmental predictability drives adaptive within-and transgenerational plasticity of heat tolerance across life stages and climatic regions. *Funct. Ecol.* 35, 153–166. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.13704>
- Donelson, J.M., Gaitan-Espitia, J.D., Hobday, A.J., Mokany, K., Andrew, S.C., Boulter, S., Cook, C.N., Dickson, F., Macgregor, N.A., Mitchell, N.J., 2023. Putting plasticity into practice for effective conservation actions under climate change. *Nat. Clim. Chang.* 13, 632–647. <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01706-4>
- Donelson, J.M., Sunday, J.M., Figueira, W.F., Gaitán-Espitia, J.D., Hobday, A.J., Johnson, C.R., Leis, J.M., Ling, S.D., Marshall, D., Pandolfi, J.M., 2019. Understanding interactions between plasticity, adaptation and range shifts in response to marine environmental change. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.* 374, 20180186. <https://doi.org/10.1098/rstb.2018.0186>
- Doney, S.C., Ruckelshaus, M., Emmett Duffy, J., Barry, J.P., Chan, F., English, C.A., Galindo, H.M., Grebmeier, J.M., Hollowed, A.B., 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>
- Dray, S., Dufour, A.-B., 2007. The ade4 package: implementing the duality diagram for ecologists. *J. Stat. Softw.* 22, 1–20. <https://doi.org/10.18637/jss.v022.i04>
- Duarte, C.M., Cebrián, J., 1996. The fate of marine autotrophic production. *Limnol. Oceanogr.* 41, 1758–1766. <https://doi.org/10.4319/lo.1996.41.8.1758>
- Duarte, C., Navarro, J.M., Quijon, P.A., Loncon, D., Torres, R., Manriques, P.H., Lardies, M.A., Vargas, C.A., Lagos, N.A., 2018. The energetic physiology of juvenile mussels, *Mytilus chilensis* (Hupe): the prevalent role of salinity under current and predicted pCO₂ scenarios. *Environ. Pollut.* 242, 156–163. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.06.053>
- FAO, 2022. El estado mundial de la pesca y la acuicultura (SOFIA). Roma.
- Fernández, P.A., Gaitán-Espitia, J.D., Leal, P.P., Schmid, M., Revill, A.T., Hurd, C.L., 2020. Nitrogen sufficiency enhances thermal tolerance in habitat-forming kelp: implications for acclimation under thermal stress. *Sci. Rep.* 10, 3186. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60104-4>
- Fernández, P.A., Labbé, B., Gaitán-Espitia, J.D., Hurd, C.L., Paine, E.R., Willis, A., Sanderson, C., Buschmann, A.H., 2023. The influence of ammonium to nitrate ratio on the thermal responses of early life stages of the giant kelp *Macrocystis pyrifera*. *Algal Res.* 72, 103114. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2023.103114>
- Frichot, E., François, O., 2015. LEA: An R package for landscape and ecological association studies. *Methods Ecol. Evol.* 6, 925–929. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12382>

- Froehlich, H.E., Gentry, R.R., Halpern, B.S., 2018. Global change in marine aquaculture production potential under climate change. *Nat. Ecol. Evol.* 2(11), 1745–1750. <https://doi.org/10.1038/s41559-018-0669-1>
- Gaitán-Espitia, J.D., Bacigalupe, L.D., Opitz, T., Lagos, N.A., Timmermann, T., Lardies, M.A., 2014. Geographic variation in thermal physiological performance of the intertidal crab *Petrolisthes violaceus* along a latitudinal gradient. *J. Exp. Bio.* 217, 4379–4386. <https://doi.org/10.1242/jeb.108217>
- Gaitán-Espitia, J.D., Belen Arias, M., Lardies, M.A., Nespolo, R.F., 2013. Variation in thermal sensitivity and thermal tolerances in an invasive species across a climatic gradient: lessons from the land snail *Cornu aspersum*. *PLoS One* 8, e70662. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0070662>
- Gaitán-Espitia, J.D., Bacigalupe, L.D., Opitz, T., Lagos, N.A., Osoreo, S., Lardies, M.A., 2017a. Exploring physiological plasticity and local thermal adaptation in an intertidal crab along a latitudinal cline. *J. Therm. Biol.* 68, 14–20. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2017.02.011>
- Gaitán-Espitia, J.D., Marshall, D., Dupont, S., Bacigalupe, L.D., Bodrossy, L., Hobday, A.J., 2017b. Geographical gradients in selection can reveal genetic constraints for evolutionary responses to ocean acidification. *Biol. Lett.* 13, 20160784. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2016.0784>
- Gallardo-Escárate, C., Valenzuela-Muñoz, V., Nuñez-Acuña, G., Valenzuela-Miranda, D., Tapia, F., Yévenes, M., Gajardo, G., Toro, J.E., Oyarzún, P.A., Arriagada, G., 2022. The native mussel *Mytilus chilensis* genome reveals adaptative molecular signatures facing the marine environment. *bioRxiv* 2022–2029. <https://doi.org/10.1101/2022.09.06.506863>
- Ghalambor, C.K., McKay, J.K., Carroll, S.P., Reznick, D.N., 2007. Adaptive versus nonadaptive phenotypic plasticity and the potential for contemporary adaptation in new environments. *Funct. Ecol.* 21, 394–407. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2007.01283.x>
- Glynn, E.F., Chen, J., Mushegian, A.R., 2006. Detecting periodic patterns in unevenly spaced gene expression time series using Lomb–Scargle periodograms. *Bioinformatics* 22, 310–316. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/bti789>
- Gobler, C.J., Baumann, H., 2016. Hypoxia and acidification in ocean ecosystems: coupled dynamics and effects on marine life. *Biol. Lett.* 12, 20150976. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2015.0976>
- Gosling, E., 2015. Marine bivalve molluscs. John Wiley & Sons.
- Gruber, B., Unmack, P.J., Berry, O.F., Georges, A., 2018. dartr: An r package to facilitate analysis of SNP data generated from reduced representation genome sequencing. *Mol. Ecol. Resour.* 18, 691–699. <https://doi.org/10.1111/1755-0998.12745>
- Halali, S., Casper, E., Breuker, J., Brakefield, P.M., Brattström, O., 2021. Seasonal environments drive convergent evolution of a faster pace-of-life in tropical butterflies. *Ecol. Lett.* 2481, 102 – 112
- Harley, C.D.G., Randall Hughes, A., Hultgren, K.M., Miner, B.G., Sorte, C.J.B., Thornber, C.S., Rodriguez, L.F., Tomanek, L., Williams, S.L., 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>
- Hernández, J., and González, L., 1976. Observaciones sobre el comportamiento de mitílicos chilenos en cultivo suspendido. 1 chorito (*Mytilus chilensis*, Hupe, 1854). *Invest. Pesquera (Chile)* 22: 1–50.
- Hill, D.F., Bruhis, N., Calos, S.E., Arendt, A., Beamer, J., 2015. Spatial and temporal variability of freshwater discharge into the Gulf of Alaska. *J Geophys Res Oceans* 120, 634–646. <https://doi.org/10.1002/2014JC010395>

- Hochachka, P.W., Somero, G.N., 2002. Biochemical adaptation: mechanism and process in physiological evolution. Oxford university press.
- Huey, R.B., Berrigan, D., Gilchrist, G.W., Herron, J.C., 1999. Testing the adaptive significance of acclimation: a strong inference approach. *Am. Zool.* 39, 323–336. <https://doi.org/10.1093/icb/39.2.323>
- Huey, R.B., Kingsolver, J.G., 2011. Variation in universal temperature dependence of biological rates. *Proc. Natl Acad. Sci.*, 108, 10377–10378. <https://doi.org/10.1073/pnas.1107430108>
- Huey, R. B., Kearney, M. R., Krockenberger, A., Holtum, J. A. M., Jess, M. and Williams, S. E. (2012). Predicting organismal vulnerability to climate warming: roles of behaviour, physiology and adaptation. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 367, 1665-1679. <https://doi.org/10.1098/rstb.2012.0005>
- Hughes, A.R., Inouye, B.D., Johnson, M.T.J., Underwood, N., Vellend, M., 2008. Ecological consequences of genetic diversity. *Ecol. Lett.* 11, 609–623. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2008.01179.x>
- Jombart, T., 2008. adegenet: a R package for the multivariate analysis of genetic markers. *Bioinformatics* 24, 1403–1405. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btn129>
- Kamvar, Z.N., Tabima, J.F., Grünwald, N.J., 2014. Poppr: an R package for genetic analysis of populations with clonal, partially clonal, and/or sexual reproduction. *PeerJ* 2, e281. <https://doi.org/10.7717/peerj.281>
- Kapsenberg, L., Hofmann, G.E., 2016. Ocean pH time-series and drivers of variability along the northern Channel Islands, California, USA. *Limnol. Oceanogr.* 61, 953–968. <https://doi.org/10.1002/lno.10264>
- Kawecki, T.J., Ebert, D., 2004. Conceptual issues in local adaptation. *Ecol. Lett.* 7, 1225–1241. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2004.00684.x>
- Kellermann, V., Chown, S.L., Schou, M.F., Aitkenhead, I., Janion-Scheepers, C., Clemson, A., Scott, M.T., Sgrò, C.M., 2019. Comparing thermal performance curves across traits: how consistent are they?. *J. Exp. Biol.* 222, jeb193433. <https://doi.org/10.1242/jeb.193433>
- Kelly, M.W., Padilla-Gamiño, J.L., Hofmann, G.E., 2013. Natural variation and the capacity to adapt to ocean acidification in the keystone sea urchin *Strongylocentrotus purpuratus*. *Glob. Chang. Biol.* 19, 2536–2546. <https://doi.org/10.1111/qcb.12251>
- Kingsolver, J.G., Massie, K.R., Shlichta, J.G., Smith, M.H., Ragland, G.J., Gomulkiewicz, R., 2007. Relating environmental variation to selection on reaction norms: an experimental test. *Am. Nat.* 169, 163–174.
- Kurihara, H., Watanabe, A., Tsugi, A., Mimura, I., Hongo, C., Kawai, T., Reimer, J.D., Kimoto, K., Gouezo, M., Golbuu, Y., 2021. Potential local adaptation of corals at acidified and warmed Nikko Bay, Palau. *Sci. Rep.* 11, 11192. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-90614-8>
- Larraín, M.A., Díaz, N.F., Lamas, C., Uribe, C., Araneda, C., 2014. Traceability of mussel (*Mytilus chilensis*) in southern Chile using microsatellite molecular markers and assignment algorithms. *Exploratory survey. Food Res. Int.* 62, 104–110. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.02.016>
- Lenormand, T., 2002. Gene flow and the limits to natural selection. *Trends Ecol. Evol.* 17, 183–189. [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(02\)02497-7](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(02)02497-7)
- 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, 515–528. <https://doi.org/10.1080/00288330.2013.802700>
- León-Muñoz, J., Aguayo, R., Marcé, R., Catalán, N., Woelfl, S., Nimptsch, J., Arismendi, I., Contreras, C., Soto, D., Miranda, A., 2021. Climate and Land Cover Trends Affecting

- Freshwater Inputs to a Fjord in Northwestern Patagonia. *Front. Mar. Sci.* 8, 628454. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.628454>
- Leung, C., Rescan, M., Grulois, D., Chevin, L., 2020. Reduced phenotypic plasticity evolves in less predictable environments. *Ecol. Lett.* 23, 1664–1672. <https://doi.org/10.1111/ele.13598>
- Li, H., Durbin, R., 2009. Fast and accurate short read alignment with Burrows–Wheeler transform. *Bioinformatics* 25, 1754–1760. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btp324>
- Li, H., Handsaker, B., Wysoker, A., Fennell, T., Ruan, J., Homer, N., Marth, G., Abecasis, G., Durbin, R., Subgroup, 1000 Genome Project Data Processing, 2009. The sequence alignment/map format and SAMtools. *Bioinformatics* 25, 2078–2079. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btp352>
- Luhring, T.M., DeLong, J.P., 2016. Predation changes the shape of thermal performance curves for population growth rate. *Curr. Zool.* 62, 501–505. <https://doi.org/10.1093/cz/zow045>
- Marshall, D.J., Burgess, S.C., 2015. Deconstructing environmental predictability: seasonality, environmental colour and the biogeography of marine life histories. *Ecol. Lett.* 18, 174–181. <https://doi.org/10.1111/ele.12402>
- Maynard, A., Bible, J.M., Pespeni, M.H., Sanford, E., Evans, T.G., 2018. Transcriptomic responses to extreme low salinity among locally adapted populations of Olympia oyster (*Ostrea lurida*). *Mol. Ecol.* 27, 4225–4240. <https://doi.org/10.1111/mec.14863>
- Moran, N.A., 1992. The evolutionary maintenance of alternative phenotypes. *Am. Nat.* 139, 971–989.
- Narváez, D.A., Vargas, C.A., Cuevas, L.A., García-Loyola, S.A., Lara, C., Segura, C., Tapia, F.J., Broitman, B.R., 2019. Dominant scales of subtidal variability in coastal hydrography of the Northern Chilean Patagonia. *J. Mar. Syst.* 193, 59–73. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2018.12.008>
- Navarro, J.M., Torres, R., Acuña, K., Duarte, C., Manríquez, P.H., Lardies, M., Lagos, N.A., 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.M., Duarte, C., Manríquez, P.H., Lardies, M.A., Torres, R., Acuña, K., Vargas, C.A., Lagos, N.A., 2016. Ocean warming and elevated carbon dioxide: multiple stressor impacts on juvenile mussels from southern Chile. *ICES J. Mar. Sci.* 73, 764–771. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsv249>
- Padfield, D., O’Sullivan, H., Pawar, S., 2021. rTPC and nls.multstart: a new pipeline to fit thermal performance curves in R. *Methods Ecol. Evol.* 12, 1138–1143. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13585>
- Palumbi, S.R., Evans, T.G., Pespeni, M.H., Somero, G.N., 2019. Present and future adaptation of marine species assemblages. *Oceanography* 32, 82–93.
- Pantoja, S., Iriarte, J.L., Daneri, G., 2011. Oceanography of the Chilean Patagonia. *Cont. Shelf. Res.* 31, 149–153. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2010.10.013>
- Pawlowicz, R., 2017. Seasonal cycles, hypoxia, and renewal in a coastal fjord (Barkley Sound, British Columbia). *Atmosphere-Ocean* 55, 264–283. <https://doi.org/10.1080/07055900.2017.1374240>
- Pespeni, M.H., Chan, F., Menge, B.A., Palumbi, S.R., 2013. Signs of adaptation to local pH conditions across an environmental mosaic in the California Current Ecosystem. *Integr. Comp. Biol.* 53, 857–870. <https://doi.org/10.1093/icb/ict094>
- Peterson, B.K., Weber, J.N., Kay, E.H., Fisher, H.S., Hoekstra, H.E., 2012. Double digest RADseq: an inexpensive method for de novo SNP discovery and genotyping in model

- and non-model species. *PLoS One* 7, e37135. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0037135>
- Pigliucci, M., 2001. Phenotypic plasticity: beyond nature and nurture. JHU Press.
- R Core Team, 2013. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing.
- Rivera, A., Unibazo, J., Leon, P., Vásquez-Lavín, F., Ponce, R., Mansur, L., Gelcich, S., 2017. Stakeholder perceptions of enhancement opportunities in the Chilean small and medium scale mussel aquaculture industry. *Aquaculture* 479, 423–431. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2017.06.015>
- Rochette, N.C., Rivera-Colón, A.G., Catchen, J.M., 2019. Stacks 2: Analytical methods for paired-end sequencing improve RADseq-based population genomics. *Mol. Ecol.* 28, 4737–4754. <https://doi.org/10.1111/mec.15253>
- Rodríguez-Romero, A., Gaitán-Espitúa, J.D., Opitz, T., Lardies, M.A., 2022. Heterogeneous environmental seascape across a biogeographic break influences the thermal physiology and tolerances to ocean acidification in an ecosystem engineer. *Divers Distrib.* 28, 1542–1553. <https://doi.org/10.1111/ddi.13478>
- Sanford, E., Kelly, M.W., 2011. Local adaptation in marine invertebrates. *Ann. Rev. Mar. Sci.* 3, 509–535. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-120709-142756>
- Schmitt, J., Antonovics, J., 1986. Experimental studies of the evolutionary significance of sexual reproduction. III. Maternal and paternal effects during seedling establishment. *Evolution (NY)* 40, 817–829. <https://doi.org/10.1111/j.1558-5646.1986.tb00541.x>
- Sotka, E. E. (2012). Natural Selection, Larval Dispersal, and the Geography of Phenotype in the Sea. *Integrative and Comparative Biology*, 52(4), 538–545. <https://doi.org/10.1093/icb/ics084>
- Tepolt, C.K., Grosholz, E.D., de Rivera, C.E., Ruiz, G.M., 2022. Balanced polymorphism fuels rapid selection in an invasive crab despite high gene flow and low genetic diversity. *Mol. Ecol.* 31, 55–69. <https://doi.org/10.1111/mec.16143>
- Thomson, R.E., Emery, W.J., 2014. Data analysis methods in physical oceanography. Newnes.
- Trueman, C.N., Artetxe-Arrate, I., Kerr, L.A., Meijers, A.J.S., Rooker, J.R., Sivankutty, R., Arrizabalaga, H., Belmonte, A., Deguara, S., Goñi, N., 2023. Thermal sensitivity of field metabolic rate predicts differential futures for bluefin tuna juveniles across the Atlantic Ocean. *Nat. Commun.* 14, 7379. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-41930-2>
- Ummenhofer, C.C., Meehl, G.A., 2017. Extreme weather and climate events with ecological relevance: a review. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 372, 20160135. <https://doi.org/10.1098/rstb.2016.0135>
- 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. *J. Geophys. Res. Biogeosci.* 121, 1468–1483. <https://doi.org/10.1002/2015JG003213>
- 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>
- Vasseur, D.A., Yodzis, P., 2004. The color of environmental noise. *Ecology* 85, 1146–1152. <https://doi.org/10.1890/02-3122>
- Velasco, J., Gutiérrez-Cánovas, C., Botella-Cruz, M., Sánchez-Fernández, D., Arribas, P., Carbonell, J.A., Millán, A., Pallarés, S., 2019. Effects of salinity changes on aquatic organisms in a multiple stressor context. *Philos. Trans. R. Soc. B: Biol. Sci.* 374, 20180011. <https://doi.org/10.1098/rstb.2018.0011>

- Vergara-Jara, M.J., DeGrandpre, M.D., Torres, R., Beatty, C.M., Cuevas, L.A., Alarcón, E., Iriarte, J.L., 2019. Seasonal changes in carbonate saturation state and air-sea CO₂ fluxes during an annual cycle in a stratified-temperate fjord (Reloncaví Fjord, Chilean Patagonia). *J. Geophys. Res. Biogeosci.* 124, 2851–2865. <https://doi.org/10.1029/2019JG005028>
- 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/gcb.15103>
- Wood, H.L., Sundell, K., Almroth, B.C., Sköld, H.N., Eriksson, S.P., 2016. Population-dependent effects of ocean acidification. *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.* 283, 20160163. <https://doi.org/10.1098/rspb.2016.0163>
- 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>
- Yévenes, M., Núñez-Acuña, G., Gallardo-Escárate, C., Gajardo, G., 2022. Adaptive mitochondrial genome functioning in ecologically different farm-impacted natural seedbeds of the endemic blue mussel *Mytilus chilensis*. *Comp. Biochem. Physiol. Part D Genomics Proteomics* 42, 100955. <https://doi.org/10.1016/j.cbd.2021.100955>

Supplementary material:

- Tables 1, 2, 3, 4, 5 and 6

Suppl. Table 3.1. Summary of environmental predictability in Sound, Fjord and Embayment involving environmental variables utilized in this study (temperature, salinity, and pH).			
Time series			
Variable	Population	β_{2019}	β_{Total}
Temperature	Sound	-1.703	-1.591
Temperature	Fjord	-	-1.078
Temperature	Embayment	-1.497	-1.500
Salinity	Sound	-1.584	-1.413
Salinity	Fjord	-	-1.072
Salinity	Embayment	-1.524	-1.410
pH	Sound	-1.206	-1.316
pH	Fjord	-	-1.017
pH	Embayment	-1.305	-1.360
β = spectral exponent Beta; negative slope of the linear regression of \log_{10} spectral density against \log_{10} frequency.			

Suppl. Table 3.2. Comparison of functions used to describe the temperature performance curves of three studied sites of *Mytilus chilensis* using Akaike's information criterion (AIC).

Animals' collection	Function	k	AIC	w_i	$P_{max}(mL\ g^{-1}\ h^{-1})$	$T_{opt}(^{\circ}C)$	T_{br}
Sound	Gaussian	4	1059	0.3697028	156	17.5	22.0
	Quadratic	4	1059	0.3510689	155	17.5	22.4
	Weibull	5	1059	0.2792284	172	11.4	16.5
Fjord	Gaussian	4	1086	9.5681e⁻⁰⁵	182	18.6	15.5
	Quadratic	4	1088	4.2356e ⁻⁰⁵	177	19.6	17.8
	Weibull	5	1068	9.9986e ⁻⁰¹	233	11.9	8.99
Embayment	Gaussian	4	1054	0.4299361	138	15.8	20.7
	Quadratic	4	1054	0.4287495	138	15.8	21.0
	Weibull	5	1056	0.1413144	139	15.5	20.4

The function with the lowest AIC is considered the most suitable for describing the data. In this context, 'K' represents the number of parameters in the function, 'wi' denotes the Akaike weight, 'P_{max}' signifies the maximum rate, 'T_{opt}' corresponds to the optimum temperature, and 'T_{br}' represents the performance breadth. Models in boldface were selected for analyses.

Suppl. Table 3.3. Comparison of functions used to describe the salinity performance curves of the three studied sites of *Mytilus* using Akaike's information criterion (AIC).

Animals' collection	Function	K	AIC	w_i	$P_{\max}(\text{mL g}^{-1} \text{h}^{-1})$	$S_{\text{opt}}(\text{psu})$	S_{br}
Sound	Gaussian	4	1197	0.4320791	174	24.7	22.2
	Quadratic	4	1197	0.4243409	170	24.7	25.1
	Weibull	5	1199	0.1435800	174	25.1	23.5
Fjord	Gaussian	4	1266	0.4796978	252	18.4	25.7
	Quadratic	4	1267	0.3187169	241	18.4	28.9
	Weibull	5	1267	0.2015853	262	15.3	22.2
Embayment	Gaussian	4	1281	2.09434e⁻⁰²	425	33.6	8.93
	Quadratic	4	1304	2.10761e ⁻⁰⁷	258	28.8	23.8
	Weibull	5	1273	9.79056e ⁻⁰¹	406	35.2	10.1

The function with the lowest AIC is considered the most suitable for describing the data. In this context, 'K' represents the number of parameters in the function, 'w_i' denotes the Akaike weight, 'P_{max}' signifies the maximum rate, 'S_{opt}' corresponds to the optimum salinity, and 'S_{br}' represents the performance breadth. Models in boldface were selected for analyses.

Suppl. Table 3.4. Comparison of functions used to describe the pH performance curves of the three studied sites of <i>Mytilus chilensis</i> using Akaike's information criterion (AIC).							
Animals' collection	Function	k	AIC	w_i	$P_{\max}(\text{mL g}^{-1} \text{h}^{-1})$	pH_{opt}	pH_{br}
Sound	Gaussian	4	1215	1.404576e ⁻⁰¹	230	7.98	0.71
	Quadratic	4	1239	1.005403e ⁻⁰⁶	175	8.6	1.26
	Weibull	5	1212	8.595414e⁻⁰¹	241	8.1	0.65
Fjord	Gaussian	4	1247	5.114242e⁻⁰¹	350	7.82	0.52
	Quadratic	4	1296	1.403467e ⁻¹¹	196	8.6	1
	Weibull	5	1247	4.885758e ⁻⁰¹	338	7.9	0.42
Embayment	Gaussian	4	1252	0.456319	233	7.79	0.91
	Quadratic	4	1268	0.001739	166	7.89	1.6
	Weibull	5	1251	0.545067	234	7.91	0.81

The function with the lowest AIC is considered the most suitable for describing the data. In this context, 'K' represents the number of parameters in the function, ' w_i ' denotes the Akaike weight, ' P_{\max} ' signifies the maximum rate, ' pH_{opt} ' corresponds to the optimum pH, and ' pH_{br} ' represents the performance breadth. Models in boldface were selected for analyses.

Suppl. Table 3.5: Bootstrap-based confidence intervals (CIs) for each of the locations and environmental variables from clearance rate measurements ($\text{mL g}^{-1} \text{h}^{-1}$)

	Sound	Fjord	Embayment
Temperature	136.6 to 171.0	156.8 to 228.8	120.4 to 155.2
Salinity	136.5 to 233.0	201.0 to 317.7	248.6 to 544.9
pH	196.9 to 300.2	227.8 to 492.8	193.6 to 285.5

Suppl. Table 3.6: A hierarchical analysis of molecular variance (AMOVA) results of the three studied sites of *Mytilus chilensis*

	d.f.	SS	MS	PV
Among groups	2	20266.04	10133.022	0.030
Among samples within groups	52	531210.65	10215.589	34.277
Within samples	55	275098.10	5001.784	65.757
Total	109	826574.79	7583.255	

d.f. = degrees of freedom; SS = sums of squares; MS = mean square; PV = Percentage of variation. Groups correspond to three sites studied.

CAPÍTULO IV

Caracterización del mercado de las semillas

PUBLICACIÓN 2

Manuscrito en preparación

Adopting Certification Systems as a Sustainability Strategy in the Mussel Farming Industry

Nicole Castillo^{1,2}, Cristian A. Vargas^{1,2,4}, Stefan Gelcich^{2,3}, and Roberto Ponce^{5,6}

¹ Coastal Ecosystems & Global Environmental Change Lab (ECCALab), Faculty of Environmental Sciences, Universidad de Concepción, Concepción, Chile

² Coastal Social-Ecological Millennium Institute (SECOS), Universidad de Concepción, Concepción, Chile

³ Center of Applied Ecology and Sustainability (CAPES), Faculty of Biological Sciences, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile

⁴ Millennium Institute of Oceanography (IMO), Universidad de Concepcion, Concepción, Chile

⁵ Center of Applied Ecology and Sustainability (CAPES), Santiago, Chile

⁶ School of Economics and Business, Universidad del Desarrollo, Concepción, Chile

4.1. Introducción

El panorama mundial que exhibe la pesca extractiva expone un estado de estancamiento, influenciado por diversos factores como la sobreexplotación de recursos pesqueros, las repercusiones post pandemia del COVID-19 y el cambio climático, entre otros (Bennett et al., 2020; Pauly & Zeller, 2016). La sobreexplotación ha significado una disminución de muchas poblaciones de peces (FAO, 2022), representando una amenaza para la seguridad alimentaria (FAO, 2022; McClanahan et al., 2015; Metian et al., 2020). En respuesta a estos desafíos, la acuicultura ha experimentado una notable expansión (Ahmed et al., 2019), poniendo de manifiesto una alternativa para los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) (Bjørndal et al., 2024; Cavalli et al., 2021).

La acuicultura, o cultivo de organismos acuáticos, se ha convertido en una de las principales áreas de producción de alimentos a nivel mundial, evidenciando un crecimiento sostenido durante las últimas décadas (Oyinlola et al., 2020; Verdegem et al., 2023). Este aumento responde principalmente al crecimiento demográfico y la consecuente demanda de productos alimenticios (FAO, 2022). Actualmente, la acuicultura es responsable del 56% de los productos de origen acuático disponibles para el consumo humano (FAO, 2022; Stevens et al., 2018). Además, esta actividad no solo contribuye a la economía, sino que también es parte integral del estilo de vida y la nutrición de millones de personas en todo el planeta (Allison, 2011; Béné et al., 2015).

En Chile, la producción acuícola se centra en el cultivo de peces (65%), mitílidos (33,7%) y, en menor proporción, algas (1,3%) (SUBPESCA, 2024). El cultivo de mitílidos, conocido como “mitilicultura”, ha experimentado un crecimiento significativo, especialmente en la Región de Los Lagos, en el sur de Chile, impulsado por la demanda del mercado internacional (FAO, 2022). El proceso productivo de la mitilicultura chilena depende en su totalidad de la recolección de semillas del medio natural, lo que subraya la necesidad de una gestión sostenible de este recurso (Astorga et al., 2020). A pesar del notable crecimiento de esta industria en los últimos años (FAO, 2022; SUBPESCA, 2024), el cambio climático representa un riesgo significativo para esta actividad (Iriarte et al., 2010; León-

Muñoz et al., 2021; Natalia et al., 2020; Pessacg et al., 2022).

Cambios en las condiciones ambientales, como el aumento de la temperatura y la acidificación del océano, junto con la mayor frecuencia de eventos climáticos extremos (Oliver et al., 2021; Ummenhofer & Meehl, 2017) afectan directamente la fisiología y ecología de las especies cultivadas como el *Mytilus chilensis*. Estudios han reportado que el cambio global podría influir en la aptitud de los mejillones, alterando procesos importantes como la reproducción, el crecimiento de la concha y la respuesta inmune, entre otros (Castillo et al., 2017; Duarte et al., 2015; Lassoued et al., 2021; Malachowicz & Wenne, 2019). Además, estos también afectan directamente los atributos comerciales de los mejillones, exponiendo la vulnerabilidad de la industria, sus consecuencias en el sabor y modificando las preferencias de los consumidores (Ponce et al., 2019; San Martin et al., 2019). Sin duda, estas alteraciones diseminan una amenaza para la actividad y la seguridad alimentaria (Duarte et al., 2014; Maulu et al., 2021; Navarro et al., 2013).

Asimismo, la presión ejercida por las translocaciones desde los semilleros (o áreas de captación de semillas) hacia los centros de engorda, es parte fundamental del proceso de productivo (Rivera et al., 2017). Sin embargo, este conlleva una serie de alteraciones en aspectos biológicos de los organismos como la adaptación local y la diversidad genética (Ottenburghs, 2021). Dada la importancia de la sobrevivencia de las semillas de mejillón desde la visión productiva, es importante comprender los escenarios ambientales a la cual se encuentran expuestos los sitios de captación natural, ya que los organismos pueden generar una respuesta de manera diferenciativa modulada por las condiciones ambientales según su zona geográfica (Castillo et al., 2024; Lassoued et al., 2021).

Comprender el impacto del cambio climático y los desafíos ambientales es esencial para desarrollar estrategias efectivas de adaptación (Adger, 2006; Moser & Ekstrom, 2010). El aumento de la frecuencia e intensidad de eventos extremos (Oliver et al., 2021; Ummenhofer & Meehl, 2017) afecta no solo a los organismos acuáticos y las estructuras físicas, como infraestructuras de los centros de cultivo, sino que también la dinámica organizacional y el comportamiento de la industria (Diaz Tautiva et al., 2024; Nelson et al., 2007). Proporcionar información detallada

sobre las condiciones ambientales del origen geográfico de las semillas es fundamental para establecer un contexto común entre las partes interesadas y puede influir significativamente en las decisiones de compra (Anderson, 2019). Esto incluso podría replantear las expectativas, haciendo énfasis, por ejemplo, en la viabilidad de la semilla bajo condiciones ambientales específicas (Schaltegger et al., 2016).

Los desafíos ambientales y el rápido crecimiento de la acuicultura, muchas veces sin una planificación y una gestión adecuada, ha generado una creciente preocupación por la sostenibilidad del sector (Amundsen, 2022). En un mercado globalizado, los esquemas de certificación son herramientas clave para promover prácticas responsables y sostenibles en la industria (Boyd and McNevin, 2012; Lee, 2008). Estos esquemas, impulsados por las múltiples partes interesadas, funcionan como iniciativas regulatorias voluntarias mediante las cuales las industrias y/o procesos pueden demostrar el cumplimiento de parámetros y criterios de interés establecidos (Amundsen and Osmundsen, 2020). A su vez, los sistemas de certificación ofrecen beneficios tangibles, como el acceso a mercados internacionales y mejoras en los precios, incentivando la adopción de prácticas responsables y evidenciando su compromiso con la sostenibilidad, un valor cada vez más apreciado por consumidores y mercados globales que exigen productos con responsabilidad ambiental y social (Bush et al., 2013, 2019; Nilsen et al., 2018).

