



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**MODELACIÓN DE LA CONECTIVIDAD FÍSICA DEL LAGO VILLARRICA,  
CHILE, Y SU CALIDAD DE AGUAS**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

**MATÍAS ALEJANDRO SÁEZ BECERRA**

PROFESOR GUÍA:  
Yarko Niño Campos

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
Hugo Ulloa Sánchez  
Javiera Abarca Mesa

SANTIAGO DE CHILE  
2022

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL  
POR: **MATÍAS ALEJANDRO SÁEZ BECERRA**  
FECHA: 2022  
PROF. GUÍA: YARKO NIÑO

## **MODELACIÓN DE LA CONECTIVIDAD FÍSICA DEL LAGO VILLARRICA, CHILE, Y SU CALIDAD DE AGUAS**

El lago Villarrica es un cuerpo de agua de origen glacial ubicado en la región de la Araucanía, Chile con coordenadas ( $39^{\circ} 15' S$ ,  $72^{\circ}05' O$ ). Este contiene como principal afluente el río Pucón y único efluente el río Toltén. Se caracteriza por sus vientos de alta intensidad proveniente del Este en verano y de baja intensidad en el resto de temporadas. En la cuenca de drenaje de este cuerpo lacustre, se han desarrollado diversas actividades de origen antrópico, las cuales influyen en el deterioro de la calidad de agua del lago Villarrica. Estas descargas son caracterizadas como fuentes puntuales o difusas y aceleran el enriquecimiento del cuerpo de agua en nutrientes, que provocan un incremento del estado trófico. Actualmente la cuenca del lago Villarrica se encuentra como zona saturada por clorofila-A, transparencia y fósforo disuelto. En virtud de lo anterior, el objetivo general de este trabajo consiste en implementar un modelo hidrodinámico que permita reproducir los procesos de la termo-hidrodinámica, y de este modo implementar un modelo de calidad de aguas y la conectividad física para el lago Villarrica.

A partir de los resultados derivados del modelo hidrodinámico, se puede afirmar que (1) el lago Villarrica presenta una estratificación térmica en verano con un estrato superior a  $20^{\circ}C$ , uno inferior a  $10^{\circ}C$  y una termoclina a 20 m de profundidad, mientras que en invierno presenta mezcla completa; (2) a partir de la energía cinética turbulenta proporcionada por el viento, se observaron movimientos oscilatorios en la termoclina, los cuales ven aumentada su amplitud debido al efecto resonante entre el viento de periodicidad diaria y la onda Kelvin fundamental; (3) el campo de velocidades del lago Villarrica en verano posee una circulación en sentido horario por los bordes del lago en la zona de la termoclina, lo cual se atribuye a la presencia de la onda Kelvin fundamental. Sin embargo, a pesar de que la calibración en base a observaciones de perfiles de temperatura obtuvo un buen desempeño, se debe realizar una calibración en base a las velocidad del lago, para así obtener una mejor representación de la circulación en el lago Villarrica.

Con respecto al modelo de partículas, el experimento de trazadores conservativos permite afirmar que ante la presencia de una estratificación, la interfaz de densidad no permite desplazamientos verticales entre ambas capas, ya que las partículas que fueron descargadas artificialmente en el epilimnion en periodo de estratificación, transitaron preferentemente por esta zona. Por otro lado, el experimento de trazadores lagrangianos, permitió trazar los caminos preferenciales que tienen las partículas descargadas en una zona de potencial descarga hacia una zona de interés. Finalmente, con el modelo de calidad de aguas se permitió observar el efecto de las reacciones que se producen en los nutrientes al interactuar con el cuerpo de agua y su variación estacional producto de la presencia de biomasa algal. Este modelo se logró validar, a partir de imágenes satelitales que permiten detectar la presencia de clorofila-A en la superficie del lago, a través de las cuales se pudo observar una similitud en cuanto a la distribución horizontal de clorofila-A.

# Agradecimientos

En este pequeño espacio quiero agradecer a algunas de las personas que fueron parte importante de este proceso. Un camino que si bien fue largo, me entregó mucho aprendizaje y también me hizo dar cuenta que soy capaz de superar obstáculos que se veían muy difíciles.

A Yarko y Hugo, por ser excelentes guías, maestros y sobretodo su calidad humana.

A Javiera, por facilitar todo su material para poder realizar este trabajo.

A mi padre y madre, por cuidarme, por todo el cariño que me han entregado, y especialmente por acompañarme siempre en cada decisión que he tomado.

A mis hermanas, por ser mi motivación de terminar esta etapa. Ustedes son mi motor de vida. Prometo amarlas y apoyarlas en el porvenir.

Al Vicho, la Coni y los Pichonsitos, por escucharme, entenderme, aguantarme y por ser mi cable a tierra.

Al Pepe, por hacer alegre cada momento y brindarme su ayuda cuando ha sido necesario.

Al Benja y Nacho, por ser mis amigos de toda la vida.

A la Javi, por su compañía y eternos trasnoches.

A mis amigos y amigas de la u, por todas las risas, bailes y campeonatos. Una mención especial al Leito, un gran amigo.

A Tania, por toda su ayuda.

Al Woody, por acompañarme siempre, por tu paciencia y tu amor tan noble y sincero.

Esta investigación fue parcialmente apoyada por la infraestructura de supercómputo del NLHPC.

# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	1
1.2. Objetivos . . . . .	3
1.2.1. Objetivo General . . . . .	3
1.2.2. Objetivos específicos . . . . .	3
1.3. Metodología . . . . .	3
1.3.1. Recopilación de Información . . . . .	3
1.3.2. Modelo Hidrodinámico . . . . .	4
1.3.3. Modelo de Partículas . . . . .	4
1.3.4. Interpretación de los resultados obtenidos mediante las distintas simulaciones . . . . .	5
1.4. Organización del Informe . . . . .	5
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>7</b>
2.1. Estratificación térmica y mezcla en lagos . . . . .	7
2.2. Respuesta de un cuerpo de agua estratificado forzado por el viento . . . . .	10
2.3. Afloramiento de termoclina en la superficie . . . . .	13
2.4. Ondas internas . . . . .	14
2.4.1. Efecto de la rotación terrestre . . . . .	14
2.4.2. Resonancia . . . . .	17
2.5. Lagos y su estado trófico . . . . .	18
<b>3. Caso de Estudio</b>	<b>19</b>
3.1. Zona de Estudio . . . . .	19
3.2. Antecedentes Hidrodinámicos . . . . .	20
3.3. Antecedentes Condición Trófica . . . . .	21
3.4. Antecedentes Legales . . . . .	22
3.5. Fuentes de Información . . . . .	24
3.5.1. Forzantes Meteorológicas . . . . .	24
3.5.1.1. Temperatura . . . . .	27
3.5.1.2. Radiación Solar . . . . .	28
3.5.1.3. Humedad Relativa . . . . .	29
3.5.1.4. Vientos . . . . .	30
3.5.2. Parámetros físico-químicos . . . . .	33
<b>4. Modelo Numérico</b>	<b>36</b>
4.1. Modelación Hidrodinámica . . . . .	36
4.1.1. Características del modelo . . . . .	36

4.1.1.1.	Tamaño de la malla e intervalo de paso . . . . .	36
4.1.1.2.	Condiciones Iniciales . . . . .	38
4.1.1.3.	Condiciones de borde . . . . .	38
4.2.	Calibración . . . . .	40
4.3.	Modelo Calidad de aguas . . . . .	42
4.3.1.	Características del modelo . . . . .	42
4.3.1.1.	Condiciones iniciales . . . . .	42
4.3.1.2.	Condiciones de borde . . . . .	43
4.3.2.	Calibración . . . . .	43
<b>5.</b>	<b>Resultados y Discusión</b>	<b>45</b>
5.1.	Modelo Hidrodinámico . . . . .	45
5.1.1.	Estratificación térmica . . . . .	45
5.1.2.	Respuesta del lago a la acción del viento . . . . .	50
5.1.3.	Campo de velocidades del lago Villarrica . . . . .	56
5.2.	Modelo de partículas . . . . .	62
5.2.1.	Propagación de trazadores conservativos . . . . .	62
5.2.2.	Conectividad Física . . . . .	65
5.3.	Modelo Calidad de Aguas . . . . .	69
5.3.1.	Escenario 1 . . . . .	72
5.3.2.	Escenario 2 . . . . .	74
5.3.3.	Escenario 3 . . . . .	75
<b>6.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>80</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>83</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>87</b>
	<b>Anexo A. Calibración del modelo hidrodinámico</b>	<b>87</b>
	<b>Anexo B. Calibración del modelo de calidad de aguas</b>	<b>91</b>

# Índice de Tablas

2.1.	Clasificación de Smith et al. (1999) para determinar el estado trófico de un lago, según concentración de nitrógeno, fósforo, clorofila-a, y profundidad del disco Secchi. . . . .	18
3.1.	Parámetros morfométricos del lago Villarrica. . . . .	19
3.2.	Niveles de calidad ambiental según la zona de vigilancia para el lago Villarrica. Rescatado del Decreto 19 (2013). . . . .	24
3.3.	Descripción de las estaciones de monitoreo vigentes dispuestas por la DGA. . .	34
4.1.	RMSE y MAE para los perfiles de temperatura en cada estación de monitoreo del Lago Villarrica para el periodo de calibración (agosto 2018-julio 2019). . .	41
4.2.	RMSE y MAE de los perfiles de temperatura a nivel global en el Lago Villarrica para el periodo de calibración (agosto 2018-julio 2019). . . . .	42
4.3.	Parámetros utilizados para realizar la calibración del modelo hidrodinámico en el lago Villarrica. . . . .	42
4.4.	Condiciones iniciales para el modelo de calidad de agua. . . . .	43
4.5.	Cargas de nutrientes utilizadas como condición de borde para el modelo de calidad de agua. . . . .	43
5.1.	Resumen de las simulaciones de trayectoria de partículas realizadas. . . . .	62
5.2.	Parámetros estadísticos del tiempo de residencia promedio obtenido en cada uno de los experimentos de trazadores lagrangianos. . . . .	68
5.3.	Escenarios que permite describir el transporte de nutrientes y clorofila-A en el lago Villarrica según un instante de tiempo y profundidad de la capa. . . . .	72
A.1.	Calibración a partir temperaturas en la estación centro del lago Villarrica. . .	87
A.2.	Calibración a partir temperaturas en la estación pelagial Villarrica del lago Villarrica. . . . .	88
A.3.	Calibración a partir temperaturas en la estación litoral norte del lago Villarrica.	88
A.4.	Calibración a partir temperaturas en la estación litoral Pucón del lago Villarrica.	89
A.5.	Calibración a partir temperaturas en la estación litoral sur del lago Villarrica.	89
A.6.	Calibración a partir temperaturas en la estación litoral Villarrica del lago Villarrica. . . . .	90
A.7.	Calibración a partir temperaturas en la estación la poza del lago Villarrica. . .	90
B.1.	Calibración a partir de fósforo total y nitrógeno total en la estación litoral norte del lago Villarrica. . . . .	91
B.2.	Calibración a partir de fósforo total y nitrógeno total en la estación litoral Pucón del lago Villarrica. . . . .	92
B.3.	Calibración a partir de fósforo total y nitrógeno total en la estación litoral sur del lago Villarrica. . . . .	92
B.4.	Calibración a partir de fósforo total y nitrógeno total en la estación litoral Villarrica del lago Villarrica. . . . .	93

B.5.	Calibración a partir de fósforo total y nitrógeno total en la estación la poza del lago Villarrica. . . . .	93
B.6.	Calibración a partir de fósforo total y nitrógeno total en la estación pelagial Villarrica del lago Villarrica. . . . .	94
B.7.	Calibración a partir de fósforo total y nitrógeno total en la estación centro del lago Villarrica. . . . .	94

# Índice de Ilustraciones

2.1.	Clasificación para los distintos lagos en función de su latitud y elevación. Rescatado de (Wetzel, 2001). . . . .	9
2.2.	Esquema inicial de un cuerpo de agua estratificado establemente en dos capas, en el que actúa un viento en la dirección longitudinal $x$ . Rescatado de Niño (2019a). . . . .	11
2.3.	Definición para los desplazamientos de la superficie libre y la interfaz de densidad mediante la acción del viento, $\xi_1$ y $\xi_2$ , respectivamente. Rescatado de Niño (2019a).	12
2.4.	Inclinación de la superficie libre e interfaz de densidad debido a la acción del viento en un flujo estratificado de dos capas. Rescatado de Niño (2019a). . . .	13
2.5.	Desarrollo de una onda kelvin en un borde costero ubicado en el Hemisferio Norte. Fuente: Hodges, Imberger, Saggio, y Winters (2000). . . . .	16
2.6.	Desarrollo de una onda Poincaré ubicada en el Hemisferio Norte en distintos modos. En (a) modo 1 vertical y (b) modo 2 vertical. Fuente: Hodges et al. (2000). . . . .	17
3.1.	Cuenca del lago Villarrica, Región de la Araucanía, Chile. . . . .	20
3.2.	Detección de microalgas mediante imágenes satélites para el día 14 de Marzo del 2020. Rescatado de Bravo (2021). . . . .	22
3.3.	Forzantes meteorológicas y fluviométricas en las cercanías del lago Villarrica, Chile. Fuente: Elaboración propia. . . . .	25
3.4.	Distribución de temperatura, humedad relativa y radiación solar a nivel mensual en el periodo agosto/2018-julio/2020 mediante un diagrama de cajas. Fuente: Elaboración propia. . . . .	26
3.5.	Distribución de cielo cubierto, velocidad del viento y dirección del viento a nivel mensual en el periodo agosto/2018-julio/2020 mediante un diagrama de cajas. Fuente: Elaboración propia. . . . .	27
3.6.	Serie de tiempo de la temperatura promedio diaria para cada mes en el periodo de validación y calibración. . . . .	28
3.7.	Serie de tiempo de la radiación solar promedio diaria para cada mes en el periodo de validación y calibración. . . . .	29
3.8.	Serie de tiempo de la humedad relativa promedio diaria para cada mes en el periodo de validación y calibración. . . . .	30
3.9.	Vientos en el centro del lago Villarrica según su estación climática en el periodo agosto 2018 - julio 2019. . . . .	31
3.10.	Vientos en el centro del lago Villarrica según su estación climática en el periodo agosto 2019 - julio 2020. . . . .	32
3.11.	Forzantes climáticas en Febrero 2020. En A) temperatura del aire; B) humedad relativa , C) velocidad del viento y D) dirección del viento. . . . .	33

