



Memoria de titulación para optar al Título de
Ingeniera Civil Oceánica

TENDENCIA DE LAS FLORACIONES ALGALES NOCIVAS Y SU RELACIÓN CON CAMBIOS EN LA TEMPERATURA Y SALINIDAD SUPERFICIAL EN ÁREAS DE SALMONICULTURA INTENSIVA DEL SUR DE CHILE

Bárbara Constanza Jaramillo Aceituno

Julio 2024

TENDENCIA DE LAS FLORACIONES ALGALES NOCIVAS Y SU RELACIÓN
CON CAMBIOS EN LA TEMPERATURA Y SALINIDAD SUPERFICIAL EN ÁREAS
DE SALMONICULTURA INTENSIVA DEL SUR DE CHILE

Bárbara Constanza Jaramillo Aceituno

COMISIÓN REVISORA

NOTA

FIRMA

Catalina Aguirre Galaz
Profesora guía

Pilar Aparicio Rizzo
Revisora

Felipe Caselli Benavente
Revisor

DECLARACIÓN

Este trabajo, o alguna de sus partes, no ha sido presentado anteriormente en la Universidad de Valparaíso, institución universitaria chilena o extranjera u organismo de carácter estatal, para evaluación, comercialización u otros propósitos. Salvo las referencias citadas en el texto, confirmo que el contenido intelectual de este Proyecto de Título es resultado exclusivamente de mis esfuerzos personales.

La Universidad de Valparaíso reconoce expresamente la propiedad intelectual del autor sobre esta Memoria de Titulación. Sin embargo, en caso de ser sometida a evaluación para los propósitos de obtención del Título Profesional de Ingeniera Civil Oceánica, el autor renuncia a los derechos legales sobre la misma y los cede a la Universidad de Valparaíso, la que estará facultada para utilizarla con fines exclusivamente académicos.

Dra. Catalina Aguirre Galaz
Profesora Guía



Bárbara Jaramillo Aceituno
Alumna Tesista

AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento especial y con mucho amor, a mi mamá, Pamela Aceituno Castillo y a mi papá, Pablo Jaramillo Fernández, gracias por el apoyo incondicional, confianza, cariño y grandes valores que me han brindado durante mi vida. Por todo el esfuerzo que han entregado en mi vida, para que yo pueda estudiar y cumplir mis sueños. A mi hermana Consuelo, por su alegría, consejos, entusiasmo, apoyo y amor durante mi vida, uno de los pilares fundamentales en el desarrollo de mi carrera.

A mi familia, en especial a mi abuela Rosa, quien me acompaña de otra forma, gracias por el apoyo, preocupación, energía y regaloneo durante toda mi vida. A mi abuela Carmen, tías y tíos, gracias por siempre apoyarme y darme energías para seguir.

A mi compañero de vida, Francisco, un regalo que me dejó mi práctica profesional, quien sin dudar, me apoyó desde el primer día. Gracias por el ánimo que me entregas diariamente, por tu paciencia, amor y maravilloso espíritu científico, el cual hizo encantarme por el mundo de las macroalgas y microalgas.

También quiero agradecer de manera especial y muy sincera a mi profesora guía de tesis, Catalina Aguirre Galaz, por entregarme su confianza, conocimientos sobre la programación, las ciencias y todo el apoyo que me ha brindado en este tiempo, ofreciéndome la posibilidad de ser su alumna tesista en el Proyecto FONDAP 15110009 y ser parte del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2 en el transcurso del presente trabajo.

A mis amigos y compañeros, con quienes compartí gratamente en mi paso por la Universidad, gracias por los buenos momentos compartidos. Especialmente les agradezco a mis amigas, Magdalena y Rosario, a quienes conocí en la bienvenida del 2015 y no nos separamos desde ese día, gracias por su alegría, por apoyarme y por hacer que mi paso por la Universidad haya sido una hermosa experiencia.