En otras industrias, los sistemas de certificación han desempeñado un papel fundamental en el incentivo de prácticas sostenibles y mejoras en el sector. Por ejemplo, en la industria del aceite de palma, la certificación de la Roundtable on Sustainable Palm Oil (RSPO) ha sido crucial para reducir el impacto ambiental, promoviendo la conservación de biodiversidad y la mejora de condiciones laborales (Santika et al., 2021). Asimismo, en la industria del camarón en Vietnam, los sistemas de certificación han demostrado ser efectivos para promover prácticas sostenibles, dar mayor seguridad al consumidor y aumentar la competitividad en el mercado global (Marschke and Wilkings, 2014).

En la mitilicultura, una industria en rápido crecimiento y de gran relevancia económica en países productores como Chile, la implementación de esquemas de

certificación podría ofrecer oportunidades similares. La adopción de prácticas sostenibles en este sector no solo respondería a las demandas propias del mercado global, sino que también propiciaría una posible reducción de los impactos ambientales, mejoras laborales y tecnológicas asociados al cultivo de mejillones.

Comprender las percepciones y el conocimiento de los distintos actores de la industria permite identificar mecanismos de adaptación que respondan de forma efectiva a las realidades específicas de cada uno, considerando su heterogeneidad socioeconómica y productiva (Fernández et al., 2018, 2023; Marschke and Wilkings, 2014; Rivera et al., 2017). En la mitilicultura chilena, coexisten desde pequeños pescadores artesanales hasta grandes empresas, cuyas diferentes características, experiencias pasadas y percepciones influyen en su capacidad de respuesta frente a los desafíos del sector (Figueroa y Dresdner, 2016; González-Poblete et al., 2018). Ampliar nuestro entendimiento sobre los actores y sus interacciones podría facilitar la implementación de políticas y programas de certificación, promoviendo medidas de adaptación e innovación orientadas a mejorar la adaptabilidad del sector en situaciones de - por ejemplo - estrés ambiental (Rivera et al., 2017).

Actualmente, en el contexto del proceso de compra-venta de semillas de *M. chilensis*, se observa una falta de trazabilidad y de información crítica sobre el producto adquirido, así como la falta de selección de atributos de importancia de las semillas. Este capítulo, explora inicialmente cómo la provisión de información detallada, mediante un sistema de certificación, sobre el origen y las condiciones ambientales de las semillas puede influir en las preferencias de compra de las empresas mitilicultoras. Esta información es esencial para desarrollar estrategias que mejoren la sostenibilidad de los insumos acuícolas como la compra de semillas. La función de dicha información podría ser proporcionar contexto o generar cambios de comportamiento entre las empresas que se abastecen de estas dado que actualmente ellos carecen de toda información relacionada a lo que están comprando.

4.2. Materiales y Métodos

4.2.1 Caso de estudio

La producción acuícola en Chile se concentra principalmente en las regiones del sur, específicamente en Los Lagos y Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo (DGA, 2017), las que representaron el 90,5% de la producción total en 2019 (FAO, 2022; SSPA, 2019). Estas regiones, se han consolidado como epicentros de la acuicultura nacional debido a sus condiciones climáticas y geográficas favorables, así como a la disponibilidad de recursos naturales que facilitan el cultivo de especies acuáticas de alto valor económico (Poblete et al., 2019). La temperatura y la calidad del agua son algunos de los factores clave que han impulsado el desarrollo de esta actividad en la zona (Gonzalez-Poblete et al., 2018).

Dentro de la industria acuícola chilena, destacan tres especies principales: el salmón del Atlántico (*Salmo salar*), el salmón del Pacífico (*Oncorhynchus kisutch*) y el mejillón chileno (*Mytilus chilensis*). Estas especies representan conjuntamente el 91,7% de la producción acuícola nacional (SSPA, 2019). La mitilicultura, en particular, ha mostrado un crecimiento significativo, aumentando la producción de *Mytilus chilensis* de año 2007 a 394.600 toneladas durante el 2023 (SUBPESCA, 2024). Este incremento ha posicionado a Chile como uno de los principales exportadores de mejillones a nivel mundial (Bustos-Gallardo, 2017; FAO, 2022).

La actividad mitilicultora en Chile, especialmente en la región de Los Lagos, no solo se destaca por su relevancia económica, sino también por su impacto ecológico y social. La producción a gran escala de *Mytilus chilensis* contribuye significativamente a la economía local, generando empleo y mejorando la calidad de vida de las comunidades costeras. Estas actividades están íntimamente relacionadas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), particularmente en la promoción del trabajo decente y el crecimiento económico (ODS 1), la promoción de trabajo decente y crecimiento económico (ODS 8), y la gestión sostenible de los recursos marinos y costeros (ODS 14).

En relación con los antecedentes expuestos, la industria mitilicultora es una de las economías que presenta un amplio desarrollo durante las últimas décadas, mostrando una gran importancia desde la perspectiva económica, ecológica y social

para la región de Los Lagos, y que además contribuye de forma trascendental a los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Asimismo, los efectos del cambio climático no sólo se manifestarán en los ecosistemas marinos, sino que también afectará a los sistemas sociales, por ejemplo, a las comunidades locales dependientes de las actividades costeras (Marín, 2019; Nagy et al., 2019; Soto et al., 2019), como la mitilicultura.

4.2.2 Antecedentes históricos de la actividad

Antecedentes históricos describen que la extracción de este recurso data de la década de los años 30', pero el desarrollo de esta actividad a escala comercial comienza en los años 90' (González & Rivero, 2013; Uriarte, 2008). En ese sentido, la cadena de producción del *Mytilus chilensis*, comprende un periodo variable entre 14 a 20 meses y consta de cuatro etapas: (I) Recolección y disposición de semillas desde bancos naturales, mediante la instalación de sistemas de colectores, considerándose el soporte de esta actividad (Gonzalez-Poblete et al., 2018; Lara et al., 2016; Rivera et al., 2017) (**Figura 4.1**), (II) engorda de semillas hasta que alcance el tamaño necesario de la cosecha, (III) extracción y procesamiento de *M. chilensis*, (IV) y, finalmente la comercialización de productos mercados nacionales e internacionales (Gonzalez-Poblete et al., 2018; Leiva et al., 2005; Rivera et al., 2017). Es importante destacar que, a lo largo de la cadena de productiva del *M. chilensis*, pequeños productores coexisten e interactúan con grandes industrias del sector (Hoffman & Torres, 2011), generando una dependencia sistemática entre ellos.

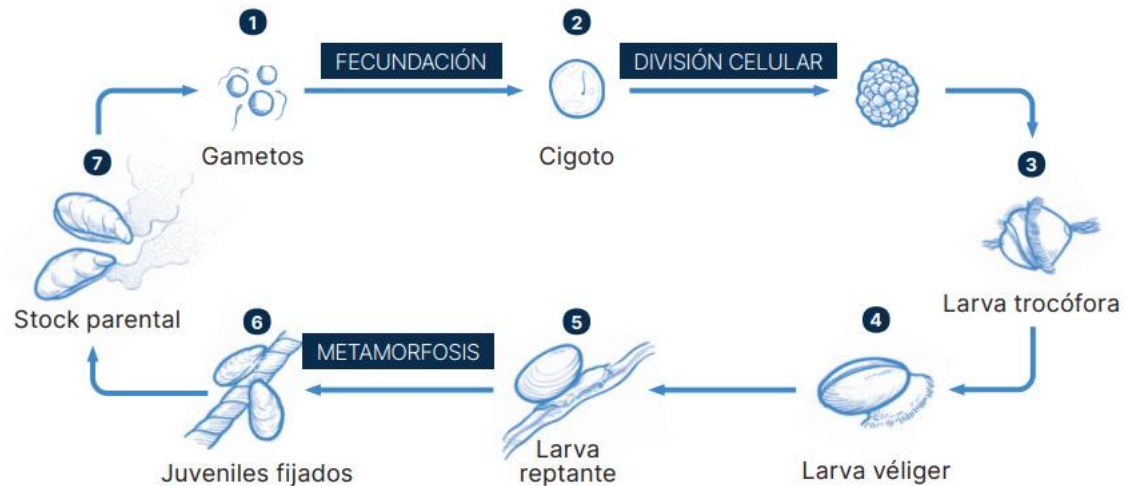


Figura 4.1: Ciclo de vida del chorito o mejillón chileno (*Mytilus chilensis*). Fuente: Contreras, J. y Godoy, C. 2021. Manual de procedimientos y buenas prácticas para la captación de semillas de chorito (*M. chilensis*) en Áreas de Manejo y Explotación de Recursos Bentónicos. Fortalecimiento de la capacidad de adaptación en el sector pesquero y acuícola chileno al cambio climático. Santiago de Chile.

Las zonas de recolección de semilla presentan una alta vulnerabilidad al cambio climático (Iriarte et al., 2010; León-Muñoz et al., 2021), incluyendo variaciones en el aumento en la temperatura de la superficie del mar, alteraciones en los patrones de precipitación, cambios en la salinidad, agotamiento del oxígeno, entre otros (Aguayo et al., 2019; Handisyde et al., 2017; Lara et al., 2016). En este contexto, a pesar de que la producción de mitílidos en Chile ha presentado un aumento sostenido durante los últimos años (FAO, 2022), esta ha enfrentado un déficit en la recolección y fijación de semillas (Carrasco et al., 2014), asociado a cambios en las variables ambientales que provocan una disminución en la tasa de supervivencia en las primeras fases de desarrollo de los mitílidos (Fernández et al., 2018; León-Muñoz et al., 2018).

Se destaca que el proceso de compra - venta de semillas, normalmente se realiza de manera informal y es relativo a la disponibilidad de éstas, existiendo distintas modalidades de compra – venta, quedando la opción de preferencia sujeta a cada centro de cultivo. Existen tres mecanismos legales para realizar la actividad:

concesiones, permisos temporales (una temporada) y Áreas de Manejo y Explotación de Recursos Bentónicos (AMERB) (Fernández et al., 2018).

En ese sentido, la forma más común corresponde a la venta directa de semillas, actividad realizada por pescadores artesanales convertidos a miticultores, a través de los “Permisos temporales para la Captación de Semillas”. Éstos instalan los colectores en sistemas de cultivo (long-line) hasta alcanzar el tamaño adecuado para su venta (~ 15 a 20 mm). Esto ocurre normalmente durante los meses de abril y mayo, fecha en la cual los colectores son retirados del agua y vendidos a sus respectivos clientes. La venta puede estar determinada de dos formas: semilla a granel o colector completo, dependiendo de los requerimientos y/o preferencia de cada cliente. Para la entrega del colector completo, estos son dispuestos en sacos (dos a tres colectores) y, en el caso de la venta de semilla a granel (suelta), esta se desprende de los colectores y luego es puesta en maxisacos (25 a 27 kilogramos de semillas). Otra opción de adquirir semillas es mediante servicios de captación de semilla, es decir, la empresa negocia con un proveedor determinado e instala sus colectores en el semillero (se paga el derecho a instalación del colector). Posteriormente, estos son retirados por la empresa y trasladados hacia los respectivos centros de engorda.

En cualquiera de las formas de compra, los compradores de semilla carecen de información relacionada al producto que están adquiriendo. De esta forma se evidencia la necesidad de conocer más información respecto al colector que se está comprando asociado a algunos atributos de importancia de la semilla. Considerando esta perspectiva, resulta necesaria la implementación de un sistema de certificación. Ejemplos de certificación han sido utilizadas en distintas áreas productivas como por ejemplo en la agricultura o plantaciones forestales (Angelo & Reilly-Brown, 2014; Kraxner et al., 2014), resultando ser favorables para estas. Esta información resulta fundamental para la sostenibilidad de la actividad, ya que los actores pueden tomar decisiones informados y eventualmente cambiar las preferencias de compra hacia mercados formales de venta de semillas.

En ese sentido, ellos como potenciales compradores tienen la opción de acceder a colectores con semillas certificadas. Conceptualmente, la certificación es

el procedimiento mediante el cual un organismo y/o autoridad designada da una garantía escrita de un producto, servicio o proceso (Erazo-Killer, 2011) (**Figura 4.2**). En esta situación, este sistema eventualmente tendrá un carácter local, exponiendo la relación entre el colector y las características específicas atribuibles a la homogeneidad en tallas, tamaño de compra de las semillas, rendimiento, adaptabilidad ambiental y precio, consideradas como requisitos relevantes al momento de compra de colectores.



Figura 4.2. Proceso de certificación por tercera parte. Fuente: FAO, 2002; OESA, 2017.

4.2.3. Entrevistas semi-estructuradas

Los datos para este estudio se recopilaban entre julio y septiembre del 2021 a través de una entrevista semi-estructurada en formato online dirigida a actores claves de la industria (grandes empresas y actores público-privado como Municipalidad, IFOP e INTEMIT). El objetivo principal de esta fue obtener de primera fuente la percepción de los actores a una serie de preguntas relacionadas al proceso de compra-venta de semillas, el nivel de formalidad del mercado, la forma en que se determinan los precios, la existencia de poder de mercado, obtener percepciones sobre el efecto de diversos eventos sobre la actividad de los semilleros: cambio climático, contaminación, entre otros (ver **Figura 4.3**).

Asimismo, estas entrevistas consideraron el panorama actual de la actividad, exponiendo a los entrevistados a la relación que existe entre el clima y la actividad

mitilicultora, la que durante los últimos años ha manifestado ser un sector altamente vulnerable al cambio climático y a eventos ambientales extremos (Savva et al., 2018; Weatherdon et al., 2016), pudiendo impactar significativamente la productividad de sus cultivos (Barange et al., 2018; Froehlich et al., 2018). Sin duda, esto podría tener múltiples consecuencias en los precios y en el mercado, como también en el desarrollo óptimo de la industria, entre otros.



Entrevista primaria a actores claves de la perspectiva institucional la industria de *Mytilus chilensis*



Hola, mi nombre es Nicole Castillo Villagrán, estudiante de Doctorado de la Universidad de Concepción. El objetivo de esta entrevista es obtener información relacionada con el proceso de compra – venta de semillas de *Mytilus chilensis*. Es importante que sepa que no hay respuestas correctas o incorrectas, simplemente deseamos obtener su opinión al respecto. [Selección del Entrevistado: La persona debe estar trabajando en actividades relacionadas a la mitilicultura, ya sea en alguna institución del estado y/o técnico-académica y debe disponer de aprox. 30 - 45 minutos].

NOTA: Toda la información proporcionada con el objeto de la siguiente entrevista será confidencial. El manejo de los datos será del tipo estadístico y NO serán facilitados a terceros.

Sección 1. Preguntas que guían la entrevista. ¿Cuál/Cómo es el proceso de compra-venta de semillas?, ¿quienes participan? ¿Existen intermediarios? ¿Existe un contrato que formalice el tipo de semilla que se transa? ¿Que tan fuertes son las relaciones pasadas entre las partes que comercian? ¿Cómo se determinan los precios? ¿Existe poder de mercado? ¿Cómo se transportan las semillas una vez adquiridas? ¿Quién asume el riesgo?

Sección 2. Preguntas que guían la entrevista. ¿Existen diferencias en la calidad de semillas de distintas localidades? ¿Cuáles son las principales diferencias entre semillas? ¿Tiene alguna incidencia en la relación de compra - venta de semillas? ¿Inciden los parámetros ambientales (por ejemplo, temperatura, pH, salinidad) en la calidad de las semillas? ¿Cómo definiría Ud. una buena semilla? ¿Considera que la actividad es viable sin la existencia de los bancos naturales?

Sección 3: Preguntas que guían la entrevista. ¿Cuál es su percepción sobre la relevancia de los siguientes eventos sobre la actividad de los semilleros: cambio climático, contaminación, algas nocivas, precios, regulaciones ambientales, tecnología? ¿Cuál es más relevante para el sector? ¿Es posible que existen áreas de producción de semillas que pudieran ser mas resilientes a diferentes tipos de eventos (ambientales y CC) ?, ¿que característica del área favorece la resiliencia? |

Sección 4: Preguntas que guían la entrevista. Considerando el potencial de desarrollo futuro de la industria, ¿Ud. considera viable la implementación de un sistema que certifique la calidad de una determina semilla? De todas las variables que definen una "buena semilla" ¿cuál cree usted que es más fácil de certificar? (¿por que?). ¿Ud. cree que la industria está dispuesta a invertir en semillas certificadas? ¿Ahora o en el futuro?

Figura 4.3: Entrevista semi-estructurada realizada en formato online dirigida a actores claves de la industria.

4.3 Resultados

4.3.1. Entrevistas semi-estructuradas iniciales y selección de atributos de importancia para la industria

Se consideró un número apropiado de entrevistados cuando se llegó al punto de saturación de entrevistas online cualitativas (12 personas, incluidos actores claves de la industria, municipales y público-privado). La entrevista consideró 4 secciones principales que se detallan a continuación.

4.3.1.1. Sección 1

Objetivo: Obtener información básica sobre el proceso de compra-venta de semillas, el nivel de formalidad del mercado, la forma en que se determinan los precios, la existencia del poder de mercado, influencia de negociaciones pasadas y el transporte de semillas.

El proceso de compra - venta de semillas según los entrevistados, normalmente se realiza de manera informal y es relativa a la disponibilidad de éstas, existiendo distintas modalidades de compra – venta, quedando la opción de preferencia sujeta a cada centro de cultivo. En ese sentido, la forma más común corresponde a la venta directa de semillas, actividad realizada por pescadores artesanales convertidos a miticultores, a través de los “Permisos para la Captación de Semillas”. Éstos instalan los colectores en sistemas de cultivo (long-line) hasta alcanzar el tamaño adecuado para su venta dependiendo de la solicitud del comprador (variable ~ 10 a 20 mm). Esto ocurre normalmente durante los meses de abril y mayo, fecha en la cual los colectores son retirados del agua y vendidos a sus respectivos clientes.

La venta puede estar determinada de dos formas: semilla a granel o colector completo, dependiendo de los requerimientos y/o preferencia de cada cliente. Para la entrega del colector completo, estos son dispuestos en sacos (dos a tres colectores) y, en el caso de la venta de semilla a granel (suelta), esta se desprende de los colectores y luego es puesta en maxisacos (25 a 27 kilogramos de semillas). En esta metodología de compra, prima el rendimiento de las semillas por metro

lineal y, es utilizada por grandes empresas como St. Andrews.

Otra opción de adquirir semillas es mediante servicios de captación de semillas, es decir, la empresa negocia con un proveedor determinado e instala sus colectores en el semillero (se paga el derecho a instalación del colector). Posteriormente, estos son retirados por la empresa y trasladados hacia los respectivos centros de engorda.

Los precios están sujetos a la disponibilidad que exista en el ambiente, presentándose variaciones en la captación y en el precio año a año. Asimismo, la forma para determinar el precio del colector es por medio del tamaño de la semilla y el porcentaje de fauna acompañante, es decir, considerando la presencia de larvas de choro zapato (*Choromytilus chorus*), cholga (*Aulacomya ater*), entre otras. Se debe enfatizar que no existe ningún organismo que regule los precios de los colectores y/o semillas, por lo que éste queda sujeto a especulaciones, informalidad, a la capacidad de negociación que los productores tengan, entre otras.

El traslado de la semilla es, generalmente, responsabilidad del comprador y, puede ser realizada por vía terrestre o marítima, dependiendo de cada cliente. Aquí, no existen seguros de por medio (relacionados a la pérdida/muerte de las semillas) y toda la responsabilidad recae en el comprador.

Cabe destacar que este proceso carece de contratos relacionados con el tipo de semilla que se transa, basándose mayormente en “tratos de palabra”. Esto propicia que existan brechas importantes con respecto al mercado de la semilla en términos de formalidad, percepción de transparencia en el mercado, entre otros, enfatizando la falta de estándares que definan “calidad de colector” y/o “calidad de semilla” para poder avanzar hacia contratos.

4.3.1.2. Sección 2

Objetivo: Conocer si existen preferencias por semillas dependiendo de su procedencia. De existir alguna, interesa conocer si existe “algún” atributo relevante. Por otro lado, interesa saber si se reconoce el efecto que tienen las variables ambientales sobre las semillas. Además de conocer cuáles son los atributos que hacen que una semilla, sea una “buena semilla”.

Los entrevistados exponen el cambio que ha sufrido la industria en las últimas décadas. Antiguamente (15 - 20 años), las semillas provenían de la localidad de Yaldad. Estos colectores tenían la particularidad de que eran casi en su totalidad semillas de *M. chilensis* pero, conforme al crecimiento de la actividad, Yaldad colapsó y el semillero se sobreexplotó. Por ende, hubo que buscar semillas de otros sitios como en la zona cercana a Castro, el Estuario de Reloncaví, entre otros, recurriendo finalmente a lugares cordilleranos como Hornopirén y Chanco, además de Palena y Balmaceda.

Sin duda, los actores consultados reconocen 3 zonas de importancia para la captación de semillas, destacando uno de estos en sus preferencias de compra. En ese sentido, se expone las siguientes diferencias:

- Zona de Castro: Mucha presencia de *Choromytilus chorus* por ende, pocas unidades de *M. chilensis* por colector.
- Estuario de Reloncavi: Es el sector preferencia de compra y el lugar más importante de los semilleros, ya que los colectores presentan poco porcentaje de fauna acompañante (*Aulacomya atra*, *Choromytilus chorus*).
- Hualaihué: captación de semilla mucho más anticipada, crecimiento más rápido, pero hay mayor presencia de fauna acompañante (*Aulacomya atra*). Se destaca una mayor presencia de fitoplancton en el agua.

En general, existe una preferencia generalizada de compra de semillas en el fiordo debido a la pureza del colector. La investigadora de IFOP, señala que a pesar de las diferencias de salinidad existentes respecto al mar interior de Chiloé (ubicación de los centros de cultivo), las empresas prefieren la compra de colectores con menor porcentaje de fauna acompañante, es decir, prima la pureza del colector por sobre la viabilidad de la semilla. Por otro lado, en aquellas situaciones donde la disponibilidad de semillas es escasa, no existe una preferencia de compra, más bien se “*compra lo hay disponible en el mercado*”. En condiciones críticas, deben recurrir a lugares más alejados, aumentando los costos en traslado, comprando “*a ciegas y con diferentes condiciones*”.

En otra perspectiva, al ser consultados por los parámetros ambientales y su incidencia en la calidad de las semillas, ellos creen que sí tiene “alguna” repercusión y, si bien disponen de datos ambientales, falta información relevante para hacer la relación de cómo estas variables inciden en la calidad de las semillas. Además, señalan que se debe considerar un lenguaje de aplicación a estos estudios ¿Cómo lo puedo aplicar? ¿Cómo puedo trabajar con estas variaciones ambientales? ¿Cómo esta información la utilizo de tal forma de que se pueda aplicar y mejorar mi capacidad productiva?

Nuevamente, uno de los temas que más se enfatizó en esta sección fue la importancia de trabajar con la definición de “calidad de semillas” y/o “calidad del colector”. Esto se debe a que existen percepciones y descripciones diferentes en torno a ésta. Para los entrevistados, las características que se contemplarían en un “buen colector” (ver **Figura 4.4**) son la pureza del colector, dispersión en sus tallas, tasa de crecimiento, resistencia a los traslados y la cantidad de semillas por colector. Asimismo, definen “calidad de la semilla”, considerando características y parámetros propios del organismo como, por ejemplo, la capacidad de fijación, el color de la concha, la dureza de la concha y la resistencia fisiológica (que el organismo no muera).

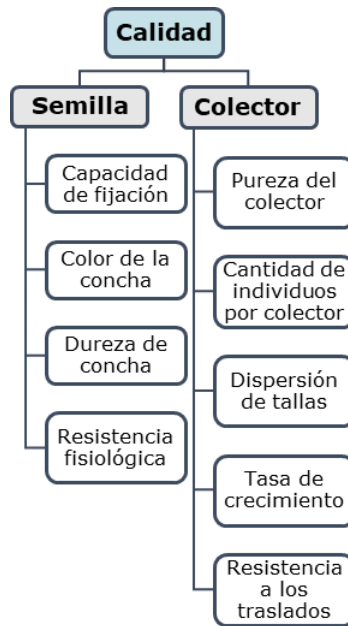


Figura 4.4. Parámetros de calidad expuestos por los entrevistados. Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, los entrevistados consideran que esta actividad no se podría llevar a cabo sin la existencia de los bancos naturales debido a que, por un lado, están los costos asociados que implica la creación de hatcheries y por el otro, por el gran volumen de semillas que las empresas necesitan para la actividad.

4.3.1.3. Sección 3

Objetivo: Obtener percepciones sobre el efecto de diversos eventos en el desarrollo de la actividad de los semilleros: cambio climático, contaminación, algas nocivas, precios, regulaciones ambientales, tecnología. Conocer si se identifican áreas de producción de semillas que pudiesen ser más resilientes a estos eventos (ambientales, cambio climático), identificando que característica del área favorece la resiliencia.

A continuación, se detalla la percepción de los entrevistados frente una serie de eventos en la actividad de los semilleros:

- Cambio Climático: Se enfatiza la importancia y las alteraciones que ya ha

ocasionado el cambio climático en la zona y, se reconoce que “de alguna forma está afectando a la industria, tanto en los semilleros como en los centros de engorda”. Se expone que se debe tener mayores antecedentes para poder prepararse y seguir realizando captación de semillas en bancos naturales. Por ejemplo, tener más información en relación al tiempo de calado de la semilla, verificar el ciclo reproductivo, etc. En general, anticiparse a lo que pudiese suceder.

- Contaminación: exponen la cercanía del fiordo a los asentamientos humanos, donde hay más actividades turísticas y, en definitiva, la contaminación es inminente. Se reconoce que “es un tema muy importante para la industria, que se ha ido trabajando en el tiempo, pero que aún falta mucho”. Por otro lado, las exigencias ambientales no son transversales a todas las actividades que se realizan en el mar.
- Algas nocivas: Se reconoce que es un tema complejo. Si bien no afecta directamente a los semilleros, los inconvenientes ocurren cuando los colectores se trasladan de área y llegan a zonas donde no existen condiciones de riesgo. Se destaca que es un tema que no se ha podido controlar.
- Regulaciones ambientales: Se enfatiza que hay muy poca fiscalización. No existe el contingente ni la capacidad de fiscalizar adecuadamente. Además, se expone que las regulaciones “deben mejorar y ser mucho más estrictas. Están muy centralizados y sus normativas se concentran en la Ley de Pesca y Acuicultura, donde los reglamentos están hechos en base a la industria del salmón. Estas son industrias totalmente distintas, no pueden ni deben tener el mismo marco regulatorio”. Si bien hay avances en la “Ley de mitilidos”, aún ellos expresan muchas dudas con respecto a ésta, enfatizando la importancia de los tiempos de descanso ecológicos y cantidad de colectores solicitables por hectárea para poder mantener la actividad en el tiempo, entre otras.
- Tecnología: destacan la falta de inversión en los semilleros, ya que aún se utilizan mecanismos antiguos en los sistemas de captación (e.g. rampas de madera, uso de plumavit, etc.). Por otro lado, hay lugares donde no están

dadas todas las condiciones para realizar la actividad. Asimismo, se reconoce un estado de estancamiento en términos tecnológicos para la captación de semillas.

Paralelamente, considerando los eventos mencionados y descritos anteriormente, los entrevistados exponen que “*no hay un evento más relevante que otro*”, sino que todos son importantes y se deben trabajar en conjunto. Además, se manifiesta que esta actividad debe incorporar el desarrollo tecnológico en toda la cadena de producción (no solo en los centros de engorda) y, por sobre todo en la etapa de semillas que es la base de la industria. Dicho esto, se enfatiza la importancia de la educación en el sector semillero, la que dispone de poca instrucción comparada con el sector de engorda y eso hace que de alguna manera no tengan la misma visión, les cueste proyectarse, se mantengan sesgos con respecto a la mejora de la actividad, entre otras.

Asimismo, los entrevistados reconocen una vulnerabilidad en la zona del estuario, debido al amplio espectro ambiental presente producto de la intrusión de agua dulce dada principalmente por el río Puelo. En ese sentido, manifiestan que la disminución de precipitaciones y el aumento de temperatura que se prevé para esta área pudiese provocar un impacto mayor en la zona y en la actividad. Por otro lado, intuyen que la zona de Hornopirén pudiese ser la más resiliente debido a que se considera un sitio más estable ambientalmente y, las veces que ha existido un déficit de semillas, este sitio ha abastecido a la industria.

4.3.1.4. Sección 4

Objetivo: Conocer si el entrevistado considera viable algún sistema que certifique la calidad de una determina semilla y cuál es la variable es más relevante de certificar (tamaño, color, peso, características nutricionales, otra).

En esta sección se destaca la viabilidad de la implementación de un eventual sistema de certificación debido al gran potencial de desarrollo que presenta la industria. En ese sentido, se exponen algunos atributos importantes a contemplar

como, por ejemplo, la homogeneidad de las tallas, pureza del colector, el crecimiento y que sea más resistente a los traslados. Nuevamente, se enfatiza la importancia de definir y estandarizar los conceptos de la “buena calidad de la semilla” y/o “buena calidad del colector”, para poder ser aplicados en un eventual sistema de certificación.

Asimismo, los entrevistados exponen que las variables más difíciles de incluir en un sistema de certificación son todas aquellas que tenga que ver con el individuo, por ejemplo, la dureza de concha, ácidos grasos, presencia de metales pesados y la firmeza del biso, ya que requiere el uso de mayor tecnología para llevar a cabo estos estudios.

Sin embargo, se señala que la industria sí está dispuesta a invertir en semillas certificadas en un futuro, obviamente, considerando los costos asociados que esto implicaría. No obstante, se manifiesta la preocupación de que un posible sistema de certificación pudiese aumentar las brechas entre proveedores, por los costos que pudiese tener.

Por otro lado, la percepción y la comprensión del término conceptual de una “semilla de buena calidad” por parte de los compradores puede variar ampliamente. Esto se debe principalmente a dos razones: en primer lugar, el término “buena calidad” se utiliza con frecuencia en muchos contextos diferentes y los compradores lo asocian a una multitud de contextos y, en segundo lugar, debido a su conocimiento limitado respecto a las definiciones técnicas y homogenización del lenguaje la producción de productos del mar.

Los atributos establecidos y sus niveles se identificaron mediante la revisión de literatura, entrevistas a compradores grandes y medianos de semillas de *M. chilensis* e investigadores de instituciones público-privado como INTEMIT-IFOP.

Las consultas revelaron que los atributos y niveles de importancia para la compra de semillas considera la “homogeneidad en tallas”, “tamaño de compra de las semillas”, “rendimiento”, “adaptabilidad ambiental” y “precio” por colector. Notar que los atributos seleccionados, corresponden a características del colector asociados a la semilla que pueden verse modificados por efectos del sitio de procedencia de estos. En la **Tabla 4.1** se presenta una descripción completa y los

niveles para cada uno de estos atributos.

Tabla 4.1: Atributos del colector asociados a la calidad de semilla de <i>M. chilensis</i> y sus correspondientes niveles.					
Categoría	Atributo	Niveles			
Apariencia del colector	Homogeneidad de tallas	Alta homogeneidad en tallas		Baja homogeneidad en tallas	
	Tamaño de compra de las semillas	<10 mm	Entre 10 – 20 mm	➤ 20 mm	
Productividad	Rendimiento	300 individuos por metro de siembra	600 individuos por metro de siembra	800 individuos por metro de siembra	
Monetaria	Precio	Bajo \$600	Medio \$900	Alto \$1.500	Sobre precio \$2.500
Rasgo de desempeño asociado a mortalidad	Adaptabilidad ambiental	Adaptable (Resistente al estrés ambiental)		No adaptable (No resistente al estrés ambiental)	

Asimismo, se destaca que frente la creación de un eventual *Sistema de certificación* este debiese ser llevado a cabo por una tercera parte, principalmente debido a que, según los resultados de las entrevistas iniciales, se expuso la pérdida de confianza en entidades estatales (**Figura 4.5**). En ese sentido, es clave para el éxito del programa de certificación que las condiciones técnicas y de proceso de *Semillas Certificadas* ambientalmente deben ser aprobadas por un organismo que cuente con el respaldo y confianza de la mayoría de los miticultores. De igual manera, es importante enfatizar que los vendedores de semilla deberán mantener registros de cómo, dónde y cuándo se recolectaron las semillas desde bancos naturales para permitir una mayor especificación del producto (colector) hasta el proceso de venta final (empresas).