3.12.	Estaciones de monitoreo de parámetros físico-químicos en el lago Villarrica. Fuente: Elaboración propia. . . . .	35
4.1.	Estructura vertical utilizada en el modelo hidrodinámico. . . . .	38
4.2.	Series mensuales de evaporación, precipitación, caudal afluente y efluente del lago Villarrica para el periodo agosto 2018 - julio 2020. . . . .	39
4.3.	Diagrama de dispersión entre las temperaturas simuladas y observadas con respecto a la función identidad. . . . .	41
4.4.	Dispersión entre los nutrientes modelados y observados con la función identidad. En el panel izquierdo se tiene registro del Nitrógeno total y en el panel derecho el fósforo total. . . . .	44
5.1.	Evolución de la estructura térmica y de densidad en el periodo Agosto 2018 - Julio 2020, a partir de un punto en el centro del lago Villarrica. . . . .	46
5.2.	Evolución mensual de la estructura térmica promedio (línea segmentada) y observaciones de temperatura realizadas por la DGA (puntos) en el lago Villarrica en el periodo agosto 2018 - julio 2019. . . . .	47
5.3.	Panel superior: Flujo de calor a nivel horario del lago Villarrica para el periodo de validación. Panel inferior: Flujo de calor promedio diario y su variabilidad en el periodo de validación. . . . .	48
5.4.	Perfiles de temperatura en la dirección Oeste-Este en dos instantes. En estos se puede diferenciar como se visualiza una fuerte y una débil estratificación en la columna de agua del lago Villarrica. . . . .	49
5.5.	Dirección del viento, velocidad del viento y número de Wedderburn obtenido del lago Villarrica en Febrero 2020. . . . .	51
5.6.	Densidad de potencia espectral (PSD) de las oscilaciones de la termoclina para el periodo enero 2020-marzo 2020. En el panel superior: PSD en el centro del lago; En el panel inferior: PSD en la zona litoral. . . . .	52
5.7.	Densidad de potencia espectral (PSD) de las fluctuaciones de la termoclina en el centro del lago Villarrica para el periodo Enero 2020-Abril 2020. . . . .	54
5.8.	Dirección del viento y velocidad del viento en el centro del lago Villarrica, y variación en la termoclina en P1, P3 y centro del lago en el mes de febrero 2020. . . . .	55
5.9.	Flujo de calor diario acumulado para el periodo enero y febrero 2020 medido en el centro del lago Villarrica. . . . .	56
5.10.	Campo de velocidad promediado para la temporada de invierno 2019 (14-60 m de profundidad). La escala de colores representa la velocidad del flujo en m/s y las flechas blancas indican la dirección del flujo. . . . .	57
5.11.	Campo de velocidades promediado en la zona del hipolimnion (10 - 20 m de profundidad). La escala de colores representa la velocidad del flujo en m/s y las flechas blancas indican la dirección del flujo. . . . .	58
5.12.	Campo de velocidades promediado en la zona del hipolimnion (40 - 20 m de profundidad). La escala de colores representa la velocidad del flujo en m/s y las flechas blancas indican la dirección del flujo. . . . .	59
5.13.	Campo de velocidades promediado en la zona del hipolimnion (70 - 40 m de profundidad). La escala de colores representa la velocidad del flujo en m/s y las flechas blancas indican la dirección del flujo. . . . .	60
5.14.	Campo de temperaturas medido a 20 m de profundidad para el 22 y 23 de febrero 2020. La escala de colores representa la temperatura en °C. . . . .	61

5.15.	Puntos de observación utilizados para la simulación $A_V$ . (A): Litoral Pucón; (B): La Poza; (C) Litoral Sur; (D) Villarrica. . . . .	63
5.16.	Evolución de trazadores conservativos descargados continuamente desde el río Pucón entre el 01/08/2019 y 31/07/2020 hacia el lago Villarrica. Los paneles A), B), C) y D) hacen referencia a los distintos puntos de medición de la concentración, denominados como: Litoral Pucón, La Poza, Litoral Sur y Litoral Villarrica, respectivamente. Cada uno de los paneles posee una escala distinta para $C/C_{max}$ . . . . .	64
5.17.	Mapas de tiempo de residencia promedio por celda y caminos preferenciales a partir de una descarga continua de trazadores lagrangianos. La descarga se realizó en el periodo de Invierno 2019, desde el río Pucón hacia el litoral sur del lago Villarrica (A) y hacia la ciudad de Villarrica (B). . . . .	66
5.18.	Mapas de tiempo de residencia promedio por celda y caminos preferenciales a partir de una descarga continua de trazadores lagrangianos. La descarga se realizó en el periodo de Verano 2020, desde el río Pucón hacia el litoral sur del lago Villarrica (A) y hacia la ciudad de Villarrica (B). . . . .	67
5.19.	Evolución de la concentración de nitrato, amonio, fosfato y clorofila para el periodo de estudio en el centro del lago Villarrica. . . . .	70
5.20.	Evolución de la concentración de nitrato, amonio, fosfato y clorofila para el periodo de estudio en la estación de monitoreo litoral Pucón del lago Villarrica. . . . .	71
5.21.	Evolución de los nutrientes y clorofila-A para el día 15/11/2019 a 10 m de profundidad. A) Ortofosfato, B) Amonio, C) Nitrato y D) Clorofila-A. . . . .	73
5.22.	Evolución del Nitrato para el día 15/11/2019 a 30 m de profundidad. . . . .	74
5.23.	Evolución de los nutrientes y clorofila-A para el día 22/02/2020 a 20 m de profundidad. A) Ortofosfato, B) Amonio, C) Nitrato y D) Clorofila-A. . . . .	75
5.24.	Evolución de los nutrientes y clorofila-A para el día 19/03/2020 a 3 m de profundidad. A) Ortofosfato, B) Amonio, C) Nitrato y D) Clorofila-A. . . . .	76
5.25.	Distribución de la concentración de clorofila-A correspondiente al 19 de marzo del 2020. Rescatado de (Bravo, 2021). . . . .	77
5.26.	Distribución de la concentración de clorofila-A correspondiente al 21 de enero del 2020. Rescatado de (Bravo, 2021). . . . .	78
5.27.	Distribución de la concentración de clorofila-A correspondiente al 21 de enero del 2020 obtenida mediante el modelo numérico. . . . .	78

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Motivación

En la actualidad los recursos hídricos han sufrido considerables alteraciones producto de intervenciones antrópicas en el ambiente. Es por esto, que surge la necesidad de una mejor gestión de los recursos hídricos y de regular eficientemente las intervenciones que pueden afectar al sistema.

Los lagos se consideran cuerpos de agua generalmente dulce y de gran extensión. Los aportes de agua a este sistema provienen de ríos, aguas freáticas y precipitaciones sobre el espejo de agua (Mitra et al., 2014). También se debe considerar que existe un aporte de origen antrópico, en las cuales se destacan la descarga de riles y otros compuestos. Estas descargas se pueden caracterizar como fuentes de contaminación debido al aporte de diversos nutrientes, los cuales pueden afectar la calidad de agua del sistema lacustre, perjudicando ecosistemas y salud de las personas (Ji, 2008). Este problema adquiere mucha importancia al considerar que el cuerpo de agua afectado es un lago, dado que los lagos responden lentamente a los cambios que ocurren en ellos. El tiempo de residencia promedio en cuerpo lacustres es de 17 años (ILEC, 2005). En el caso del lago Villarrica, el tiempo de retención se encuentra entre 2 y 4 años (MMA, 2020b), por lo cual se considera un rápido recambio de agua con respecto al promedio mundial.

En Chile, específicamente en la novena y décima región, se encuentran los lagos Araucanos. El lago Villarrica, se ubica en la región de la Araucanía con coordenadas (39° 15' S, 72° 05' O). Tiene una superficie aproximada de 176 km<sup>2</sup>; largo máximo de 22 km; ancho máximo 11 km, profundidad máxima 167 m y una profundidad media de 120 m (Campos et al., 1983).

Los vientos que se presentan con mayor frecuencia en el lago Villarrica poseen una dirección preferencialmente del Oeste. En general estos vientos se caracterizan por poseer magnitudes bajas. Sin embargo, en algunas localidades de Chile se observan con cierta frecuencia vientos fuertes provenientes del Este. Este fenómeno se conoce como evento tipo "Puelche" (Palabra de origen mapuche que significa "Del Este"). Este evento se caracteriza por ser de alta intensidad, cálido y seco. El fenómeno Puelche es uno de los agentes principales en los procesos que ocurren en el lago Villarrica (Meruane, 2005).

Meruane (2005) encuentra un número de Burger igual a 0,22. Este parámetro indica que

los efectos de la rotación influyen en la hidrodinámica del lago cuando es menor a 1 (Ji, 2008). Debido al tamaño que posee y la latitud en la que se encuentra el lago Villarrica, el efecto de Coriolis cobra importancia en el cuerpo de agua, ya que este modifica las ondas superficiales e internas generadas por la acción del viento.

El lago Villarrica se considera un lago monomítico, ya que posee una fuerte estratificación en verano producto del aumento de radiación solar. Como resultado se obtiene una termoclina ubicada a 20 m de profundidad, una capa térmica superior de 20° C y una capa inferior a 10° C (Galaz, 2020; Campos et al., 1983). La estratificación y el efecto del viento que sopla en la superficie libre del lago, genera como respuestas ondas superficiales e internas en el momento que se tiene una velocidad del viento nula. La importancia de estas ondas radica en que su dinámica permite transferir momentum, masa y calor a través del lago. Considerando el efecto de Coriolis, los fenómenos hidrodinámicos, entre ellos las ondas internas, son perturbadas por la rotación terrestre, lo que trae como consecuencia una serie de ondas secundarias que puedan generar una redistribución de la masa (sedimentos, nutrientes, biomasa) en el lago. En el estudio de Rozas (2011), se afirma que la interacción resonante entre los vientos de periodicidad diaria y la onda Kelvin fundamental, determinan la hidrodinámica del lago en el periodo estival.

Por otro lado, en las cercanías del lago se identifican diversas actividades de origen antrópico, las cuales tienen asociada una descarga de nutrientes que es perjudicial para el cuerpo de agua. Estas actividades se identifican como fuentes de contaminación, en la cual se destacan los aportes de la piscicultura, aguas residuales domésticas o aguas servidas, plantas de tratamiento de aguas servidas, fosas sépticas y uso de suelo agrícola y ganadero (Bruning, 2018). Los aportes de nutrientes que contienen estas descargas generan y aceleran el enriquecimiento del cuerpo de agua en nutrientes tales como el Fósforo y Nitrógeno, siendo la causa directa del proceso de eutrofización del lago (Ulloa, 2011). El proceso de eutrofización se identifica como una de las principales alteraciones que afectan a los sistemas acuáticos (Mazzeo et al., 2002). Algunos de los cambios asociados son la pérdida de diversidad, calidad de agua y aumento de organismos nocivos. En el último tiempo, el lago Villarrica ha estado en observación, debido a las altas concentraciones de nutrientes, lo que se traduce en un peligro constante en el equilibrio del ecosistema, debido al proceso de eutrofización (Seremi Región de la Araucanía, 2017).

El foco de este trabajo es implementar un modelo hidrodinámico que reproduzca los procesos de la termo-hidrodinámica del lago Villarrica, el cual es calibrado en función de las observaciones de temperatura dispuestas por la Dirección General de Aguas. A partir de este modelo, se desea incorporar un modelo de partículas, que permita trazar las vías preferentes de las partículas a lo largo del año. Por último, se desea integrar un modelo de calidad de aguas del lago Villarrica, cuya finalidad es cuantificar el transporte de amonio, nitrato y ortofosfato, a partir de procesos advectivos, difusivos y reactivos, e incorporar la presencia de biomasa algal, permitiendo evaluar la condición trófica del cuerpo lacustre.

La motivación de este trabajo surge ante la necesidad de una buena gestión de los recursos hídricos y la preservación de cuerpos lacustres. Para esto se desea implementar modelos numéricos que permitan predecir para prevenir una situación de riesgo, tal como el vertimiento de contaminantes y además cooperar con la generación de información útil para el proceso de implementación del actual Plan de Descontaminación por Clorofila A, Fósforo Disuelto y

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo General**

El objetivo principal de este trabajo consiste en implementar un modelo numérico que reproduzca los procesos de la termo-hidrodinámica en el lago Villarrica que permita simular la repuesta que se genera en el cuerpo de agua frente a forzantes climáticas, y así obtener la conectividad física de la zona litoral y la zona pelágica e incorporar un modelo de calidad de aguas para las descargas de nutrientes provenientes del río Pucón.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

1. Caracterizar las forzantes meteorológicas correspondientes a la zona de estudio (dirección y velocidad del viento, humedad relativa, temperatura y nubosidad).
2. Obtener la termo-hidrodinámica del lago Villarrica luego de realizar una simulación numérica mediante Delft3D-FLOW.
3. Determinar el área de influencia, trayectoria y escala de tiempo asociada a la descarga artificial de trazadores conservativos en regiones estratégicas ubicadas en la zona litoral del lago, a partir de experimentos numéricos que simulan la descarga continua de partículas, y adquieren un campo de velocidad como consecuencia de la hidrodinámica del cuerpo de agua, con el fin de evaluar la conectividad física que existe entre dos zonas de interés ubicadas en la zona litoral, a través del interior del lago.
4. Predecir la evolución y distribución de ortofosfato, amonio y nitrato descargados al lago Villarrica desde el río Pucón, considerando la presencia de algas en el interior de lago, luego de realizar una simulación numérica mediante D-Water Quality.

## **1.3. Metodología**

Para el cumplimiento de los objetivos señalados, se adoptó la siguiente metodología:

### **1.3.1. Recopilación de Información**

- Se analizaron las teorías que sustentan el estudio sobre la hidrodinámica y calidad de aguas en cuerpos lacustres. Junto a esto, se recopiló información de diversos estudios que permiten representar la teoría mediante modelos numéricos.
- Se recolectaron antecedentes hidrodinámicos relacionados a la condición trófica en el lago Villarrica y del Plan de Descontaminación por clorofila-A, fósforo disuelto y transparencia de la cuenca del lago Villarrica del Ministerio del Medio Ambiente de Chile.

- Se obtuvieron las variables de entrada del modelo numérico para implementar en el lago Villarrica, dentro de las cuales se encuentran las condiciones hidrometeorológicas para el periodo de estudio obtenidos a partir de la Dirección General de Aguas (DGA). También, la batimetría del lago Villarrica, a partir de un estudio del Instituto Geográfico Militar (IGM).
- Finalmente se adquirieron los datos necesarios para realizar la calibración de los modelos numéricos. Para la calibración del modelo hidrodinámico se extrajeron las observaciones de temperatura y para el modelo de calidad de agua, se tomaron en cuenta las mediciones de fósforo total y nitrógeno total en las estaciones de monitoreo del lago.

### 1.3.2. Modelo Hidrodinámico

Para la implementación del modelo hidrodinámico en el lago Villarrica, se hace uso del software Delft 3D, específicamente el modulo 3D-Flow. A continuación se muestra el procedimiento que se llevó a cabo para realizar las simulaciones del modelo numérico.

- Se estudió el funcionamiento del modulo hidrodinámico mediante el manual de instrucciones del software Delft3D. Además, se analizó la teoría que sustenta el modelo.
- Se elaboró un modelo conceptual que permite entender las diferentes forzantes que se incluyeron en el modelo. En este caso, se consideraron las variables hidrometeorológicas, tales como: vientos, humedad, afluentes, efluentes, radiación solar, nubosidad y temperatura del aire.
- Se realizaron simulaciones tomando como base valores de parámetros físicos, utilizados en estudios enfocados en la hidrodinámica del lago Villarrica.
- Finalmente se calibró el modelo con mediciones en terreno realizadas por estaciones de monitoreo, dispuestas por la DGA, de perfiles de temperatura en diversos puntos del lago. Esta calibración se llevó a cabo mediante el ajuste de parámetros físicos del modelo, con la finalidad de minimizar las métricas de error RMSE y MAE. Asimismo, maximizar la métrica "Model Skill Metric"(MSM).