Al cuerpo académico de la carrera de Ingeniería Civil Oceánica de la Universidad de Valparaíso, por entregarme todos los conocimientos necesarios en mi formación profesional y personal. En especial a las académicas, Catalina Aguirre y Gianina Morales, y a los académicos, Felipe Caselli, Mauricio Reyes, Patricio Winckler, Mauricio Molina y Rodrigo Sazo. Gracias a todos por transmitir su espíritu oceánico a la hora de compartir sus conocimientos.

Por último y no menos importante, agradecer a Andrés Mansilla y Máximo Frangopulos, a quienes conocí en mi práctica profesional en la Universidad de Magallanes. Gracias por todos los conocimientos entregados sobre las macroalgas y microalgas, por brindarme la oportunidad de participar en EXOFAN Magallanes, una experiencia enriquecedora que nunca olvidaré. Allí aprendí sobre las floraciones algales nocivas y reflexioné sobre lo importante que es conservar y proteger lugares que son prístinos, remotos e inhóspitos, tanto para nosotros, como para las próximas generaciones.

Infinitas gracias a todos.

“LA CIENCIA ES PARA LA INGENIERÍA, COMO LA INGENIERÍA ES PARA LA CIENCIA”



En la imagen se aprecia el glaciar Fouquet ubicado en la reserva de la biósfera Cabo de Hornos (RBCH) y el buque científico AGS-61 “Cabo de Hornos”, en el marco del desarrollo de la práctica profesional, “Explorando la oceanografía de islas y bahías y su incidencia en la recurrencia de Floraciones Algaes Nocivas en la región de Magallanes y la Antártica Chilena (EXOFAN 2021)”.

*El Espíritu: en el oleaje de la vida,
en el torbellino de la acción,
ondulo subiendo y bajando,
me agito de un lado a otro.
Nacimiento y muerte,
un océano sin fin,
una actividad cambiante,
una vida febril:
así trabajo yo,
en el zumbador telar del tiempo,
tejiendo el viviente ropaje
de la divinidad.*

J.W. Goethe; El fausto.

TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN.....	IX
1 INTRODUCCIÓN.....	1
2 OBJETIVOS	3
2.1 OBJETIVO GENERAL	3
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
3 MARCO TEÓRICO	4
3.1 FLORACIONES ALGALES NOCIVAS EN LA PATAGONIA CHILENA	4
3.2 INTERACCIÓN ENTRE LA SALMONICULTURA Y LAS FLORACIONES ALGALES NOCIVAS.....	7
4 METODOLOGÍA.....	11
4.1 ÁREA DE ESTUDIO	11
4.2 INFORMACIÓN UTILIZADA	15
4.3 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN	16
5 RESULTADOS	18
5.1 CARACTERIZACIÓN ESPACIAL DE LOS PARÁMETROS OCEANOGRÁFICOS	18
5.2 CARACTERIZACIÓN DE LA ABUNDANCIA RELATIVA DE ESPECIES DE MICROALGAS	21
5.3 RELACIÓN ENTRE LA ABUNDANCIA RELATIVA Y LOS PARÁMETROS OCEANOGRÁFICOS	23
5.4 TENDENCIAS DE LOS PARÁMETROS OCEANOGRÁFICOS	25
5.5 TENDENCIAS DE LA ABUNDANCIA RELATIVA DE ESPECIES DE MICROALGAS	28
5.6 RELACIÓN ENTRE LOS CAMBIOS DE LOS PARÁMETROS OCEANOGRÁFICOS Y LAS TENDENCIAS DE ABUNDANCIA RELATIVA	30
5.7 EFECTOS DE LA BIOMASA ACUMULADA DE SALMONES SOBRE LA ABUNDANCIA RELATIVA DE ESPECIES DE MICROALGAS.....	33
6 DISCUSIÓN.....	38
7 CONCLUSIONES	42
8 FINANCIAMIENTO	44
9 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	45

LISTA DE TABLAS

Tabla 4.1. Agrupaciones de concesiones de salmonicultura (ACS) y estaciones de muestreo en la Región de Aysén.....	13
Tabla 4.2. Especies FAN productoras de toxinas monitoreadas y escala de abundancia relativa.....	16