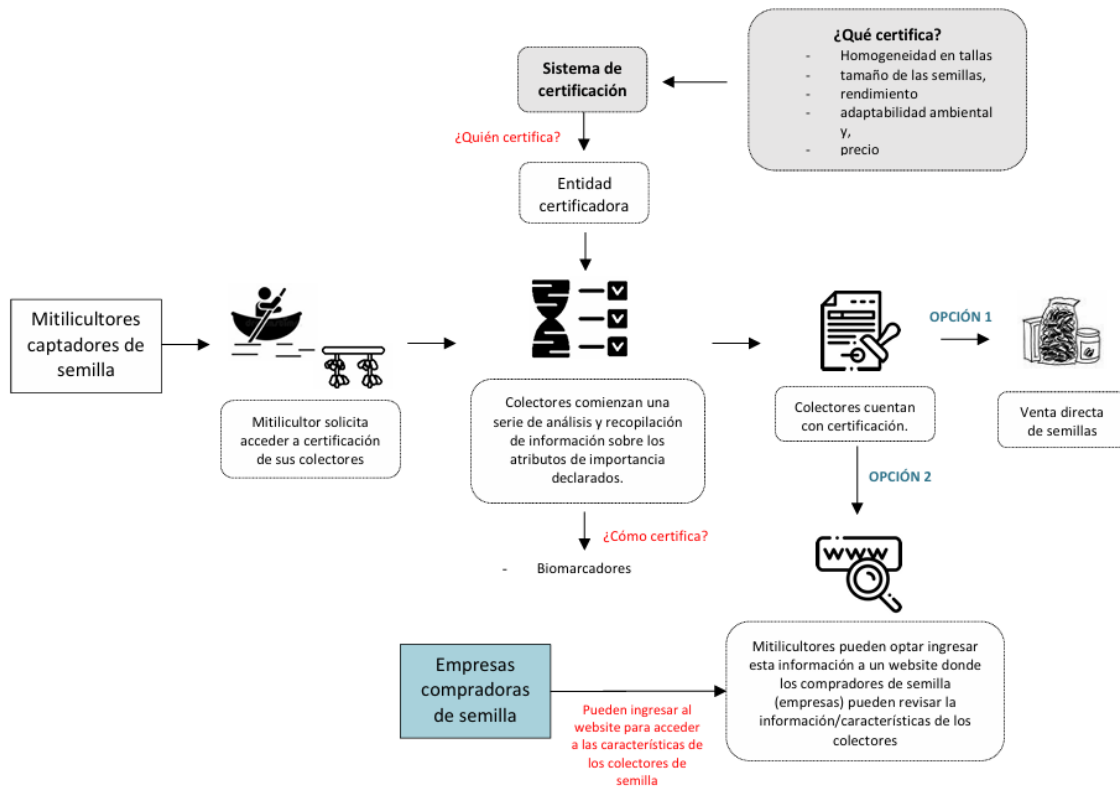


Figura 4.5: Diagrama de un tentativo proceso de certificación. Fuente: Elaboración propia.

4.4 Discusión

A nivel mundial, se ha descrito que la industria acuícola se verá afectada por el cambio climático (Barange et al., 2018), lo que sin duda tendrá una serie de consecuencias tanto para las especies en cultivo como para la industria en su conjunto (De Silva & Soto, 2009; Doubleday et al., 2013; Steeves & Filgueira, 2019). Chile no está exento estos desafíos. Por ejemplo, el aumento en la probabilidad de sequías en las latitudes medias del hemisferio sur (IPCC, 2021), se ha manifestado en una sequía sin precedentes en la región (Garreaud et al., 2020). Asimismo, la frecuencia e intensidad de las olas de calor marinas han incrementado, con potenciales efectos negativos en los ecosistemas marinos y consecuencias socioeconómicas (Carrasco et al., 2023; Hobday et al., 2018). Esto resalta la necesidad de generar más conocimiento en este sector, considerando la vulnerabilidad a los cambios ambientales como la heterogeneidad socioeconómica

y productiva de sus actores (Fernández et al., 2018, 2023; Marschke and Wilkings, 2014; Rivera et al., 2017).

Cambios en las condiciones ambientales, como el aumento de la temperatura y la acidificación del océano (Oliver et al., 2021; Ponce et al., 2019; San Martin et al., 2019; Ummenhofer & Meehl, 2017) afectan directamente la fisiología y ecología de las especies cultivadas, como el *Mytilus chilensis*, mediante repercusiones negativas en la actividad productiva. La industria mitilicultora ha mostrado un crecimiento significativo en los últimos años, llegando a una producción de 394.600 toneladas durante el 2023 (SUBPESCA, 2024), posicionando a Chile como uno de los principales exportadores de mejillones a nivel mundial (FAO, 2022). Este sector está compuesto por una diversidad de actores, desde pequeños pescadores artesanales a empresas multinacionales (San Martin et al., 2020), quienes enfrentan desafíos en términos de producción y estrés ambiental, entre otros (Figueroa & Dresdner, 2016; Rivera et al., 2017; San Martin et al., 2020).

Actualmente, el proceso de compra-venta de semillas obtenidas del medio natural, predominantemente informal, refleja una falta de regulación y estandarización en el sector, afectando la capacidad de respuesta de los captadores de semillas (Figueroa & Dresdner, 2016; Grel & Bihan, 2009). Esta informalidad puede limitar el desarrollo de prácticas sostenibles y la implementación de mejoras tecnológicas, dado que las transacciones basadas en acuerdos informales (“tratos de palabras”) tienen un bajo poder de negociación y carecen de garantías para compradores y vendedores (Salazar et al., 2018).

La ausencia de sistemas de certificación en la etapa de captación de semillas destaca una falta de regulación y prácticas sostenibles. Diversos ejemplos de sistemas de certificación han sido exitosos en áreas del sector primario, como en otras especies de la acuicultura, la agricultura y la silvicultura (Tricallotis et al., 2019; Vince & Haward, 2019), pero el desarrollo de certificaciones en la mitilicultura, especialmente en la captación de semillas, ha sido carente. Un esquema tentativo para un proceso de certificación en este sector – etapa compra – venta de semillas - podría basarse en certificaciones existentes de otras industrias, como la del aceite de palma y los programas del Forest Stewardship Council (FSC) y el Programme

for the Endorsement of Forest Certification (PEFC) (Gutiérrez Garzón et al., 2020). La implementación de un sistema de certificación en la mitilicultura podría mejorar la transparencia y confianza en el mercado, beneficiando tanto a compradores como a vendedores (Erazo-Killer, 2011; Saha, 2022).

Por otro lado, los precios de las semillas también están influenciados por factores externos, como la variabilidad espacial y temporal del asentamiento larvario y la calidad percibida de las semillas (Bernadochi et al., 2016; Cáceres-Martínez & Figueras Huerta, 1998; Figueroa & Dresdner, 2016), lo cual introduce una gran variabilidad y especulación en el mercado. La ausencia de reguladores y de criterios estandarizados en la compra-venta contribuye a un mercado donde la informalidad y la capacidad de negociación individual son determinantes en la fijación de precios (Saha, 2022), lo cual podría comprometer la sostenibilidad a largo plazo de la industria.

La introducción de estándares claros y la formalización de los procesos de compra-venta podrían mejorar la estabilidad del mercado y fomentar un entorno más equitativo y sostenible (Saha, 2022). Además, la falta de formalidad en las transacciones puede limitar la capacidad de los productores para planificar a largo plazo y adaptarse a cambios en el mercado y en el entorno regulatorio.

La preferencia por semillas de ciertas zonas geográficas, como el Estuario de Reloncaví, refleja la importancia de la calidad percibida y de las condiciones ambientales específicas. Sin embargo, la falta de estudios con información detallada sobre cómo las condiciones ambientales afectan la calidad y fisiología de las semillas limita la capacidad de los productores para tomar decisiones informadas y optimizar sus prácticas de cultivo. Esto sugiere la necesidad de investigación adicional y la implementación de sistemas de monitoreo ambiental que proporcionen datos relevantes y aplicables. La creación de hatcheries podría ofrecer una solución para garantizar el suministro de semillas confiables y reducir la exposición a impactos ambientales (Barton et al., 2015; Paquet et al., 2011), aunque su alto costo y las implicaciones sociales actuales limitan su adopción (Rivera et al., 2017).

A futuro, los entrevistados reconocen que el cambio climático podría afectar tanto a los bancos naturales como a los centros de engorda, subrayando la

importancia de integrar datos ambientales en la planificación de las zonas de captación de semillas. La falta de preparación ante estos impactos puede limitar la capacidad de adaptación de la industria para mantener la captación de semillas y, por ende, la sostenibilidad de la industria en el largo plazo.

De igual manera, existe una percepción de vulnerabilidad en la zona del Estuario de Reloncaví debido a las fluctuaciones ambientales lo que resalta la necesidad de identificar y proteger áreas claves para la captación. La zona de Hornopirén es percibida por los entrevistados como potencialmente más resiliente debido a su estabilidad ambiental y su capacidad para abastecer la demanda de semillas en tiempos de déficit. Es fundamental desarrollar mayor información sobre estas percepciones, incluyendo mapas de riesgo y resiliencia que ayuden a identificar áreas prioritarias para la captación de semillas y a planificar estrategias de gestión que minimicen los impactos de los eventos ambientales extremos.

La implementación de un eventual sistema de certificación para la calidad de las semillas es vista como una oportunidad significativa para el desarrollo de la industria mitilicultora. Un sistema de certificación podría mejorar la transparencia y la confianza en el mercado (Erazo-Killer, 2011; Saha, 2022), estableciendo estándares claros para la calidad de las semillas. Atributos relevantes, como la homogeneidad de tallas, la pureza del colector, el crecimiento de las semillas y su resistencia al transporte, permitirían evaluar la calidad y trazabilidad, beneficiando tanto a productores como a compradores. Sin embargo, incluir criterios de atributos más complejos, como la dureza de la concha y la presencia de metales pesados, requeriría una mayor inversión en tecnología y recursos para realizar los análisis necesarios.

En este contexto, los sistemas de certificación han jugado un papel crucial en diversas industrias al establecer garantías externas sobre la calidad de productos y procesos (Erazo-Killer, 2011), lo que otorga a las organizaciones ventajas competitivas y promueve prácticas más sostenibles. Por ejemplo, los esquemas de certificación permiten a los productores diferenciar sus productos en el mercado, aumentar la confianza del consumidor y cumplir con estándares ambientales y sociales (Abdul Majid et al., 2021; Hernandez-Vivanco & Bernardo, 2022). Aunque

la adopción de un sistema de certificación puede implicar costos significativos y generar diferencias entre proveedores, los beneficios, como la protección de derechos laborales, la reducción de riesgos y la mejora de la legitimidad institucional, son considerables (Boiral & Henri, 2012; Riaz & Saeed, 2020).

Aunque existe disposición para incluir en semillas certificadas, los costos asociados y la potencial creación de brechas entre proveedores son preocupaciones importantes entre los entrevistados. La implementación de un sistema de certificación debe ser equilibrada para no excluir a pequeños productores y asegurar que los beneficios de la certificación sean accesibles para todos los actores (Saha, 2022). La participación de una tercera parte confiable en la certificación es crucial para asegurar la imparcialidad y la aceptación del sistema, debido a que los entrevistados señalan explícitamente que existe una falta de confianza generalizada hacia las instituciones. Esta entidad debiese tener el respaldo y la confianza de la mayoría de los actores de la industria para garantizar la credibilidad y la efectividad del programa de certificación. Sin embargo, es importante considerar que solo se entrevistaron a doce actores relevantes de la industria y, por lo tanto, esto podría generar un sesgo en los resultados. Además, las percepciones no son fijas y pueden evolucionar con el tiempo y según los estímulos que presentes en la industria, por lo que se debe seguir monitoreado y se debe complementar con datos cuantitativos sobre su productividad y la disposición a acceder a un eventual sistema de certificación.

Chile está muy bien posicionado en términos de producción de sus recursos marinos, además de una fuerte demanda de mercados internacionales (FAO, 2022). La mejora de las capacidades de cultivo, junto con la inversión en tecnologías, sistemas de certificación, gestión de recursos genéticos y herramientas genómicas, pueden contribuir a la sostenibilidad y expansión del sector de la mitilicultura en Chile. Estos esfuerzos ayudarán a la certificación como origen y marca del sur de Chile. En un mercado global, es crucial que estas herramientas y tecnologías modernas sean adoptadas y desarrolladas para mantener este estatus para el cultivo de mejillones y aprovechar el potencial del país en el futuro.

4.5 Referencias

- Abdul Majid, N., Ramli, Z., Md Sum, S., & Awang, A. H. (2021). Sustainable palm oil certification scheme frameworks and impacts: A systematic literature review. *Sustainability*, 13(6), 3263.
- Adger, W. N. (2006). Vulnerability. *Global Environmental Change*, 16(3), 268–281.
- Amundsen, V. S. (2022). From checking boxes to actual improvement: A new take on sustainability certification. *Aquaculture*, 548, 737672.
- Amundsen, V. S., & Osmundsen, T. C. (2020). Becoming certified, becoming sustainable? Improvements from aquaculture certification schemes as experienced by those certified. *Marine Policy*, 119, 104097.
- Aguayo, R., León-Muñoz, J., Vargas-Baecheler, J., Montecinos, A., Garreaud, R., Urbina, M., Soto, D. & Iriarte, J. L. (2019). The glass half-empty: climate change drives lower freshwater input in the coastal system of the Chilean Northern Patagonia. *Climatic Change*, 155, 417–435.
- Ahmed, N., Thompson, S. & Glaser, M. (2019). Global aquaculture productivity, environmental sustainability, and climate change adaptability. *Environmental Management*, 63, 159–172.
- Allison, E. (2011). Aquaculture, fisheries, poverty and food security.
- Anderson, D. A. (2019). Environmental economics and natural resource management. Routledge.
- Angelo, M. J. & Reilly-Brown, J. (2014). Whole-System Agricultural Certification: Using Lessons Learned from LEED to Build a Resilient Agricultural System to Adapt to Climate Change. *U. Colo. L. Rev.*, 85, 689.
- Astorga, M. P., Cárdenas, L., Pérez, M., Toro, J. E., Martínez, V., Farías, A. & Uriarte, I. (2020). Complex spatial genetic connectivity of mussels *Mytilus chilensis* along the southeastern Pacific coast and its importance for resource management. *Journal of Shellfish Research*, 39(1), 77–86.
- Barange, M., Bahri, T., Beveridge, M. C., Cochrane, K. L., Funge-Smith, S. & Poulain, F. (2018). Impacts of climate change on fisheries and aquaculture. United Nations' Food and Agriculture Organization, 12(4), 628–635.
- Barton, A., Waldbusser, G. G., Feely, R. A., Weisberg, S. B., Newton, J. A., Hales, B., Cudd, S., Eudeline, B., Langdon, C. J. & Jefferds, I. (2015). Impacts of coastal acidification on the Pacific Northwest shellfish industry and adaptation strategies implemented in response. *Oceanography*, 28(2), 146–159.
- Béné, C., Barange, M., Subasinghe, R., Pinstrup-Andersen, P., Merino, G., Hemre, G.-I. & Williams, M. (2015). Feeding 9 billion by 2050—Putting fish back on the menu. *Food Security*, 7, 261–274.
- Bennett, N. J., Finkbeiner, E. M., Ban, N. C., Belhabib, D., Jupiter, S. D., Kittinger, J. N., Mangubhai, S., Scholtens, J., Gill, D. & Christie, P. (2020). The COVID-19 pandemic, small-scale fisheries and coastal fishing communities. *Coastal Management*, 48(4), 336–347
- Bernadochi, L. C., Alves, J. L. & Marques, H. L. de A. (2016). Settlement of juveniles of pearl oyster (*Pinctada imbricata*) on artificial collectors in C araguatatuba, S ao P aulo, B razil. *Aquaculture Research*, 47(2), 424–432.
- Bjørndal, T., Dey, M. & Tusvik, A. (2024). Economic analysis of the contributions of aquaculture to future food security. *Aquaculture*, 578, 740071.
- Boyd, C. E., & McNevin, A. A. (2012). An early assessment of the effectiveness of aquaculture certification and standards. *The Roles and Limitations of Certification*, 35.

- Bush, S. R., Belton, B., Hall, D., Vandergeest, P., Murray, F. J., Ponte, S., ... & Kusumawati, R. (2013). Certify sustainable aquaculture? *Science*, 341(6150), 1067-1068.
- Bush, S. R., & Roheim, C. A. (2019). The shifting politics of sustainable seafood consumerism. *Oxford handbook of political consumerism*. Oxford University Press, Oxford, UK. <https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780190629038.013>, 16, 331.
- Bustos-Gallardo, B. (2017). The post 2008 Chilean Salmon industry: an example of an enclave economy. *The Geographical Journal*, 183(2), 152–163.
- Cáceres-Martínez, J. & Figueras Huerta, A. (1998). Mussel (*Mytilus galloprovincialis* Lamarck) colonization on artificial substrates in the Ria de Vigo of NW Spain.
- Carrasco, A., Astorga, M., Cisterna, A., Farías, A., Espinoza, V. & Uriarte, I. (2014). Pre-feasibility study for the installation of a Chilean mussel *Mytilus chilensis* (Hupé, 1854) seed hatchery in the lakes region, Chile. *Fisheries and Aquaculture Journal*.
- Carrasco, Pizarro, O., Jacques-Coper, M. & Narvaez, D. A. (2023). Main drivers of marine heat waves in the eastern South Pacific. *Frontiers in Marine Science*, 10, 1129276.
- 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*. *Fish & Shellfish Immunology*, 70, 149–155.
- Cavalli, L. S., da Rocha, A. F., de Brito, B. G., de Brito, K. C. T. & Rotta, M. A. (2021). Major sustainable development goals applied to aquaculture. *Pesquisa Agropecuária Gaúcha*, 27(1), 110–126.
- De Silva, S. S. & Soto, D. (2009). Climate change and aquaculture: potential impacts, adaptation and mitigation. *Climate Change Implications for Fisheries and Aquaculture: Overview of Current Scientific Knowledge*. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper, 530, 151–212.
- DGA. (2017). Atlas del agua Chile 2016.
- Diaz Tautiva, J. A., Rifo Rivera, F. I., Barros Celume, S. A. & Rifo Rivera, S. A. (2024). Mapping the research about organisations in the latin american context: a bibliometric analysis. *Management Review Quarterly*, 74(1), 121–169.
- Doubleday, Z. A., Clarke, S. M., Li, X., Pecl, G. T., Ward, T. M., Battaglione, S., Frusher, S., Gibbs, P. J., Hobday, A. J. & Hutchinson, N. (2013). Assessing the risk of climate change to aquaculture: a case study from south-east Australia. *Aquaculture Environment Interactions*, 3(2), 163–175.
- Duarte, Navarro, J. M., Acuña, K., Torres, R., Manríquez, P. H., Lardies, M. A., Vargas, C. A., Lagos, N. A. & Aguilera, V. (2014). Combined effects of temperature and ocean acidification on the juvenile individuals of the mussel *Mytilus chilensis*. *Journal of Sea Research*, 85, 308–314.
- Duarte, Navarro, J. M., Acuña, K., Torres, R., Manríquez, P. H., Lardies, M. A., Vargas, C. A., Lagos, N. A. & Aguilera, V. (2015). Intraspecific variability in the response of the edible mussel *Mytilus chilensis* (Hupe) to ocean acidification. *Estuaries and Coasts*, 38, 590–598.
- Erazo-Killer, A. (2011). Directrices técnicas para la certificación en acuicultura. Versión Aprobado Por Los Miembros El Comité de Pesca (COFI) En Su Vigésimo Novena Sesión Celebrada En Roma, Italia Del, 31.
- FAO. (2022). El estado mundial de la pesca y la acuicultura (SOFIA).
- Fernández, Ponce, R. D., Vásquez-Lavin, F., Figueroa, Y., Gelcich, S. & Dresdner, J. (2018). Exploring typologies of artisanal mussel seed producers in southern Chile. *Ocean & Coastal Management*, 158, 24–31.
- Fernández, F. J., Muñoz, M., Oliva, R. D. P., Vásquez-Lavín, F., & Gelcich, S. (2023). Mapping Firms' adaptive profiles: The role of experiences and risk perception in the aquaculture industry. *Aquaculture*, 562, 738802.

- Figuerola, Y. & Dresdner, J. (2016). Are mussel seed producers responsive to economic incentives? Empirical evidence from the Benthic Resource Management Areas in Chile. *Aquaculture Economics & Management*, 20(3), 283–311.
- Froehlich, H. E., Gentry, R. R. & Halpern, B. S. (2018). Global change in marine aquaculture production potential under climate change. *Nature Ecology & Evolution*, 2(11), 1745–1750.
- Garreaud, R. D., Boisier, J. P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H. H. & Veloso-Aguila, D. (2020). The central Chile mega drought (2010–2018): a climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology*, 40(1), 421–439.
- González, Á. F. & Rivero, J. G. (2013). Acuicultura y globalización: el caso de la industria del mejillón. *Asociación Española de Historia Económica*.
- Gonzalez-Poblete, E., Rojo, C. & Norambuena, R. (2018). Blue mussel aquaculture in Chile: Small or large scale industry? *Aquaculture*, 493, 113–122.
- Grel, L. Le & Bihan, V. Le. (2009). Oyster farming and externalities: the experience of the Bay of Bourgneuf. *Aquaculture Economics & Management*, 13(2), 112–123.
- Gutierrez Garzon, A. R., Bettinger, P., Siry, J., Abrams, J., Cieszewski, C., Boston, K., . . . Yeşil, A. (2020). A comparative analysis of five forest certification programs. *Forests*, 11(8), 863.
- Handisyde, N., Telfer, T. C. & Ross, L. G. (2017). Vulnerability of aquaculture-related livelihoods to changing climate at the global scale. *Fish and Fisheries*, 18(3), 466–488
- Hernandez-Vivanco, A., & Bernardo, M. (2022). Are certified firms more prone to eco-product innovation? The moderating role of slack resources. *Journal of Cleaner Production*, 377, 134364. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134364>
- Hobday, A. J., Oliver, E. C. J., Gupta, A. Sen, Benthuisen, J. A., Burrows, M. T., Donat, M. G., Holbrook, N. J., Moore, P. J., Thomsen, M. S. & Wernberg, T. (2018). Categorizing and naming marine heatwaves. *Oceanography*, 31(2), 162–173
- IPCC. (2021). Climate change 2021: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2(1), 2391.
- Iriarte, J. L., González, H. E. & Nahuelhual, L. (2010). Patagonian fjord ecosystems in southern Chile as a highly vulnerable region: problems and needs. *Ambio*, 39, 463–466
- Kraxner, F., Shchepashchenko, D., Fuss, S., Lunnan, A., Aoki, K. & Shvidenko, A. (2014). Global forest management certification: future development potential.
- 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.
- Lassoued, J., Padín, X. A., Comeau, L. A., Bejaoui, N., Pérez, F. F. & Babarro, J. M. F. (2021). The Mediterranean mussel *Mytilus galloprovincialis*: responses to climate change scenarios as a function of the original habitat. *Conservation Physiology*, 9(1), coaa114.
- Lee, D. (2008). *Aquaculture certification. Seafood ecolabelling: principles and practice*. Oxford.
- Leiva, G., Santibañez, C., Bartheld, J. L., Molinet, C. & Navarro, J. (2005). Definición de criterios biológicos, ambientales, sanitarios y operativos para la instalación de colectores de moluscos bivalvos en la X Región. Informe Final Proyecto FIP, 18, 197.
- León-Muñoz, J., Aguayo, R., Marcé, R., Catalán, N., Woelfl, S., Nimptsch, J., Arismendi, I., Contreras, C., Soto, D. & Miranda, A. (2021). Climate and Land Cover Trends

- Affecting Freshwater Inputs to a Fjord in Northwestern Patagonia. *Frontiers in Marine Science*, 8, 628454.
- León-Muñoz, J., Urbina, M. A., Garreaud, R. & Iriarte, J. L. (2018). Hydroclimatic conditions trigger record harmful algal bloom in western Patagonia (summer 2016). *Scientific Reports*, 8(1), 1330.
- Malachowicz, M. & Wenne, R. (2019). Mantle transcriptome sequencing of *Mytilus* spp. and identification of putative biomineralization genes. *PeerJ*, 6, e6245.
- Marschke, M., & Wilkings, A. (2014). Is certification a viable option for small producer fish farmers in the global south? Insights from Vietnam. *Marine Policy*, 50, 197-206.
- Marín, A. (2019). Adaptive capacity to coastal disasters: challenges and lessons from small-scale fishing communities in central-southern Chile. *Viability and Sustainability of Small-Scale Fisheries in Latin America and The Caribbean*, 51–78.
- Maulu, S., Hasimuna, O. J., Haambiya, L. H., Monde, C., Musuka, C. G., Makorwa, T. H., Munganga, B. P., Phiri, K. J. & Nsekanabo, J. D. (2021). Climate change effects on aquaculture production: sustainability implications, mitigation, and adaptations. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 609097.
- McClanahan, T., Allison, E. H. & Cinner, J. E. (2015). Managing fisheries for human and food security. *Fish and Fisheries*, 16(1), 78–103.
- Metian, M., Troell, M., Christensen, V., Steenbeek, J. & Pouil, S. (2020). Mapping diversity of species in global aquaculture. *Reviews in Aquaculture*, 12(2), 1090–1100.
- Moliné Flores, C. A., 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.
- Moser, S. C. & Ekstrom, J. A. (2010). A framework to diagnose barriers to climate change adaptation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(51), 22026–22031.
- Nagy, G. J., Gutiérrez, O., Brugnoli, E., Verocai, J. E., Gómez-Erache, M., Villamizar, A., Olivares, I., Azeiteiro, U. M., Leal Filho, W. & Amaro, N. (2019). Climate vulnerability, impacts and adaptation in Central and South America coastal areas. *Regional Studies in Marine Science*, 29, 100683.
- Natalia, P., Silvia, F., Silvina, S. & Miguel, P. (2020). Climate change in northern Patagonia: critical decrease in water resources. *Theoretical and Applied Climatology*, 140(3), 807–822.
- Navarro, J. M., Torres, R., Acuña, K., Duarte, C., Manriquez, P. H., Lardies, M., Lagos, N. A., 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(3), 1242–1248.
- Nelson, D. R., Adger, W. N. & Brown, K. (2007). Adaptation to environmental change: contributions of a resilience framework. *Annu. Rev. Environ. Resour.*, 32, 395–419.
- Nilsen, M., Amundsen, V. S., & Olsen, M. S. (2018). Swimming in a slurry of schemes: making sense of aquaculture standards and certification schemes. In *Safety and reliability—Safe societies in a changing world* (pp. 3149-3156). CRC Press.
- Oliver, E. C. J., Benthuisen, J. A., Darmaraki, S., Donat, M. G., Hobday, A. J., Holbrook, N. J., Schlegel, R. W. & Sen Gupta, A. (2021). Marine heatwaves. *Annual Review of Marine Science*, 13, 313–342.
- Ottenburghs, J. (2021). The genic view of hybridization in the Anthropocene. *Evolutionary Applications*, 14(10), 2342–2360.
- 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.

- Oyinlola, M. A., Reygondeau, G., Wabnitz, C. C. C. & Cheung, W. W. L. (2020). Projecting global mariculture diversity under climate change. *Global Change Biology*, 26(4), 2134–2148.
- Paquet, P. J., Flagg, T., Appleby, A., Barr, J., Blankenship, L., Campton, D., Delarm, M., Evelyn, T., Fast, D. & Gislason, J. (2011). Hatcheries, conservation, and sustainable fisheries—achieving multiple goals: results of the Hatchery Scientific Review Group’s Columbia River basin review. *Fisheries*, 36(11), 547–561.
- Pauly, D. & Zeller, D. (2016). Catch reconstructions reveal that global marine fisheries catches are higher than reported and declining. *Nature Communications*, 7(1), 10244.
- Pessacq, N., Blázquez, J., Lancelotti, J. & Solman, S. (2022). Climate changes in coastal areas of Patagonia: observed trends and future projections. In *Global Change in Atlantic Coastal Patagonian Ecosystems: A Journey Through Time* (pp. 13–42). Springer.
- Poblete, E. G., Drakeford, B. M., Ferreira, F. H., Barraza, M. G. & Failler, P. (2019). The impact of trade and markets on Chilean Atlantic salmon farming. *Aquaculture International*, 27, 1465–1483.
- Ponce, Vasquez-Lavín, F., San Martín, V. A., Hernández, J. I., Vargas, C. A., Gonzalez, P. S. & Gelcich, S. (2019). Ocean acidification, consumers’ preferences, and market adaptation strategies in the mussel aquaculture industry. *Ecological Economics*, 158, 42–50.
- Rivera, A., Unibazo, J., Leon, P., Vásquez-Lavín, F., Ponce, R., Mansur, L. & Gelcich, S. (2017). Stakeholder perceptions of enhancement opportunities in the Chilean small and medium scale mussel aquaculture industry. *Aquaculture*, 479, 423–431.
- Saha, C. K. (2022). Emergence and evolution of aquaculture sustainability certification schemes. *Marine Policy*, 143, 105196.
- Salazar, C., Jaime, M., Figueroa, Y. & Fuentes, R. (2018). Innovation in small-scale aquaculture in Chile. *Aquaculture Economics & Management*, 22(2), 151–167.
- Santika, T., Wilson, K. A., Law, E. A., St John, F. A., Carlson, K. M., Gibbs, H., ... & Struebig, M. J. (2021). Impact of palm oil sustainability certification on village well-being and poverty in Indonesia. *Nature Sustainability*, 4(2), 109–119.
- San Martín, Gelcich, S., Vásquez Lavín, F., Ponce Oliva, R. D., Hernández, J. I., Lagos, N. A., Birchenough, S. N. R. & Vargas, C. A. (2019). Linking social preferences and ocean acidification impacts in mussel aquaculture. *Scientific Reports*, 9(1), 4719.
- San Martín, V. A., Lavín, F. V., Oliva, R. D. P., Lerdón, X. P., Rivera, A., Serramalera, L. & Gelcich, S. (2020). Exploring the adaptive capacity of the mussel mariculture industry in Chile. *Aquaculture*, 519, 734856.
- Savva, I., Bennett, S., Roca, G., Jordà, G. & Marbà, N. (2018). Thermal tolerance of Mediterranean marine macrophytes: Vulnerability to global warming. *Ecology and Evolution*, 8(23), 12032–12043.
- Schaltegger, S., Lüdeke-Freund, F. & Hansen, E. G. (2016). Business models for sustainability: A co-evolutionary analysis of sustainable entrepreneurship, innovation, and transformation. *Organization & Environment*, 29(3), 264–289.
- Soto, D., León-Muñoz, J., Dresdner, J., Luengo, C., Tapia, F. J. & Garreaud, R. (2019). Salmon farming vulnerability to climate change in southern Chile: understanding the biophysical, socioeconomic and governance links. *Reviews in Aquaculture*, 11(2), 354–374.
- SSPA. (2019). Informe sectorial de Pesca y Acuicultura.
- Steeves, L. & Filgueira, R. (2019). Stakeholder perceptions of climate change in the context of bivalve aquaculture. *Marine Policy*, 103, 121–129.

- Stevens, J. R., Newton, R. W., Tlustý, M. & Little, D. C. (2018). The rise of aquaculture by-products: Increasing food production, value, and sustainability through strategic utilisation. *Marine Policy*, 90, 115–124.
- SUBPESCA. (2024). Informe Sectorial de Pesca y Acuicultura 2024 .
- Tricallotis, M., Kanowski, P., & Gunningham, N. (2019). The drivers and evolution of competing forest certification schemes in the Chilean forestry industry. *International Forestry Review*, 21(4), 516-527.
- Ummenhofer, C. C. & Meehl, G. A. (2017). Extreme weather and climate events with ecological relevance: a review. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 372(1723), 20160135.
- Uriarte, I. (2008). Estado actual del cultivo de moluscos bivalvos en Chile. 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.
- Verdegem, M., Buschmann, A. H., Latt, U. W., Dalsgaard, A. J. T. & Lovatelli, A. (2023). The contribution of aquaculture systems to global aquaculture production. *Journal of the World Aquaculture Society*, 54(2), 206–250.
- Vince, J., & Haward, M. (2019). Hybrid governance in aquaculture: certification schemes and third party accreditation. *Aquaculture*, 507, 322-328.
- Weatherdon, L. V, Magnan, A. K., Rogers, A. D., Sumaila, U. R. & Cheung, W. W. L. (2016). Observed and projected impacts of climate change on marine fisheries, aquaculture, coastal tourism, and human health: an update. *Frontiers in Marine Science*, 3, 48.

CAPÍTULO V

Sistemas de Certificación

PAPER 3

Aceptada en Sage Open

Charting the Path: Unraveling the Research on Organizations and Certification Schemes (1999-2022)

Nicole Castillo^{1,2,3}, Julian Andrés Diaz-Tautiva⁴, Roberto Ponce^{2,4}

¹ Facultad de Ciencias Ambientales y Centro EULA, Universidad de Concepción.