### 1.3.3. Modelo de Partículas

Para la implementación del modelo de partículas del lago Villarrica, se hace uso del software Delft 3D, específicamente el modulo D-WAQ PART. A continuación se tiene el procedimiento realizado para obtener los resultados esperados:

- Se estudió el funcionamiento del modulo "Particle Tracking" mediante el manual de instrucciones del software Delft3D.
- Se acoplaron los resultados obtenidos de la hidrodinámica, específicamente el campo de velocidades.
- Se definieron los escenarios a simular para dos experimentos numéricos. El primero consta de descargas continuas de trazadores conservativos en el periodo de agosto 2019 hasta julio 2020 a una profundidad de 3 m. En el segundo experimento se consideran descargas continuas de trazadores lagrangianos en dos períodos estacionales: junio-agosto de 2019 y diciembre 2019 a marzo 2020.

- Se consideró como zona de descarga de las partículas las cercanías del río Pucón. Para el experimento numérico de trazadores conservativos se consideraron 10000 partículas. En el caso del experimento de trazadores lagrangianos se consideraron 5000 partículas.
- Por último, en el primer experimento se obtuvo la evolución de partículas en cuatro puntos de observación dentro del lago. En el segundo experimento, se procesaron los resultados del modelo mediante algoritmos implementados en Python. Como resultado, fue posible determinar las vías preferentes de las partículas.

## Modelo de Calidad de Aguas

Para la implementación de un modelo de calidad de aguas del lago Villarrica, se hace uso del software Delft 3D, específicamente el modulo D-WAQ PART. A continuación se tiene el procedimiento realizado para obtener los resultados esperados.

- Se estudio el funcionamiento del modulo "Water Quality" mediante el manual de instrucciones del software Delft3D.
- Se acoplaron los resultados de la hidrodinámica en el modelo de calidad de aguas y se seleccionaron los procesos y sustancias a simular. En este caso se simuló la descarga de ortofosfato, nitrato y amonio realizada en el río Pucón.
- Se incorporó la presencia de biomasa algal, específicamente el grupo de Diatomeas.
- Se calibró el modelo en función de mediciones de nitrógeno total y fósforo total en las estaciones de monitoreo dispuestas por la DGA.
- Por ultimo, se analizó la evolución de los nutrientes y clorofila-A en el periodo de estudio.

### 1.3.4. Interpretación de los resultados obtenidos mediante las distintas simulaciones

## 1.4. Organización del Informe

El desarrollo de este estudio se divide en siete capítulos, los cuales son resumidos a continuación.

En el **Capítulo 2** se encuentra el marco teórico, en el cual se revisan las teorías que sustentan los fenómenos más importantes que gobiernan la termo-hidrodinámica y la calidad de aguas en los cuerpos lacustres.

El **Capítulo 3** está enfocado en detallar los aspectos mas relevantes en la zona de estudio. Esta sección se divide en tres partes. En la primera se detalla la zona de estudio. En la segunda se exhiben antecedentes de la hidrodinámica, condición trófica y del plan de descontaminación por clorofila-A, fósforo disuelto y transparencia del Ministerio del Medio Ambiente de Chile, en el lago Villarrica. Por último, se detallan las fuentes de información utilizadas para el desarrollo de esta investigación, en el cual se encuentran las forzantes meteorológicas y las estaciones de monitoreo de parámetros físico-químicos dentro del lago Villarrica.

El procedimiento realizado para elaborar los modelos numéricos se detallan en el **Capítulo 4**, en el cual se exponen las principales decisiones, y parámetros físicos, químicos y numéricos adoptados para el funcionamiento del modelo hidrodinámico y de calidad de aguas. Junto a esto, se resumen los resultados de la calibración de cada modelo numérico.

En el **Capítulo 5** se muestran los principales resultados y discusiones de este estudio. Se divide en tres partes: modelo hidrodinámico, modelo de partículas y modelo de calidad de aguas. Con respecto al modelo hidrodinámico los resultados se reflejan en tres secciones (1) estratificación térmica; (2) respuesta del cuerpo lacustre ante la acción del viento; (3) circulación general del lago Villarrica. En el modelo de partículas se detallan los resultados de los experimentos numéricos asociados a descargas de trazadores conservativos y trazadores lagrangianos. Finalmente, se evidencia la evolución de los nutrientes descargados en el río Pucón y su interacción ante la presencia de biomasa algal.

En el **Capítulo 6** se exhiben las principales conclusiones obtenidas a partir del estudio realizado.

Finalmente, se adjuntan las referencias utilizadas para el desarrollo de esta investigación

# Capítulo 2

## Marco Teórico

### 2.1. Estratificación térmica y mezcla en lagos

La termo-hidrodinámica hace referencia a los procesos físicos asociados al transporte de calor, energía, masa y momento en una masa de agua. Estos procesos en conjunto se caracterizan por tres aspectos principales: distribución de temperatura, corrientes y turbulencia (Niño, 2019b). Estos poseen la característica de ser interdependientes entre si, lo que quiere decir que cada aspecto se ve afectado y modulado por los otros dos. En el caso de los lagos, la distribución de temperatura es impulsada por la radiación solar (o el intercambio de calor con la atmósfera). Las corrientes y turbulencia se generan principalmente por el viento, flujos de entrada y salida, efectos boyantes y, eventualmente, la fuerza de Coriolis (Niño, 2019b). Esta última puede influir en la hidrodinámica dependiendo del tamaño del cuerpo de agua y su latitud.

La radiación solar que actúa sobre la superficie libre de un lago, tiende a generar un gradiente de temperatura en la vertical debido a la difusión de calor hacia aguas más profundas, logrando dividir el fluido en la columna de agua. El gradiente de temperatura, está directamente relacionado con el gradiente de densidad. Para masas de aguas mayores a 4°C, los gradientes positivos de temperatura están relacionados con gradientes negativos de densidad. En una estratificación estable, se tiene que la masa de agua caliente (menor densidad) esta por encima de la masa de agua fría (mayor densidad) y se caracteriza por no tener un movimiento mediante la convección natural dentro de la masa de agua.

Esta estratificación implica que disminuye la energía potencial en la columna de agua, lo que se traduce en una dificultad para los procesos relacionados al intercambio de masa, calor y movimiento entre las capas superficiales y más profundas. Al considerar que la fuente de energía disponible para calentar el agua de un lago proviene de la radiación solar, se puede decir que los cambios en la estratificación ocurren a escala estacional, debido a los cambios en las condiciones atmosféricas y meteorológicas. Por otro lado se tiene una ganancia de energía cinética en la columna de agua, mediante afluentes, efluentes y el viento que actúa en el lago, que tiende a producir una mezcla total o parcial en el interior del lago. En este contexto, es posible definir la termo-hidrodinámica como la interacción entre la energía potencial y energía cinética del cuerpo de agua.

Una forma de entender de manera típica la estructura térmica de un lago que presenta una estratificación estable es mediante 3 capas denominadas epilimnion, metalimnion e

hipolimnion (Ji, 2008).

- **Epilimnion:** El epilimnion es la capa superior del lago donde la temperatura es relativamente uniforme en profundidad, con bastante circulación y turbulencia. Esta capa suele estar bien mezclada por la acción del viento al menos una parte del día (Ji, 2008).
- **Hipolimnion:** El hipolimnion es la capa que está en contacto con la base del lago y se caracteriza por ser la capa mas fría y densa. Esta capa posee una circulación prácticamente nula (Ji, 2008).
- **Metalimnion:** El metalimnion se define como una región finita de transición, dentro de la cual se encuentran fuertes gradientes de temperatura entre el epilimnion e hipolimnion (Ji, 2008).

El termino "termoclina" se ha definido por diversos autores como un plano asociado al máximo gradiente de temperatura entre el epilimnion e hipolimnion. Una mejor definición, para esta es el metalimnión (Niño, 2019b), descrita anteriormente. Sin embargo, este modelo de tres capas, si bien permite entender de forma general el comportamiento de la estructura térmica de un cuerpo de agua, no permite describir detalladamente los procesos físicos que ocurren dentro de la columna de agua.

Un ejemplo para esto, es lo que ocurre en la capa superior (epilimnion). Esta región esta sujeta a diversos cambios en su estructura, debido a que esta responde a los cambios diurnos en los flujos superficiales de calor y momentum, por lo que no suele estar mezclada en su totalidad ni encontrarse en un estado de turbulencia uniforme y constante. Es necesario señalar que, el gradiente vertical de temperatura de una columna de agua está fuertemente relacionado con la resolución del instrumento de medición, es por esto que instrumentos de alta resolución han permitido encontrar gradientes tan fuertes como los encontrados en el metalimnion. Imberger y Patterson (1989), propusieron una estructura térmica mas realista, la cual se encuentra determinada por una capa superficial diurna, termoclina madre, metalimnion e hipolimnion, permitiendo describir de mejor forma un comportamiento diurno de la estratificación en un cuerpo de agua.

Al considerar una estratificación estable, tal que su densidad  $\rho(z)$  aumente en función de la profundidad del lago, la componente vertical de la fluctuación de la velocidad instantánea asociada a la turbulencia, genera pequeñas oscilaciones debido a la interacción entre los efectos boyantes y la acción de la gravedad. La frecuencia de este movimiento se denomina como frecuencia boyante o de *Brünt-Väisälä*, y se define como:

$$N = \sqrt{\frac{-g}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial z}} \quad (2.1)$$

donde  $g$  es la aceleración de gravedad,  $\rho_0$  una densidad de referencia,  $\partial \rho / \partial z$  el gradiente de densidad en la profundidad y  $z$  es un eje vertical definido desde el fondo del lago hasta la superficie libre. De esta forma el gradiente es un valor negativo para estratificaciones estables. Dicho esto, es posible decir que la máxima frecuencia boyante se encuentra en la termoclina.

Una forma de caracterizar la estratificación del lago en la vertical, y los procesos de mezcla,

es mediante el número de Richardson de gradiente:

$$Ri = \frac{g}{N^2} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = \frac{N^2}{(\frac{\partial \bar{u}}{\partial z})^2} \quad (2.2)$$

donde  $\partial \bar{u} / \partial z$  es el gradiente de la velocidad media horizontal en profundidad. Este parámetro adimensional representa la relación entre la energía potencial (Ecuación 2.3) requerida para mezclar verticalmente y la energía cinética turbulenta (Ecuación 2.4) disponible para producir dicha mezcla (Niño, 2019b).

$$W = -gV \frac{d\rho}{dz} \frac{l^2}{2} \quad (2.3)$$

$$E = \frac{1}{2} \rho V \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} l \right)^2 \quad (2.4)$$

donde  $g$  es la aceleración de gravedad,  $V$  un volumen de control,  $\rho$  es la densidad del fluido,  $l$  se asocia al desplazamiento vertical que tiene el fluido el cual es equivalente a la longitud de mezcla de Prandtl's,  $\partial \bar{u} / \partial z$  es el gradiente de la velocidad media horizontal en profundidad.

Los ciclos de estratificación a nivel estacional de los lagos dependen de las condiciones climáticas locales y, por tanto, están relacionadas con su latitud y elevación del lago. Dicho esto, es posible establecer una clasificación de los lagos en función del régimen de estratificación a nivel estacional (Ver Figura 2.1).

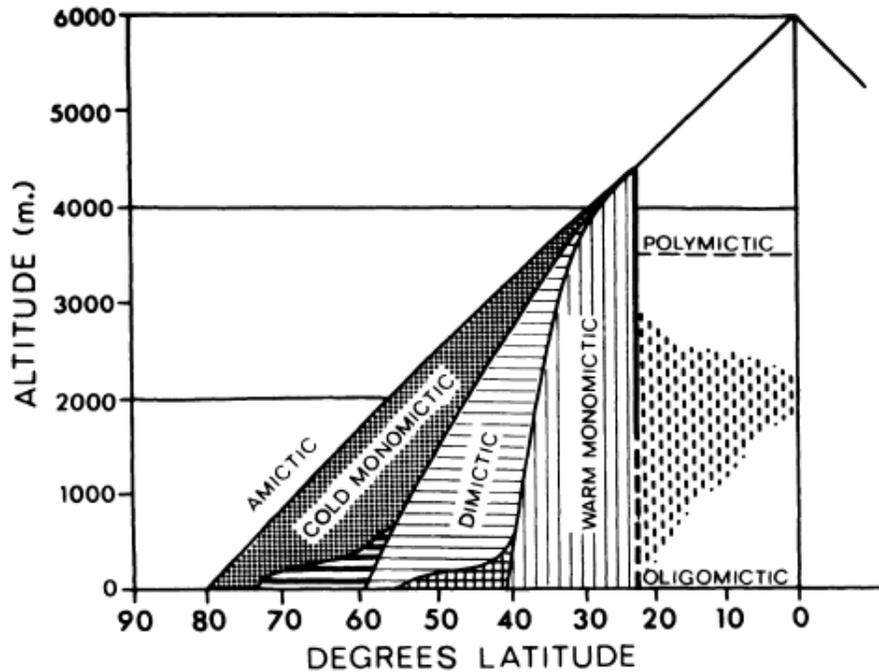


Figura 2.1: Clasificación para los distintos lagos en función de su latitud y elevación. Rescatado de (Wetzel, 2001).

A continuación, se presenta una definición de cada uno de los tipos de lagos vistos en la

Figura 2.1.

- Lagos amícticos: Nunca se mezclan ni sufren una rotación porque tienen una cubierta de hielo permanente.
- Lagos dimícticos: Tienen dos eventos de recambio al año, en primavera y otoño, y mantienen una estratificación estable en verano e invierno.
- Lagos monomícticos fríos: Las temperaturas del agua nunca superan los 4°C, y sólo tienen un evento de recambio a finales de la primavera por debajo de los 4°C
- Lagos monomícticos cálidos: Tienen un solo evento de recambio a finales de otoño por encima de 4°C. Nunca forman una capa de hielo.
- Lagos oligomícticos: Están estratificados térmicamente gran parte del año con eventos raros e irregulares de circulación.
- Lagos polimícticos: Presentan períodos frecuentes o continuos de mezcla al año como consecuencia de los fuertes vientos y los escasos cambios estacionales de la temperatura del aire.
- Lagos meromícticos: Permanecen perennemente estratificados debido a los fuertes gradientes de salinidad.

## 2.2. Respuesta de un cuerpo de agua estratificado forzado por el viento

La termo-hidrodinámica de lagos y embalses esta fuertemente relacionada con el movimiento de un flujo estratificado afectados por forzantes externas, siendo la acción del viento, calentamiento de la superficie y flujos afluentes y/o efluentes los principales impulsores del movimiento del cuerpo de agua (Imboden y Wüest, 1995). En ausencia de fuertes afluentes y efluentes el viento adquiere gran importancia, ya que se considera el principal forzante que inyecta energía cinética turbulenta y momentum (Imberger y Patterson, 1990); por lo tanto, es este el responsable en la generación de ondas superficiales e internas, así como también de la circulación y la turbulencia, lo que conduce a una mezcla vertical en la columna de agua (Stevens y Imberger, 1996).