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Modelo conceptual asociado a los eventos FAN. Ilustración de las fases de crecimiento y los procesos biológicos asociados, en interacción con las actividades humanas, y los procesos oceanográficos y atmosféricos.....	5
Figura 2. Eventos de floraciones algales con efectos tóxicos y/o nocivos..	6
Figura 3. Eventos de floraciones algales con efectos tóxicos y/o nocivos en centros de salmonicultura.....	9
Figura 4. Estaciones de muestreo (N = 95; puntos rojos) junto a sus respectivas agrupaciones de concesiones de salmonicultura (N = 27; polígonos celestes) en la región de Aysén, Chile.....	12
Figura 5. Especies fitoplanctónicas de estudio: A) <i>Alexandrium catenella</i> ; B) <i>Dinophysis acuta</i> ; y C) <i>Protoceratium reticulatum</i>	15
Figura 6. Temperatura (A) y salinidad (B) superficial promedio de verano (2006-2020) en la región de Los Lagos, Chile.	18
Figura 7. Temperatura (A) y salinidad (B) superficial promedio de verano (2006-2020) en la región de Aysén, Chile.....	19
Figura 8. Temperatura (A) y salinidad (B) superficial promedio de verano (2006-2020) en la región de Magallanes, Chile.....	20
Figura 9. Abundancia relativa promedio de verano (2006-2020) en la región de Aysén, Chile. <i>Alexandrium catenella</i> (A), <i>Dinophysis acuta</i> (B), y <i>Protoceratium reticulatum</i> (C).....	22
Figura 10. Relación entre los promedios de la abundancia relativa (AR) de <i>A. catenella</i> y las tendencias de la temperatura y la salinidad superficial de verano en el periodo 2006-2020	23
Figura 11. Relación entre los promedios de la abundancia relativa (AR) de <i>D. acuta</i> y las tendencias de la temperatura y la salinidad superficial de verano en el periodo 2006-2020.	24
Figura 12. Relación entre los promedios de la abundancia relativa (AR) de <i>P. reticulatum</i> y las tendencias de la temperatura y la salinidad superficial de verano en el periodo 2006-2020.	25
Figura 13. Tendencias de la temperatura (A) y la salinidad (B) superficial de verano en la región de Los Lagos, Chile	26

Figura 14. Tendencias de la temperatura (A) y la salinidad (B) superficial de verano en la región de Aysén, Chile.....	27
Figura 15. Tendencias de la temperatura (A) y la salinidad (B) superficial durante verano en la región de Magallanes, Chile.....	28
Figura 16. Tendencias de la abundancia relativa (AR) de las especies de microalgas presentes en la región de Aysén, en el periodo 2006-2020. A. <i>catenella</i> (A), <i>D. acuta</i> (B) y <i>P. reticulatum</i> (C).....	29
Figura 17. Relación entre la tendencia de la abundancia relativa (AR) de <i>A. catenella</i> y las tendencias de la temperatura y la salinidad superficial de verano en el periodo 2006-2020..	30
Figura 18. Relación entre la tendencia de la abundancia relativa (AR) de <i>D. acuta</i> y las tendencias de la temperatura y la salinidad superficial de verano en el periodo 2006-2020..	31
Figura 19. Relación entre la tendencia de la abundancia relativa (AR) de <i>P. reticulatum</i> y las tendencias de la temperatura y la salinidad superficial de verano en el periodo 2006-2020.	32
Figura 20. Distribución espacial: latitudinales y longitudinales de la abundancia relativa (AR) de <i>A. catenella</i> (A-B), <i>D. acuta</i> (C-D) y <i>P. reticulatum</i> (E-F) en relación con la biomasa acumulada de cosecha de salmones en el periodo 2010-2019.....	34
Figura 21. Índice de biomasa acumulada de cosecha de salmón por ACS. Donde: (1) bajo [0 ton – 50000 ton]; (2) moderado [50000 ton – 100000 ton]; (3) alto [100000 ton – 150000 ton]; (4) muy alto [>150000 ton].	35
Figura 22. Tendencia de la abundancia relativa (AR/década) de <i>A. catenella</i> (A), <i>D. acuta</i> (B) y <i>P. reticulatum</i> (C) en relación con el número de concesiones de salmones en el periodo 1998-2018.	37