² Coastal Social-Ecological Millennium Institute (SECOS), Universidad de Concepción, Concepción, Chile.

³ Coastal Ecosystems & Global Environmental Change Lab (ECCALab), Faculty of Environmental Sciences, Universidad de Concepción.

⁴ Center of Applied and Sustainability (CAPES).

Abstract

Certification schemes are a significant focal point for organizations, offering promising avenues for achieving excellence, fostering innovation, and promoting sustainability. However, our understanding of the relationship between organizations and certification schemes remains limited and fragmented. This study addresses this knowledge gap by elucidating the evolution of research on this topic within the categories of business and economics, engineering, and sustainability. We conducted a comprehensive literature synthesis spanning from 1999 to 2022, employing a four-stage PRISMA protocol. The analysis incorporated bibliometric methods to uncover the underlying knowledge structure within the literature. Notably, the Institut National De La Recherche Agronomique in France and the Journal of Cleaner Production emerged as the most productive institutions and journals in this domain. Furthermore, Olivier Boiral stood out as the most co-cited author. Additionally, we identified thirteen distinct research clusters. We propose future research directions based on these clusters, considering the categories of business and economics, engineering, and sustainability. The results enhance the ongoing discussion regarding the worldwide adoption of certification schemes and their viability as strategies to tackle grand challenges, particularly in the context of global environmental change.

Keywords. Certification schemes, organization, bibliometric, primary sector, global environmental change

5.1. Introduction

Social systems are undergoing significant transformations, most of which are being generated by an increasingly empowered society (Avelino et al., 2019). These transformations encompass a range of changes, such as growing consumer demand for eco-friendly and healthy products (Lazaroiu et al., 2019; H. Nguyen et al., 2019), cleaner production methods (A. Nguyen et al., 2020; Zameer et al., 2020), and the implementation of new regulations (Galati et al., 2019), among others. In such a dynamic and complex context, decision-makers, including consumers, producers, and governmental institutions, require signals to distinguish meaningful changes from mere noise. Certification schemes play a central role in this uncertain context and represent opportunities for innovation and sustainability in terms of environmental and social attributes (Hernandez-Vivanco & Bernardo, 2022).

Certification schemes are processes in which a designated body or authority issues a written guarantee for a product, service, or process (Abdul Majid et al., 2021). These schemes are used in various sectors, including energy, agriculture, and the forest industry (Angelo & Reilly-Brown, 2014; Kraxner et al., 2017; Li et al., 2019). One example of such a scheme is the Environmental Management System (EMS), which is promoted through voluntary certifications such as Eco-Management and Audit Scheme (EMAS) (Arocena et al., 2023). These certification schemes serve as tools for achieving organizational excellence and can provide organizations with a competitive advantage by offering third-party guarantees of their internal practices and observed performance (Haga, 2018).

Some organizations decide to access certification schemes for multiple benefits, such as demonstrating to the buyer that the supplier complies with certain standards and improves its image and reputation, which can translate into greater trust and loyalty on the part of customers and a competitive advantage in the market (Riaz & Saeed, 2020; Tran & Goto, 2019). Additionally, certification provides several benefits, such as protecting the labor rights of industrial workers (Lavin et al., 2020), reducing liability risk (Barla, 2007), decreasing information asymmetry with stakeholders (King et al., 2005), obtaining institutional legitimacy (Boiral & Henri, 2012), and defining best practices for the primary production, processing, and

marketing of different products (Ssebunya et al., 2019). Moreover, Organizations combine voluntary certifications with specific labels to differentiate their products from noncertified ones in the market (Y. Guo & Wang, 2022).

Certification schemes can conceptualize different dimensions, such as products or processes (Chen & Wang, 2023; Gray et al., 2015; Jellema et al., 2022). Product certification refers to the external verification of manufactured products to ensure that they meet specified quality and characteristic standards (Abdul Majid et al., 2021). This process involves the integration of sustainability into the organization's supply chain management (Hou et al., 2023) and internal production processes (Chkanikova & Sroufe, 2021; Formentini & Taticchi, 2016). Examples of product certification include green production programs (Cui et al., 2022), organic products (Brito et al., 2022), and carbon footprint (Taufique et al., 2022). For instance, certification processes in smallholders could assist in improving their agricultural practices, which could lead to better yields and promote sustainable agriculture (Abdul Majid et al., 2021).

Other certification schemes include systems voluntarily developed by the International Organization for Standardizations (ISO). These certifications cover a range of areas, including quality management systems (ISO 9001), environmental management systems (ISO 14001), food safety management (ISO 22000), information security management (ISO 27001), and medical device management (ISO 13485) are demanded to support organizational consolidation, growth, and long-term survival (Camilleri, 2022; Kitsios et al., 2023; McDermott et al., 2022).

This paper enlightens the evolution of the certification schemes and discusses their implications for theory and practice. Our research addresses the following questions: How has the research on certification schemes and organizations evolved, and how can it be advanced? In addressing these questions, we analyze the conceptual structure of the field to propose a relevant and timely research agenda. This agenda will guide us in understanding how organizations can address significant challenges, such as global environmental change (including climate change, ecosystem degradation, and species loss), achieve superior performance, and exploit new market opportunities through the adoption of certification schemes. We synthesized

the literature using a three-stage systematic review protocol using bibliometric methods. The review included 1.769 articles that have explored the intersection between certification schemes and organizations. We chose bibliometric techniques given their relevance for evaluating the scientific productions (Block & Fisch, 2020; Diaz Tautiva, Rifo Rivera, et al., 2022).

Although certification schemes are relevant topics for organizations, a comprehensive analysis of this phenomenon is still lacking. Several authors have reviewed certification schemes (see **Tabla 5.1**) but, most have focused on specific sectors (e.g., Auld et al., 2008; Bray & Neilson, 2017; Clark & Kozar, 2011; Latino et al., 2022; Schleifer & Sun, 2020), types of certification schemes (e.g., Oya et al., 2018; PérezLombard et al., 2009), or contexts (e.g., Della Corte et al., 2018; Guo et al., 2019). To the best of our knowledge, our understanding of this phenomenon remains limited and fragmented, hindering the ability to draw comprehensive conclusions about it. This study offers a comprehensive overview of certification schemes and their relationship with organizations, analyzing their evolution across three categories: business and economics, engineering, and sustainability. In doing so, our objective is to identify prevailing research trends in prior studies and to bridge the existing knowledge gap by mapping the underlying knowledge structure.

Tabla 5.1. Previous Literature Reviews				
References	Focus	Method	Methodology	Period
(Oya et al., 2018)	Certification systems with socio-economic goals	Content Review	Statistical descriptions, and meta-analysis	1990-2016
(Guo et al., 2019)	Product certifications and system certifications in China.	Narrative Review	Historical analysis	Not described
(Schleifer & Sun, 2020)	Sustainability certifications and Food security	Narrative Review	Content analysis	Not described
(Clark & Kozar, 2011)	Sustainable forest management certifications	Content review	Statistical descriptions, and meta-analysis	2008-2009
(Pérez-Lombard et al., 2009)	Energy certifications schemes	Narrative Review	Historical and technical analysis	Not described
(Latino et al., 2022)	Food certifications	Content review	Statistical description and content analysis	1976-2020
(Bray & Neilson, 2017)	Coffee certification programmes	Narrative Review	Content analysis	2000-2017
(Pérez-Lombard et al., 2009)	Certification schemes on forest and forestry	Narrative Review	Historical analysis	Not described
(Latino et al., 2022)	Certification schemes for agricultural production	Content review	Statistical descriptions, meta-analysis, and thematic synthesis	1990-2015
(Tröster & Hiete, 2018)	Voluntary sustainability certifications schemes	Content review	Statistical descriptions, and Contingency analysis	1997-2017
(Abdul Majid et al., 2021)	Sustainable Palm Oil Certification	Narrative Review	Content analysis	2004-2019
(Della Corte et al., 2018)	Ethical food and Kosher certification	Content review	Statistical descriptions, and Bibliometric analysis	1985-2016

The article follows the next structure. Section 2 provides a detailed presentation of data and methods. Section 3 summarizes the results and provides an initial discussion. Section 4 synthesizes the observed research gaps and provides the research agenda. Finally, section 5 presents the conclusions and describes the limitations of this research.

5.2. Data and Methods

Our research adopts a comprehensive four-stage approach, following the Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) protocol.

This protocol encompasses three distinct stages, facilitating a transparent review and analysis of the material, namely, identification, eligibility assessment, and inclusion (Diaz Tautiva, 2021; Diaz Tautiva, Huaman, et al., 2022; Diaz Tautiva, Rifo Rivera, et al., 2022). **Figura 5.1** offers a comprehensive overview of the procedures employed at each stage of our study.

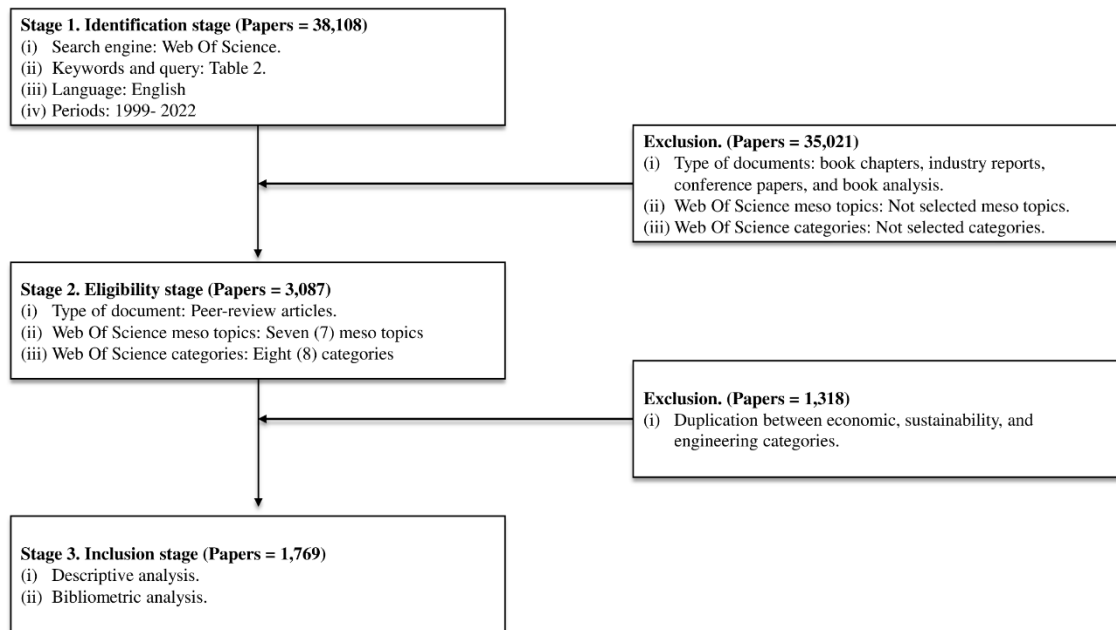


Figura 5.1. PRISMA Protocol.

The first stage comprises the identification of the overall literature of interest. This stage considers four factors: (i) the selection of a search engine, (ii) the determination of search keywords and query, (iii) the specification of the search language, and (iv) the establishment of search periods. First, the Web of Science (WOS) database was used, given the high quality and availability of journals (Ellegaard & Wallin, 2015). Second, we chose keywords that not only encapsulate the essence of the phenomena but also encompass various facets of business venturing, as outlined in **Tabla 5.2** (Diaz Tautiva, Huaman, et al., 2022; Diaz Tautiva, Rifo Rivera, et al., 2022; Kücher & Feldbauer-Durstmüller, 2019). Our search query was configured to include these keywords across multiple bibliometric elements,

including topics, abstracts, titles, author keywords, and WOS keywords (Alayo et al., 2021). Third, we narrowed our focus to research materials exclusively written in English. Fourth, we restricted our search to encompass research documents published within the timeframe of 1999 to 2022. As a result of this identification process, a total of 38,108 research documents were retrieved during this initial phase.

Tabla 5.2. Keywords		
Themes	Keywords	Author
Organization	("firm*" or "business*" or "organization*" or "organisation*" or "compan*" or "corporat*" or "enterprise*" or "venture*" or "multinational*" or "conglomerate*" OR "industr*" OR "sector*")	(Alayo et al., 2021; Diaz Tautiva et al., 2022; Díaz Tautiva et al., 2022; Kücher & Feldbauer-Durstmüller, 2019)
Context	"Certificat*" or "Label*")	(Abdul Majid et al., 2021)

Building upon the documents acquired in the previous stage, we advanced to the eligibility assessment phase, which incorporated three pivotal criteria: (i) the type of research documents, (ii) WOS meso topics, and (iii) WOS categories. First, we have considered only research articles given to the empirical or theoretical contribution to understanding the phenomenon. Second, acknowledging the multidisciplinary nature of research exploring this phenomenon, we deliberately chose research articles across seven distinct WOS meso topics. These encompassed management, sustainability science, economics, agricultural policy, crop science, economic theory, and food science and technology (Clark & Kozar, 2011; Schleifer & Sun, 2020). Lastly, we specifically identified articles within 11 designated WOS categories, which included management, business, environmental sciences, economics, green sustainable science technology, environmental studies, business finances, engineering environmental, food science technology, agricultural economic policy, and plant sciences (Oya et al., 2018; Pérez-Lombard et al., 2009). As a result of this eligibility screening, a total of 35,021 articles were excluded from further analysis, leaving us with 3,087 articles that proceeded to the subsequent phase.

The publications that successfully passed the eligibility stage were then integrated into the inclusion stage. This inclusion stage encompassed several components, namely, a duplication check, content assessment, a descriptive literature analysis, and a bibliometric analysis (Diaz Tautiva, Rifo Rivera, et al., 2022; Donthu et al., 2021). Initially, the three authors jointly validated the entire sample to ensure the robustness of the previous two stages, involving a meticulous assessment of the titles and abstracts within the sample. Subsequently, we conducted a comprehensive descriptive analysis of the literature to identify scientific production patterns. Lastly, to gain a more comprehensive insight into the phenomena, we categorized the publications into three distinct divisions based on the observed WOS categories: (a) sustainability, encompassing environmental sciences, green sustainable science technology, and environmental studies; (b) engineering, encompassing engineering environmental, food science technology, and plant sciences; and (c) business and economics, including agricultural economic policy, economics, management, business, and business finances. During this process, we identified and eliminated a total of 1,318 duplicate records that existed across categories. Consequently, the remaining 1,769 articles underwent the subsequent bibliometric analysis.

Finally, we utilized a bibliometric approach, specifically co-word analysis (Block et al., 2020), to delve into the conceptual structure of the literature and identify potential research hotspots. Co-word analysis is a technique that quantifies the relationships between documents by examining the words within them, including titles, abstracts, or keywords. This technique operates on the premise that when words frequently co-occur in documents, they are indicative of closely correlated central concepts (Yan & Ding, 2012). We employed an author-keyword approach as it better represents the essence of the documents (Diaz Tautiva, Rifo Rivera, et al., 2022). We used VosViewer (Version 1.6.17) to process the bibliometric data because of its compatibility with the WOS dataset (Van Eck & Waltman, 2017).

5.3. Results

5.3.1. Basic Characteristics of the literature

5.3.1.1 *Annual change in the number of publications*

The appendix provides an overview of the scientific production from 1999 to 2022. The number of publications exhibited an upward trajectory from 1999 to 2003, during which 71 publications were assessed, yielding an average of 14.2 publications per year. This average distribution comprised an annual average of 2 publications in the field of sustainability, 10.8 in engineering, and 13.4 in business and economics. Moreover, we observed an initial upsurge in publications from 2004 to 2010, totaling 200 publications and averaging approximately 28.57 per year. This surge marked a substantial increase of 181.69% compared to the 1999-2003 period. This notable growth can be attributed to a clear escalation in the total number of articles published in both the sustainability category (N= 64, signifying an increase of 540%) and the business and economics category (N= 188, indicating an increase of 181%).

The period spanning from 2011 to 2022 has seen a remarkable upsurge in academic interest in this phenomenon. During this period, a total of 1,498 publications emerged, equating to an average of 124.83 publications per year. Particularly noteworthy is the apex in publication activity observed in the years 2020 and 2021, with 228 and 219 articles, respectively (refer to **Figura 5.2**). This surge can be attributed to an escalation in publishing activity within journals such as Sustainability, Business Strategy and the Environment, and the British Food Journal. Furthermore, the engagement of additional journals, including Trends in Food Sciences and Technology, Sustainable Production and Consumption, and Foods, contributed significantly to the overall increase in the number of publications.

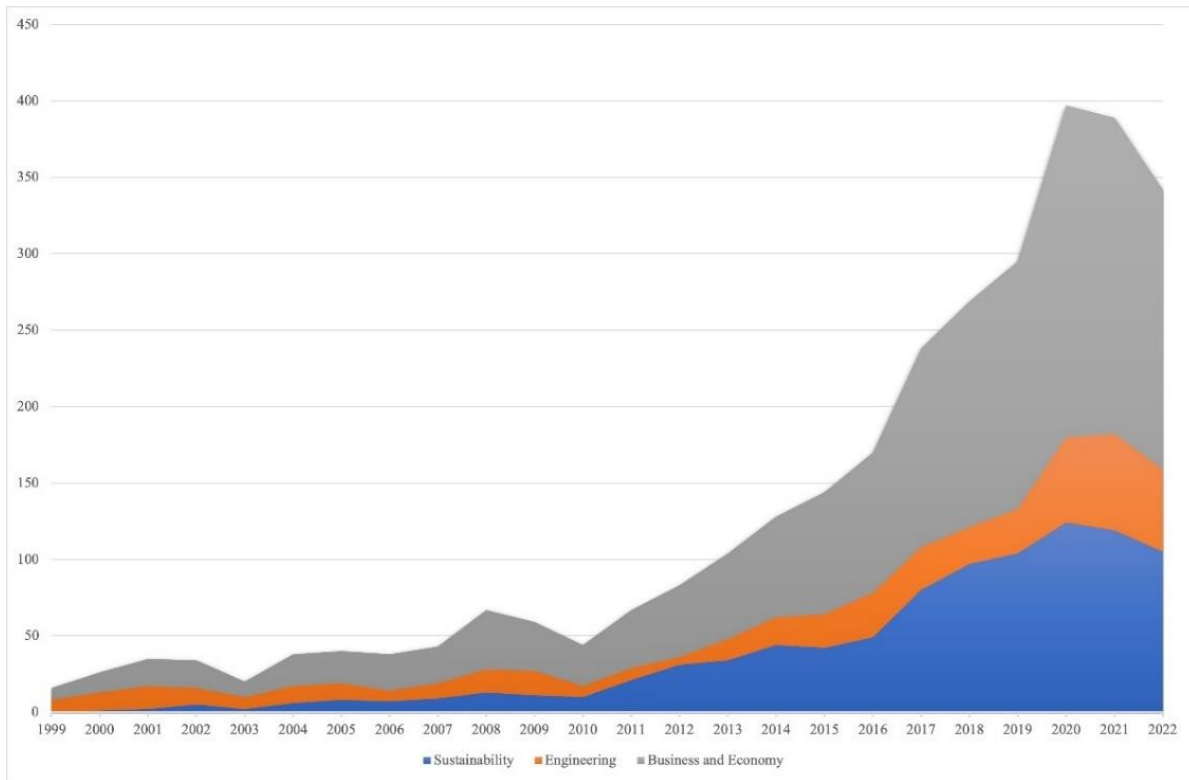


Figura 5.2. Publications trend 1999-2022

5.3.1.2 Distribution by world region and organizations

As depicted in **Tabla 5.3**, the United States of America led with the highest number of publications, totaling 277 (12.07%). China followed closely with 187 publications (8.15%), while Italy and Spain ranked third and fourth, with 185 (8.06%) and 172 (7.49%) publications, respectively. Notably, the top 10 countries collectively accounted for 57.34% of the total publications spanning from 1999 to 2022.

Tabla 5.3. Top 10 countries by published papers.			
Country	Region	Publications	Citations
USA	North America	277	9,870
China	Asia	187	4,138
Italy	Europe	185	4,642
Spain	Europe	172	5,072
Germany	Europe	132	3,803
England	Europe	114	2,854
Brazil	South America	90	2,174
France	Europe	80	2,228
Australia	Australia & Oceania	79	2,307

Figura 5.3 provides a visual representation of publication density across different regions worldwide that have contributed to research in this topic. In line with previous research (Diaz Tautiva, Huaman, et al., 2022) the analysis considers eight distinct regions: North America, Central America, South America, Europe, Asia, Middle East, Africa, and Australia & Oceania. **Tabla 5.4** presents an overview of the total publications across various regions. Europe stood out as the region with the highest number of publications spanning the period from 1999 to 2022, with a total of 1,122 publications, representing 49% of the total. Asia and North America followed as the second and third-ranking regions, with 464 publications (20%) and 375 publications (16%), respectively. Limited research activity was noted in the regions of South America (6%), Australia & Oceania (5%), Africa (3%), Middle East (1%), and Central America (0%).

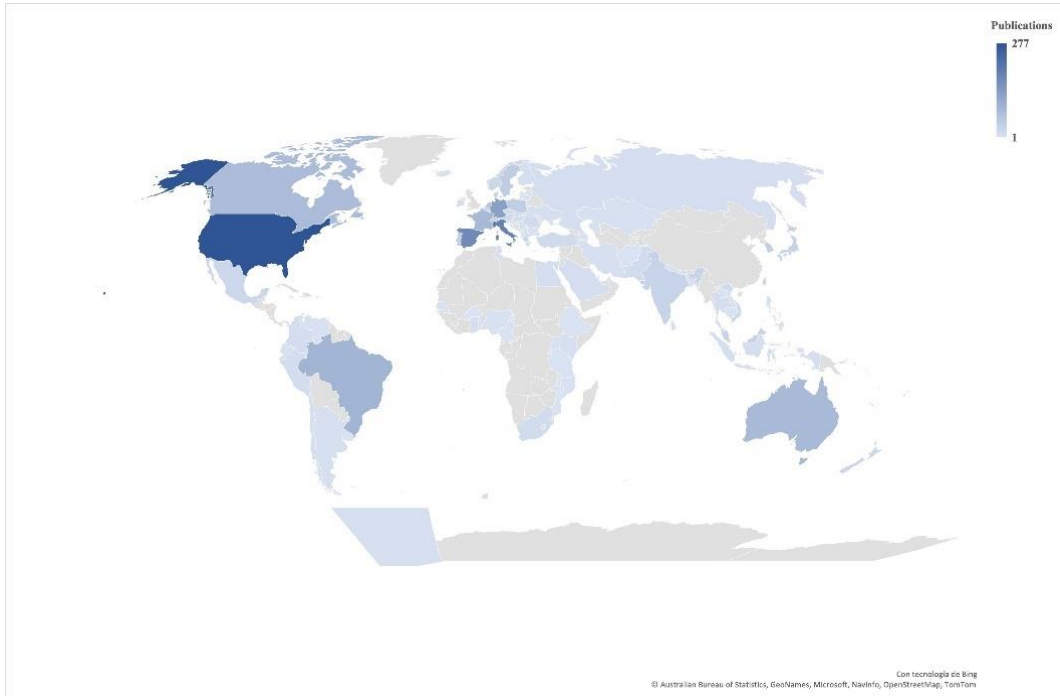


Figura 5.3. Global distribution of publication density

Tabla 5.4. Region distribution by published papers.		
Region	Publications	Citations
Europe	1,122	29,303
Asia	464	9,542
North America	375	12,391
South America	129	2,709
Australia & Oceania	105	3,041
Africa	70	1,043
Middle East	25	523
Central America	5	66

Note: Citation records obtained in December 2022.

Tabla 5.5 provides insight into the top 10 most significant contributors to research in this field. Institut National De La Recherche Agronomique (France) stands out as the most prolific contributor with a total of 22 articles. Following closely, Laval University (Canada), University of São Paulo (Brazil), and Sant'Anna School of Advanced Studies (Italy) have published 18, 16, and 15 articles, respectively. The trends

highlighted in **Tabla 5.5** suggest that any of the top 10 organizations have a substantial advantage in exploring this phenomenon, given their prolific publication records. Notably, universities from the United States of America, Italy, and France have taken a leading role in certifications and organizations research, with 36, 29, and 22 articles, respectively.

Tabla 5.5. Top 10 research organizations by published papers.			
Organizations	Country	Publications	Citations
Institut National De La Recherche Agronomique	France	22	863
Laval University	Canada	18	924
University of São Paulo	Brazil	16	551
Sant'Anna School of Advanced Studies	Italy	15	980
University of Florida	USA	14	245
University of Milan	Italy	14	253
University of Canterbury	New Zealand	12	290
Arizona State University	USA	11	436
Cornell University	USA	11	421
Shanghai Jiao Tong University	China	11	716

Note: Citation records obtained in December 2022.

5.3.1.3 Journal analysis

Tabla 5.6 provides a comprehensive summary of the impact factor (IF) rankings for journals in this field. The Journal of Cleaner Production emerged as the journal with the highest impact factor (IF= 11.07). Notably, the Journal of Cleaner Production also led in terms of the total number of publications with 285 articles (total citations= 11,689). It was closely followed by Sustainability (IF= 3.89, N= 283, total citations= 2,847), Business Strategy and the Environment (IF= 10.80, N=69, total citations= 2,429), British Food Journal (IF=3.22, N=62, total citations= 966), and International Journal of Life Cycle Assessment (IF=5.26, N=39, total citations= 974), ranking as the second to fifth, respectively. **Tabla 5.7** presents the top 10 journals by co-citations. Notably, the Journal of Cleaner Production led the way with 5,163 citations, followed by the Journal of Business Ethics (citations= 1,288), Business Strategy and

the Environment (citations= 1,287), and Sustainability (citations= 1,073), all of which accumulated more than 1,000 citations.

Tabla 5.6. Top 10 contributing journals					
Journal	IF	TP	TP%	TCT	CPP
Journal Of Cleaner Production	11.07	285	16,11	11,689	41,01
Sustainability	3.89	283	16,00	2,847	10,06
Business Strategy and The Environment	10.80	69	3,90	2,429	35,20
British Food Journal	3.22	62	3,50	966	15,58
International Journal of Life Cycle Assessment	5.26	39	2,20	974	24,97
Journal Of Environmental Management	8.91	38	2,15	1,595	41,97
Corporate Social Responsibility and Environmental Management	8.46	38	2,15	1,211	31,87
Plant Physiology	8.00	32	1,81	2,217	69,28
Annals Of Botany	5.04	29	1,64	1,011	34,86
Planta	4.54	23	1,30	1,023	44,48

Note: IF= 2021 journal impact factor, TP= total publications, TP%= percentage of TP over total, TCT= total citations, CPP= average citation per publication. Citation records were obtained in December 2022.

Tabla 5.7. Top 10 journals by co-citations				
Journal	Cluster	Links	Total link strength	Citations
Journal of Cleaner Production	3	44	87,192	5,163
Journal of Business Ethics	1	42	29,000	1,288
Business Strategy and The Environment	1	39	33,244	1,287
Sustainability	3	43	20,228	1,073
Ecological Economics	1	43	20,650	806
Plant Physiology	4	18	12,868	796
Journal of Environmental Management	3	42	18,451	677
Food Policy	2	43	8,570	613
Energy Policy	3	39	9,178	610
Academy of Management Journal	1	38	16,091	603

Note: Local citations refer to citations within the 1.769 publications used in this research. Links refer to the number of connections within the publications. TLS= Total Link strength. Citation records were obtained in December 2022.

Figure 5.4 illustrates the journals' co-citation network, focusing on journals with a minimum of 200 citations. We applied a cluster-detection analysis (Waltman et al., 2010) to this network to pinpoint emerging community-like structures. Based on the cluster-detection analysis, we identified four distinct clusters. Cluster 1 (red) contains journals such as Journal of Business Ethics, Business Strategy and the Environment, and Ecological Economies. Cluster 2 (green) includes journals such as Food Policy, American Journal of Agricultural Economy, and World Development. Cluster 3 (blue) encompasses journals as Journal of Cleaner Production, Sustainability, and Journal of Environmental Management. Lastly, Cluster 4 (yellow) comprehends journals as Plants Physiology, Plant Cell, and Plant Journal.

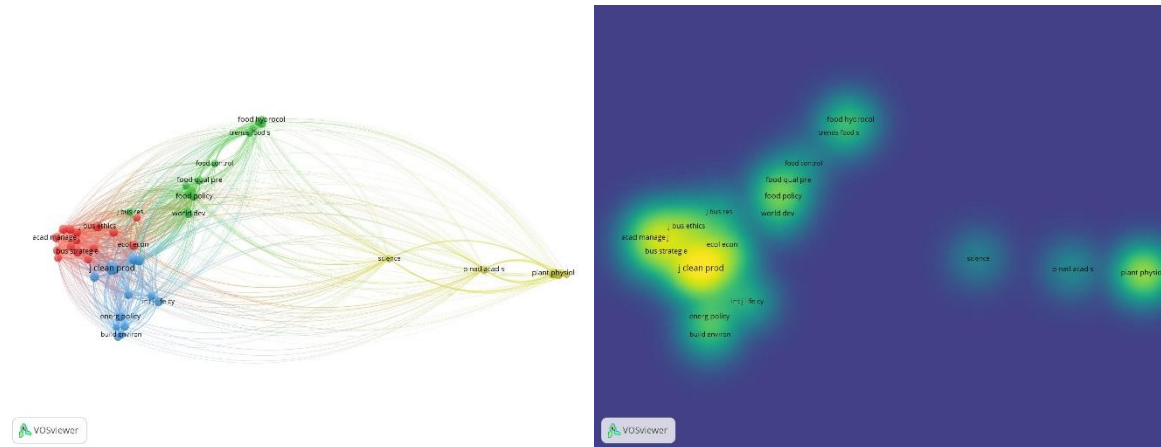


Figure 5.4. Journals' co-citation network. Note: the first panel identifies the journal network, and the second panel identifies the network' density. Journals with 200 citations. Created using VOS Viewer version 1.6.17.

5.3.1.4 Authors analysis

Tabla 5.8 provides a summary of the top 10 authors in the sample, ranked by total citations. Francesco Testa emerged as the most cited author, with a total of 1,135 citations. Following closely were Fabio Iraldo and Marco Frey, with 930 and 848 citations, respectively. Francesco Testa is an associate professor at Sant'Anna School of Advanced Studies in Italy. Testa's most cited publication is titled 'The effect of environmental regulation on firms' competitive performance: The case of the

building & construction sector in some EU regions' (Testa et al., 2011). This article draws upon neoclassical economic theory and the theory of dynamic competitiveness to address the impact of environmental policy stringency, such as green public procurement schemes or eco-labels, on firm competitiveness performance. The findings suggest that stricter environmental regulations lead to increased investment in organizational innovation.

Tabla 5.8. Top 10 authors by citations			
Authors	Total link strength	Publications	Citations
Francesco Testa	30	14	1135
Fabio Iraldo	29	13	930
Marco Frey	20	8	848
Olivier Boiral	21	16	741
Inaki Heras-Saizarbitoria	22	16	637
Tiberio Daddi	22	11	419
Maria Del Mar Alonso-Almeida	5	5	358
Charbel Jose Chiappetta Jabbour	2	5	346
Frederic Marimon	6	4	303
Robert Sroufe	6	5	294

Note: Links refers to the number of connections within the publications. TLS= Total Link strength. Citation records were obtained in December 2022.

Fabio Iraldo ranked as the second most cited author. Fabio Iraldo is a full professor at Scuola Superiore Sant'Anna di Pisa in Italy. Iraldo's most cited paper is titled 'Is an environmental management system able to influence environmental and competitive performance? The case of the eco-management and audit scheme (EMAS) in the European Union' (Iraldo et al., 2009). This research investigates the influence of Environmental Management Systems (EMS) on organizational performance and competitiveness. The authors contend that performance improvement becomes attainable when the components inherent to the EMS are seamlessly integrated into the management processes. Furthermore, the adoption of an EMS is shown to sustain the firm's competitive advantages by nurturing innovation capabilities.

The third most cited author is Marco Frey. Marco Frey is a full professor at Scuola Superiore Sant'Anna in Italy. Frey's most cited papers is titled 'EMAS and ISO 14001: the differences in effectively improving environmental performance' (Iraldo et al., 2009). The article conducts a thorough analysis, comparing the short- and long-term impacts of various schemes, specifically Environmental Management Systems (EMS) and ISO 14001, on the environmental performance of energy-intensive firms. The authors have discovered that the implementation of the ISO 14001 standard results in a significant enhancement of environmental performance.