El viento al soplar por la superficie libre de un cuerpo de agua con una dirección e intensidad determinada, genera una respuesta en el cuerpo de agua que depende de su estructura térmica. En este caso se analizaran dos casos: una estructura no estratificada y una estratificada con dos capas. A continuación se detallan los cálculos solamente en el caso de una estructura de dos capas, los cuales fueron resueltos en (Niño, 2019a).

### Cuerpo de agua estratificado en dos capas

Si se considera un cuerpo de agua con una estratificación estable y un viento que sopla por la superficie libre de este en la dirección  $x$ , el esfuerzo de corte ( $\tau_s$ ) actúa sobre la superficie

en la misma dirección del viento (Figura 2.2). Este esfuerzo de corte se transmite en la profundidad e induce el movimiento de las aguas.

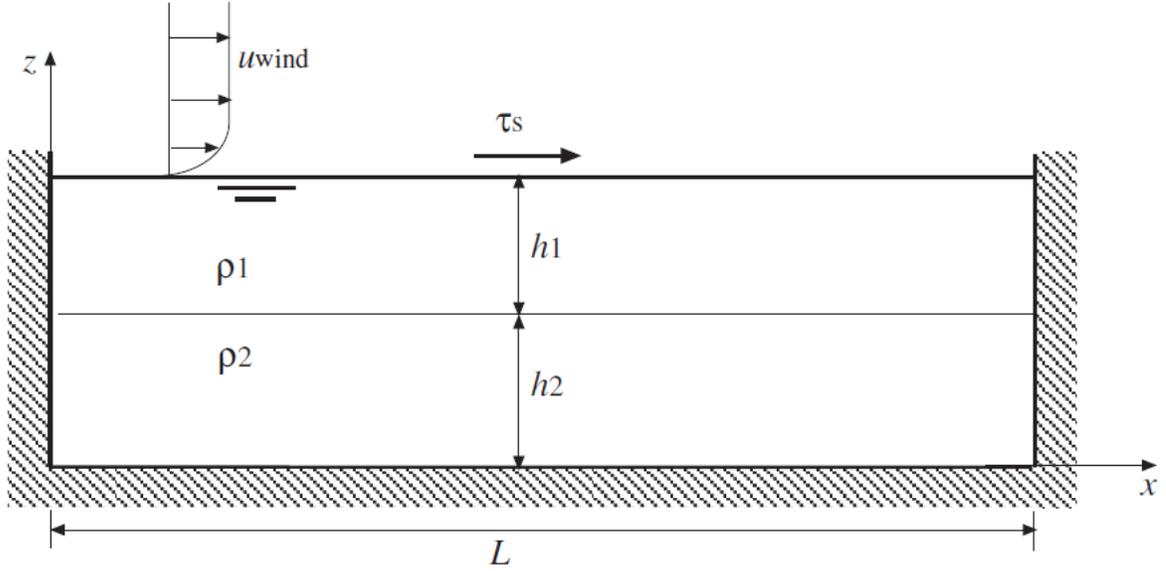


Figura 2.2: Esquema inicial de un cuerpo de agua estratificado establemente en dos capas, en el que actúa un viento en la dirección longitudinal  $x$ . Rescatado de Niño (2019a).

Asumiendo que el flujo solo se mueve en el plano  $x - z$ , las ecuaciones que gobiernan el movimiento son las de Navier-Stokes promediadas de Reynolds (RANS):

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_i \frac{\partial u_i}{\partial x} + w_i \frac{\partial u_i}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_i} \left( \frac{\partial \hat{p}}{\partial x} \right)_i + \frac{1}{\rho_i} \frac{\partial (\tau_{xx})_i}{\partial x} + \frac{1}{\rho_i} \frac{\partial (\tau_{zx})_i}{\partial z} \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial w_i}{\partial t} + u_i \frac{\partial w_i}{\partial x} + w_i \frac{\partial w_i}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_i} \left( \frac{\partial \hat{p}}{\partial z} \right)_i + \frac{1}{\rho_i} \frac{\partial (\tau_{xz})_i}{\partial x} + \frac{1}{\rho_i} \frac{\partial (\tau_{zz})_i}{\partial z} \quad (2.6)$$

donde  $u_i$  y  $w_i$  son las velocidades del flujo en la dirección horizontal y vertical en la capa  $i$ , respectivamente, donde  $i = 1, 2$ ;  $\hat{p}_i$  es la presión motriz en la capa  $i$ ;  $\rho_i$  es la densidad en la capa  $i$ ;  $(\tau_{xx})_i$  y  $(\tau_{zz})_i$  denota el esfuerzo normal en la dirección  $x$  e  $z$ , respectivamente; por ultimo  $(\tau_{zx})_i$  y  $(\tau_{xz})_i$  son los esfuerzos de corte en la dirección longitudinal y vertical en la capa  $i$ , respectivamente. Luego, despreciando los términos no lineales (componente advectiva al lado izquierdo de la ecuación), velocidades verticales ( $w_i$ ) son pequeñas y que la configuración de la Figura 2.2, es tal que se puede considerar una capa limite ( $L \gg h_1 + h_2$ ), las ecuaciones 2.5 y 2.6, se reducen a:

$$\frac{\partial w_i}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_i} \left( \frac{\partial \hat{p}}{\partial x} \right)_i + \frac{1}{\rho_i} \frac{\partial (\tau_{xz})_i}{\partial x} \quad (2.7)$$

$$0 = \left( \frac{\partial \hat{p}}{\partial z} \right)_i \quad (2.8)$$

Adicionalmente, se tiene la ecuación de continuidad, la cual es derivada de la conservación

de la masa. Considerando que se tiene un fluido incompresible:

$$\nabla \cdot \vec{v} = \frac{\partial u_i}{\partial x} + \frac{\partial w_i}{\partial z} = 0 \quad (2.9)$$

Asumiendo que el viento induce un desplazamiento vertical  $\xi_1$  en la superficie libre y  $\xi_2$  en la interfaz de densidad (Figura 2.3) y tomando en consideración que se tiene una presión hidrostática en cada capa (Ecuación 2.8), el gradiente de presión motriz en cada capa respecto al eje longitudinal queda determinado a través de la siguiente expresión.

$$\left(\frac{\partial \hat{p}}{\partial x}\right)_1 = \rho_1 g \frac{\partial \xi_1}{\partial x} \quad (2.10)$$

$$\left(\frac{\partial \hat{p}}{\partial x}\right)_2 = \rho_1 g \frac{\partial \xi_1}{\partial x} + (\rho_2 - \rho_1) g \frac{\partial \xi_2}{\partial x} \quad (2.11)$$

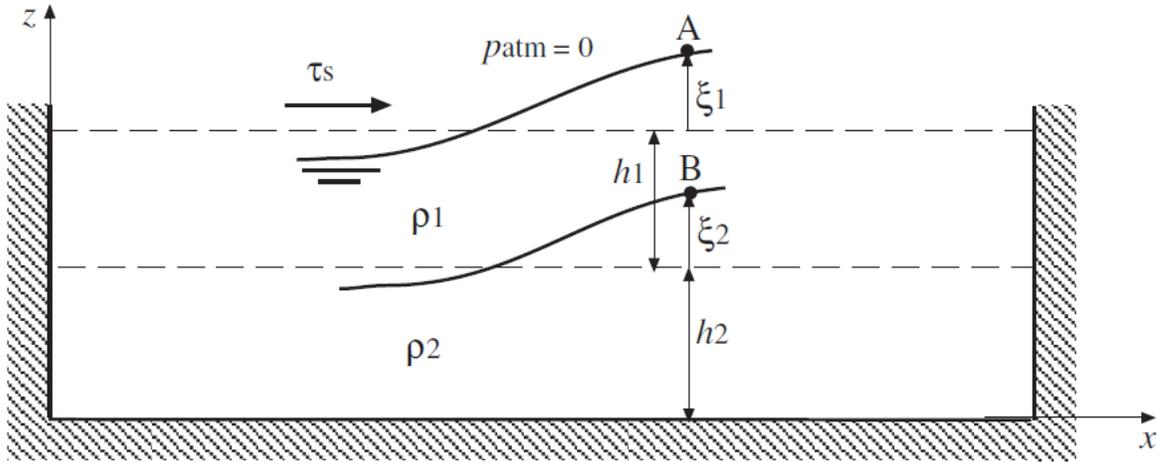


Figura 2.3: Definición para los desplazamientos de la superficie libre y la interfaz de densidad mediante la acción del viento,  $\xi_1$  y  $\xi_2$ , respectivamente. Rescatado de Niño (2019a).

Al reemplazar las ecuaciones 2.10 y 2.11 en la ecuación 2.7 e integrando ambas ecuaciones en la vertical, se obtiene:

$$\frac{\partial U_1}{\partial t} = -g \frac{\partial \xi_1}{\partial x} + \frac{1}{\rho_1 h_1} ((\tau_s) - (\tau_i)) \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial U_2}{\partial t} = -g \frac{\rho_1}{\rho_2} - g \frac{(\rho_2 - \rho_1)}{\rho_2} \frac{\partial \xi_2}{\partial x} + \frac{1}{\rho_2 h_2} (\tau_i - \tau_f) \quad (2.13)$$

donde  $U_1$  y  $U_2$ , son las velocidades promediadas en profundidad en la capa 1 y 2, respectivamente;  $\tau_s$ ,  $\tau_i$ ,  $\tau_f$  son los esfuerzos de corte que actúan en la superficie libre, interfaz de densidad y en el fondo, respectivamente. Finalmente, considerando que  $\tau_b$  es pequeño en comparación a  $\tau_s$  (Spigel y Imberger, 1990) y analizando el flujo en un estado estacionario ( $\partial U / \partial t = 0$ ), se llega a la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial \xi_1}{\partial x} = \frac{\tau_s}{gh_1 \rho_1} \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial \xi_2}{\partial x} = -\frac{\rho_1}{(\rho_2 - \rho_1)} \frac{\tau_s}{gh_1 \rho_1} \quad (2.15)$$

De esto es posible deducir que la termoclina posee una inclinación en el sentido contrario de la interfaz de la superficie libre, lo cual se explica por la conservación del volumen de ambas capas (ver Figura 2.4). Al dividir la ecuación 2.14 en 2.15, se obtiene una relación que cuantifica los efectos en la inclinación entre las ondas superficiales, siendo esta relación aproximadamente 1/1000 (Mortimer, 1952). Por otro lado, al momento en que el viento deja de actuar, se tiene que la interfaz de la superficie y la termoclina experimentan un movimiento oscilatorio denominado seiche y seiche interno, respectivamente.

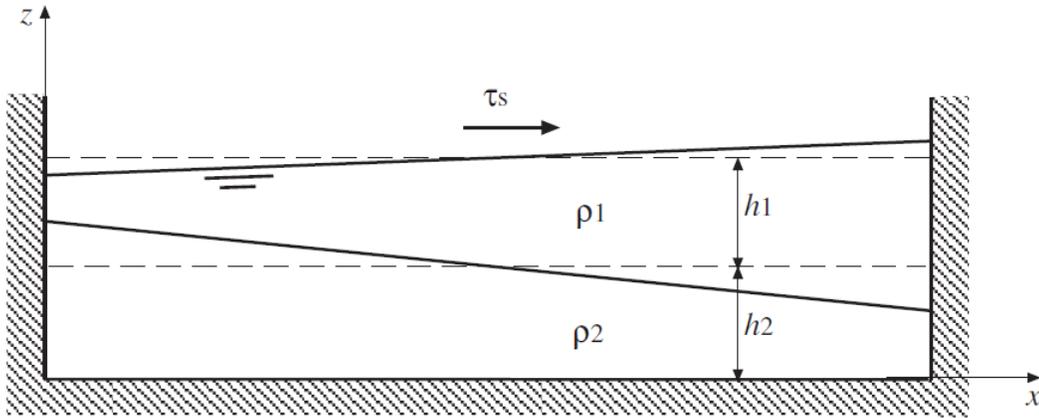


Figura 2.4: Inclinación de la superficie libre e interfaz de densidad debido a la acción del viento en un flujo estratificado de dos capas. Rescatado de Niño (2019a).

### 2.3. Afloramiento de termoclina en la superficie

La acción del esfuerzo de corte ejercido por el viento en la superficie libre de un cuerpo de agua estratificado, trae como consecuencia la inclinación de la termoclina, la cual adquiere una mayor pendiente a medida que aumenta la intensidad del viento (ecuación 2.15). Dicho esto, existe la posibilidad de que ocurra un afloramiento del hipolimnion en la superficie libre. Este fenómeno es conocido como *upwelling* (surgencia). La ocurrencia de este, puede ser medido haciendo uso de un parámetro adimensional denominado número de Wedderburn (Imberger y Hamblin, 1992):

$$W = \frac{g' h_1^2}{u_*^2 L} \quad (2.16)$$

donde  $g' = g(\rho_2 - \rho_1)/\rho_1$  es la gravedad reducida;  $h_1$  es la profundidad de la capa del epilimnion;  $L$  es la longitud en la dirección longitudinal y  $u_* = \sqrt{\tau_s/\rho_1}$  es la velocidad de corte en

la superficie.

Considerando un enfoque lineal y un cuerpo de agua rectangular, se considera que para  $W = 0.5$  existe upwelling, para el cual se asume que los desplazamientos de la termoclina son infinitesimalmente pequeños y el espesor de las capas se considera constante y homogéneo (Spigel y Imberger, 1990). Sin embargo para valores de  $W < 3$  esta suposición deja de ser valida, ya que los efectos de las amplitudes de las oscilaciones en la termoclina deben ser considerados en el balance de fuerzas. Considerando esto, se obtuvo un valor de  $W = 8/9$  en el cual ocurre un afloramiento de la termoclina en superficie (Shintani et al., 2010). Finalmente, el número de Wedderburn varia según la batimetría del lago, por lo que en el estudio realizado por Shintani et al., (2010) extienden la definición de este parámetro:

$$W_{2D} = \frac{2}{L} \frac{g' h_1^2}{u_*^2 (2x_g)} \quad (2.17)$$

donde:

$$x_g = \frac{1}{\Omega} \int_0^L x B(x) dx \quad (2.18)$$

$$\Omega = \int_0^L B(x) dx \quad (2.19)$$

$x_g$  representa la distancia en la dirección longitudinal del centroide de la superficie del lago medido desde el extremo de barlovento;  $B(x)$  representa el ancho del cuerpo de agua a lo largo de la dirección  $x$ .

## 2.4. Ondas internas

Como se mencionó anteriormente, el viento al actuar sobre un lago estratificado produce un peraltamiento de la superficie libre y termoclina, las cuales resultan con una inclinación en direcciones opuestas (ver Figura 2.4). Al dejar de actuar esta forzante, se produce un movimiento oscilatorio de la superficie libre e interfaz de densidad, denominado seiche superficial e interno, respectivamente. Este movimiento es generado debido a que la fuerza gravitacional busca restaurar el cuerpo de agua a su estado de equilibrio. Cabe destacar que este movimiento no se reduce simplemente a flujos estratificados en dos capas, por lo que es posible que se presente mas de una interfaz de densidad y dicha estabilización puede ser desarrollada en distintos modos, los cuales va a depender de la inercia propia de cada capa (Cushman-Roisin y Beckers, 2011). Además es posible decir que las ondas internas son de mayor interés en el estudio de la hidrodinámica de lagos, debido a que involucran mayores volúmenes de agua, lo cual se puede deducir al dividir las ecuaciones 2.14 y 2.15.