RESUMEN

La Patagonia chilena alberga uno de los ecosistemas más prístinos del planeta y representa un laboratorio natural en donde es posible observar el efecto de diversos factores y procesos atribuibles al cambio climático, como por ejemplo el aumento de la temperatura o una mayor frecuencia de ocurrencia de eventos climáticos extremos, y/o actividades antrópicas, como son la acuicultura de especies exóticas o cambios en el uso de suelo. En las últimas décadas, uno de los fenómenos naturales que más preocupan en los ecosistemas marinos de la Patagonia chilena, son las Floraciones Algaes Nocivas (FAN), las cuales se ven fuertemente influenciadas por complejas interacciones con factores y procesos oceanográficos, atmosféricos, hidrológicos y antropogénicos. La presente investigación tiene como objetivo analizar la distribución espacial y la tendencia en los últimos años (2006-2020) de la abundancia relativa (AR) de tres especies de microalgas asociadas a FAN, *Alexandrium catenella*, *Dinophysis acuta* y *Protoceratium reticulatum*, en los canales y fiordos de la región de Aysén en verano. Además, esta información es relacionada con los cambios observados en la temperatura y la salinidad superficial del mar, así como con la incidencia de la salmonicultura intensiva en la zona. Para llevar a cabo este trabajo, se utilizaron bases de datos del Programa de Manejo y Monitoreo de las Mareas Rojas (temperatura, salinidad y abundancia relativa) e información proporcionada por el Servicio Nacional de Pesca y Acuicultura (SERNAPESCA) y la Subsecretaría de Pesca y Acuicultura (SUBPESCA) a través del sistema de transparencia y acceso a la información pública de Chile (número de concesiones y biomasa acumulada de cosecha de salmones). Las tendencias permitieron identificar las áreas que son más sensibles al aumento de la temperatura, en la región de Los Lagos (fiordo Reloncaví), en la región de Aysén (canal Jacaf, fiordo Puyuhuapi y al sur del canal Moraleda) y en la región de Magallanes (al sur del canal Messier, canal Smith, canal Sarmiento y el brazo noroeste del canal Beagle). En tanto, las tendencias de salinidad fueron contrastantes entre áreas expuestas y semi-cerradas, observando disminución de la salinidad en sistemas semi-cerrados de fiordos y canales, como el fiordo Reloncaví, el canal Jacaf, el fiordo Puyuhuapi y en gran parte de la región de Magallanes. Por otra parte, las tendencias de AR de *A. catenella*, *D. acuta* y *P. reticulatum* en la región de Aysén, mostraron que el fiordo Puyuhuapi y el canal Jacaf son las zonas más expuestas a una tendencia positiva en la abundancia relativa de las especies. Se encontró que las agrupaciones de concesiones de salmonicultura (ACS) 18C, 21B, 32 y 33, ubicadas en archipiélago los Chonos, fiordo Puyuhuapi y canal Jacaf, respectivamente, son las ACS con mayor número de concesiones de salmones. Similar a lo anterior, las ACS con índice muy alto de biomasa de cosecha de salmones acumulada, corresponden a las ACS 18C, 21C, 28B, 32 y 33. En particular las ACS 32 y 33, son áreas que están expuestas a un aumento de la temperatura, disminución de la salinidad y aumento en la abundancia relativa de las tres especies de microalgas. Finalmente, la comparación entre áreas con actividad de salmonicultura intensiva y las que aún son prístinas en la región de Aysén, determinó que la AR de las tres especies asociadas a FAN fue mayor en sistemas semi-cerrados de fiordos y canales, donde había influencia de la salmonicultura. Lo anterior, refleja la importancia de tomar en cuenta los cambios ambientales que enfrenta la Patagonia, y con ello, fortalecer y perfeccionar la planificación del manejo y conservación de los ecosistemas en la Patagonia chilena.