Figura 5.5 illustrates the co-authorship network within the sample. The observed network exhibited fragmentation, with multiple elements within the network lacking connections to the main component. Consequently, we can deduce a deficiency in social connections among the authors who have studied this phenomenon. One plausible explanation for this could be the heterogeneity of the literature stemming from various research fields. We analyzed the main component of the network, which consists of fragments with more interconnected authors, to gain a more profound understanding of social interactions (see **Figura 5.6**). **Figura 5.6** illustrates that 15 actors have formed research groups connected through social brokers, who serve as intermediaries linking two distinct groups.

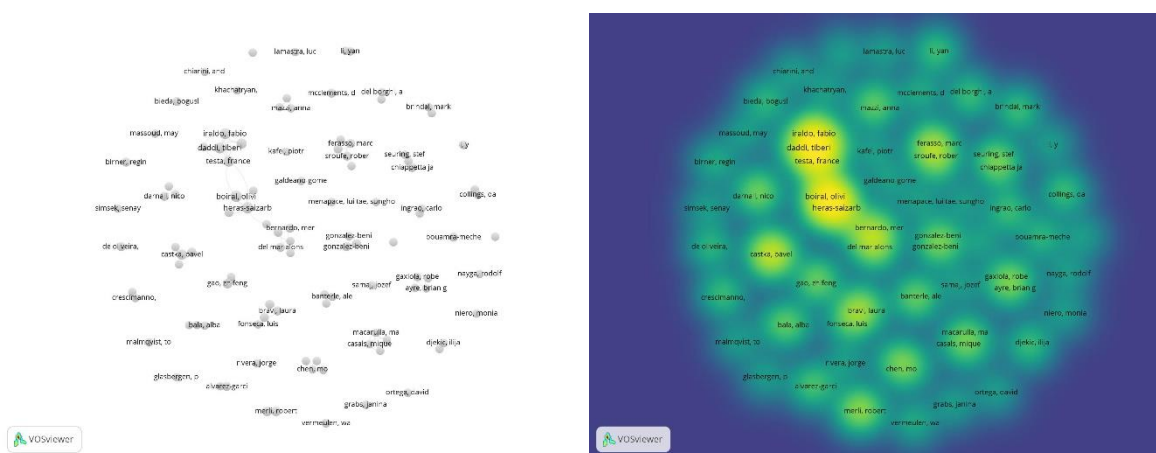


Figura 5.5. Co-authorship network. Note: the first panel identifies the co-authorship network, and the second panel identifies the network's density. 105 Authors with at least 3 publications. Created using VOS Viewer version 1.6.17

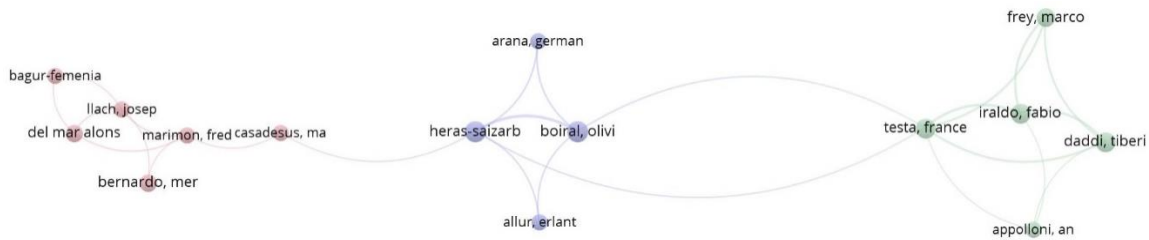


Figura 5.6. Co-authorship network main component. Note: Created using VOS Viewer version 1.6.17

We identified three clusters within the main component of the co-authorship network, as shown in **Table 5.9**, using the cluster-detection analysis (Waltman et al., 2010). Authors in cluster 1 (red) have conducted research on topics related to environmental organizational practices, sustainable management systems, and environmental business competitiveness. In contrast, authors in cluster 2 (green) have published articles on subjects such as sustainable value creation, green manufacturing, the environmental value chain, and sustainable initiatives in the supply chain. Finally, authors in cluster 3 (purple) have focused their articles on topics such as environmental management systems, sustainable cooperatives, and the circular economy.

Tabla 5.9. Cluster of authors in the co-authorship main component		
Cluster	Cluster Label	Authors By Cluster
Cluster 1	Management systems	Llorenc Bagur-Femenias (93), Merce Bernardo (194), Marti Casadesus (97), Maria Del Mar Alonso-Almeida (358), Josep Llach (181), Frederic Marimon (303)
Cluster 2	Sustainable supply chain management	Andrea Appolloni (77), Tiberio Daddi (419), Marco Frey (848), Fabio Iraldo (930), Francesco Testa (1135)
Cluster 3	Sustainable development management	Erlantz Allur (32), German Arana (214), Olivier Boiral (741), Inaki Heras-Saizarbitoria (637)

Note: Values in brackets correspond to total local citation.

5.3.1.5 Cited References analysis.

Table 5.10 presents the top 10 authors based on co-citations derived from local citations. Olivier Boiral was the most co-cited author with over 290 local citations (Local citations= 297). He was followed by Iñaki Heras-Saizarbitoria, the European Commission, and the International Organization for Standardization, with 259, 252, and 241 local citations, respectively. **Table 5.11** highlights the top 10 references based on co-citations. King (2005) stands out as the sole reference with over 70 co-citations (Local citations= 78). Additionally, two other references received more than 60 co-citations each: Boiral (2007) and Melnyk et al. (2003). Notably, among the top 10 references, four were authored by the leading co-cited authors (Boiral, 2007; Heras-Saizarbitoria et al., 2011; Potoski & Prakash, 2005; Testa et al., 2014).

Tabla 5.10. Top 10 authors by co-citations			
Sources	Local Citations	Links	TLS
Boiral, O	297	33	3680
Heras-Saizarbitoria, I	259	34	3856
European Commision	252	36	846
International Organization for Standardization	241	35	1903
Darnall, N	207	34	2848
Testa, F	172	34	2591
Porter, Me	162	35	1316
Bansal, P	151	33	1862
Delmas, Ma	144	35	1809
Potoski, M	130	33	1794

Note: Local citations comprise the citations within the 1.769 publications in the sample. Links refer to the number of connections within the publications. TLS= Total Link strength. Citation records were obtained in December 2022.

Tabla 5.11. Top 10 references by co-citation		
Cited Reference	Citations	TLS
(King et al., 2005)	78	1238
(Boiral, 2007)	69	1223
(Melnyk et al., 2003)	60	1044
(Testa et al., 2014)	55	928
(Potoski & Prakash, 2005)	57	922
(Heras-Saizarbitoria et al., 2011)	58	890
(Yin & Schmeidler, 2009)	46	863
(Christmann & Taylor, 2006)	44	862
(Morrow & Rondinelli, 2002)	61	854
(Rondinelli & Vastag, 2000)	51	817

Note: Citations refers to citations within the 1.769 publications used in this research. TLS= Total Link strength. Citation records were obtained in December 2022.

King et al. (2005) was the most co-cited article in the sample. In their study, the authors delved into the reasons behind firms' decisions to pursue certification, the impact of certifications on organizational behavior, and how external stakeholders perceive these certifications (pp. 1091). Their findings suggest that organizations opt for ISO certification to mitigate information asymmetry with their stakeholders (pp. 1102). Furthermore, the presence of such organizational certifications provides market insights into the robustness of internal operations and subsequent enhancements in organizational performance (pp. 1103).

Boiral (2007) holds the second rank in co-citations. The author explored how organizations incorporate external standards into their behavioural practices. His analysis indicated that organizations adopt these standards primarily to establish legitimacy (pp. 141). To achieve this, firms often create narratives as strategies for addressing external pressures. The interplay between the formal organizational structure and the rhetoric surrounding the standards enables organizations to meet the certification's stipulated requirements (pp. 142). Consequently, external standards gain legitimacy and rationalization through internal discourse and language (pp. 143).

Ranked third in terms of co-citations is the article by Melnyk et al. (2003). This study investigates the assumption regarding the impact of ISO 14001 in reducing environmental waste within organizations. The research evaluates the role of a

formal and certified environmental management system in contrast to a formal but uncertified system. Their findings offer evidence that organizations with a formal environmental management system not only perceive an impact on pollution abatement but also experience improved operational performance.

Figura 5.7 illustrates the Authors' co-citation network. Utilizing cluster-detection analysis (Waltman et al., 2010), we have identified four clusters within the network, as presented in **Tabla 5.12**. Cluster 1 (red), referred to as the environmental governance cluster, encompasses authors such as Magali Delmas, Nicole Darnall, Michael Porter, Pratima Bansal, and Matthew Potoski. Cluster 2 (green), designated as the environmental management cluster, features authors including Olivier Boiral, Iñaki Heras-Saizarbitoria, Francesco Testa, and Fabio Iraldo. Cluster 3 (blue), labeled as the sustainability labels cluster, includes global entities like the European Commission, Food and Agriculture Organization, and the World Bank. Lastly, cluster 4 (yellow), identified as the sustainable operations cluster, comprises authors such as Charles J Corbett, S. X. Zeng, and Pavel Castka.

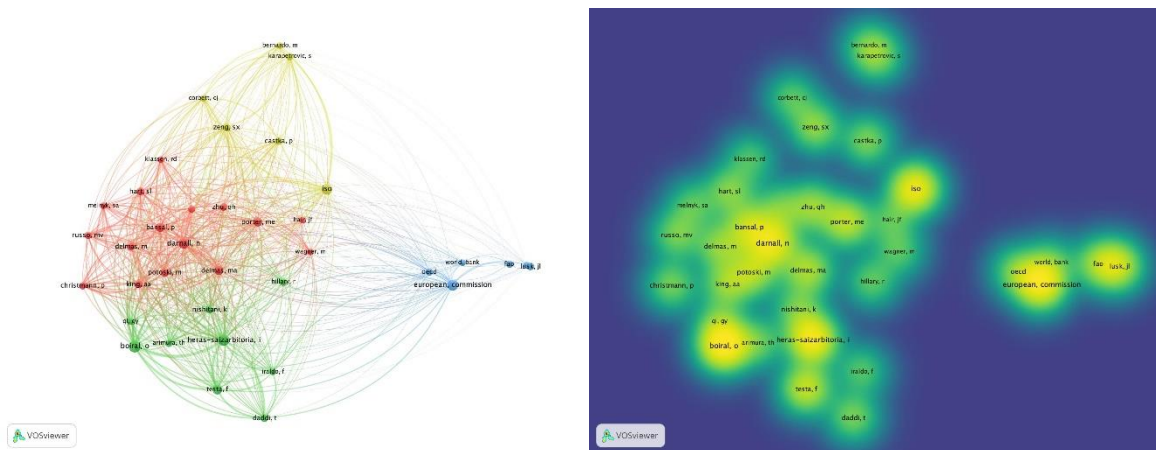


Figura 5.7. Authors' co-citation network. Note: the first panel identifies the co-citations network, and the second panel identifies the network' density. 36 Authors with at least 70 co-citations. Created using VOS Viewer version 1.6.17.

Tabla 5.12. Cluster of Authors' Co-Citation Network		
Cluster	Cluster Label	Authors By Cluster
Cluster 1	Environmental governance	Bansal, P (151), Christmann, P (98), Darnall, N (207), Delmas, M (257), Gonzalez-Benito, J (88), Hair, Jf (72), Hart, Sl (107), King, Aa (118), Klassen, Rd (72), Melnyk, Sa (77), Porter, M (162), Potoski, M (130), Russo, Mv (98), Wagner, M (76), Zhu, Qh (120)
Cluster 2	Environmental management	Arimura, Th (86), Boiral, O (297), Daddi, T (101), Heras-Saizarbitoria, I (259), Hillary, R (83), Iraldo, F (76), Nishitani, K (92), Qi, Gy (73), Testa, F (172)
Cluster 3	Sustainability labels	European, Commission (252), FAO (92), Grunert, Kg (76), Lusk, JI (106), OECD (94), World Bank (70)
Cluster 4	Sustainable operations	Bernardo, M (72), Castka, P (103), Corbett, Cj (79), ISO (241), Karapetrovic, S (87), Zeng, Sx (118)

Note: Values in brackets correspond to total local citation.

5.3.2. Conceptual Structure: A cluster Analysis

5.3.2.1. Business and economic category

Figura 5.8 illustrates the co-occurrence network based on authors' keywords. Utilizing the clusterdetection analysis (Waltman et al., 2010), we have identified four clusters within the network, as presented in **Tabla 5.13**. Cluster 1 (red) is labeled as the certifications and green supply chain cluster. Articles within this cluster focus on practices related to green supply management and the advantages of implementing international certifications. Publications in this cluster explore various aspects, including the adoption of green supply chain management practices (Chien & Shih, 2007), the correlation between green training and green supply chains (Teixeira et al., 2016), and an analysis of the relationships between motivations and the benefits related to certification (Gavronski et al., 2008).

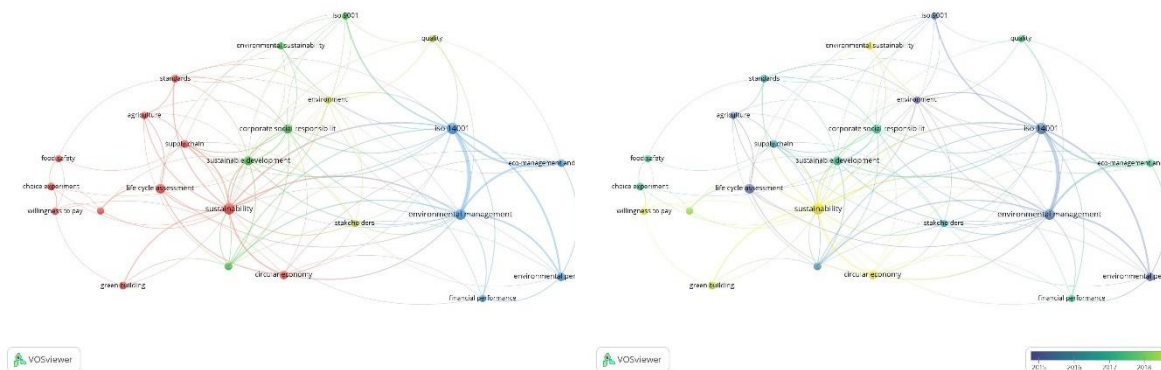


Figure 5.8. Network of co-occurrence by authors' keywords- business and economics category. Note: the first panel identifies the co-occurrence network, and the second panel identifies the network' evolution. 24 keywords with at least 15 co-occurrences. Created using VOS Viewer version 1.6.17.

Table 5.13. Cluster of authors' keywords- business and economics category		
Cluster	Cluster Label	Keywords
Cluster 1	Certifications and green supply chain	carbon footprint (19), food safety (19), agriculture (20), willingness to pay (21), standards (22), choice experiment (24), green building (26), supply chain (27), circular economy (43), life cycle assessment (70), sustainability (157).
Cluster 2	ISO implementation and environmental management systems	iso 9001 (15), environmental sustainability (16), environmental policy (27), sustainable development (44), corporate social responsibility (58)
Cluster 3	Managerial practices and environmental performance	eco-management and audit scheme (26), environmental performance (42), environmental management (142), iso 14001 (148)
Cluster 4	Certifications and environmental regulations	environment (18), stakeholders (18), quality (19)

Note: co-occurrence of each keyword in parenthesis

Cluster 2 (green) is designated as the ISO implementation and environmental management systems cluster. This cluster primarily concentrates on environmental reporting practices, the effective implementation of ISO standards, and consumer attitudes. Articles within this cluster investigate topics such as the disclosure of environmental information (da Silva Monteiro & Aibar-Guzmán, 2010), the global

proliferation of the Global Reporting Initiative (GRI) (Marimon et al., 2012), and the factors influencing consumer attitudes toward organic products marketed under a private label (Perrini et al., 2010). Additionally, Group 3 (blue) is classified as the managerial practices and environmental performance cluster. This cluster investigates the factors influencing environmental processes and assesses the effects of certifications. Publications within this cluster examine topics such as the influence of an implemented EMS on organizational performance (Iraldo et al., 2009), the pros and cons of sustainability assessment methodologies (Delmas & Blass, 2010), and the factors driving the adoption of organizational environmental processes and their subsequent effects on performance (Agan et al., 2013). Finally, cluster 4 (yellow) is designated as the certifications and environmental regulations cluster. This cluster encompasses research related to green innovations and the adoption of environmental performance certifications. Articles in this cluster investigate several dimensions including the factors affecting "green" or "non-green" innovations (Cuerva et al., 2014), the strategic impact of implementing an environmental management system (Iraldo et al., 2009), and the influence of international standards on environmental performance (Barla, 2007).

5.3.2.2. Sustainability category

Figura 5.9 illustrates the co-occurrence network based on authors' keywords. Utilizing the cluster detection analysis (Waltman et al., 2010), we have identified five clusters within the network, as presented in **Tabla 5.14**. Cluster 1 (red) is labelled as the innovation and environmental practices cluster. Articles within this cluster explore various topics, including the tools for measuring, controlling, and enhancing energy efficiency in production management (Bunse et al., 2011), the impact of implementing an Environmental Management System on organizational performance (Iraldo et al., 2009), and the correlation between environmental regulations and organizational competitiveness (Testa et al., 2011). Additionally, Cluster 2 (green) is labelled as the implementation and adoption cluster. Top publications explored the factors influencing the implementation of the Environmental Management System (Massoud et al., 2010), the relevant strategies

to promote the adoption of green building technology (Chan et al., 2017), and the potential use of environmental models by policymakers (Farinelli et al., 2005).

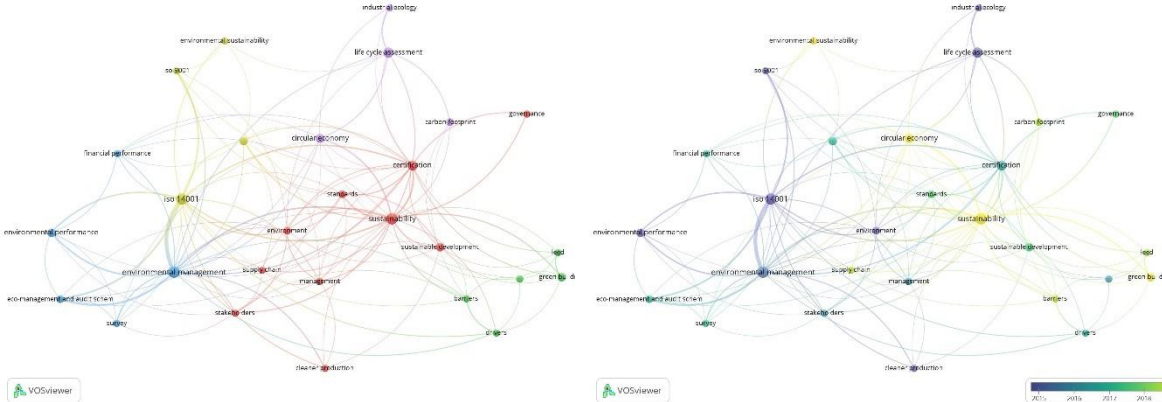


Figure 5.9. Network of co-occurrence by authors' keywords- sustainability category. Note: the first panel identifies the co-occurrence network, and the second panel identifies the network' evolution. 28 keywords with at least 10 co-occurrences. Created using VOS Viewer version 1.6.17.

Tabla 5.14. Cluster of authors' keywords- sustainability category		
Cluster	Cluster Label	Keywords
Cluster 1	Innovation and environmental practices	governance (10), management (10), supply chain (10), cleaner production (12), stakeholders (14), environment (15), standards (15), sustainable development (21), certification (51), sustainability (119)
Cluster 2	Implementation and adoption	barriers (11), drivers (11), lead (11), energy efficiency (13), green building (23)
Cluster 3	Environmental management and sustainable strategies	survey (10), financial performance (12), eco-management and audit scheme (19), environmental performance (26), environmental management (115),
Cluster 4	Internal processes and sustainable performance	iso 9001 (12), environmental sustainability (13), corporate social responsibility (26), iso 14001 (103)
Cluster 5	Sustainability management	industrial ecology (12), carbon footprint (15), circular economy (36), life cycle assessment (69).

Note: co-occurrence of each keyword in parenthesis

Cluster 3 (blue) is designated as the environmental management and sustainable strategies cluster. Publications within this cluster examined various topics, including the significance of EMAS and ISO 14001 in reducing carbon dioxide emissions (Testa et al., 2014), the role of institutional pressures in the successful implementation of environmental certification systems and management systems (Zhu et al., 2013), and the effects of quality management and environmental management on company performance, along with the influence of quality management on sustainable management (Pereira-Moliner et al., 2012). Additionally, cluster 4 (yellow) is denoted as the internal processes and sustainable performance cluster. Articles in this cluster investigated various topics, including the global dissemination of the Global Reporting Initiative (Marimon et al., 2012), the impacts of corporate green practices on financial performance (Miroshnychenko et al., 2017), and the relationship between international certification and financial performance (Heras-Saizarbitoria et al., 2011).

Lastly, cluster 5 (purple) is labelled as the sustainability management cluster. Publications in this cluster examined various topics, including the application of product certification schemes and food preservation (Notarnicola et al., 2012), efforts to manage sustainability through a hybrid technique that combines the economic input-output approach with life-cycle inventories uncertainty (Williams et al., 2009), and how organizations engage in sustainable practices, such as the circular economy, by adopting an EMS (Fonseca et al., 2018).

5.3.2.3. Engineering category

Figura 5.10 illustrates the co-occurrence network based on authors' keywords. Utilizing the cluster detection analysis (Waltman et al., 2010), we have identified four clusters within the network, as presented in **Tabla 5.15**. Cluster 1 (red) is designated as the certifications and consumer perception cluster. Articles within this cluster delve into topics such as how date labels influence individuals' willingness to waste (Wilson et al., 2017), how consumers analyze various types of nutrition information, including the nutrition facts panel label and nutrition declaration (Gracia et al., 2009), and how consumers choose fresh products (Grunert et al., 2015). Additionally,

Cluster 2 (green) is designated as the production and nutrition certifications cluster. Top articles explored how exhibiting extensive information to consumers change consumer attitudes and affect the acceptability of novel products (Barsics et al., 2017), how environmental certification can affect the vertical organization of food supply chains (Banterle et al., 2013) and investigated the potential of certifications to improve the livelihoods of small farmers (Hidayat et al., 2015).

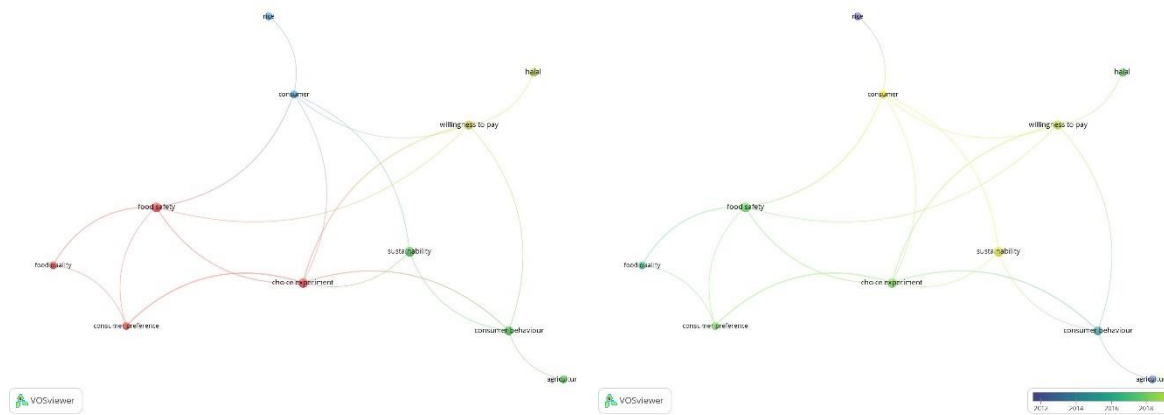


Figura 5.10. Main component network of co-occurrence by authors' keywords- engineering category. Note: the first panel identifies the co-occurrence network, and the second panel identifies the network' evolution. 11 keywords with at least 5 co-occurrences. Created using VOS Viewer version 1.6.17

Tabla 5.15. Cluster of authors' keywords- engineering category		
Cluster	Cluster Label	Keywords
Cluster 1	Certifications and consumer perception	food quality (5), consumer preference (6), food safety (12), choice experiment (13)
Cluster 2	Production and nutrition certifications	agriculture (5), consumer behavior (10), sustainability (13)
Cluster 3	Consumer attributes and preferences	consumer (5), rice (6)
Cluster 4	Willingness to pay for certified products	halal (7), willingness to pay (11)

Cluster 3 (blue) is designated as the consumer attributes and preferences cluster. Articles within this cluster examined the analysis of consumer preferences and marginal willingness to pay for selected food safety attributes (Liu et al., 2020), how consumers assess the importance of various indicators of product authenticity (El Benni et al., 2019), and how certification guidance can mitigate threats to food safety and improve consumers' health (Macharia et al., 2013). Lastly, cluster 4 (yellow) is labelled as the willingness to pay for certified products cluster. Articles within this cluster explored the factors motivating consumers to pay for halal logistics and the resulting impact on the demand for halal logistics certification (Fathi et al., 2016), whether religious food laws can provide answers to current problems in food systems, and the willingness to pay for products with safety guarantee labels (Owusu-Sekyere et al., 2014).

5.4. Implications, empirical gaps, and further research opportunities.

This study offers a two-fold contribution. Firstly, it presents a comprehensive overview of certification-related research spanning from 1999 to 2022. Secondly, it conducts an in-depth analysis incorporating diverse perspectives on the various certification applications over the past two decades. This analysis encompasses several dimensions, including trends in productivity (see the appendix), the primary countries of publication (**Table 5.3**), regional distribution of published articles (**Table 5.4**), key contributors (**Table 5.5**), prominent journals (**Table 5.6**), journals with the highest co-citations (**Table 5.7**), noteworthy authors (**Table 5.8**), author clusters in the co-authorship network (**Table 5.9**), leading authors based on co-citations (**Table 5.10**), significant references based on co-citations (**Table 5.11**), and author clusters within the co-citation network (**Table 5.12**).

Our observations reveal a significant surge in the number of publications since 2010, with no apparent slowdown as of the time of writing this article. Notably, the United States of America emerged as the leading contributor with 277 publications (12.07%), followed by China with 187 (8.15%), Italy with 185 (8.06%), and Spain with 172 (7.49%). Furthermore, our study highlights Europe as the most prolific region in terms of publications during the period 1999-2022, accounting for 49%

(N=1122) of the total publications. In contrast, South America (6%), Australia & Oceania (5%), Africa (3%), the Middle East (1%), and Central America (0%) exhibited relatively lower levels of research participation. In addition, the Institut National De La Recherche Agronomique was among the major contributors to this topic. The Journal of Cleaner Production, Sustainability, Business Strategy and the Environment, the British Food Journal, and the International Journal of Life Cycle Assessment stand out, having published the largest number of articles on this topic. Lastly, in terms of authorship, Francesco Testa emerges as the most cited author with 1,135 citations, followed closely by Fabio Iraldo (930) and Marco Frey (848). Additionally, we have elucidated the conceptual structure of this topic by conducting a comprehensive analysis of co-occurrence networks within three distinct categories: sustainability, engineering, and business and economics. Within the business and economics category, we have identified four distinct clusters: (i) certifications and the green supply chain; (ii) ISO implementation and environmental management systems; (iii) managerial practices and environmental performance; and (iv) certifications and environmental regulations. In the sustainability category, our analysis has unveiled five prominent clusters: (i) innovation and environmental practices, (ii) implementation and adoption, (iii) environmental management and sustainable strategies, (iv) internal processes and sustainable performance, and (v) sustainability management. Finally, within the engineering category, we have observed four noteworthy clusters: (i) certification and consumer perception, (ii) production and nutrition certification, (iii) consumer attributes and preferences, and (iv) willingness to pay for certified products. In summary, this comprehensive analysis offers valuable insights into the diverse applications of certification within a global context. Furthermore, it underscores the potential for certification to serve as a strategic tool in addressing pressing global challenges, such as those related to climate risk mitigation.

Considering our analysis of the co-occurrence networks across three distinct categories—business and economy, engineering, and sustainability—we present prospective avenues for future research. **Table 5.16** offers an overview of potential research directions for business and economic research. Some of the recommended

areas of exploration encompass understanding the interplay between production processes, sustainable certification schemes, and evolving business strategies in dynamic environments. Additionally, we propose investigating the connections between environmental pressures, certification schemes, and the sustainable outcomes of organizations. Another fruitful area of study could delve into the adoption patterns of certifications within inter-organizational networks.

Tabla 5.16. Future research directions- business and economics		
Cluster	Future Research Directions	Baseline Article
I	To explore the relationship between green supply chain management practices and sustainable performance	(Chien & Shih, 2007)
	To analyze the effects of industrial sector characteristics on green supply chain management implementation.	(Teixeira et al., 2016)
	Defining a set of business strategies under different EMS adoption.	(Gavronski et al., 2008)
	To understand the social and psychological barriers to adopting certification schemes.	(Hoffman & Henn, 2008)
II	To analyze the effect of institutional pressure on organizational and interorganizational environmental practices.	(Zhu et al., 2013)
	Describe the diffusion patterns of integrated management systems within an inter-organizational network in several sectors and countries.	(Marimon et al., 2012)
	To analyze how certification schemes relate to organizational public trust.	(Perrini et al., 2010)
III	To unravel organizational factors that correlate with a successful certification scheme implementation.	(Barla, 2007)
	To explore how public awareness of EMS affects sustainable competitive organizational decisions.	(Iraldo et al., 2009)
	To analyze how sustainable behavior contributes to organizational growth and innovation performance.	(Cuerva et al., 2014)
IV	To untangle how institutional endorsement of sustainable practices enhance organizational competitiveness	(Testa et al., 2011)

Tabla 5.17 outlines plausible trajectories for expanding research within the engineering realms. These suggested research directions encompass inquiries into the relationships between production processes, food safety assurance labels, and consumer behavior. Lastly, **Tabla 5.18** outlines conceivable pathways for advancing research within the sustainability domains. Potential research directions focus on elucidating the drivers, barriers, pressures, and incentives that influence the implementation and adoption of environmental certification schemes. These future research endeavours promise to contribute significantly to our understanding of the multifaceted roles of certification in diverse contexts.

Tabla 5.17. Future research directions- engineering		
Cluster	Future Research Directions	Baseline Article
I	To investigate the effects of policies on mitigating food waste.	(Wilson et al., 2017)
	To explore the effects of different logos and logo combinations on product choice (standard and sustainable food).	(Hoek et al., 2017)
	To evaluate the effect of nutritional labels on consumers' food choices.	(Gracia et al., 2009)
	Unravel how nutritional and production labels affect willingness to purchase.	(Costanigro et al., 2014)
II	To explore consumers' behavioral patterns of eco-labelled products.	(Barsics et al., 2017)
	Analyze consumers' interest in environmental and social sustainability certifications.	(Banterle et al., 2013)
	To untangle the strategies used to improve small farmer livelihoods through sustainability certifications.	(Hidayat et al., 2015)
III	To explore how demand for consumption goods varies depending on product certifications.	(Ortega et al., 2016)
	To unravel how food safety certifications shape consumer preferences.	(Liu et al., 2020)
IV	To explore the drivers of consumers' willingness to pay for production certificate schemes.	(Fathi et al., 2016)
	To unravel the complementarity of religious and health product schemes.	(Tieman & Hassan, 2015)
	Determine how safety assurance labels impact consumer preferences.	(Owusu-Sekyere et al., 2014)

Tabla 5.18. Future research directions- sustainability

Cluster	Future Research Directions	Baseline Article
I	To explore the relationship between energy management certification and production performance.	(Bunse et al., 2011)
	To untangle mediation and moderation factors between environmental management system implementation and environmental performance.	(Iraldo et al., 2009)
II	To analyze drivers, barriers, and incentives for implementing production certification schemes.	(Massoud et al., 2010)
	To investigate the interrelationship between governmental promotion strategies and the likelihood of implementing certification schemes.	(Chan et al., 2017)
III	Untangle how standards' requirements affect the achievement of continuous improvements in environmental certifications schemes.	(Testa et al., 2014)
	To evaluate the impact of voluntary and non-voluntary regulatory pressures on certification scheme adoption.	(Zhu et al., 2013)
IV	To analyze the motives and impacts of the adoption of social certification schemes.	(Marimon et al., 2012)
	To explore the relationship between sustainable certification schemes and financial performance.	(Miroshnychenko et al., 2017)
V	To analyze the role of certification schemes in the creation of a sustainable agri-food industry.	(Notarnicola et al., 2012)
	Exploring the organizational determinants of adopting circular economy practices and implementing sustainable certifications.	(Fonseca et al., 2018)

While certification studies have garnered significant attention worldwide, it is crucial to acknowledge that certain research areas have remained underexplored. Notably, our examination reveals a noticeable gap in understanding how organizations can leverage certification schemes to address pressing global challenges, particularly those of substantial societal importance such as global environmental change (Diaz Tautiva, Huaman, et al., 2022; Taylor & Lindenmayer, 2021). Our systematic review underscores that organizations utilize certification schemes not only to manage environmental risks but also to harmonize their operations in response to the diverse pressures exerted by multiple stakeholders. Furthermore, these schemes serve as a strategic avenue to foster more sustainable organizational practices. In essence, the adoption of certification schemes can be perceived as an effective strategy for

navigating environmental challenges.