### 2.4.1. Efecto de la rotación terrestre

Al considerar la rotación terrestre o la fuerza de Coriolis, los seiches superficiales e internos pueden ser modificados en su trayectoria siguiendo un sentido anti-horario en el hemisferio sur (sentido horario en el hemisferio norte), lo que se traduce en que no existe necesariamente

homogeneidad en las propiedades de un lago en el plano horizontal. El efecto Coriolis se trata de una fuerza inercial o ficticia, la cual permite explicar, para un sistema de referencia en rotación, la aceleración relativa que tiene un objeto dentro de dicho sistema. Si bien todos los objetos en la superficie terrestre experimentan esta fuerza ficticia, no se pueden observar sus efectos para todos los sistemas, debido a que este solo se puede apreciar en fenómenos de gran escala. Con el fin de verificar si el efecto de la rotación terrestre afecta un sistema lacustre, se utiliza el número de Burger ( $S$ ), definido como la razón entre el radio de deformación interna de Rossby ( $R_0$ ) y la máxima longitud del lago  $L$  (Antenucci y Imberger, 2001):

$$S = \frac{R_0}{L} \quad (2.20)$$

donde el radio de deformación de Rossby se define como:

$$R_0 = \frac{c}{f} \quad (2.21)$$

donde  $c$  corresponde a la celeridad, la cual puede ser escrita para ondas superficiales como  $c = \sqrt{gH}$ , donde  $g$  es la aceleración de gravedad y  $H$  es la altura de la columna de agua. En el caso de existir estratificación, la celeridad de una onda interna se puede escribir como:

$$c_i = \sqrt{g \frac{\Delta\rho}{\rho_2} \left( \frac{h_1 h_2}{h_1 + h_2} \right)}$$

(2.22)

donde  $h_1$  la altura de la capa del epilimnion;  $h_2$  la altura de la capa del hipolimnion;  $\Delta\rho$  es la diferencia de densidad de ambas capas.

Por otro lado,  $f$  hace referencia al coeficiente de coriolis:

$$f = 2\Omega \sin(\theta) \quad (2.23)$$

donde  $\Omega$  es la frecuencia angular de la tierra, equivalente a  $7.27 \cdot 10^{-5} [rad \cdot s^{-1}]$ ;  $\theta$  es la latitud del sistema de interés.

El número de Burger puede ser interpretado como la razón entre la velocidad de una onda para el caso sin rotación y la rotación terrestre. Para que un sistema se vea afectado por la rotación terrestre, el número de Burger debe ser menor a 1. Antenucci y Imberger (2001), reportan que los lagos ubicados en latitudes medias presentan un radio de deformación interna de Rossby aproximado de  $5 \text{ km}$ , por lo que para lagos con una extensión mayor a esta longitud, se espera que se vean afectados por el efecto Coriolis. Además, dado que la celeridad de una onda interna es claramente menor que la celeridad de ondas superficiales, se espera que el número de Burger interno sea menor que el numero de Burger superficial. Dicho esto, es más probable que la rotación terrestre afecte las ondas internas que se encuentren en un cuerpo de agua estratificado ya que, para que afecte a las ondas superficiales, se requiere un lago de gran tamaño.

Si consideramos que el efecto Coriolis afecta un sistema lacustre, es posible encontrar como respuesta distintos tipos de ondas internas desarrolladas en el cuerpo de agua, dentro de las cuales se destacan las ondas Kelvin (ver Figura 2.5) y Poincaré (ver Figura 2.6). En el caso de las ondas Kelvin, estas pueden ser sub o súper inerciales, mientras que las ondas Poincaré solo pueden ser superinerciales y su sentido de propagación es contrario al de las ondas Kelvin.

## Ondas Kelvin

Las ondas Kelvin se definen como ondas sinusoidales que se desarrollan en los bordes de un lago y decaen exponencialmente hacia el interior (Hodges et al., 2000), por lo que se espera que sus máximos y mínimos se encuentren en los bordes del lago. En el caso del hemisferio sur, estas ondas adquieren una dirección de propagación anticiclónica.

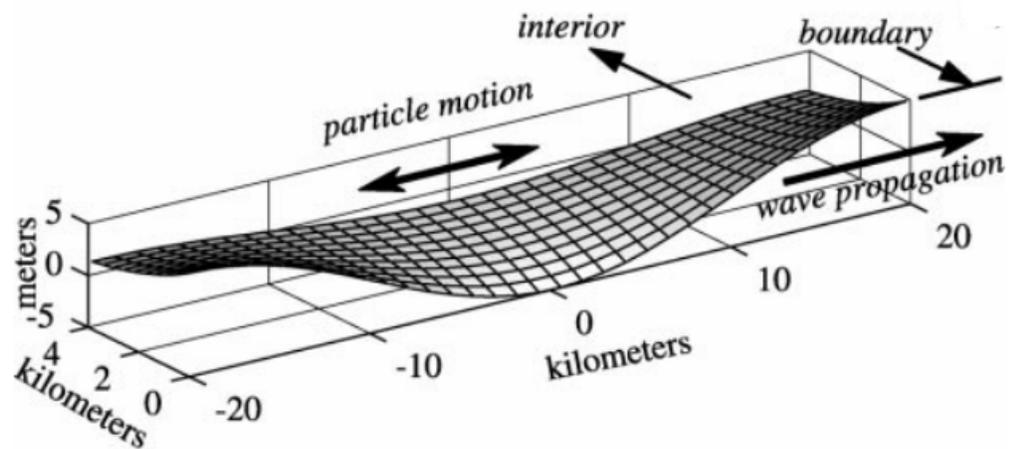


Figura 2.5: Desarrollo de una onda kelvin en un borde costero ubicado en el Hemisferio Norte. Fuente: Hodges et al. (2000).

## Ondas Poincaré

Las ondas Poincaré son ondas que se desarrollan en la zona central de un sistema lacustre, las cuales decaen hacia la periferia del lago. Por lo que se espera que los máximos y mínimos se encuentren en el centro del sistema lacustre. La estructura de estas ondas es similar a una onda sin el efecto rotativo. Sin embargo al considerar el efecto de la rotación esta onda adquiere una trayectoria elíptica siguiendo una dirección de propagación ciclónica en el hemisferio sur.

Las ondas Poincaré pueden ser visualizadas como la superposición de dos ondas sinusoidales progresivas de igual frecuencia, amplitud y número de onda, pero con direcciones de propagación que forman el mismo ángulo con los ejes principales del lago (Mortimer, 1974).

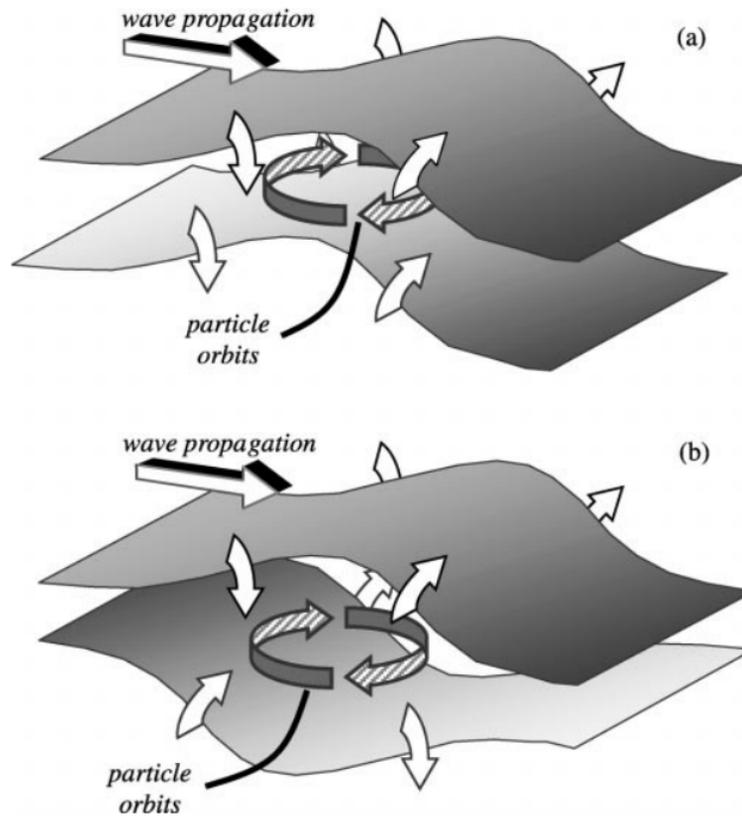


Figura 2.6: Desarrollo de una onda Poincaré ubicada en el Hemisferio Norte en distintos modos. En (a) modo 1 vertical y (b) modo 2 vertical. Fuente: Hodges et al. (2000).

## 2.4.2. Resonancia

Como se mencionó anteriormente, el viento aporta energía a un lago induciendo un movimiento en la termoclina de su posición de equilibrio y posteriormente, la generación de ondas internas. En ausencia de viento, las ondas internas realizan un movimiento oscilatorio, el cual disminuye su energía debido a efectos disipativos, tales como la fricción con las paredes y el fondo del lago. Sin embargo, al considerar que el viento actúa sobre la superficie de un lago con una cierta periodicidad, la cual esta dada por las periodicidad de las condiciones meteorológicas de la zona de interés, se puede analizar la interacción entre el viento y el lago como un oscilador armónico forzado. En el momento en que la frecuencia del forzante (viento) es cercana a la frecuencia de la onda de algún modo normal del sistema lacustre, se produce resonancia. Esto implica que la amplitud de las ondas internas del sistema aumenten.

Rozas et al. (2014), realizó un estudio que consiste en un análisis modal. Este permitió estudiar la presencia de ondas internas de gran escala e identificar modos normales de oscilación del lago, mediante datos en terreno y los resultados numéricos del análisis modal. De los resultados obtenidos, se encontró que la hidrodinámica del lago Villarrica está gobernada en su mayoría por la interacción resonante entre la onda Kelvin fundamental y el viento de periodicidad diaria, la cual es controlada por la fricción presente en el sistema.

## 2.5. Lagos y su estado trófico

Los lagos son un recurso de agua dulce importante, debido a la gran cantidad de servicios que puede surtir. Dentro de estos se destaca el consumo de agua potable, generación de energía, riego agrícola, receptor de eliminación de residuos, actividades recreativas, entre otras (Mitra et al., 2014), así como fuente de agua para hábitat de una variedad de flora y fauna (Oertli et al., 2009).

La eutrofización es un proceso que hace referencia al enriquecimiento de nutrientes, específicamente nitrógeno y fósforo. Este fenómeno puede ocurrir naturalmente, y es potenciado por actividades humanas que se desarrollan en la cuenca de drenaje, las cuales se pueden clasificar como fuentes puntuales (vertidos de aguas residuales e industriales) o difusas (escorrentía agrícola y urbana ) (Donoso, 2011). Para caracterizar el estado trófico que presenta un lago, se hace uso de la clasificación propuesta por Smith et al. (1999), la cual se basa en concentraciones de nitrógeno total, fósforo total , clorofila-A y transparencia del disco Secchi. A continuación, se presenta en la Tabla 2.1 la clasificación de Smith para cada estado trófico.

Tabla 2.1: Clasificación de Smith et al. (1999) para determinar el estado trófico de un lago, según concentración de nitrógeno, fósforo, clorofila-a, y profundidad del disco Secchi.

Estado Trófico	Nitrógeno Total [mg/L]	Fósforo Total [mg/L]	Clorofila-a [µg/L]	Transparencia [m]
Oligotrófico	0 - 0.35	0 - 0.01	0 - 3.5	>4
Mesotrófico	0.035 - 0.65	0.01 - 0.03	3.5 - 9	2 - 4
Eutrófico	0.65 - 1.20	0.03 - 0.10	9 - 25	1 - 2
Hipertrófico	>1.20	>0.10	>25	0 - 1

Una de las principales consecuencias de que un lago posea alto contenido de nutrientes, es el crecimiento de algas fitoplanctónicas. La aparición de estas algas esta dada por condiciones favorables de nutrientes (fósforo y nitrógeno) y también la disponibilidad de luz solar, por lo que estas se encuentran en la zona superficial de la columna de agua. Si se considera la presencia de algas, la disponibilidad de luz en la columna de agua alcanza una menor profundidad, debido a que la turbidez aumenta en el cuerpo lacustre.

Al considerar un lago estratificado, tal como se dijo en secciones anteriores, existe una resistencia a la mezcla entre la capa superior e inferior debido al gradiente de densidad existente entre ambas capas. Dicho esto, la turbulencia generada por la acción del viento, es muy probable que se desarrolle solamente en el epilimnion.

Finalmente, si las algas fitoplanctónicas son organismos fotosintéticos ubicados en la zona superior y que el lago estratificado es resistente a la mezcla entre la capa superior e inferior, la re-aireación en zonas profundas se verá desfavorecida, ya que solo existiría intercambio de oxígeno entre la capa superior y la atmósfera. De esta forma la capa inferior presenta un bajo nivel de oxígeno disuelto, por lo que se podría considerar no apta para la vida, permitiendo que mueran especies presentes en el lago.

# Capítulo 3

## Caso de Estudio

### 3.1. Zona de Estudio

El lago Villarrica es un cuerpo de agua de origen glacial, perteneciente a la cuenca del lago Villarrica (Figura 3.1), la cual esta ubicada en la provincia de Cautín, entre las ciudades de Pucón y Villarrica, en la Región de la Araucanía, Chile. Su principal afluente es el río Trancura, el cual aporta aproximadamente el 90 % del caudal entrante de los afluentes (Decreto 19, 2013). El río Toltén es el único efluente del lago Villarrica, ubicado en la zona oeste del cuerpo de agua. Del estudio limnológico realizado por Campos et al. (1983), se reportan algunos parámetros morfométricos del lago Villarrica, los cuales se resumen en la Tabla 3.1. Además, el lago Villarrica tiene una isla denominada Aillaquillén, con una superficie de 0.005 km<sup>2</sup>.

Tabla 3.1: Parámetros morfométricos del lago Villarrica.

Latitud	39°18' S
Longitud	72°05' O
Altitud	230 m
Largo máximo	23.05 km
Ancho máximo	11.20 km
Área superficial	175.87 km <sup>2</sup>
Profundidad máxima	165 m
Profundidad media	120 m

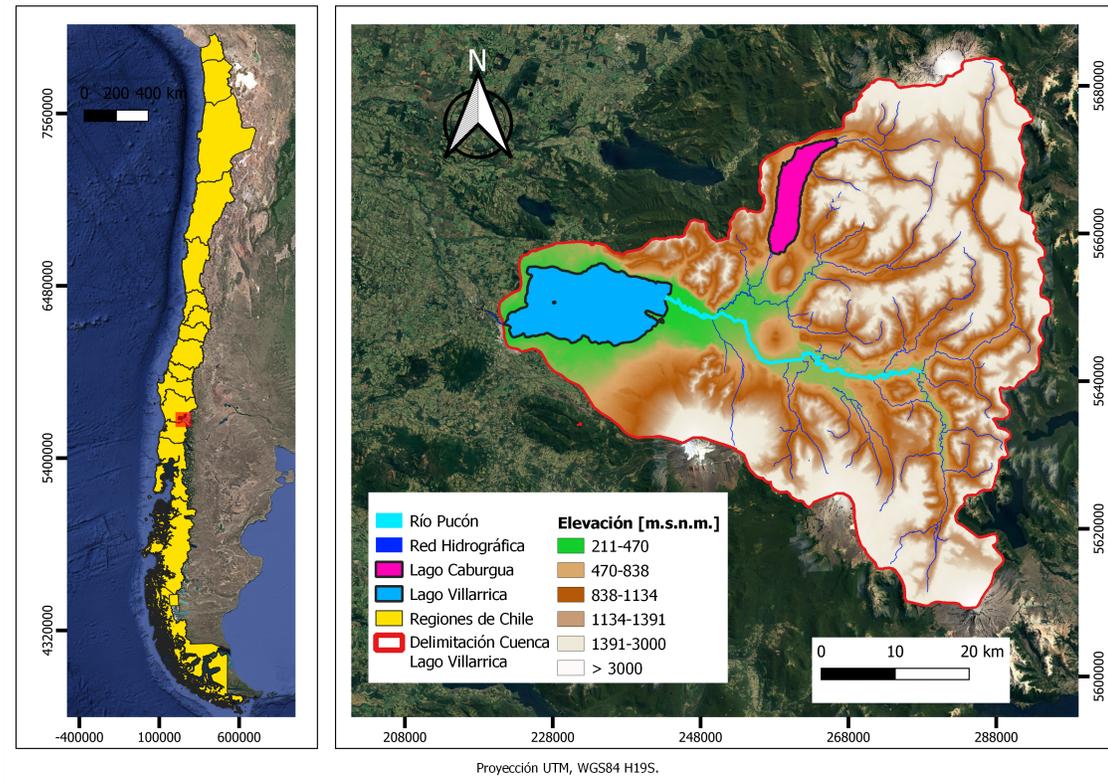


Figura 3.1: Cuenca del lago Villarica, Región de la Araucanía, Chile.

## 3.2. Antecedentes Hidrodinámicos

El régimen térmico de este lago se considera monomítico temperado (Campos et al., 1983), lo cual significa que presenta estratificación en los meses estivales y mezcla completa en invierno. Galaz (2020) realizó un estudio de la hidrodinámica del lago Villarica mediante un modelo hidrodinámico con coordenadas tipo  $\sigma$ , en el cual obtuvo en invierno una estratificación con una termoclina ubicada a 20 m de profundidad y una capa superior a 20°C e inferior a 10°C.

Meruane (2005) obtuvo un número de Burger para el lago Villarica igual a 0.22, por lo que los efectos asociados a la rotación terrestre son importantes para la hidrodinámica del cuerpo de agua. En el estudio elaborado por Rozas et al. (2014), se logró evidenciar que existe una importante interacción resonante entre el viento de periodicidad diaria y la onda Kelvin fundamental, la cual esta controlada por la disipación de energía a partir de la fricción que se genera en las paredes y fondo del lago. Es por esto que, al integrar los efectos de la resonancia, la onda Kelvin adquiere un aumento en su amplitud, en comparación de lo que sucedería si solo se considerara la acción del esfuerzo de corte proveniente del viento, el cual generalmente tiene una baja intensidad. Ulloa et al. (2014) realizó un estudio experimental de la respuesta de ondas internas gravitacionales afectadas por la rotación terrestre en un flujo estratificado, el cual extrapoló al lago Villarica al considerar condiciones adimensionales existentes en el cuerpo de agua. De este estudio, se obtuvo que existe una alta degeneración de ondas internas, observándose la presencia de ondas tipo solitarias mediante las ondas Kelvin, lo cual se espera que ocurra en el lago (Ulloa et al., 2015).

Los vientos que actúan sobre el lago Villarrica generalmente son de baja intensidad y actúan en la dirección Oeste-Este. No obstante, existe la presencia de vientos de alta intensidad que actúan en la dirección Este-Oeste, cuyo fenómeno es denominando Puelche. La respuesta del cuerpo de agua frente al evento tipo Puelche fue estudiado por Meruane (2005). Como principales resultados obtenidos en este estudio, se tiene que: se logra una mezcla vertical en el epilimnion, provocando un aumento en la concentración de fósforo en la capa superficial, por lo que al ser un nutriente esencial para el crecimiento de algas, se produce un aumento en el fitoplancton; existe un cambio en la estructura térmica, lo que se traduce en una disminución de la temperatura superficial debido a la mezcla que se genera en el epilimnion y la evaporación experimentada en la superficie; finalmente se evidencia un cambio en el flujo entre el flujo en condiciones normales, durante el evento Puelche y posterior a dicho evento.

### 3.3. Antecedentes Condición Trófica

En el estudio realizado por la DGA (2018), se evaluó la condición trófica para el lago Villarrica según el índice de Carlson (TSI), indicando un estado Meso-Oligotrófico ( $30 < \text{TSI} < 40$ ) en el año 2017. En este mismo estudio, se analizó la tendencia de la condición trófica del lago Villarrica, mediante la tasa de cambio del índice de Carlson. Para esto se considero una muestra de 28 años entre los años 1986-2017, entregando una tendencia significativa de empeorar su estado trófico. Posteriormente en el estudio realizado por EULA (2021), se reportó que el lago Villarrica en el periodo 2018-2020 sigue en un estado Meso-Oligotrófico, según el índice de Carlson, y al evaluar mediante el índice de Smith (Smith et al., 1999), se obtuvo una condición oligotrófica para nitrógeno y fósforo, mientras que para la concentración de clorofila y transparencia, se tiene un estado eutrófico.

En el área de drenaje del lago Villarrica se presenta el desarrollo de diversas actividades de origen antrópico. Las principales actividades económicas que se destacan son el turismo, ganadería, agricultura, plantaciones forestales y piscicultura (MMA, 2011), siendo esta última la más relevante en la cuenca. Estas actividades influyen en el lago Villarrica, de tal forma que se genera y acelera la presencia de nutrientes esenciales para un cambio del estado trófico en el cuerpo de agua. Del estudio realizado por MMA (2020a), se identificaron las fuentes de contaminación que influyen en el lago, las cuales son caracterizadas como fuentes puntuales o fuentes difusas. En el caso de las fuentes puntuales de contaminación se destacan las pisciculturas, plantas de tratamiento de aguas servidas y a la emisión directa del alcantarillado ubicado en Curarrehue al río Pucón. Por otra parte, las fuentes difusas que se encuentran están asociadas a los procesos de precipitación-escorrentía asociado a coberturas de suelo con vegetación natural y el sector silvoagropecuario, y la emisión en la ribera sur del lago Villarrica producto de emisiones asociadas al sector residencial, las cuales cuentan con un sistema de tratamiento de aguas residuales domiciliarias de fosas sépticas, por lo que mediante la infiltración del suelo existe un aporte de nutrientes al lago.

En el estudio realizado por la DGA (2014), se reporta que el nitrógeno se puede considerar un nutriente limitante en verano para la producción biológica en el lago y al fósforo como nutriente limitante en la temporada de invierno. Posteriormente, según lo estudiado

por EULA (2021), se determinó que el fósforo es el nutriente limitante promedio en distintos puntos del lago, a excepción de la zona centro, donde el nitrógeno es un nutriente limitante en la estación de verano.

Además EULA (2021), pudo caracterizar la comunidad fitoplanctonica del lago Villarrica. En esta se encuentra que las especies más abundantes son las diatomeas de la clase Bacillariophyceae y Coscinodiscophyceae, y también las cianobacterias. Del mismo estudio, mediante mediciones realizadas desde el año 2018 al 2020, se registraron diversos eventos de floraciones de biomasa algal. Dentro de estas se destaca un evento ocurrido en Enero del 2020, donde se alcanzó una concentración celular del fitoplancton máxima cercana a  $5 \cdot 10^6$  cel/L, en la estación Villarrica a 20 m de profundidad, y también se evidenció en las estaciones pelagial Villarrica, centro y litoral sur.

En el estudio de Bravo (2021), se clasificó la condición trófica del lago Villarrica haciendo uso de imágenes satelitales. En los años 2018, 2019 y 2020, el lago Villarrica presenta un estado Oligotrófico, siendo mayor en las áreas litoral Villarrica, Pucón y la Poza. Sin embargo, menciona que su estado trófico puede cambiar considerablemente en poco tiempo, considerando los eventos de floraciones biomasa algal. Asimismo, se pudo detectar floraciones algales en enero y marzo del 2020 (ver Figura 3.2), las cuales siguen un patrón de circulación acorde a la hidrodinámica del lago.



Figura 3.2: Detección de microalgas mediante imágenes satélites para el día 14 de Marzo del 2020. Rescatado de Bravo (2021).

### 3.4. Antecedentes Legales

La protección de la calidad de las aguas superficiales del lago Villarrica está regulada por el Decreto 19 (2013). El decreto tiene como objetivo desacelerar el empeoramiento del estado trófico del cuerpo lacustre mediante la reducción de las descargas de origen antrópico dentro de la red de drenaje del lago Villarrica. El cumplimiento de este, se establece a partir de los niveles señalados en la Tabla 3.2 en seis áreas de vigilancia definidas en esta normativa.

A partir de mediciones realizadas entre enero 2014 y diciembre 2016 en las áreas de vigilancia definidas en Decreto 19 (2013), la cuenca del lago Villarrica se declara como zona saturada por clorofila-A, transparencia y fósforo disuelto mediante el (Decreto 43, 2018). Este decreto entró en vigencia debido a que la clorofila-A, superó los valores máximos establecidos por la norma en todas las zonas de vigilancia. Del mismo modo, los parámetros transparencia y fósforo disuelto registraron niveles de saturación en el periodo enero 2014 - diciembre 2016, en la zona centro del lago y en 4 de las 6 áreas de vigilancia, respectivamente.

A raíz de lo anterior, se inició un plan de descontaminación asociado a los parámetros clasificados como saturados en la cuenca del lago Villarrica (Decreto 43, 2018). Esta medida busca recuperar los niveles señalados en la Norma Secundaria de las aguas superficiales del lago Villarrica 3.2, a través de la definición e implementación de acciones sobre las principales fuentes de descarga de fósforo y nitrógeno en la red de drenaje que alimenta este cuerpo lacustre. A continuación, se señalan algunas de las medidas descritas en el plan de descontaminación, las cuales se encuentran detalladas en el informe realizado por MMA (2020b).

- Control de emisiones asociadas a las siguientes fuentes puntuales: pisciculturas; planta de tratamiento de aguas servidas.
- Control de emisiones asociadas a las siguientes fuentes difusas: aguas residuales domiciliarias sin saneamiento; cobertura de suelo silvoagropecuario; coberturas de suelo urbanas.
- Medidas de gestión para disminución indirecta de nutrientes: fiscalización de la descarga de aguas residuales que son aportantes al lago Villarrica; centros termales deben realizar dos campañas anuales de monitoreo del agua que captan para sus instalaciones, así como para la descarga a cuerpos de agua superficiales y/o subterráneos.
- Compensación de emisiones.
- Plan operacional para el florecimiento de algas.
- Programa de involucramiento ciudadano.
- Programas complementarios: En un plazo máximo de dos años desde la publicación del decreto asociado al plan de descontaminación, el Ministerio del Medio Ambiente deberá iniciar un estudio para elaborar un modelo hidrodinámico y de calidad de agua actualizado para el lago Villarrica.
- Fiscalización, verificación del cumplimiento y actualización del plan.

Cabe destacar que hasta agosto del año 2022, el plan de descontaminación del lago Villarrica se encuentra suspendido, a la espera de la finalización de sus tramites de aprobación.

Tabla 3.2: Niveles de calidad ambiental según la zona de vigilancia para el lago Villarrica. Rescatado del Decreto 19 (2013).

Parámetro	Unidad	Criterio	Zona Pelagial	Zona Litoral
Transparencia (Secchi)	m	Promedio anual	$\geq 9$	$\geq 7$
		Mínimo	$\geq 5$	$\geq 4$
Fósforo Total	mg/l	Promedio anual	$\leq 0.010$	$\leq 0.015$
		Máximo	$\leq 0.015$	$\leq 0.025$
Saturación Oxígeno	%	Mínimo	$\geq 80$	$\geq 70$
Nitrógeno Total	mg/l	Promedio anual	$\leq 0.15$	$\leq 0.15$
		Máximo	$\leq 0.20$	$\leq 0.30$
Clorofila-A	$\mu\text{g/l}$	Promedio anual	$\leq 3$	$\leq 5$
		Máximo	$\leq 6$	$\leq 10$

### 3.5. Fuentes de Información

En esta sección se detallan las forzantes meteorológicas y parámetros físico-químicos del lago Villarrica, las cuales fueron obtenidas a escala horaria mediante la información dispuesta por el Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA) y la Dirección General de Aguas (DGA).

#### 3.5.1. Forzantes Meteorológicas

En la Figura 3.3 se muestran las estaciones meteorológicas y fluviométricas en las cercanías del lago Villarrica. Con respecto a las estaciones meteorológicas, se puede observar que la estación Villarrica, perteneciente a la Dirección Meteorológica de Chile (DMC), se ubica cerca al lago Villarrica y en la mitad del largo mas extenso de este cuerpo de agua, por lo que podría representar adecuadamente las forzantes medidas. Sin embargo, esta estación no presentaba un alto número de registros en el período de estudio. La estación Pucón, perteneciente a la DGA, se ubica en el aeropuerto de Pucón pero no posee registro de observaciones en el período de estudio.

Tomando en cuenta lo anterior, se hizo uso de las estaciones Vida Nueva y Huiscaپی para las forzantes climáticas requeridas por el modelo. La estación Vida Nueva posee un registro aproximado del 95 % en todas las forzantes para el periodo de estudio, además, se ubica mas cerca que la estación Huiscaپی. Es por esto que se seleccionó esta estación para las mediciones de temperatura del aire, radiación solar y humedad relativa, las cuales son importantes para el modelo radiativo del lago Villarrica.

Estaciones fluviométricas y meteorológicas cercanas al lago Villarrica, Chile.  
Proyección UTM, WGS84 H18S.