It is crucial to establish a connection between environmental impacts and the broader production system to understand the ramifications of global environmental change and formulate effective industry adaptation strategies. Global Environmental Change is leading to a heightened occurrence and severity of extreme weather events, exerting profound effects on both the natural environment and organizational behavior (Diaz Tautiva, Huaman, et al., 2022; Masson-Delmotte et al., 2019). These effects carry significant implications for society, as they amplify perceptions of uncertainty across all sectors (Daddi et al., 2018; Linnenluecke & Griffiths, 2013). Among these sectors, primary industries, including agriculture, fishing, forestry, and aquaculture, stand out as particularly vulnerable to the impacts of global environmental change (Maulu et al., 2021). This heightened vulnerability is primarily due to their heavy reliance on natural resources and their dependence on favourable climatic conditions (Diaz Tautiva, Huaman, et al., 2022). Consequently, these environmental shifts can engender fluctuations in productivity, thereby inducing socioeconomic responses.

The primary sector has embraced certification schemes as both a response to external pressures and as additional strategic tools to navigate the complexities of an uncertain environment (Angelo & ReillyBrown, 2014; Chkanikova & Sroufe, 2021; Kraxner et al., 2017; Vince & Haward, 2019). These certification schemes find application in diverse areas within the primary sector, including aquaculture, agriculture, and forestry (Tricallotis et al., 2019; Vince & Haward, 2019). Notable examples encompass palm oil certification and certifications such as the Forest Stewardship Council (FSC) and the Programme for the Endorsement of Forest Certification (PEFC) (Gutierrez Garzon et al., 2020). While the primary sector has made strides in implementing these certification schemes, the question of how organizations in these sectors can optimize the overall product lifecycle in the context of global environmental change remains an open and intriguing area that merits further research.

Additional research endeavours could broaden the horizons of our bibliometric analysis, offering deeper insights. Initially, a more comprehensive investigation could

explore the array of theories, contexts, methods, and methodologies that populate the existing literature. This exploration holds the potential to yield fresh perspectives on the intricate interplay between certification schemes and organizations. Furthermore, future research could scrutinize the longitudinal patterns discerned within the conceptual network to observe inflection points in this topic. Lastly, a thematic, in-depth analysis has the capacity to foster theoretical advancements that contribute to a more comprehensive understanding of these phenomena.

5.5. Conclusions and limitations.

While certification schemes hold a pivotal position in societies, mitigating uncertainty among economic actors, our understanding of their influence on organizations remains fragmented. This research addresses this knowledge gap by elucidating the evolution of research on organizations and certification schemes. Notably, the period spanning from 2011 to 2022 has witnessed substantial academic interest in these phenomena. Nonetheless, it is worth noting that the scientific output is disproportionately concentrated in developed nations and a select number of institutions.

By mapping the conceptual structure in the literature, we have identified several research clusters that hold the potential to enhance our understanding of this phenomenon. Specifically, we have identified four (4) clusters within the business and economic category, five (5) clusters within the sustainability category, and four (4) clusters within the engineering category. Future research endeavours may delve into the forefront of each of these identified clusters.

Our research is subject to certain limitations. Firstly, we have exclusively examined English language literature, thereby excluding bibliometric data from other languages, such as Spanish and French. Secondly, our analysis is confined to articles indexed in the Web of Science database, chosen for its high quality and extensive journal coverage. Lastly, it is important to note that our systematic review, conducted through bibliometric methods, focused on discerning patterns within the literature, and did not encompass an in-depth analysis of the entire body of research in this field.

Statements and Declarations

Competing interests

This manuscript has not been published or presented elsewhere and is not under consideration by another journal. All authors have approved the manuscript and agree with submission. The authors have no relevant financial or non-financial interests to disclose.

Availability of data and material

The data that support the findings of this study are available from the corresponding author upon request.

Appendix.

Yearly number of publications

Year	Sustainability	Engineering	Business and Economy	Without Duplications
1999	0	8	8	8
2000	1	12	13	14
2001	2	15	18	19
2002	5	11	18	20
2003	2	8	10	10
2004	6	11	21	23
2005	8	11	21	22
2006	7	7	24	24
2007	9	10	24	25
2008	13	15	39	40
2009	11	16	32	37
2010	10	7	27	29
2011	21	8	38	40
2012	31	5	47	48
2013	34	14	56	59
2014	44	18	66	68
2015	42	22	80	84
2016	49	29	92	98
2017	80	28	130	138
2018	97	24	148	153
2019	104	29	162	169
2020	124	56	217	228
2021	119	63	207	219
2022	105	54	183	194
Total	924	481	1681	1769

5.6 Reference

- Abdul Majid, N., Ramli, Z., Md Sum, S., & Awang, A. H. (2021). Sustainable palm oil certification scheme frameworks and impacts: A systematic literature review. *Sustainability*, 13(6), 3263.
- Agan, Y., Acar, M. F., & Borodin, A. (2013). Drivers of environmental processes and their impact on performance: a study of Turkish SMEs. *Journal of cleaner production*, 51, 23-33.
- Alayo, M., Iturralde, T., Maseda, A., & Aparicio, G. (2021). Mapping family firm internationalization research: bibliometric and literature review. *Review of Managerial Science*, 15(6), 1517-1560.
- Angelo, M. J., & Reilly-Brown, J. (2014). Whole-System Agricultural Certification: Using Lessons Learned from LEED to Build a Resilient Agricultural System to Adapt to Climate Change. *U. Colo. L. Rev.*, 85, 689.
- Arocena, P., Orcos, R., & Zouaghi, F. (2023). The scope of implementation of ISO 14001 by multinational enterprises: The role of liabilities of origin. *Journal of Environmental Management*, 327, 116844. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116844>
- Avelino, F., Wittmayer, J. M., Pel, B., Weaver, P., Dumitru, A., Haxeltine, A., . . . Ruijsink, S. (2019). Transformative social innovation and (dis) empowerment. *Technological Forecasting and Social Change*, 145, 195-206.
- Barla, P. (2007). ISO 14001 certification and environmental performance in Quebec's pulp and paper industry. *Journal of environmental economics and management*, 53(3), 291-306.
- Barsics, F., Caparros Megido, R., Brostaux, Y., Barsics, C., Blecker, C., Haubruge, E., & Francis, F. (2017). Could new information influence attitudes to foods supplemented with edible insects? *British Food Journal*, 119(9), 2027-2039.
- Block, J. H., & Fisch, C. (2020). Eight tips and questions for your bibliographic study in business and management research. In (Vol. 70, pp. 307-312): Springer.
- Boiral, O. (2007). Corporate greening through ISO 14001: a rational myth? *organization science*, 18(1), 127-146.
- Boiral, O., & Henri, J.-F. (2012). Modelling the impact of ISO 14001 on environmental performance: A comparative approach. *Journal of environmental management*, 99, 84-97.
- Bray, J. G., & Neilson, J. (2017). Reviewing the impacts of coffee certification programmes on smallholder livelihoods. *International journal of biodiversity science, ecosystem services & management*, 13(1), 216-232.
- Brito, T. P., de Souza-Esquerdo, V. F., & Borsatto, R. S. (2022). State of the art on research about organic certification: a systematic literature review. *Organic Agriculture*, 12(2), 177–190. <https://doi.org/10.1007/s13165-022-00390-6>
- Bunse, K., Vodicka, M., Schönsleben, P., Brühlhart, M., & Ernst, F. O. (2011). Integrating energy efficiency performance in production management–gap analysis between industrial needs and scientific literature. *Journal of Cleaner Production*, 19(6-7), 667-679.
- Camilleri, M. A. (2022). The rationale for ISO 14001 certification: A systematic review and a cost–benefit analysis. *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*, 29(4), 1067–1083. <https://doi.org/10.1002/csr.2254>
- Chan, A. P. C., Darko, A., & Ameyaw, E. E. (2017). Strategies for promoting green building technologies adoption in the construction industry—An international study. *Sustainability*, 9(6), 969.
- Chen, X., & Wang, N. (2023). From green to gold? A test of the innovation incentive and performance improvement effect of enterprise voluntary environmental

- management. *Environment, Development and Sustainability*, 25(8), 8005–8029. <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02385-5>
- Chien, M., & Shih, L.-H. (2007). An empirical study of the implementation of green supply chain management practices in the electrical and electronic industry and their relation to organizational performances.
- Chkanikova, O., & Sroufe, R. (2021). Third-party sustainability certifications in food retailing: Certification design from a sustainable supply chain management perspective. *Journal of Cleaner Production*, 282, 124344.
- Christmann, P., & Taylor, G. (2006). Firm self-regulation through international certifiable standards: Determinants of symbolic versus substantive implementation. *Journal of International Business Studies*, 37, 863-878.
- Clark, M. R., & Kozar, J. S. (2011). Comparing sustainable forest management certifications standards: a meta-analysis. *Ecology and Society*, 16(1).
- Costanigro, M., Appleby, C., & Menke, S. D. (2014). The wine headache: Consumer perceptions of sulfites and willingness to pay for non-sulfited wines. *Food Quality and Preference*, 31, 81-89.
- Cuerva, M. C., Triguero-Cano, Á., & Córcoles, D. (2014). Drivers of green and non-green innovation: empirical evidence in Low-Tech SMEs. *Journal of Cleaner Production*, 68, 104-113.
- Cui, J., Dai, J., Wang, Z., & Zhao, X. (2022). Does environmental regulation induce green innovation? A panel study of Chinese listed firms. *Technological Forecasting and Social Change*, 176, 121492. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121492>
- da Silva Monteiro, S. M., & Aibar-Guzmán, B. (2010). Determinants of environmental disclosure in the annual reports of large companies operating in Portugal. *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*, 17(4), 185-204.
- Daddi, T., Todaro, N. M., De Giacomo, M. R., & Frey, M. (2018). A systematic review of the use of organization and management theories in climate change studies. *Business Strategy and the Environment*, 27(4), 456-474.
- Della Corte, V., Del Gaudio, G., & Sepe, F. (2018). Ethical food and the kosher certification: a literature review. *British Food Journal*.
- Delmas, M., & Blass, V. D. (2010). Measuring corporate environmental performance: the trade-offs of sustainability ratings. *Business Strategy and the Environment*, 19(4), 245-260.
- Diaz Tautiva, J. A. (2021). Empirical research on high-growth entrepreneurship: a literature review and Latam research agenda. *Management Research*. <https://doi.org/10.1108/MRJIAM-09-2021-1231>
- Diaz Tautiva, J. A., Huaman, J., & Ponce Oliva, R. D. (2022). Trends in research on climate change and organizations: a bibliometric analysis (1999–2021). *Management Review Quarterly*, 1–35. <https://doi.org/10.1007/s11301-022-00298-1>
- Diaz Tautiva, J. A., Rifo Rivera, F. I., Barros Celume, S. A., & Rifo Rivera, S. A. (2022). Mapping the research about organisations in the latin american context: a bibliometric analysis. *Management Review Quarterly*, 1–49. <https://doi.org/10.1007/s11301-022-00296-3>
- Donthu, N., Kumar, S., Mukherjee, D., Pandey, N., & Lim, W. M. (2021). How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 133, 285-296.
- El Benni, N., Stolz, H., Home, R., Kendall, H., Kuznesof, S., Clark, B., . . . Chan, M.-Y. (2019). Product attributes and consumer attitudes affecting the preferences for infant milk formula in China—a latent class approach. *Food Quality and Preference*, 71, 25-33.

- Farinelli, U., Johansson, T. B., McCormick, K., Mundaca, L., Oikonomou, V., Örtenvik, M., Santi, F. (2005). "White and Green": comparison of market-based instruments to promote energy efficiency. *Journal of cleaner production*, 13(10-11), 1015-1026.
- Fathi, E., Zailani, S., Iranmanesh, M., & Kanapathy, K. (2016). Drivers of consumers' willingness to pay for halal logistics. *British Food Journal*.
- Fonseca, L. M., Domingues, J. P., Pereira, M. T., Martins, F. F., & Zimon, D. (2018). Assessment of circular economy within Portuguese organizations. *Sustainability*, 10(7), 2521.
- Formentini, M., & Taticchi, P. (2016). Corporate sustainability approaches and governance mechanisms in sustainable supply chain management. *Journal of cleaner production*, 112, 1920-1933.
- Galati, A., Schifani, G., Crescimanno, M., & Migliore, G. (2019). "Natural wine" consumers and interest in label information: An analysis of willingness to pay in a new Italian wine market segment. *Journal of Cleaner Production*, 227, 405-413.
- Gavrinski, I., Ferrer, G., & Paiva, E. L. (2008). ISO 14001 certification in Brazil: motivations and benefits. *Journal of Cleaner Production*, 16(1), 87-94.
- Gracia, A., Loureiro, M. L., & Nayga Jr, R. M. (2009). Consumers' valuation of nutritional information: A choice experiment study. *Food Quality and Preference*, 20(7), 463-471.
- Gray, J. V., Anand, G., & Roth, A. V. (2015). The influence of ISO 9000 certification on process compliance. *Production and Operations Management*, 24(3), 369-382.
- Grunert, K. G., Loose, S. M., Zhou, Y., & Tinggaard, S. (2015). Extrinsic and intrinsic quality cues in Chinese consumers' purchase of pork ribs. *Food Quality and Preference*, 42, 37-47.
- Guo, Y., & Wang, L. (2022). Environmental entrepreneurial orientation and firm performance: The role of environmental innovation and stakeholder pressure. *Sage Open*, 12(1), 21582440211061350. <https://doi.org/10.1177/21582440211061354>
- Guo, Z., Bai, L., & Gong, S. (2019). Government regulations and voluntary certifications in food safety in China: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 90, 160-165.
- Gutierrez Garzon, A. R., Bettinger, P., Siry, J., Abrams, J., Cieszewski, C., Boston, K., . . . Yeşil, A. (2020). A comparative analysis of five forest certification programs. *Forests*, 11(8), 863.
- Haga, A. (2018). Eco-Label Effects in the Built Environment: Does Labeling a Light Source Environmentally Friendly Influence Performance and Judgment? *Sage Open*, 8(2), 2158244018766977. <https://doi.org/10.1177/2158244018766977>
- Heras-Saizarbitoria, I., Molina-Azorín, J. F., & Dick, G. P. (2011). ISO 14001 certification and financial performance: selection-effect versus treatment-effect. *Journal of Cleaner Production*, 19(1), 1-12.
- Hernandez-Vivanco, A., & Bernardo, M. (2022). Are certified firms more prone to eco-product innovation? The moderating role of slack resources. *Journal of Cleaner Production*, 377, 134364. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134364>
- Hidayat, K. N., Glasbergen, P., & Offermans, A. (2015). Sustainability certification and palm oil smallholders' livelihood: A comparison between scheme smallholders and independent smallholders in Indonesia. *International Food and Agribusiness Management Review*, 18(1030-2016-83041), 25-48.
- Hoek, A., Pearson, D., James, S., Lawrence, M., & Friel, S. (2017). Healthy and environmentally sustainable food choices: Consumer responses to point-of-purchase actions. *Food quality and preference*, 58, 94-106.
- Hoffman, A. J., & Henn, R. (2008). Overcoming the social and psychological barriers to green building. *Organization & Environment*, 21(4), 390-419.

- Hou, Y., Khokhar, M., Sharma, A., Sarkar, J. B., & Hossain, M. A. (2023). Converging concepts of sustainability and supply chain networks: A systematic literature review approach. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(16), 46120–46130. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-25412-y>
- Iraldo, F., Testa, F., & Frey, M. (2009). Is an environmental management system able to influence environmental and competitive performance? The case of the eco-management and audit scheme (EMAS) in the European union. *Journal of Cleaner Production*, 17(16), 1444-1452.
- Jellema, S. F., Werner, M. D., Rasche, A., & Cornelissen, J. (2022). Questioning impact: a crossdisciplinary review of certification standards for sustainability. *Business & Society*, 61(5), 1042– 1082. <https://doi.org/10.1177/00076503211056332>
- King, A. A., Lenox, M. J., & Terlaak, A. (2005). The strategic use of decentralized institutions: Exploring certification with the ISO 14001 management standard. *Academy of management journal*, 48(6), 1091-1106.
- Kitsios, F., Chatzidimitriou, E., & Kamariotou, M. (2023). The ISO/IEC 27001 Information Security Management Standard: How to Extract Value from Data in the IT Sector. *Sustainability*, 15(7), 5828. <https://doi.org/10.3390/su15075828>
- Kraxner, F., Schepaschenko, D., Fuss, S., Lunnan, A., Kindermann, G., Aoki, K., . . . See, L. (2017). Mapping certified forests for sustainable management-A global tool for information improvement through participatory and collaborative mapping. *Forest Policy and Economics*, 83, 10-18.
- Kücher, A., & Feldbauer-Durstmüller, B. (2019). Organizational failure and decline—A bibliometric study of the scientific frontend. *Journal of Business Research*, 98, 503-516.
- Latino, M. E., Corallo, A., Menegoli, M., & Nuzzo, B. (2022). An Integrative Conceptual Framework of Food Certifications: Systematic Review, Research Agenda, and Macromarketing Implications. *Journal of Macromarketing*, 42(1), 71-99.
- Lavin, F. V., Barrientos, M., Castillo, Á., Herrera, I., & Oliva, R. D. P. (2020). Firewood certification programs: Key attributes and policy implications. *Energy Policy*, 137, 111160.
- Lazaroiu, G., Andronie, M., Uță, C., & Hurloiu, I. (2019). Trust management in organic agriculture: Sustainable consumption behavior, environmentally conscious purchase intention, and healthy food choices. *Frontiers in Public Health*, 7, 340.
- Li, Y., Kubicki, S., Guerriero, A., & Rezgui, Y. (2019). Review of building energy performance certification schemes towards future improvement. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 113, 109244.
- Linnenluecke, M. K., Stathakis, A., & Griffiths, A. (2011). Firm relocation as adaptive response to climate change and weather extremes. *Global environmental change*, 21(1), 123-133.
- Liu, R., Gao, Z., Snell, H. A., & Ma, H. (2020). Food safety concerns and consumer preferences for food safety attributes: Evidence from China. *Food Control*, 112, 107157.
- Macharia, J., Collins, R., & Sun, T. (2013). Value-based consumer segmentation: the key to sustainable agri-food chains. *British Food Journal*.
- Marimon, F., del Mar Alonso-Almeida, M., del Pilar Rodríguez, M., & Alejandro, K. A. C. (2012). The worldwide diffusion of the global reporting initiative: what is the point? *Journal of cleaner production*, 33, 132-144.
- Massoud, M. A., Fayad, R., El-Fadel, M., & Kamleh, R. (2010). Drivers, barriers and incentives to implementing environmental management systems in the food industry: A case of Lebanon. *Journal of cleaner production*, 18(3), 200-209.

- Maulu, S., Hasimuna, O. J., Haambiya, L. H., Monde, C., Musuka, C. G., Makorwa, T. H., . . . Nsekanabo, J. D. (2021). Climate change effects on aquaculture production: sustainability implications, mitigation, and adaptations. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 609097.
- Meachern, M. G., & Seaman, C. (2005). Consumer perceptions of meat production: enhancing the competitiveness of British agriculture by understanding communication with the consumer. *British Food Journal*.
- Melnyk, S. A., Sroufe, R. P., & Calantone, R. (2003). Assessing the impact of environmental management systems on corporate and environmental performance. *Journal of operations management*, 21(3), 329-351.
- Miroshnychenko, I., Barontini, R., & Testa, F. (2017). Green practices and financial performance: A global outlook. *Journal of Cleaner Production*, 147, 340-351.
- Morrow, D., & Rondinelli, D. (2002). Adopting corporate environmental management systems:: Motivations and results of ISO 14001 and EMAS certification. *European management journal*, 20(2), 159-171.
- Nguyen, A. T., Parker, L., Brennan, L., & Lockrey, S. (2020). A consumer definition of eco-friendly packaging. *Journal of Cleaner Production*, 252, 119792.
- Nguyen, H. V., Nguyen, C. H., & Hoang, T. T. B. (2019). Green consumption: Closing the intention-behavior gap. *Sustainable Development*, 27(1), 118-129.
- Notarnicola, B., Hayashi, K., Curran, M. A., & Huisingh, D. (2012). Progress in working towards a more sustainable agri-food industry. *Journal of cleaner production*, 28, 1-8.
- Ortega, D. L., Hong, S. J., Wang, H. H., & Wu, L. (2016). Emerging markets for imported beef in China: Results from a consumer choice experiment in Beijing. *Meat Science*, 121, 317-323.
- Owusu-Sekyere, E., Owusu, V., & Jordaan, H. (2014). Consumer preferences and willingness to pay for beef food safety assurance labels in the Kumasi Metropolis and Sunyani Municipality of Ghana. *Food Control*, 46, 152-159.
- Oya, C., Schaefer, F., & Skalidou, D. (2018). The effectiveness of agricultural certification in developing countries: A systematic review. *World Development*, 112, 282-312.
- Paluš, H., Krahulcová, M., & Parobek, J. (2021). Assessment of forest certification as a tool to support forest ecosystem services. *Forests*, 12(3), 300.
- Pereira-Moliner, J., Claver-Cortés, E., Molina-Azorín, J. F., & Tarí, J. J. (2012). Quality management, environmental management and firm performance: direct and mediating effects in the hotel industry. *Journal of Cleaner Production*, 37, 82-92.
- Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., González, R., & Maestre, I. R. (2009). A review of benchmarking, rating and labelling concepts within the framework of building energy certification schemes. *Energy and Buildings*, 41(3), 272-278. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.10.004>
- Perrini, F., Castaldo, S., Misani, N., & Tencati, A. (2010). The impact of corporate social responsibility associations on trust in organic products marketed by mainstream retailers: a study of Italian consumers. *Business Strategy and the Environment*, 19(8), 512-526.
- Potoski, M., & Prakash, A. (2005). Covenants with weak swords: ISO 14001 and facilities' environmental performance. *Journal of Policy Analysis and Management: The Journal of the Association for Public Policy Analysis and Management*, 24(4), 745-769.
- Riaz, H., & Saeed, A. (2020). Impact of environmental policy on firm's market performance: The case of ISO 14001. *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*, 27(2), 681-693.

- Rondinelli, D., & Vastag, G. (2000). Panacea, common sense, or just a label?: The value of ISO 14001 environmental management systems. *European Management Journal*, 18(5), 499-510.
- Schleifer, P., & Sun, Y. (2020). Reviewing the impact of sustainability certification on food security in developing countries. *Global Food Security*, 24, 100337.
- Ssebunya, B. R., Schader, C., Baumgart, L., Landert, J., Altenbuchner, C., Schmid, E., & Stolze, M. (2019). Sustainability performance of certified and non-certified smallholder coffee farms in Uganda. *Ecological Economics*, 156, 35-47.
- Taufique, K. M., Nielsen, K. S., Dietz, T., Shwom, R., Stern, P. C., & Vandenberg, M. P. (2022). Revisiting the promise of carbon labelling. *Nature Climate Change*, 12(2), 132-140.
- Taylor, C., & Lindenmayer, D. B. (2021). Stakeholder engagement in a forest stewardship council controlled wood assessment. *Environmental Science & Policy*, 120, 204-212.
- Teixeira, A. A., Jabbour, C. J. C., de Sousa Jabbour, A. B. L., Latan, H., & De Oliveira, J. H. C. (2016). Green training and green supply chain management: evidence from Brazilian firms. *Journal of Cleaner Production*, 116, 170-176.
- Testa, F., Iraldo, F., & Frey, M. (2011). The effect of environmental regulation on firms' competitive performance: The case of the building & construction sector in some EU regions. *Journal of environmental management*, 92(9), 2136-2144.
- Testa, F., Rizzi, F., Daddi, T., Gusmerotti, N. M., Frey, M., & Iraldo, F. (2014). EMAS and ISO 14001: the differences in effectively improving environmental performance. *Journal of Cleaner Production*, 68, 165-173.
- Tieman, M., & Hassan, F. H. (2015). Convergence of food systems: Kosher, Christian and Halal. *British Food Journal*.
- Tran, D., & Goto, D. (2019). Impacts of sustainability certification on farm income: Evidence from small-scale specialty green tea farmers in Vietnam. *Food Policy*, 83, 70-82.
- Tricallotis, M., Kanowski, P., & Gunningham, N. (2019). The drivers and evolution of competing forest certification schemes in the Chilean forestry industry. *International Forestry Review*, 21(4), 516-527.
- Tröster, R., & Hiete, M. (2018). Success of voluntary sustainability certification schemes—A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 196, 1034-1043.
- Van Eck, N. J., & Waltman, L. (2017). VOSviewer manual (pp. 1–53). https://www.vosviewer.com/documentation/Manual_VOSviewer_1.6.6.pdf
- Vince, J., & Haward, M. (2019). Hybrid governance in aquaculture: certification schemes and third party accreditation. *Aquaculture*, 507, 322-328.
- Waltman, L., Van Eck, N. J., & Noyons, E. C. (2010). A unified approach to mapping and clustering of bibliometric networks. *Journal of informetrics*, 4(4), 629-635.
- Williams, E. D., Weber, C. L., & Hawkins, T. R. (2009). Hybrid framework for managing uncertainty in life cycle inventories. *Journal of Industrial Ecology*, 13(6), 928-944.
- Wilson, N. L., Rickard, B. J., Saputo, R., & Ho, S.-T. (2017). Food waste: The role of date labels, package size, and product category. *Food Quality and Preference*, 55, 35-44.
- Winn, M., Kirchgeorg, M., Griffiths, A., Linnenluecke, M. K., & Günther, E. (2011). Impacts from climate change on organizations: a conceptual foundation. *Business strategy and the environment*, 20(3), 157-173.
- Yan, E., & Ding, Y. (2012). Scholarly network similarities: How bibliographic coupling networks, citation networks, cocitation networks, topical networks, coauthorship networks, and cword networks relate to each other. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 63(7), 1313-1326.
- Yin, H., & Schmeidler, P. J. (2009). Why do standardized ISO 14001 environmental management systems lead to heterogeneous environmental outcomes? *Business Strategy and the Environment*, 18(7), 469– 486. <https://doi.org/10.1002/bse.629> Yin,

- H., & Schmeidler, P. J. (2009). Why do standardized ISO 14001 environmental management systems lead to heterogeneous environmental outcomes? *business strategy and the environment*, 18(7), 469-486.
- Zameer, H., Wang, Y., & Yasmeen, H. (2020). Reinforcing green competitive advantage through green production, creativity and green brand image: implications for cleaner production in China. *Journal of cleaner production*, 247, 119119.
- Zhu, Q., Cordeiro, J., & Sarkis, J. (2013). Institutional pressures, dynamic capabilities and environmental management systems: Investigating the ISO 9000–Environmental management system implementation linkage. *Journal of environmental management*, 114, 232-242.

CAPÍTULO VI

Discusión y Conclusión general

Discusión general

En el contexto de cambio global, que ejerce una presión sobre los ecosistemas, es fundamental comprender cómo responderán los organismos a un entorno cada vez más variable. Esto resulta especialmente relevante para especies de importancia comercial, que enfrentarán un aumento en la frecuencia de eventos extremos (Carrasco et al., 2023; Ummenhofer & Meehl, 2017; Yévenes et al., 2021). Entender las respuestas de estos los organismos no solo aporta información clave para la biología evolutiva – al considerar aspectos de adaptación y la resiliencia de las especies (Kawecki & Ebert, 2004; Savolainen et al., 2013) - sino que también constituye un pilar fundamental para los responsables de formular políticas públicas orientadas a promover la sostenibilidad con una mirada ecosistémica.

Este estudio interdisciplinario considera enfoques de la socioecología, oceanografía, fisiología y genética, proporcionando una visión más completa de interrogantes e interacciones complejas. Al profundizar en la respuesta de los organismos a variables ambientales como la temperatura, la salinidad y el pH, se busca entender cómo estos se desempeñan en escenarios, tanto actuales o futuros (**Capítulo III**). Esta información puede ofrecer a la industria mitilicultora una base para aplicaciones prácticas, como la planificación espacial y un eventual sistema de certificación que contribuya a las dinámicas de mercado en la comercialización de semillas. Además, este trabajo destaca algunos de los desafíos presentes en la industria, tales como la informalidad en el mercado de semillas y la necesidad de establecer definiciones claras en torno a términos comúnmente utilizados (**Capítulo IV**). Asimismo, se realiza una revisión sistemática (**Capítulo V**) donde se expone el uso de esquemas de certificación en diversas áreas.

Los conocimientos y limitantes identificados pueden ser fundamentales para informar estrategias que equilibren las demandas en la industria. Esta información podría no solo contribuir a la sostenibilidad, sino también a una planificación más eficiente, orientada a reducir los impactos derivados de la intensificación de eventos extremos cada vez más frecuentes y destructivos (Garner, 2023; Ummenhofer & Meehl, 2017).

Comprendiendo las respuestas fisiológicas frente a la variabilidad ambiental

Los invertebrados marinos, como *Mytilus chilensis*, presentan una diversidad de respuestas frente a la heterogeneidad ambiental (Duarte et al., 2014, 2015; Lassoued et al., 2021). En este contexto, la plasticidad fenotípica permite a los organismos ajustar su fisiología, comportamiento y rendimiento en respuesta a un entorno fluctuante, como la zona intermareal (Chevin & Hoffmann, 2017; Donelson et al., 2023; Pigliucci, 2001; Regan & Sheldon, 2023; Sultan, 1987; Whitman & Agrawal, 2009).

Este estudio interdisciplinario, evalúa como los regímenes de variabilidad ambiental influyen en la respuesta fisiológica del *Mytilus chilensis* recolectadas en sitios ambientalmente contrastantes - Seno (Metri), Fiordo (Puelo) y Bahía (Caleta El Manzano) - mediante la caracterización de sus regímenes de variabilidad y predictibilidad ambiental, así como el análisis de curvas de desempeño fisiológico, considerando la tasa de aclaramiento en función de un gradiente de temperatura, salinidad y pH. Adicionalmente, se comparó la diversidad y estructura genética de los organismos experimentales (**Publicación 1**).

Los resultados del **Capítulo III** señalan que existen patrones contrastantes de plasticidad entre los sitios, que se ven influenciados por la variabilidad ambiental y la predictibilidad en su conjunto (**Publicación 1**). Asimismo, la variación intraespecífica observada en la forma de las curvas sugiere que los regímenes ambientales locales ejercen presiones selectivas que modulan la fisiología y el desempeño de los mejillones a pesar de encontrarse en pequeñas escalas espaciales (**Castillo et al., 2024**; Kellermann et al., 2019).

Aunque los tres sitios compartían un ciclo estacional común, los análisis de las series de tiempo revelaron diferencias en los regímenes de variabilidad de temperatura, salinidad y pH (**Castillo et al., 2024**; Narváez et al., 2019; Vergara-Jara et al., 2019). Esto puede ser producto de diversos factores como lluvias estacionales e influencias de agua dulce provenientes de la Cordillera de los Andes (León-Muñoz et al., 2021). Los análisis de exponentes espectrales (β) son útiles para estudiar la variabilidad temporal de una señal en diferentes escalas de tiempo (Vasseur & Yodzis, 2004). Esto resulta especialmente valioso en estudios

ambientales y ecológicos, donde la predictibilidad ambiental se considera fundamental para entender cómo una variable ambiental de interés puede afectar a los organismos (Ruokolainen et al., 2009). En este contexto, el estudio muestra que, aunque la predictibilidad ambiental es similar entre los sitios, siendo el fiordo el más impredecible para temperatura y salinidad. Este hallazgo probablemente se deba a fluctuaciones de alta frecuencia impulsadas por ciclos diarios o de mareas, además de la influencia del ciclo hidrológico desde el río Puelo, principal fuente de agua dulce en la zona (León-Muñoz et al., 2021). Estudios empíricos sugieren que los organismos expuestos a entornos más predecibles tienden a mostrar respuestas más plásticas, lo que potencialmente favorece la adaptación local y/o la evolución de la plasticidad fenotípica (Burgess & Marshall, 2011; Palumbi et al., 2019; Schaum and Collins, 2014; Vargas et al., 2017).