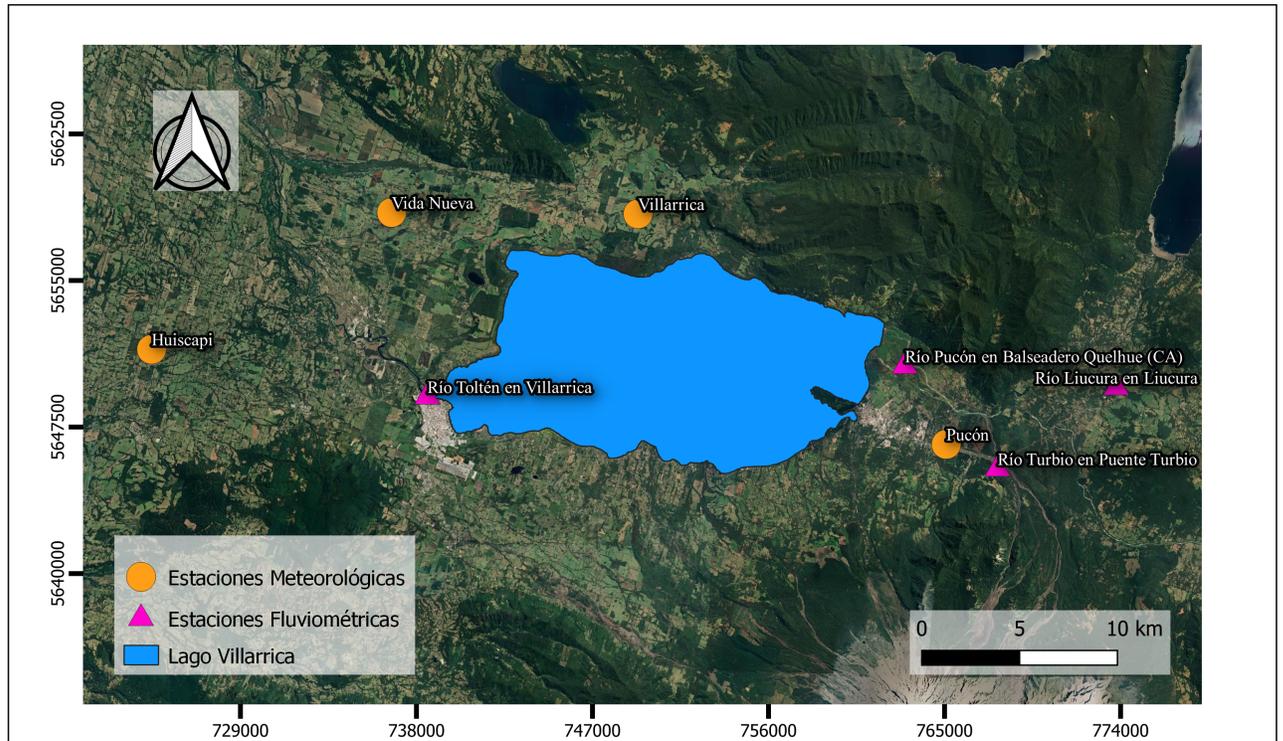


Figura 3.3: Forzantes meteorológicas y fluviométricas en las cercanías del lago Villarrica, Chile. Fuente: Elaboración propia.

Para el resto de las forzantes climáticas, se seleccionó la estación Huiscaqui, específicamente las mediciones de intensidad y dirección del viento. Esta se eligió por sobre la otra estación debido a que se representaban de mejor forma la distribución de dirección de los vientos que actúan en el lago Villarrica, tomando como referencia otros estudios realizados en dicho lago (Galaz, 2020; Bruning, 2018; Rozas, 2011; Ulloa, 2011; Meruane, 2005), y además, esta estación poseía un registro aproximado del 95 % en el periodo de estudio.

Luego se realizó una limpieza de datos para la temperatura del aire, debido a que en ocasiones presentaba valores muy altos. Por esta razón se identificaron como valores atípicos los valores que cumplen con la siguiente condición:

$$T < Q1 - 1.5IQR \vee T > Q3 + 1.5IQR \quad (3.1)$$

donde  $T$  es la temperatura del aire observada;  $Q1$  es el primer cuartil de la muestra de temperatura;  $Q3$  el tercer cuartil de la muestra de temperatura y  $IQR=Q3-Q1$ . Al realizar esta limpieza de datos, se eliminaron una mínima cantidad de observaciones, las cuales solo eran temperaturas mayores a  $40^{\circ}\text{C}$ . Finalmente, considerando que las observaciones sin datos en los registros de las estaciones eran bajas y que el intervalo de tiempo en el cual no

se tenía información era corto, se realizó un relleno de datos mediante una interpolación lineal.

En la Figuras 3.4 y 3.5, se presenta mediante un diagrama de cajas la distribución a nivel mensual de las distintas forzantes meteorológicas obtenidas por las estaciones Huis capi y Vida Nueva en el periodo agosto 2018 - julio 2020.

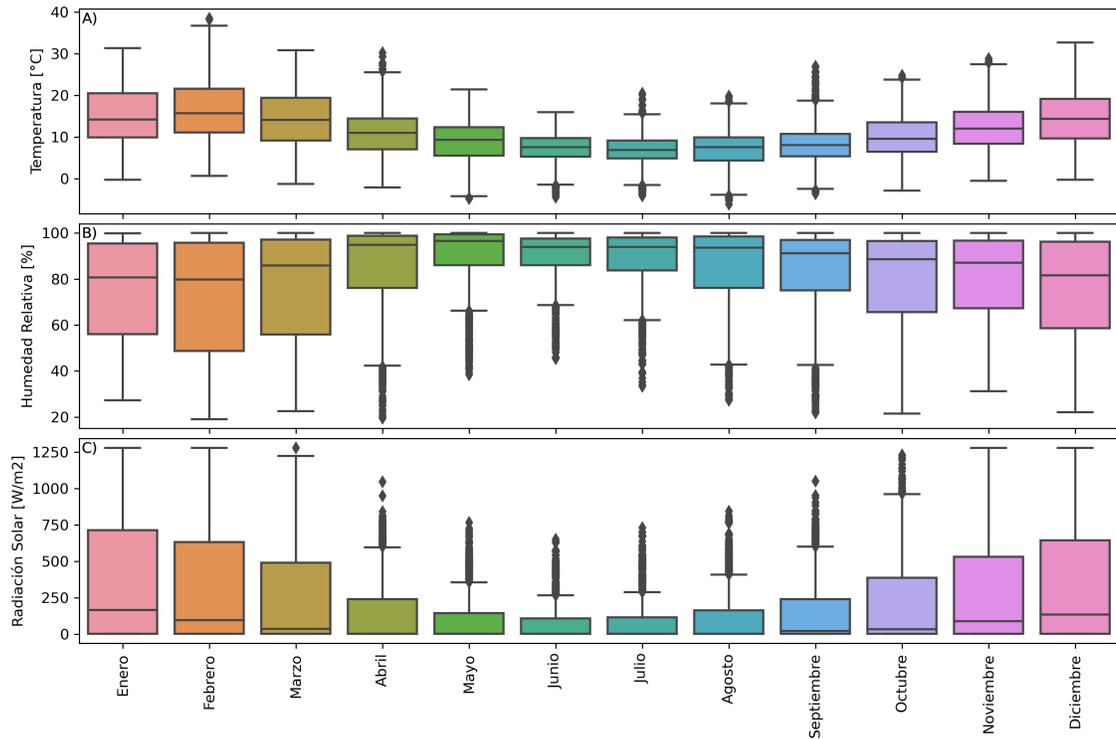


Figura 3.4: Distribución de temperatura, humedad relativa y radiación solar a nivel mensual en el periodo agosto/2018-julio/2020 mediante un diagrama de cajas. Fuente: Elaboración propia.

De la Figura 3.4 se puede apreciar que la temperatura, humedad relativa y radiación solar, poseen una coherencia estacional, debido a que en los meses de invierno se presenta una mayor humedad, y a la vez, se presenta una menor radiación y temperatura con respecto a los obtenidos en verano. Para la temporada estival, se observa que las forzantes presentan una mayor variabilidad, por lo que en el transcurso del día se podría esperar que estas forzantes presenten grandes cambios en su magnitud. Por otro lado, se observa un importante número de valores extremos en el periodo de invierno en la radiación solar y humedad relativa.

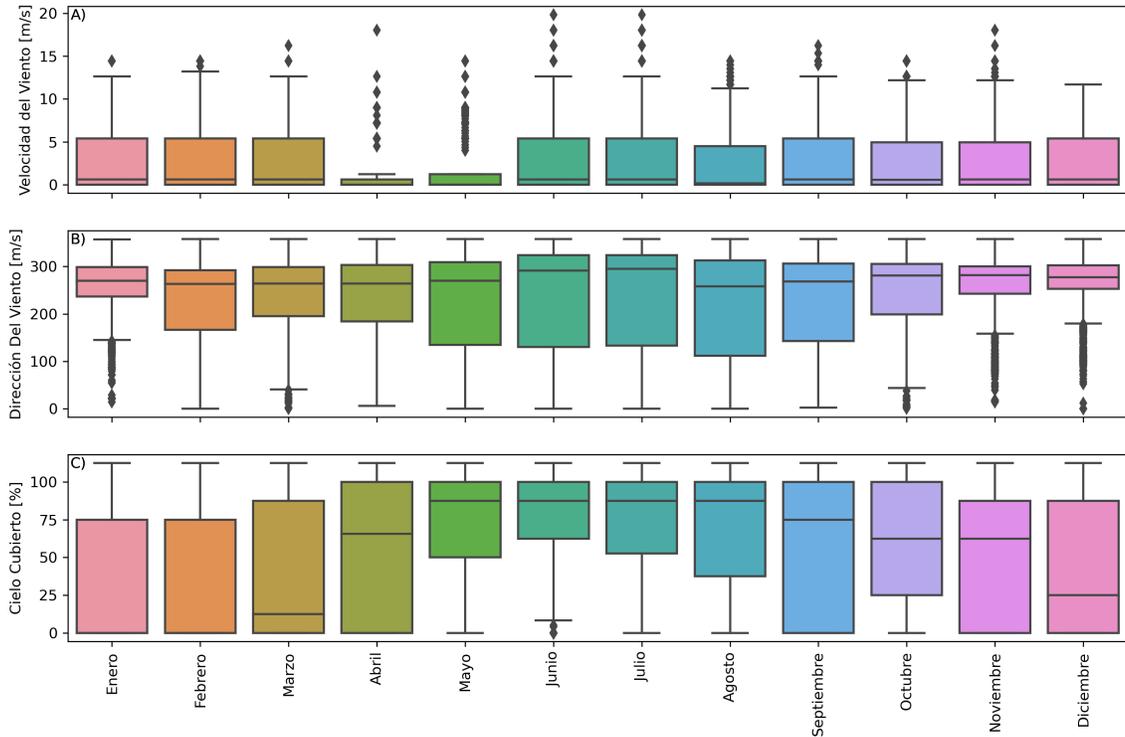


Figura 3.5: Distribución de cielo cubierto, velocidad del viento y dirección del viento a nivel mensual en el periodo agosto/2018-julio/2020 mediante un diagrama de cajas. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3.5 se puede observar la velocidad del viento durante los meses de Enero y Febrero, donde se concentran los vientos de mayor intensidad, destacándose que aproximadamente el 50% de los vientos que actúa lo hace con una intensidad de 5 m/s. Por otro lado, en el mes de junio y octubre se observa la presencia de una gran cantidad de vientos extremos, los cuales alcanzan los 20 m/s.

Con respecto a la dirección del viento, se observa una concentración de al menos el 50% de las observaciones entre los 210° y 330° para todos los meses, lo que significa que los vientos soplan preferencialmente desde el oeste hacia el este, lo cual es lo esperado. Entre el mes de noviembre y abril, se observa la presencia de valores extremos para valores cercanos a los 90°, por lo que estos vientos provienen del Este. Esto permite una primera aproximación en estudiar los eventos tipo Puelche, que se catalogan como vientos de alta intensidad, secos y que actúan desde el Este.

### 3.5.1.1. Temperatura

En el modelo hidrodinámico, la temperatura del aire está involucrada en el balance radiativo de la superficie del cuerpo de agua, por lo que contribuye en el intercambio de calor que existe entre la atmósfera y el lago en esta región.

En la Figura 3.6 se muestra la temperatura promedio diaria y su rango de variabilidad para el periodo agosto 2018 - julio 2019 (calibración) y agosto 2019 - julio 2020 (validación). Las menores temperaturas se encuentran entre los meses de junio y agosto, las que oscilan entre los 0 y 10 °C, presentando una baja variabilidad durante el transcurso del día. En cambio, entre diciembre y febrero, se encuentran las mayores temperaturas y una gran variabilidad en el transcurso del día.

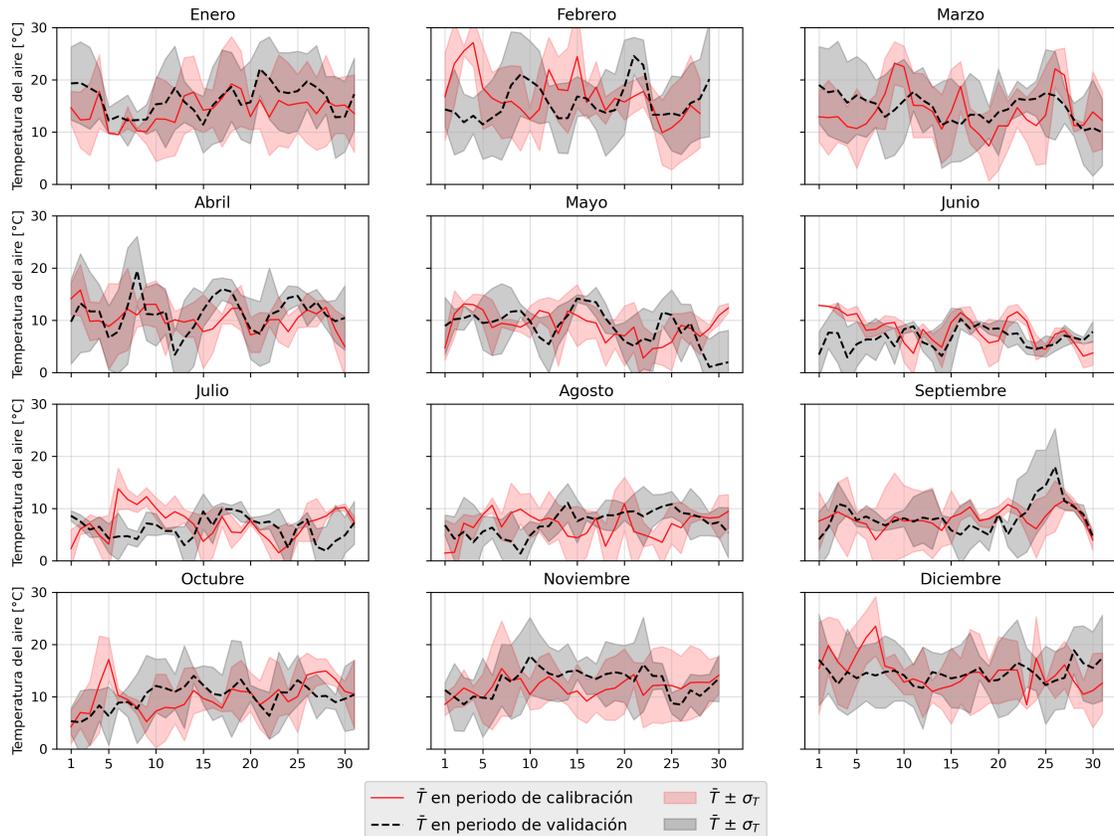


Figura 3.6: Serie de tiempo de la temperatura promedio diaria para cada mes en el periodo de validación y calibración.