Los resultados de las curvas de desempeño fisiológico de *Mytilus chilensis* (**Figura 3.3, Publicación 1**) evidenciaron diferencias significativas en la tasa de aclaramiento entre los organismos de distintos sitios geográficos en respuesta a todas las variables ambientales evaluadas (**Tabla 3.2, Publicación 1**). Por ejemplo, los mejillones de Puelo exhibieron el óptimo térmico (T_{opt}) y el rendimiento máximo ($P_{máx}$) más alto en comparación con los mejillones de Metri y El Manzano. Esto sugiere que los mejillones de Puelo presentan un mejor desempeño a temperaturas más elevadas, lo cual podría reflejar una posible especialización producto de las condiciones ambientales locales. En contraste, los mejillones de Metri mostraron un rango de tolerancia (T_{br}) más amplio, lo que podría indicar una estrategia más generalista frente a la temperatura (**Castillo et al., 2024**; Schaum et al., 2022). Además, el rango de tolerancia térmica de los organismos coincidió con la frecuencia ambiental experimentada en sus respectivos sitios geográficos (**Figura 3.2**). Organismos expuestos regularmente a temperaturas más altas o extremas tienden a desarrollar óptimos térmicos superiores (Kroecker et al., 2020; Tomanek & Somero, 2000) lo que respalda los resultados y la idea que la plasticidad es inducida por señales ambientales que influyen la tolerancia de los organismos (Kellermann et al., 2019; Kingsolver and Buckley, 2017).

En cuanto a la respuesta a la salinidad, los mejillones de El Manzano

alcanzaron el valor de P_{max} más alta en condiciones de alta salinidad ($S_{opt}= 33.6$ psu), aunque su amplitud de tolerancia a la salinidad es relativamente estrecho ($S_{br}= 8.93$ psu). Esto indica que estos organismos pueden ser más especialistas en cuanto a salinidad. En contraste, los mejillones del fiordo mostraron una mayor tolerancia frente el gradiente de salinidad ($S_{br} = 25,7$ psu), con un S_{opt} inclinado hacia condiciones de baja salinidad ($S_{opt} = 18,4$ psu). Esta mayor amplitud de tolerancia en mejillones del fiordo sugiere que están mejor preparados para entornos con fluctuaciones más amplias de salinidad, una característica que podría ser crucial para su supervivencia en ecosistemas donde las condiciones de salinidad varían drásticamente (Wernberg et al., 2012).

Finalmente, la respuesta al pH de los mejillones del fiordo mostró el valor más alto de P_{max} en relación con la tasa de aclaramiento ($350 \text{ mL g}^{-1} \text{ h}^{-1}$), lo que indica una alta capacidad de respuesta en ambientes con condiciones de pH variables. Sin embargo, los mejillones de El Manzano exhibieron una mayor amplitud de respuesta en términos de pH ($pH_{br} = 0,81$), lo que sugiere una mayor tolerancia a las fluctuaciones de pH. Esto podría estar asociado a la menor variabilidad de pH en este sitio en comparación con el fiordo, donde las fluctuaciones de pH son más extremas y predecibles ($\beta = -1$).

La diversidad genética es fundamental para la adaptación y evolución de las poblaciones (Hughes et al., 2008; Yévenes et al., 2022). Los resultados de este estudio, al comparar la diversidad y estructura genética entre los respectivos sitios, revelaron valores bajos de heterocigosidad y una variación mínima en la diversidad de nucleótidos y reducidos valores de F_{IS} y F_{ST} . Estos valores bajos de F_{ST} son consistentes con estudios previos basados en el análisis de alozimas y microsatélites (Araneda et al., 2016; Larraín et al., 2014). Esta alta diversidad genética y baja diferenciación entre los organismos de distinta procedencia, atribuible al alto flujo genético mediado por las larvas, la estrategia de la especie y la translocación de individuos producto de la acuicultura (Toro et al., 2004; Astorga et al., 2010; Haye & Segovia, 2023).

Sin embargo, la adaptación depende exclusivamente de la diversidad genética, sino también de mecanismos epigenéticos como la metilación del ADN y

modificaciones de la cromatina, los cuales pueden ser influenciados por el ambiente y heredarse entre generaciones (Bossdorf et al., 2007; Lamka et al., 2022). Estos mecanismos ofrecen una respuesta rápida a las perturbaciones ambientales, complementando la herencia genética en la evolución de fenotipos adaptativos y regulando la expresión en diferentes contextos biológicos, fisiológicos y ecológicos (Yévenes et al., 2024).

Estos hallazgos contribuyen a una mejor comprensión de la relación del régimen ambiental y de la fisiología de los organismos (Gaitán-Espitia et al., 2013; Rodríguez-Romero et al., 2022), lo cual es esencial para promover la sostenibilidad y resiliencia del sistema socioecológico (Willot et al. 2019). Las curvas de desempeño, además, proporcionan información valiosa para optimizar las prácticas de cultivo, ya que la tasa de aclaramiento de los mejillones está directamente asociada con la conversión de nutrientes en estructura y masa muscular, factores claves para la productividad (Brauner and Richards, 2020; Johnston, 2001).

Esta información pudiese ser utilizada por la industria al considerar la procedencia de los organismos al momento de adquirir semillas, seleccionando aquellas que respondan mejor a la ubicación de su centro de cultivo. Los organismos generalistas, adaptados a entornos fluctuantes, presentan curvas amplias pero planas (Schaum et al., 2022), como las observadas en los ejemplares procedentes del Fiordo (**Figura 6.1**). En contraste, los especialistas, con rangos de tolerancia estrechos y adaptados a entornos estables, muestran curvas más pronunciadas, como es el caso de los organismos del El Manzano (salinidad). Estos resultados resaltan la importancia de realizar mediciones de campo y establecer un monitoreo ambiental de las variables relevantes, promoviendo la sostenibilidad y la resiliencia del sistema socioecológico (Willot et al. 2019).

Este estudio también enfrentó diversas limitaciones y desafíos, exacerbados por la pandemia de COVID-19. El cierre temporal de la universidad afectó el acceso a instalaciones esenciales para la investigación como, por ejemplo, laboratorios. Además, la manipulación de organismos vivos, especialmente considerando que se trabajó con más de mil ejemplares, presentó un reto logístico considerable, aumentando la complejidad de los experimentos.

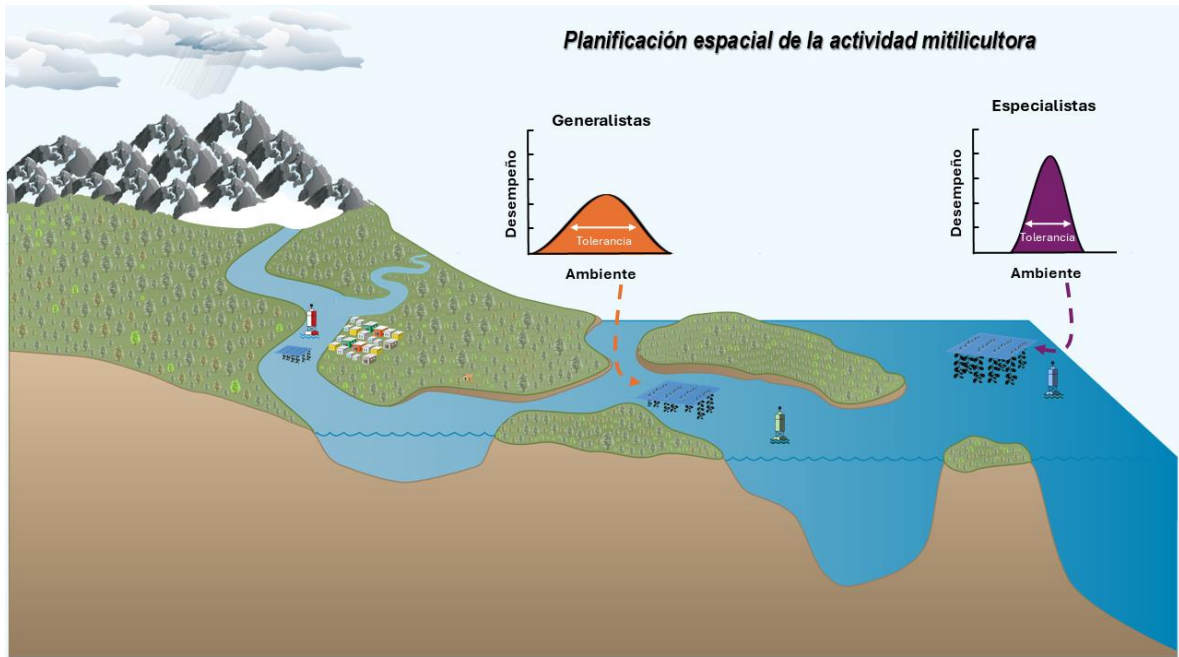


Figura 6.1: Diagrama de planificación espacial de la mitilicultura a partir de curvas de rendimiento representando la respuesta de organismos generalistas (curva naranja) y especialistas (curva morado) a distintos tipos de ambientes. Fuente: Elaboración propia.

Desafíos de la Industria y el Cambio Global

El cambio global plantea desafíos significativos para la industria mitilicultora, como el aumento de la temperatura y los efectos de la acidificación del océano en los organismos (Castillo et al., 2017; Duarte et al., 2014, 2015; Navarro et al., 2013; Ponce et al., 2019). Estos cambios no solo tienen consecuencias ecológicas, sino también potenciales repercusiones socioeconómicas (De Silva & Soto, 2009; Steeves & Filgueira, 2019). La vulnerabilidad del sector es evidente (Rivera et al., 2017), especialmente porque depende exclusivamente de la recolección de semillas de bancos naturales, cuya disponibilidad varía considerablemente entre años (Figueroa & Dresdner, 2016; Molinet Flores et al., 2015; Oyarzún et al., 2011).

Por otro lado, la informalidad del mercado se manifiesta en una falta de regulación y un bajo poder de negociación, lo cual dificulta el desarrollo de prácticas sostenibles y la implementación de mejoras tecnológicas (Salazar et al., 2018). A partir las entrevistas semi-estructuradas (**Figura 4.3**), se observó una falta de

consenso en torno a definiciones claves (Manuscrito en preparación - **Capítulo IV**). Un ejemplo relevante de esto es el término "calidad de semillas", utilizado frecuentemente, pero que los entrevistados interpretan de maneras diversas según su percepción. Aunque esta falta de consenso no representa un problema inmediato para la industria, establecer una definición unificada de definiciones de importancia, podría mejorar las negociaciones y la transparencia en el sector. Esto resulta especialmente relevante en el contexto del cambio global, donde términos como 'calidad' podría relacionarse con la tolerancia a condiciones ambientales extremas.

Iniciativas como los sistemas de certificación podrían ser clave para establecer conceptos y criterios en el sector, considerando la importancia del mercado y fomentando prácticas más sostenibles (Saha, 2022). Implementar un sistema de certificación que promueva la transparencia y brinde información a los compradores podría beneficiar al sector miticultor, proporcionando garantías tanto para los compradores como a vendedores (Erazo-Killer, 2011; Kraxner et al., 2014; Saha, 2022). Aunque las relaciones de compra-venta de semillas son fundamentales en la industria miticultora, no se conoce sobre certificaciones de insumos en este sector. Una revisión sistemática de la literatura (**Capítulo V**) explora diversas aplicaciones de certificación en diferentes industrias y analiza tendencias, incluida la distribución geográfica de las publicaciones, destacando a Europa como líder en productividad investigativa (49%), seguida de América del Sur (6%).

Basándose en esta revisión (**Publicación 3**), se analizaron publicaciones entre 1999 y 2022 para brindar una perspectiva integral sobre las prácticas de certificación en las últimas dos décadas, abarcando tendencias de productividad y distribución geográfica. Estados Unidos lidera en cantidad de estudios (277 publicaciones, 12.07%), seguido de China (8.15%), Italia (8.06%) y España (7.49%). A nivel regional, Europa destaca con un 49% de las publicaciones, mientras que América del Sur (6%) y otras regiones muestran menor participación investigativa. Además, el análisis de redes de co-ocurrencia revela tres categorías principales en el ámbito de las certificaciones: sostenibilidad, ingeniería, y negocios y economía, cada una con varios clústeres temáticos.

La revisión sistemática (**Publicación 3**) demuestra que las organizaciones utilizan esquemas de certificación no solo para gestionar riesgos ambientales, sino también para armonizar sus operaciones frente a las presiones de diversas partes interesadas, promoviendo así prácticas organizacionales más sostenibles. De esta manera, un sistema de certificación podría mejorar la transparencia, actuar como una herramienta estratégica y fortalecer la confianza en el mercado (Erazo-Killer, 2011; Kraxner et al., 2014; Saha, 2022).

Si bien sectores como la agricultura y los sistemas forestales han avanzado en la implementación de estos sistemas de certificación (Maulu et al., 2021; Saha, 2022), optimizando el ciclo de vida de sus productos, el cambio global plantea aún desafíos complejos y requiere mayor investigación. Sin duda, adoptar esquemas de certificación es una estrategia efectiva para enfrentar los retos ambientales derivados del cambio global (Díaz Tautiva et al., 2022; Masson-Delmotte et al., 2019).

Aun así, la desconfianza expresada hacia las instituciones sugiere que, en caso de implementar un sistema de certificación, este debería ser administrado por una entidad independiente y con el respaldo de los actores de la industria. Esto permitiría asegurar la credibilidad y efectividad del programa, promoviendo prácticas sostenibles y la transparencia en la cadena de producción. En este sentido, la certificación podría posicionarse como una herramienta crucial para mantener a Chile como uno de los principales productores de mejillones, alineando la sostenibilidad con el crecimiento impulsado por la demanda internacional.

Concientizar e informar sobre cómo el ambiente influye en el rendimiento de los organismos optimizaría las prácticas de cultivo. Sin embargo, la dependencia de bancos naturales sigue siendo un desafío debido a que abastecerse de semillas provenientes de hatcheries sigue siendo lejana por los altos costos (Carrasco et al., 2014; Paquet et al., 2011).

No obstante, investigaciones interdisciplinarias como la presente, integran conocimientos fisiológicos, de gestión y socioecológicos, permiten vislumbrar soluciones sostenibles. Tal como se expuso, juveniles de *Mytilus chilensis* muestran respuestas específicas a las condiciones ambientales contrastantes según sus

áreas de origen. Estas respuestas adaptativas no solo evidencian la plasticidad del mejillón frente a la variabilidad ambiental, sino también el potencial de aplicar estos conocimientos en estrategias de manejo para fortalecer la resiliencia de la industria frente al cambio global.

Este estudio también enfrentó importantes limitaciones, siendo una de las principales la pandemia, la cual dificultó la interacción y la construcción de relaciones de confianza con los entrevistados, ya que las entrevistas debieron realizarse a través de plataformas digitales. La falta de experiencia en el levantamiento de información primaria por medio de instrumentos como entrevistas – dada mi formación académica – sumado a la complejidad inherente que conlleva la certificación, pudo haber afectado en la respuesta de los actores. Adicionalmente, la desconfianza hacia las instituciones públicas y privadas constituye otra barrera significativa, sumada a la heterogeneidad socioeconómica de los participantes de la industria, resalta desafíos adicionales para abordar estos temas de manera efectiva.

Esta heterogeneidad de actores plantea un desafío importante de enfatizar, que cada grupo tiene distintas prioridades y percepciones basadas en sus experiencias previas (Rivera et al., 2017; San Martín et al., 2020), lo cual genera enfoques divergentes respecto a los problemas y soluciones (Jentoft y Chuenpagdee, 2013). Estas diferencias tienden a limitar la cooperación entre los actores y dificultan la gobernanza (Fleming et al., 2014; Rivera et al., 2017). Para implementar estrategias de gestión y certificación efectivas, es fundamental que todos los actores colaboren, y que las estrategias a considerar sean adecuadas a las necesidades de cada grupo (Mahon et al., 2008). En este contexto, las curvas de desempeño destacan como una herramienta útil para enfrentar estos desafíos, con un enfoque en los procesos de certificación y en la planificación espacial de la actividad.

A partir de esta tesis doctoral surgen nuevas interrogantes en torno a la biología del cambio global y los componentes sociales de la acuicultura. Entre ellas, resulta relevante explorar cuál es la preferencia predominante en la industria del *M. chilensis*: ¿favorecer el cultivo de organismos ‘más plásticos’ y, por tanto, capaces de responder a eventos climáticos extremos, o priorizar el crecimiento para

maximizar su producción? ¿Es viable implementar un sistema de certificación? También es pertinente cuestionarse la viabilidad de implementar un sistema de certificación en la industria. Estas preguntas son cruciales para comprender los intereses y prioridades actuales en el sector. Asimismo, investigar si los resultados de plasticidad observados se mantienen o varían a lo largo del tiempo aportando información clave para el diseño de futuras estrategias de manejo y producción. Finalmente, avanzar hacia la co-construcción de definiciones comúnmente compartidas entre los actores construiría un paso fundamental para unificar un lenguaje, facilitando transacciones de compra-venta y el desarrollo sistemas de certificación efectivos.

Conclusiones

- Las semillas de *Mytilus chilensis* provenientes de distintas áreas muestran diferencias significativas en su tasa de aclaramiento en todas las variables ambientales analizadas. Estos resultados sugieren que las semillas modulan su respuesta a partir de la zona geográfica de procedencia.
- A pesar de las diferencias en el desempeño fisiológico, no se encontraron diferencias en la estructura genética, por lo que la tolerancia y el rendimiento observado está influenciado, en su conjunto, por la variabilidad y predictibilidad ambiental.
- La adopción de un eventual sistema de certificación podría ofrecer estrategias adecuadas a cada grupo de actores, unificar definiciones considerando los desafíos actuales, promoviendo la sostenibilidad y manteniendo a Chile como un líder en el mercado internacional de mejillones.
- Términos comúnmente utilizados en la industria podrían modificarse, debido a la influencia del cambio global. Esto subraya el potencial de las curvas de desempeño como una herramienta útil para enfrentar estos desafíos, con un enfoque en los procesos de certificación y en la planificación espacial de la actividad.
- A partir de los antecedentes expuestos, se acepta la **hipótesis 1** (H_1) para las variables ambientales de temperatura y salinidad. Esto se debe a que los organismos procedentes del sitio menos predecible (Puelo) presenta una mayor amplitud respecto a la tolerancia de las condiciones ambientales mencionadas.
- También, se acepta la **hipótesis 2** (H_2), ya que la información obtenida a partir de los experimentos realizados sobre curvas de desempeño fisiológico pudiese ser utilizada por los centros de engorda como una medida de adaptación a eventos extremos, considerando las características ambientales mediante un tentativo sistema de certificación. Cabe destacar que es necesario indagar más en este aspecto.

CAPÍTULO VII

Referencias generales

Referencias generales

- Adger, W. N. (2006). Vulnerability. *Global Environmental Change*, 16(3), 268–281.
- Aguayo, R., León-Muñoz, J., Vargas-Baecheler, J., Montecinos, A., Garreaud, R., Urbina, M., Soto, D. & Iriarte, J. L. (2019). The glass half-empty: climate change drives lower freshwater input in the coastal system of the Chilean Northern Patagonia. *Climatic Change*, 155, 417–435.
- Ahmed, N., Thompson, S. & Glaser, M. (2019). Global aquaculture productivity, environmental sustainability, and climate change adaptability. *Environmental Management*, 63, 159–172.
- Alayo, M., Iturralde, T., Maseda, A. & Aparicio, G. (2021). Mapping family firm internationalization research: bibliometric and literature review. *Review of Managerial Science*, 15(6), 1517–1560.
- Alfnes, F., Guttormsen, A. G., Steine, G. & Kolstad, K. (2006). Consumers' willingness to pay for the color of salmon: a choice experiment with real economic incentives. *American Journal of Agricultural Economics*, 88(4), 1050–1061.
- Allison, E. (2011). *Aquaculture, fisheries, poverty and food security*.
- Anderson, D. A. (2019). *Environmental economics and natural resource management*. Routledge.
- Angelo, M. J. & Reilly-Brown, J. (2014). Whole-System Agricultural Certification: Using Lessons Learned from LEED to Build a Resilient Agricultural System to Adapt to Climate Change. *U. Colo. L. Rev.*, 85, 689.
- Angilletta, M. J. (2009). *Thermal adaptation: a theoretical and empirical synthesis*.
- Araneda, C., Larraín, M. A., Hecht, B. & Narum, S. (2016). Adaptive genetic variation distinguishes Chilean blue mussels (*Mytilus chilensis*) from different marine environments. *Ecology and Evolution*, 6(11), 3632–3644.
- Astorga, M. P., Cárdenas, L., Pérez, M., Toro, J. E., Martínez, V., Farías, A. & Uriarte, I. (2020). Complex spatial genetic connectivity of mussels *Mytilus chilensis* along the southeastern Pacific coast and its importance for resource management. *Journal of Shellfish Research*, 39(1), 77–86.
- Balloux, F. & Lugon-Moulin, N. (2002). The estimation of population differentiation with microsatellite markers. *Molecular Ecology*, 11(2), 155–165.
- Barange, M., Bahri, T., Beveridge, M. C., Cochrane, K. L., Funge-Smith, S. & Poulain, F. (2018). Impacts of climate change on fisheries and aquaculture. *United Nations' Food and Agriculture Organization*, 12(4), 628–635.
- Barria, A., Gebauer, P. & Molinet, C. (2012). Spatial and temporal variability of mytilid larval supply in the Seno de Reloncavi, southern Chile. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 47(3), 461–473.
- Barton, A., Waldbusser, G. G., Feely, R. A., Weisberg, S. B., Newton, J. A., Hales, B., Cudd, S., Eudeline, B., Langdon, C. J. & Jefferds, I. (2015). Impacts of coastal acidification on the Pacific Northwest shellfish industry and adaptation strategies implemented in response. *Oceanography*, 28(2), 146–159.
- Brauner, C. J., & Richards, J. G. (2020). Physiological performance in aquaculture: Using physiology to help define optimal conditions for growth and environmental tolerance. In *Fish physiology* (Vol. 38, pp. 83-121). Academic Press.
- Beldade, P., Mateus, A. R. A. & Keller, R. A. (2011). Evolution and molecular mechanisms of adaptive developmental plasticity. *Molecular Ecology*, 20(7), 1347–1363.
- Béné, C., Barange, M., Subasinghe, R., Pinstrup-Andersen, P., Merino, G., Hemre, G.-I. & Williams, M. (2015). Feeding 9 billion by 2050—Putting fish back on the menu. *Food Security*, 7, 261–274.

- Bennett, N. J., Finkbeiner, E. M., Ban, N. C., Belhabib, D., Jupiter, S. D., Kittinger, J. N., Mangubhai, S., Scholtens, J., Gill, D. & Christie, P. (2020). The COVID-19 pandemic, small-scale fisheries and coastal fishing communities. *Coastal Management*, 48(4), 336–347.
- Bernadochi, L. C., Alves, J. L. & Marques, H. L. de A. (2016). Settlement of juveniles of pearl oyster (*Pinctada imbricata*) on artificial collectors in C araguatatuba, S ao P aulo, B razil. *Aquaculture Research*, 47(2), 424–432.
- Bindoff, N. L., Willebrand, J., Artale, V., Cazenave, A., Gregory, J. M., Gulev, S., Hanawa, K., Le Quere, C., Levitus, S. & Nojiri, Y. (2007). *Observations: oceanic climate change and sea level*.
- Bitter, M. C., Kapsenberg, L., Silliman, K., Gattuso, J.-P. & Pfister, C. A. (2021). Magnitude and predictability of pH fluctuations shape plastic responses to ocean acidification. *The American Naturalist*, 197(4), 486–501.
- Bjørndal, T., Dey, M. & Tusvik, A. (2024). Economic analysis of the contributions of aquaculture to future food security. *Aquaculture*, 578, 740071.
- Blanc, J. M., Molinet, C., Subiabre, R. & Díaz, P. A. (2018). Cadmium determination in Chilean blue mussels *Mytilus chilensis*: Implications for environmental and agronomic interest. *Marine Pollution Bulletin*, 129(2), 913–917.
- Bonamour, S., Chevin, L.-M., Charmantier, A. & Teplitsky, C. (2019). Phenotypic plasticity in response to climate change: the importance of cue variation. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 374(1768), 20180178.
- Bossdorf, O., Richards, C. L., & Pigliucci, M. (2008). Epigenetics for ecologists. *Ecology letters*, 11(2), 106-115.
- Brierley, A. S. & Kingsford, M. J. (2009). Impacts of climate change on marine organisms and ecosystems. *Current Biology*, 19(14), R602–R614.
- Broitman, B. R., Halpern, B. S., Gelcich, S., Lardies, M. A., Vargas, C. A., Vásquez-Lavín, F., Widdicombe, S. & Birchenough, S. N. R. (2017). Dynamic interactions among boundaries and the expansion of sustainable aquaculture. *Frontiers in Marine Science*, 4, 216296.
- Bronnmann, J. & Asche, F. (2017). Sustainable seafood from aquaculture and wild fisheries: Insights from a discrete choice experiment in Germany. *Ecological Economics*, 142, 113–119.
- Burger, F. A., John, J. G. & Frölicher, T. L. (2020). Increase in ocean acidity variability and extremes under increasing atmospheric CO₂. *Biogeosciences*, 17(18), 4633–4662.
- Burger, F.A., Terhaar, J. & Frölicher, T.L. Compound marine heatwaves and ocean acidity extremes. *Nat Commun* 13, 4722 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41467-022-32120-7>
- Burgess, S. C. & Marshall, D. J. (2011). Temperature-induced maternal effects and environmental predictability. *Journal of Experimental Biology*, 214(14), 2329–2336.
- Bustos-Gallardo, B. (2017). The post 2008 Chilean Salmon industry: an example of an enclave economy. *The Geographical Journal*, 183(2), 152–163.
- Cáceres-Martínez, J. & Figueras Huerta, A. (1998). *Mussel (Mytilus galloprovincialis Lamarck) colonization on artificial substrates in the Ria de Vigo of NW Spain*.
- Calosi, P., Melatunan, S., Turner, L. M., Artioli, Y., Davidson, R. L., Byrne, J. J., Viant, M. R., Widdicombe, S. & Rundle, S. D. (2017). Regional adaptation defines sensitivity to future ocean acidification. *Nature Communications*, 8(1), 13994.
- Carrasco, A., Astorga, M., Cisterna, A., Farías, A., Espinoza, V. & Uriarte, I. (2014). Pre-feasibility study for the installation of a Chilean mussel *Mytilus chilensis* (Hupé, 1854) seed hatchery in the lakes region, Chiles. *Fisheries and Aquaculture Journal*.
- Carrasco, Pizarro, O., Jacques-Coper, M. & Narvaez, D. A. (2023). Main drivers of marine heat waves in the eastern South Pacific. *Frontiers in Marine Science*, 10, 1129276.
- Carstensen, J. & Duarte, C. M. (2019). Drivers of pH variability in coastal ecosystems. *Environmental Science & Technology*, 53(8), 4020–4029.

- Castellini, G., Vezzulli, F., Lambri, M., Sacchettini, G., Graffigna, G., Marques, A. & Capri, E. (2022). Perceptions and Liking Distortion from Information about the Nutritional Upgrades in Biofortified Seafood Products. *Foods*, 11(18), 2808.
- 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*. *Fish & Shellfish Immunology*, 70, 149–155.
- Castillo, N. C., 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. *Science of The Total Environment*, 176772.
- Cavalli, L. S., da Rocha, A. F., de Brito, B. G., de Brito, K. C. T. & Rotta, M. A. (2021). Major sustainable development goals applied to aquaculture. *Pesquisa Agropecuária Gaúcha*, 27(1), 110–126.
- Cheng, L., Abraham, J., Trenberth, K. E., Fasullo, J., Boyer, T., Locarnini, R., Zhang, B., Yu, F., Wan, L., Chen, X., Song, X., Lui, Y., Mann, M., Reseghetti, F., Simoncelli, S., Gouretski, V., Chen, G., Mishono, A., Reagan, J., & Zhu, J. (2021). Upper ocean temperatures hit record high in 2020. *Advances in atmospheric science*, Vol. 28.
- Cheng, J., Kao, H. & Dong, S. (2020). Population genetic structure and gene flow of rare and endangered *Tetraena mongolica* Maxim. revealed by reduced representation sequencing. *BMC Plant Biology*, 20, 1–13.
- Chevin, L.-M. & Hoffmann, A. A. (2017). Evolution of phenotypic plasticity in extreme environments. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 372(1723), 20160138.
- Chown, S. L. & Terblanche, J. S. (2006). Physiological diversity in insects: ecological and evolutionary contexts. *Advances in Insect Physiology*, 33, 50–152.
- Cornwall, C. E. & Hurd, C. L. (2016). Experimental design in ocean acidification research: problems and solutions. *ICES Journal of Marine Science*, 73(3), 572–581.
- Council, N. R., Earth, D. on, Studies, L., Sciences, B. on A. & Concentrations, C. on S. T. for A. G. G. (2011). *Climate stabilization targets: emissions, concentrations, and impacts over decades to millennia*. National Academies Press.
- Cowen, R. K. & Sponaugle, S. (2009). Larval dispersal and marine population connectivity. *Annual Review of Marine Science*, 1, 443–466.
- De Silva, S. S. & Soto, D. (2009). Climate change and aquaculture: potential impacts, adaptation and mitigation. *Climate Change Implications for Fisheries and Aquaculture: Overview of Current Scientific Knowledge. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper*, 530, 151–212.
- Detree, C., Núñez-Acuña, G., Roberts, S. & Gallardo-Escarate, C. (2016). Uncovering the complex transcriptome response of *Mytilus chilensis* against saxitoxin: implications of harmful algal blooms on mussel populations. *PloS One*, 11(10), e0165231.
- DGA. (2017). *Atlas del agua Chile 2016*.
- Diaz, F., Kuijper, B., Hoyle, R. B., Talamantes, N., Coleman, J. M. & Matzkin, L. M. (2021). Environmental predictability drives adaptive within-and transgenerational plasticity of heat tolerance across life stages and climatic regions. *Functional Ecology*, 35(1), 153–166.
- Diaz Tautiva, J. A., Rifo Rivera, F. I., Barros Celume, S. A. & Rifo Rivera, S. A. (2024). Mapping the research about organisations in the latin american context: a bibliometric analysis. *Management Review Quarterly*, 74(1), 121–169.
- Dickey, T. D. (2003). Emerging ocean observations for interdisciplinary data assimilation systems. *Journal of Marine Systems*, 40, 5–48.
- Donelson, J. M., Gaitan-Espitia, J. D., Hobday, A. J., Mokany, K., Andrew, S. C., Boulter, S., Cook, C. N., Dickson, F., Macgregor, N. A. & Mitchell, N. J. (2023). Putting plasticity into

- practice for effective conservation actions under climate change. *Nature Climate Change*, 13(7), 632–647.
- Donelson, J. M., Sunday, J. M., Figueira, W. F., Gaitán-Espitia, J. D., Hobday, A. J., Johnson, C. R., Leis, J. M., Ling, S. D., Marshall, D. & Pandolfi, J. M. (2019). Understanding interactions between plasticity, adaptation and range shifts in response to marine environmental change. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 374(1768), 20180186.
- Doney, S. C., Fabry, V. J., Feely, R. A. & Kleypas, J. A. (2009). Ocean acidification: the other CO₂ problem. *Annual Review of Marine Science*, 1, 169–192.
- Doney, S. C., Ruckelshaus, M., Emmett Duffy, J., Barry, J. P., Chan, F., English, C. A., Galindo, H. M., Grebeiner, J. M., Hollowed, A. B. & Knowlton, N. (2012). Climate change impacts on marine ecosystems. *Annual Review of Marine Science*, 4, 11–37.
- Doney, S. C., Busch, D. S., Cooley, S. R., & Kroeker, K. J. (2020). The impacts of ocean acidification on marine ecosystems and reliant human communities. *Annual Review of Environment and Resources*, 45(1), 83–112.
- Doubleday, Z. A., Clarke, S. M., Li, X., Pecl, G. T., Ward, T. M., Battaglione, S., Frusher, S., Gibbs, P. J., Hobday, A. J. & Hutchinson, N. (2013). Assessing the risk of climate change to aquaculture: a case study from south-east Australia. *Aquaculture Environment Interactions*, 3(2), 163–175.
- Drinkwater, K. F., Beaugrand, G., Kaeriyama, M., Kim, S., Ottersen, G., Perry, R. I., Pörtner, H.-O., Polovina, J. J. & Takasuka, A. (2010). On the processes linking climate to ecosystem changes. *Journal of Marine Systems*, 79(3–4), 374–388.
- Duarte, C. M. & Cebrián, J. (1996). The fate of marine autotrophic production. *Limnology and Oceanography*, 41(8), 1758–1766.
- Duarte, Navarro, J. M., Acuña, K., Torres, R., Manríquez, P. H., Lardies, M. A., Vargas, C. A., Lagos, N. A. & Aguilera, V. (2014). Combined effects of temperature and ocean acidification on the juvenile individuals of the mussel *Mytilus chilensis*. *Journal of Sea Research*, 85, 308–314.
- Duarte, Navarro, J. M., Acuña, K., Torres, R., Manríquez, P. H., Lardies, M. A., Vargas, C. A., Lagos, N. A. & Aguilera, V. (2015). Intraspecific variability in the response of the edible mussel *Mytilus chilensis* (Hupe) to ocean acidification. *Estuaries and Coasts*, 38, 590–598.
- Dube, K. (2024). A Comprehensive Review of Climatic Threats and Adaptation of Marine Biodiversity. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(2), 344.
- Ellegaard, O. & Wallin, J. A. (2015). The bibliometric analysis of scholarly production: How great is the impact? *Scientometrics*, 105, 1809–1831.
- Endler, J. A. (1986). *Natural selection in the wild* (Issue 21). Princeton University Press.
- Erazo-Killer, A. (2011). Directrices técnicas para la certificación en acuicultura. *Versión Aprobado Por Los Miembros El Comité de Pesca (COFI) En Su Vigésimo Novena Sesión Celebrada En Roma, Italia Del*, 31.
- FAO. (2022). *El estado mundial de la pesca y la acuicultura (SOFIA)*.
- Fernández, P. A., Gaitán-Espitia, J. D., Leal, P. P., Schmid, M., Revill, A. T. & Hurd, C. L. (2020). Nitrogen sufficiency enhances thermal tolerance in habitat-forming kelp: implications for acclimation under thermal stress. *Scientific Reports*, 10(1), 3186.
- Fernández, Ponce, R. D., Vásquez-Lavin, F., Figueroa, Y., Gelcich, S. & Dresdner, J. (2018). Exploring typologies of artisanal mussel seed producers in southern Chile. *Ocean & Coastal Management*, 158, 24–31.
- Figueroa, Y. & Dresdner, J. (2016). Are mussel seed producers responsive to economic incentives? Empirical evidence from the Benthic Resource Management Areas in Chile. *Aquaculture Economics & Management*, 20(3), 283–311.
- Fleming, A., Hobday, A. J., Farmery, A., van Putten, E. I., Pecl, G. T., Green, B. S., & Lim-Camacho, L. (2014). Climate change risks and adaptation options across Australian seafood supply chains—A preliminary assessment. *Climate Risk Management*, 1, 39–50.

- Froehlich, H. E., Gentry, R. R. & Halpern, B. S. (2018). Global change in marine aquaculture production potential under climate change. *Nature Ecology & Evolution*, 2(11), 1745–1750.
- Frölicher, T. L., Ramseyer, L., Raible, C. C., Rodgers, K. B. & Dunne, J. (2020). Potential predictability of marine ecosystem drivers. *Biogeosciences*, 17(7), 2061–2083.
- Gaines, S., Gaylor, B., Gerber, L. R., Hastings, A. & Kinlan, B. P. (2007). Connecting places: the ecological consequences of dispersal in the sea. *Oceanography*, 20(3), 90–99.
- Gaitán-Espitia, J. D., Bacigalupe, L. D., Opitz, T., Lagos, N. A., Osorio, S. & Lardies, M. A. (2017). Exploring physiological plasticity and local thermal adaptation in an intertidal crab along a latitudinal cline. *Journal of Thermal Biology*, 68, 14–20.
- Gaitán-Espitia, J. D., Belén Arias, M., Lardies, M. A. & Nespolo, R. F. (2013). Variation in thermal sensitivity and thermal tolerances in an invasive species across a climatic gradient: lessons from the land snail *Cornu aspersum*. *PLoS One*, 8(8), e70662.
- Garner, A. J. (2023). Observed increases in North Atlantic tropical cyclone peak intensification rates. *Scientific Reports*, 13(1), 16299.
- Garreaud, R. D., Boisier, J. P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H. H. & Veloso-Aguila, D. (2020). The central Chile mega drought (2010–2018): a climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology*, 40(1), 421–439.
- Gehlen, M., Barciela, R., Bertino, L., Brasseur, P., Butenschön, M., Chai, F., Crise, A., Drillet, Y., Ford, D. & Lavoie, D. (2015). Building the capacity for forecasting marine biogeochemistry and ecosystems: recent advances and future developments. *Journal of Operational Oceanography*, 8(sup1), s168–s187.
- Ghalambor, C. K., McKay, J. K., Carroll, S. P. & Reznick, D. N. (2007). Adaptive versus non-adaptive phenotypic plasticity and the potential for contemporary adaptation in new environments. *Functional Ecology*, 21(3), 394–407.
- Gissi, E., Manea, E., Mazaris, A. D., Fraschetti, S., Almpantidou, V., Bevilacqua, S., Coll, M., Guarneri, G., Lloret-Lloret, E. & Pascual, M. (2021). A review of the combined effects of climate change and other local human stressors on the marine environment. *Science of the Total Environment*, 755, 142564.
- Gobler, C. J. & Baumann, H. (2016). Hypoxia and acidification in ocean ecosystems: coupled dynamics and effects on marine life. *Biology Letters*, 12(5), 20150976.
- González, Á. F. & Rivero, J. G. (2013). *Acuicultura y globalización: el caso de la industria del mejillón*. Asociación Española de Historia Económica.
- Gonzalez-Poblete, E., Rojo, C. & Norambuena, R. (2018). Blue mussel aquaculture in Chile: Small or large scale industry? *Aquaculture*, 493, 113–122.
- Grel, L. Le & Bihan, V. Le. (2009). Oyster farming and externalities: the experience of the Bay of Bourgneuf. *Aquaculture Economics & Management*, 13(2), 112–123.
- Grosberg, R. & Cunningham, C. W. (2001). Genetic structure in the sea. *Marine Community Ecology*, 61–84.
- Hamilton, S. L., Regetz, J. & Warner, R. R. (2008). Postsettlement survival linked to larval life in a marine fish. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(5), 1561–1566.
- Handisyde, N., Telfer, T. C. & Ross, L. G. (2017). Vulnerability of aquaculture-related livelihoods to changing climate at the global scale. *Fish and Fisheries*, 18(3), 466–488.
- Harley, C. D. G., Randall Hughes, A., Hultgren, K. M., Miner, B. G., Sorte, C. J. B., Thornber, C. S., Rodriguez, L. F., Tomanek, L. & Williams, S. L. (2006). The impacts of climate change in coastal marine systems. *Ecology Letters*, 9(2), 228–241.
- Hedrick, P. W. (2009). *Genetics of populations*. Jones & Bartlett Publishers.
- Hernandez, V. J. M. (1976). Observaciones sobre el comportamiento de mitilidos chilenos en cultivo suspendido. 1 chorito (*Mytilus chilensis*, Hupe, 1854). *Investigación Pesquera (Chile)*. No. 22.

- Hobday, A. J., Oliver, E. C. J., Gupta, A. Sen, Benthuyssen, J. A., Burrows, M. T., Donat, M. G., Holbrook, N. J., Moore, P. J., Thomsen, M. S. & Wernberg, T. (2018). Categorizing and naming marine heatwaves. *Oceanography*, 31(2), 162–173.
- Hobday, A. J., Spillman, C. M., Paige Eveson, J. & Hartog, J. R. (2016). Seasonal forecasting for decision support in marine fisheries and aquaculture. *Fisheries Oceanography*, 25, 45–56.
- Hoffman, R. S. & Torres, M. (2011). Cosechadora semindustrial de choritos. *CODESSER*.
- Hoffmann, A. A. & Sgrò, C. M. (2011). Climate change and evolutionary adaptation. *Nature*, 470(7335), 479–485.
- Hoque, M. Z., Akhter, N. & Chowdhury, M. S. R. (2022). Consumers' preferences for the traceability information of seafood safety. *Foods*, 11(12), 1675.
- Huey, R. B. & Kingsolver, J. G. (1989). Evolution of thermal sensitivity of ectotherm performance. *Trends in Ecology & Evolution*, 4(5), 131–135.
- Huey, R. B. & Kingsolver, J. G. (2011). Variation in universal temperature dependence of biological rates. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(26), 10377–10378.
- Huey, R. B. & Stevenson, R. D. (1979). Integrating thermal physiology and ecology of ectotherms: a discussion of approaches. *American Zoologist*, 19(1), 357–366.
- IPCC. (2021). Climate change 2021: the physical science basis. *Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 2(1), 2391.
- Iriarte, J. L., González, H. E. & Nahuelhual, L. (2010). Patagonian fjord ecosystems in southern Chile as a highly vulnerable region: problems and needs. *Ambio*, 39, 463–466.
- Kapsenberg, L. & Hofmann, G. E. (2016). Ocean pH time-series and drivers of variability along the northern Channel Islands, California, USA. *Limnology and Oceanography*, 61, 953–968.
- Kawecki, T. J. & Ebert, D. (2004). Conceptual issues in local adaptation. *Ecology Letters*, 7(12), 1225–1241.
- Kellermann, V., Chown, S. L., Schou, M. F., Aitkenhead, I., Janion-Scheepers, C., Clemson, A., Scott, M. T. & Sgrò, C. M. (2019). Comparing thermal performance curves across traits: how consistent are they? *Journal of Experimental Biology*, 222(11), jeb193433.
- Kingsolver, J. G., Massie, K. R., Shlichta, J. G., Smith, M. H., Ragland, G. J. & Gomulkiewicz, R. (2007). Relating environmental variation to selection on reaction norms: an experimental test. *The American Naturalist*, 169(2), 163–174.
- Kraxner, F., Shchepashchenko, D., Fuss, S., Lunnan, A., Aoki, K. & Shvidenko, A. (2014). *Global forest management certification: future development potential*.
- Laikre, L., Hoban, S., Bruford, M. W., Segelbacher, G., Allendorf, F. W., Gajardo, G., Rodríguez, A. G., Hedrick, P. W., Heuertz, M. & Hohenlohe, P. A. (2020). Post-2020 goals overlook genetic diversity. *Science*, 367(6482), 1083–1085.
- Lamka, G. F., Harder, A. M., Sundaram, M., Schwartz, T. S., Christie, M. R., DeWoody, J. A., & Willoughby, J. R. (2022). Epigenetics in ecology, evolution, and conservation. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 10, 871791.
- 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.
- Larraín, M. A., Díaz, N. F., Lamas, C., Uribe, C. & Araneda, C. (2014). Traceability of mussel (*Mytilus chilensis*) in southern Chile using microsatellite molecular markers and assignment algorithms. Exploratory survey. *Food Research International*, 62, 104–110.
- Lassoued, J., Padín, X. A., Comeau, L. A., Bejaoui, N., Pérez, F. F. & Babarro, J. M. F. (2021). The Mediterranean mussel *Mytilus galloprovincialis*: responses to climate change scenarios as a function of the original habitat. *Conservation Physiology*, 9(1), coaa114.
- Leblanc, A. R., Landry, T. & Miron, G. (2003). *Fouling organisms of the blue mussel Mytilus edulis: their effect on nutrient uptake and release*.

- Leiva, G., Santibañez, C., Bartheld, J. L., Molinet, C. & Navarro, J. (2005). Definición de criterios biológicos, ambientales, sanitarios y operativos para la instalación de colectores de moluscos bivalvos en la X Región. *Informe Final Proyecto FIP*, 18, 197.
- Lenormand, T. (2002). Gene flow and the limits to natural selection. *Trends in Ecology & Evolution*, 17(4), 183–189.
- León-Muñoz, J., Aguayo, R., Marcé, R., Catalán, N., Woelfl, S., Nimptsch, J., Arismendi, I., Contreras, C., Soto, D. & Miranda, A. (2021). Climate and Land Cover Trends Affecting Freshwater Inputs to a Fjord in Northwestern Patagonia. *Frontiers in Marine Science*, 8, 628454.
- León-Muñoz, J., Urbina, M. A., Garreaud, R. & Iriarte, J. L. (2018). Hydroclimatic conditions trigger record harmful algal bloom in western Patagonia (summer 2016). *Scientific Reports*, 8(1), 1330.
- Lowe, A. T., Bos, J. & Ruesink, J. (2019). Ecosystem metabolism drives pH variability and modulates long-term ocean acidification in the Northeast Pacific coastal ocean. *Scientific Reports*, 9(1), 963.
- Mahon, R., McConney, P., & Roy, R. N. (2008). Governing fisheries as complex adaptive systems. *Marine Policy*, 32(1), 104-112.
- Malachowicz, M. & Wenne, R. (2019). Mantle transcriptome sequencing of *Mytilus* spp. and identification of putative biomineralization genes. *PeerJ*, 6, e6245.
- Marín, A. (2019). Adaptive capacity to coastal disasters: challenges and lessons from small-scale fishing communities in central-southern Chile. *Viability and Sustainability of Small-Scale Fisheries in Latin America and The Caribbean*, 51–78.
- Marshall, D. J., Monro, K., Bode, M., Keough, M. J. & Swearer, S. (2010). Phenotype–environment mismatches reduce connectivity in the sea. *Ecology Letters*, 13(1), 128–140.
- Maulu, S., Hasimuna, O. J., Haambiya, L. H., Monde, C., Musuka, C. G., Makorwa, T. H., Munganga, B. P., Phiri, K. J. & Nsekanabo, J. D. (2021). Climate change effects on aquaculture production: sustainability implications, mitigation, and adaptations. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 609097.
- McClanahan, T., Allison, E. H. & Cinner, J. E. (2015). Managing fisheries for human and food security. *Fish and Fisheries*, 16(1), 78–103.
- Metian, M., Troell, M., Christensen, V., Steenbeek, J. & Pouil, S. (2020). Mapping diversity of species in global aquaculture. *Reviews in Aquaculture*, 12(2), 1090–1100.
- Molinet Flores, C. A., 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.
- Moser, S. C. & Ekstrom, J. A. (2010). A framework to diagnose barriers to climate change adaptation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(51), 22026–22031.
- Nagy, G. J., Gutiérrez, O., Brugnoli, E., Verocai, J. E., Gómez-Erache, M., Villamizar, A., Olivares, I., Azeiteiro, U. M., Leal Filho, W. & Amaro, N. (2019). Climate vulnerability, impacts and adaptation in Central and South America coastal areas. *Regional Studies in Marine Science*, 29, 100683.
- Narváez, D. A., Vargas, C. A., Cuevas, L. A., García-Loyola, S. A., Lara, C., Segura, C., Tapia, F. J. & Broitman, B. R. (2019). Dominant scales of subtidal variability in coastal hydrography of the Northern Chilean Patagonia. *Journal of Marine Systems*, 193, 59–73.
- Natalia, P., Silvia, F., Silvina, S. & Miguel, P. (2020). Climate change in northern Patagonia: critical decrease in water resources. *Theoretical and Applied Climatology*, 140(3), 807–822.
- Navarro, J. M., Torres, R., Acuña, K., Duarte, C., Manriquez, P. H., Lardies, M., Lagos, N. A., 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(3), 1242–1248.

- Naylor, R. L., Hardy, R. W., Buschmann, A. H., Bush, S. R., Cao, L., Klinger, D. H., Little, D. C., Lubchenco, J., Shumway, S. E. & Troell, M. (2021). A 20-year retrospective review of global aquaculture. *Nature*, *591*(7851), 551–563.
- Nelson, D. R., Adger, W. N. & Brown, K. (2007). Adaptation to environmental change: contributions of a resilience framework. *Annu. Rev. Environ. Resour.*, *32*, 395–419.
- Nevoux, M., Forcada, J., Barbraud, C., Croxall, J. & Weimerskirch, H. (2010). Bet-hedging response to environmental variability, an intraspecific comparison. *Ecology*, *91*(8), 2416–2427.
- Oliver, E. C. J., Benthuisen, J. A., Darmaraki, S., Donat, M. G., Hobday, A. J., Holbrook, N. J., Schlegel, R. W. & Sen Gupta, A. (2021). Marine heatwaves. *Annual Review of Marine Science*, *13*, 313–342.
- Ortega, D. L., Wang, H. H. & Olynk Widmar, N. J. (2015). Effects of media headlines on consumer preferences for food safety, quality and environmental attributes. *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics*, *59*(3), 433–445.
- Osores, S. J. A., Lagos, N. A., San Martín, V., Manríquez, P. H., Vargas, C. A., Torres, R., Navarro, J. M., Poupin, M. J., Saldías, G. S. & Lardies, M. A. (2017). Plasticity and inter-population variability in physiological and life-history traits of the mussel *Mytilus chilensis*: a reciprocal transplant experiment. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, *490*, 1–12.
- Ottenburghs, J. (2021). The genic view of hybridization in the Anthropocene. *Evolutionary Applications*, *14*(10), 2342–2360.
- Oyarzún, P. A., Toro, J. E., Cañete, J. I. & Gardner, J. P. A. (2016). Bioinvasion threatens the genetic integrity of native diversity and a natural hybrid zone: smooth-shelled blue mussels (*Mytilus* spp.) in the Strait of Magellan. *Biological Journal of the Linnean Society*, *117*(3), 574–585.
- 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.
- Oyinlola, M. A., Reygondeau, G., Wabnitz, C. C. C. & Cheung, W. W. L. (2020). Projecting global mariculture diversity under climate change. *Global Change Biology*, *26*(4), 2134–2148.
- Palero, F., Abelló, P., Macpherson, E., Gristina, M. & Pascual, M. (2008). Phylogeography of the European spiny lobster (*Palinurus elephas*): Influence of current oceanographical features and historical processes. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, *48*(2), 708–717.
- Palumbi, S. R. (1994). Genetic divergence, reproductive isolation, and marine speciation. *Annual Review of Ecology and Systematics*, *25*(1), 547–572.
- Palumbi, S. R. (2003). Population genetics, demographic connectivity, and the design of marine reserves. *Ecological Applications*, *13*(sp1), 146–158.
- Palumbi, S. R., Evans, T. G., Pespeni, M. H. & Somero, G. N. (2019). Present and future adaptation of marine species assemblages. *Oceanography*, *32*(3), 82–93.
- Paquet, P. J., Flagg, T., Appleby, A., Barr, J., Blankenship, L., Campton, D., Delarm, M., Evelyn, T., Fast, D. & Gislason, J. (2011). Hatcheries, conservation, and sustainable fisheries—achieving multiple goals: results of the Hatchery Scientific Review Group’s Columbia River basin review. *Fisheries*, *36*(11), 547–561.
- Pauly, D. & Zeller, D. (2016). Catch reconstructions reveal that global marine fisheries catches are higher than reported and declining. *Nature Communications*, *7*(1), 10244.
- Payne, M. R., Hobday, A. J., MacKenzie, B. R., Tommasi, D., Dempsey, D. P., Fässler, S. M. M., Haynie, A. C., Ji, R., Liu, G. & Lynch, P. D. (2017). Lessons from the first generation of marine ecological forecast products. *Frontiers in Marine Science*, *4*, 289.
- Pessacg, N., Blázquez, J., Lancelotti, J. & Solman, S. (2022). Climate changes in coastal areas of Patagonia: observed trends and future projections. In *Global Change in Atlantic Coastal Patagonian Ecosystems: A Journey Through Time* (pp. 13–42). Springer.

- Petereit, J., Hoerterer, C. & Krause, G. (2022). Country-specific food culture and scientific knowledge transfer events—Do they influence the purchasing behaviour of seafood products? *Aquaculture*, 560, 738590.
- Pigliucci, M. (2001). *Phenotypic plasticity: beyond nature and nurture*. JHU Press.
- Pigliucci, M. (2005). Evolution of phenotypic plasticity: where are we going now? *Trends in Ecology & Evolution*, 20(9), 481–486.
- Pineda, J., Hare, J. A. & Sponaugle, S. U. (2007). Larval transport and dispersal in the coastal ocean and consequences for population connectivity. *Oceanography*, 20(3), 22–39.
- Poblete, E. G., Drakeford, B. M., Ferreira, F. H., Barraza, M. G. & Failler, P. (2019). The impact of trade and markets on Chilean Atlantic salmon farming. *Aquaculture International*, 27, 1465–1483.
- Ponce, Vasquez-Lavín, F., San Martín, V. A., Hernández, J. I., Vargas, C. A., Gonzalez, P. S. & Gelcich, S. (2019). Ocean acidification, consumers' preferences, and market adaptation strategies in the mussel aquaculture industry. *Ecological Economics*, 158, 42–50.
- Pörtner, H. O. & Farrell, A. P. (2008). Physiology and climate change. *Science*, 322(5902), 690–692.
- Regan, C. E. & Sheldon, B. C. (2023). Phenotypic plasticity increases exposure to extreme climatic events that reduce individual fitness. *Global Change Biology*, 29(11), 2968–2980.
- Reyna-Fabián, M., Espinoza, A., Seingier, G., Ortiz-Lozano, L. & Espejel, I. (2018). De la evaluación ecológica a la socio-ecológica: la vulnerabilidad de los arrecifes de coral ante los factores de estrés asociados al cambio climático. *Sociedad y Ambiente*, 17, 59–92.
- Risius, A., Hamm, U. & Janssen, M. (2019). Target groups for fish from aquaculture: Consumer segmentation based on sustainability attributes and country of origin. *Aquaculture*, 499, 341–347.
- Risius, A., Janssen, M. & Hamm, U. (2017). Consumer preferences for sustainable aquaculture products: Evidence from in-depth interviews, think aloud protocols and choice experiments. *Appetite*, 113, 246–254.
- Rivera, H. E., Aichelman, H. E., Fifer, J. E., Kriefall, N. G., Wuitchik, D. M., Smith, S. J., & Davies, S. W. (2021). A framework for understanding gene expression plasticity and its influence on stress tolerance. *Molecular Ecology*, 30(6), 1381–1397.
- Rivera, A., Unibazo, J., Leon, P., Vásquez-Lavín, F., Ponce, R., Mansur, L. & Gelcich, S. (2017). Stakeholder perceptions of enhancement opportunities in the Chilean small and medium scale mussel aquaculture industry. *Aquaculture*, 479, 423–431.
- Rodríguez-Romero, A., Gaitán-Espitía, J. D., Opitz, T. & Lardies, M. A. (2022). Heterogeneous environmental seascape across a biogeographic break influences the thermal physiology and tolerances to ocean acidification in an ecosystem engineer. *Diversity and Distributions*, 28(8), 1542–1553.
- Saha, C. K. (2022). Emergence and evolution of aquaculture sustainability certification schemes. *Marine Policy*, 143, 105196.
- Salazar, C., Jaime, M., Figueroa, Y. & Fuentes, R. (2018). Innovation in small-scale aquaculture in Chile. *Aquaculture Economics & Management*, 22(2), 151–167.
- San Martín, Gelcich, S., Vásquez Lavín, F., Ponce Oliva, R. D., Hernández, J. I., Lagos, N. A., Birchenough, S. N. R. & Vargas, C. A. (2019). Linking social preferences and ocean acidification impacts in mussel aquaculture. *Scientific Reports*, 9(1), 4719.
- San Martín, V. A., Lavín, F. V., Oliva, R. D. P., Lerdón, X. P., Rivera, A., Serramalera, L. & Gelcich, S. (2020). Exploring the adaptive capacity of the mussel mariculture industry in Chile. *Aquaculture*, 519, 734856.
- Sanford, E. & Kelly, M. W. (2011). Local adaptation in marine invertebrates. *Annual Review of Marine Science*, 3, 509–535.
- Savolainen, O., Lascoux, M. & Merilä, J. (2013). Ecological genomics of local adaptation. *Nature Reviews Genetics*, 14(11), 807–820.

- Savva, I., Bennett, S., Roca, G., Jordà, G. & Marbà, N. (2018). Thermal tolerance of Mediterranean marine macrophytes: Vulnerability to global warming. *Ecology and Evolution*, 8(23), 12032–12043.
- Schaltegger, S., Lüdeke-Freund, F. & Hansen, E. G. (2016). Business models for sustainability: A co-evolutionary analysis of sustainable entrepreneurship, innovation, and transformation. *Organization & Environment*, 29(3), 264–289.
- Schmitt, J. & Antonovics, J. (1986). Experimental studies of the evolutionary significance of sexual reproduction. III. Maternal and paternal effects during seedling establishment. *Evolution*, 40(4), 817–829.
- Šegvić-Bubić, T., Žužul, I., Talijančić, I., Ugrin, N., Lepen Pleić, I., Žuvić, L., Stagličić, N. & Grubišić, L. (2020). Translocation and aquaculture impact on genetic diversity and composition of wild self-sustainable *Ostrea edulis* populations in the Adriatic sea. *Frontiers in Marine Science*, 7, 84.
- Slatkin, M. (1987). Gene flow and the geographic structure of natural populations. *Science*, 236(4803), 787–792.
- Smale, D. A., Wernberg, T., Oliver, E. C. J., Thomsen, M., Harvey, B. P., Straub, S. C., Burrows, M. T., Alexander, L. V., Benthuyssen, J. A. & Donat, M. G. (2019). Marine heatwaves threaten global biodiversity and the provision of ecosystem services. *Nature Climate Change*, 9(4), 306–312.
- Solan, M., & Whiteley, N. (2016). Stressors in the marine environment: physiological and ecological responses; societal implications. Oxford University Press.
- Soto, D., León-Muñoz, J., Dresdner, J., Luengo, C., Tapia, F. J. & Garreaud, R. (2019). Salmon farming vulnerability to climate change in southern Chile: understanding the biophysical, socioeconomic and governance links. *Reviews in Aquaculture*, 11(2), 354–374.
- SSPA. (2019). *Informe sectorial de Pesca y Acuicultura*.
- Steeves, L. & Filgueira, R. (2019). Stakeholder perceptions of climate change in the context of bivalve aquaculture. *Marine Policy*, 103, 121–129.
- Stevens, J. R., Newton, R. W., Tlustý, M. & Little, D. C. (2018). The rise of aquaculture by-products: Increasing food production, value, and sustainability through strategic utilisation. *Marine Policy*, 90, 115–124.
- SUBPESCA. (2024). *Informe Sectorial de Pesca y Acuicultura 2024*.
- Sultan, S. E. (1987). Evolutionary implications of phenotypic plasticity in plants. In *Evolutionary biology: volume 21* (pp. 127–178). Springer.
- Teplitsky, Mills, J. A., Alho, J. S., Yarrall, J. W. & Merilä, J. (2008). Bergmann's rule and climate change revisited: Disentangling environmental and genetic responses in a wild bird population. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(36), 13492–13496.
- Tommasi, D., Stock, C. A., Hobday, A. J., Methot, R., Kaplan, I. C., Eveson, J. P., Holsman, K., Miller, T. J., Gaichas, S. & Gehlen, M. (2017). Managing living marine resources in a dynamic environment: the role of seasonal to decadal climate forecasts. *Progress in Oceanography*, 152, 15–49.
- Tonkin, J. D., Bogan, M. T., Bonada, N., Rios-Touma, B. & Lytle, D. A. (2017). Seasonality and predictability shape temporal species diversity. *Ecology*, 98(5), 1201–1216.
- Toro, J. E., Ojeda, J. A. & Vergara, A. M. (2004). The genetic structure of *Mytilus chilensis* (Hupe 1854) populations along the Chilean coast based on RAPDs analysis. *Aquaculture Research*, 35(15), 1466–1471.
- Trueman, C. N., Artetxe-Arrate, I., Kerr, L. A., Meijers, A. J. S., Rooker, J. R., Sivankutty, R., Arrizabalaga, H., Belmonte, A., Deguara, S. & Goñi, N. (2023). Thermal sensitivity of field metabolic rate predicts differential futures for bluefin tuna juveniles across the Atlantic Ocean. *Nature Communications*, 14(1), 7379.
- Turner, M. G., Calder, W. J., Cumming, G. S., Hughes, T. P., Jentsch, A., LaDeau, S. L., Lenton, T. M., Shuman, B. N., Turetsky, M. R. & Ratajczak, Z. (2020). Climate change, ecosystems

- and abrupt change: science priorities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 375(1794), 20190105.
- Ummenhofer, C. C. & Meehl, G. A. (2017). Extreme weather and climate events with ecological relevance: a review. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 372(1723), 20160135.
- Uriarte, I. (2008). Estado actual del cultivo de moluscos bivalvos en Chile. *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.
- Uribe. (2015). *El cambio climático y sus efectos en la biodiversidad en América Latina*.
- 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. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 121(6), 1468–1483.
- 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. *Nature Ecology & Evolution*, 1(4), 0084.
- Vasseur, D. A. & Yodzis, P. (2004). The color of environmental noise. *Ecology*, 85(4), 1146–1152.
- Velasco, J., Gutiérrez-Cánovas, C., Botella-Cruz, M., Sánchez-Fernández, D., Arribas, P., Carbonell, J. A., Millán, A. & Pallarés, S. (2019). Effects of salinity changes on aquatic organisms in a multiple stressor context. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 374(1764), 20180011.
- Verdegem, M., Buschmann, A. H., Latt, U. W., Dalsgaard, A. J. T. & Lovatelli, A. (2023). The contribution of aquaculture systems to global aquaculture production. *Journal of the World Aquaculture Society*, 54(2), 206–250.
- Vergara-Jara, M. J., DeGrandpre, M. D., Torres, R., Beatty, C. M., Cuevas, L. A., Alarcón, E. & Iriarte, J. L. (2019). Seasonal changes in carbonate saturation state and air-sea CO₂ fluxes during an annual cycle in a stratified-temperate fjord (Reloncaví Fjord, Chilean Patagonia). *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 124(9), 2851–2865.
- Vihtakari, M., Hendriks, I. E., Holding, J., Renaud, P. E., Duarte, C. M. & Havenhand, J. N. (2013). Effects of ocean acidification and warming on sperm activity and early life stages of the Mediterranean mussel (*Mytilus galloprovincialis*). *Water*, 5(4), 1890–1915.
- Visser, M. E. (2008). Keeping up with a warming world; assessing the rate of adaptation to climate change. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 275(1635), 649–659.
- Waldvogel, A.-M., Schreiber, D., Pfenninger, M. & Feldmeyer, B. (2020). Climate change genomics calls for standardized data reporting. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 8, 242.
- Weatherdon, L. V., Magnan, A. K., Rogers, A. D., Sumaila, U. R. & Cheung, W. W. L. (2016). Observed and projected impacts of climate change on marine fisheries, aquaculture, coastal tourism, and human health: an update. *Frontiers in Marine Science*, 3, 48.
- Weis, I. M. & Schwartz, S. S. (1988). The calculation and interpretation of climatic predictabilities. *Journal of Biogeography*, 419–429.
- Whitman, D. W. & Agrawal, A. A. (2009). What is phenotypic plasticity and why is it important. *Phenotypic Plasticity of Insects: Mechanisms and Consequences*, 1–63.
- 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. *Global Change Biology*, 26(7), 3858–3879.
- Wright, S. (1984). *Evolution and the genetics of populations, volume 4: variability within and among natural populations* (Vol. 4). University of Chicago press.

- Yévenes, M., Núñez-Acuña, G., Gallardo-Escárate, C. & Gajardo, G. (2021). Adaptive differences in gene expression in farm-impacted seedbeds of the native blue mussel *Mytilus chilensis*. *Frontiers in Genetics*, 12, 666539.
- Yévenes, M, Gallardo-Escárate, C. & Gajardo, G. (2024). Epigenetic variation mediated by lncRNAs accounts for adaptive genomic differentiation of the endemic blue mussel *Mytilus chilensis*. *Heliyon*. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e23695>
- Zander, K., Risius, A., Feucht, Y., Janssen, M. & Hamm, U. (2018). Sustainable aquaculture products: implications of consumer awareness and of consumer preferences for promising market communication in Germany. *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 27(1), 5–20.