### 3.5.1.2. Radiación Solar

Se define la radiación emitida por el sol como un conjunto de radiaciones electromagnéticas. Estas ondas pueden ser captadas por distintos instrumentos de medición. En este caso la estación Vida Nueva mide la irradiancia a partir de un piranómetro que capta la radiación de onda corta, específicamente longitudes de onda entre los 400 y 1100 nm.

La radiación solar interviene en muchos procesos que ocurren en la atmósfera y la superficie, tales como la evaporación, calentamiento de la atmósfera y suelo o fuente de energía para la fotosíntesis. Al considerar la interacción directa entre un lago y esta forzante, la radiación solar no solo contribuye al balance de calor en la superficie libre del lago, sino que también esta penetra en las profundidades del cuerpo de agua, siendo regulada según el nivel

de transparencia que posea el lago.

Al observar la Figura 3.7 se deduce que esta presenta una variación a nivel estacional, ya que se obtiene una mayor magnitud en los meses de verano y menor en los meses de invierno. Dentro del periodo de estudio, se puede observar que para los meses comprendidos entre Octubre y Marzo, el periodo de validación presenta una mayor radiación por sobre el periodo de calibración, por lo que el lago Villarrica podría tener una mayor cantidad de calor en el epilimnion.

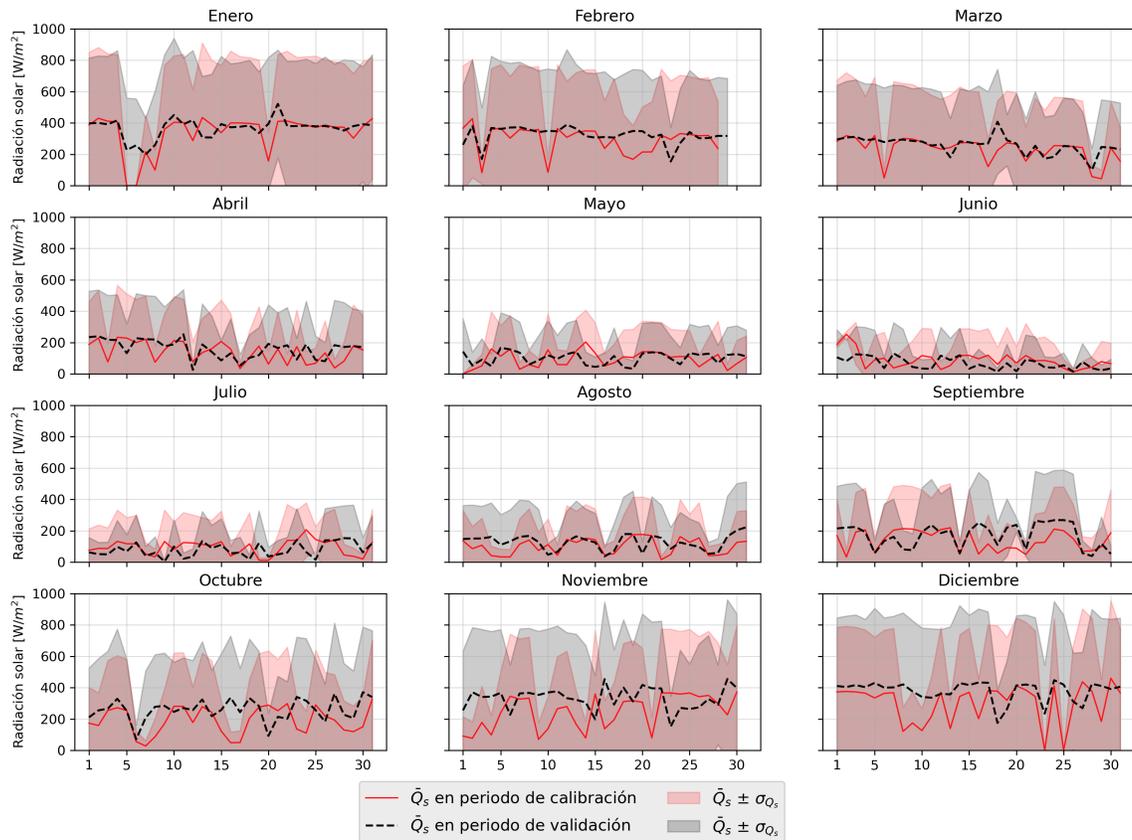


Figura 3.7: Serie de tiempo de la radiación solar promedio diaria para cada mes en el periodo de validación y calibración.

### 3.5.1.3. Humedad Relativa

La humedad relativa, es la razón entre la presión de vapor y el vapor de saturación o equilibrio. Esta variable influye en el modelo radiativo en la superficie del lago. Particularmente se incluye dentro de las ecuaciones que modelan la evaporación que ocurre en este cuerpo de agua. A partir de la Figura 3.8, se puede decir que la humedad relativa presenta valores promedios diarios mayores al 50 % en los meses más fríos. En el caso de los meses más calientes, se observa que la humedad relativa presenta una mayor variabilidad.

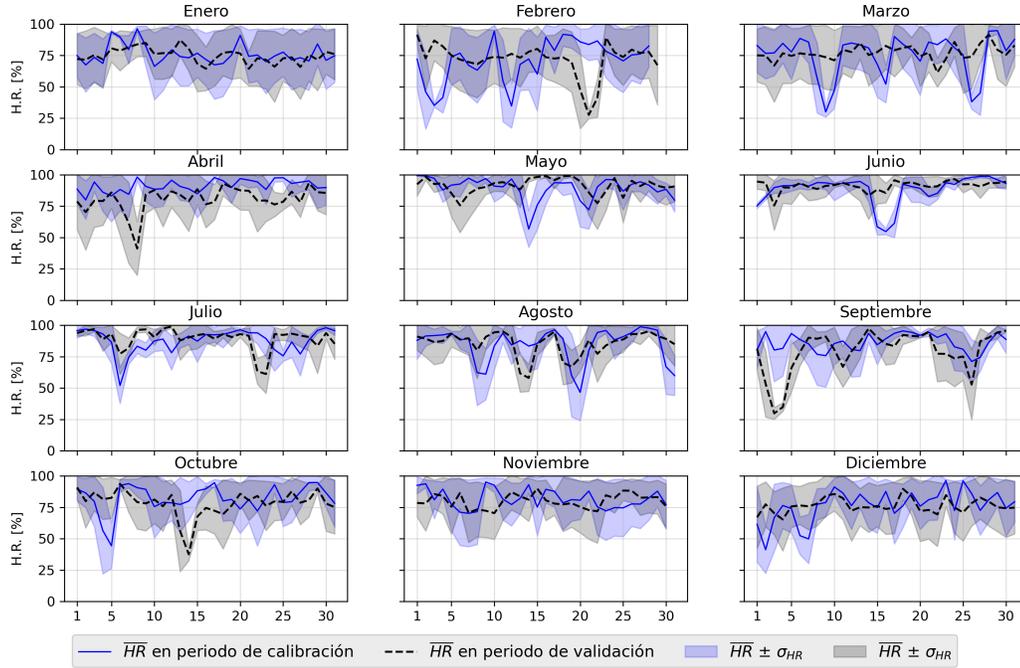


Figura 3.8: Serie de tiempo de la humedad relativa promedio diaria para cada mes en el periodo de validación y calibración.

### 3.5.1.4. Vientos

La información de los vientos que soplan en el lago Villarrica fue obtenida a partir de los datos generados en la estación Huiscaپی, los cuales fueron medidos a 2 m de altura. Es por esto que se hizo necesario corregir la altura a 10 m de altura, debido a los requerimientos del modelo hidrodinámico. Esta corrección se realiza utilizando la aproximación propuesta por Cole y Wells (2006), descrita por la siguiente ecuación:

$$U_{10} = U_{z_1} \frac{\ln(10/z_0)}{\ln(z_1/z_0)}, \quad z_0 = \begin{cases} 0.91 \text{ mm} & \text{si } U_{z_1} \leq 2.23 \text{ m/s} \\ 4.57 \text{ mm} & \text{si } U_{z_1} > 2.23 \text{ m/s} \end{cases} \quad (3.2)$$

donde  $z_1$  es la altura de medición del viento por la estación y  $U_{z_1}$  la magnitud del viento obtenido en dicha estación.

Luego se trasladaron los vientos obtenidos en la estación hasta el centro del lago mediante un modelo lineal realizado por Abarca (2018), basado en la información obtenida del Explorador Climático de la Universidad de Chile:

$$\frac{\sum_{i=1}^N (V_{EC,CEN_i} - V_{EC,EST_i})}{N} = \frac{\sum_{i=1}^M (F \cdot V_{OBS_i} - V_{OBS_i})}{M} \quad (3.3)$$

donde  $V_{EC,CEN_i}$  y  $V_{EC,EST_i}$  representan las velocidades del viento a 10 m de altura obtenida del explorador climático en el centro del lago y en la ubicación de la estación Huiscaپی, respectivamente;  $V_{OBS_i}$  representa la velocidad del viento a 10 m observada en la estación

Huiscapi; F se asocia al factor de conversión para trasladar los vientos desde la estación Huiscapi hacia el centro del lago; M la cantidad de datos obtenidos en la estación Huiscapi y finalmente, N la cantidad de mediciones obtenidas del explorador climático.

A continuación se muestra como se distribuyen los vientos según su intensidad y dirección mediante una rosa de los vientos para cada estación en el periodo de calibración y validación.

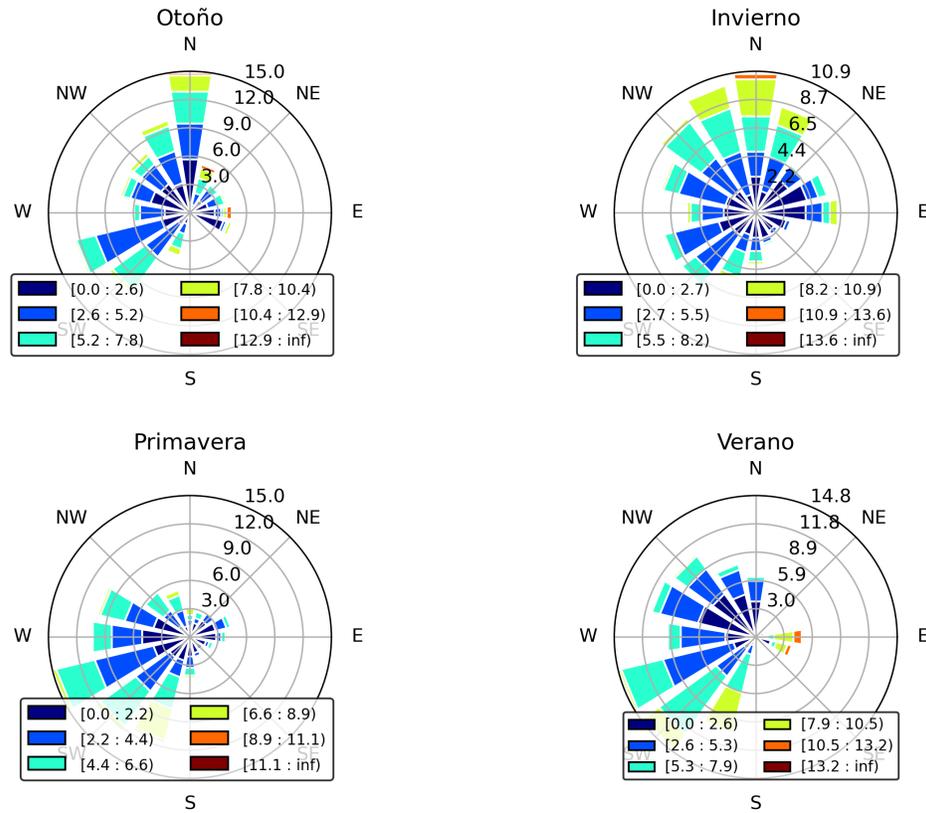


Figura 3.9: Vientos en el centro del lago Villarrica según su estación climática en el periodo agosto 2018 - julio 2019.

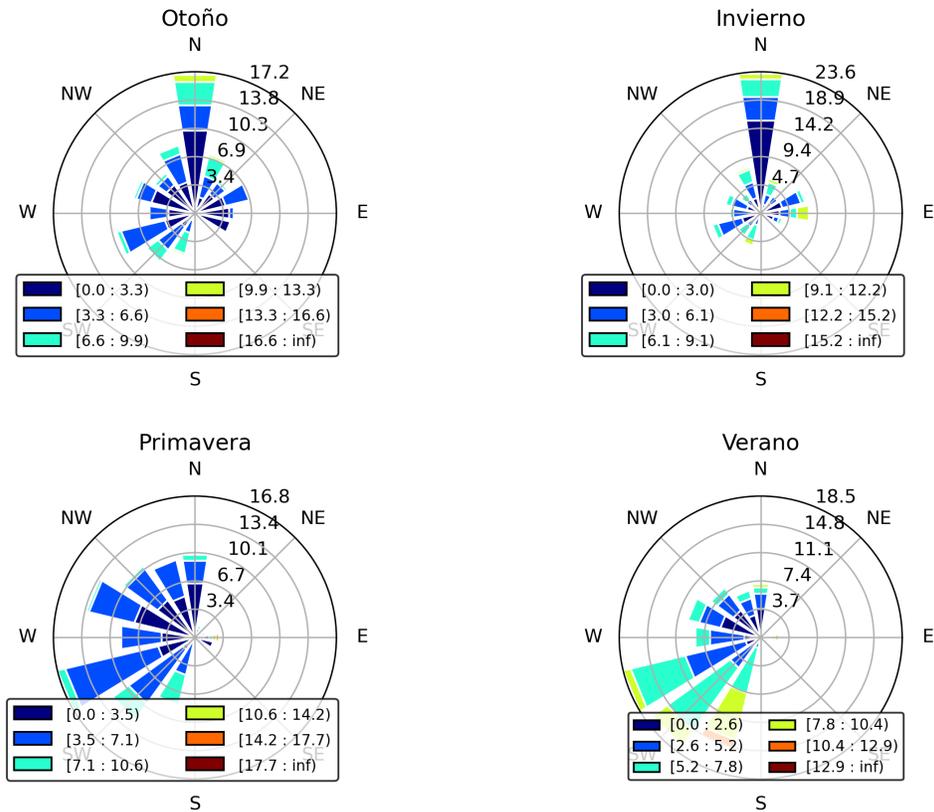


Figura 3.10: Vientos en el centro del lago Villarrica según su estación climática en el periodo agosto 2019 - julio 2020.

## Vientos Puelche

En el estudio realizado por Meruane (2005), se analizó en detalle el evento tipo Puelche sobre el lago Villarrica. Las condiciones necesarias para que ocurra un evento de estos son:

- Aumento importante en la intensidad del viento.
- Vientos provenientes del Este.
- Aumento significativo de la temperatura.
- Disminución de la humedad relativa.

Según esto, se analizaron las forzantes mencionadas para el periodo de validación en verano. Se encontraron tres periodos en los cuales se cumplen las condiciones para la ocurrencia del evento tipo Puelche. En la Figura 3.11 se pueden observar las forzantes y entre las líneas segmentadas los periodos en los cuales se identificó este fenómeno. Cabe destacar que el periodo comprendido entre el 20 y 22 de febrero, muestra un viento puelche muy marcado e intenso.

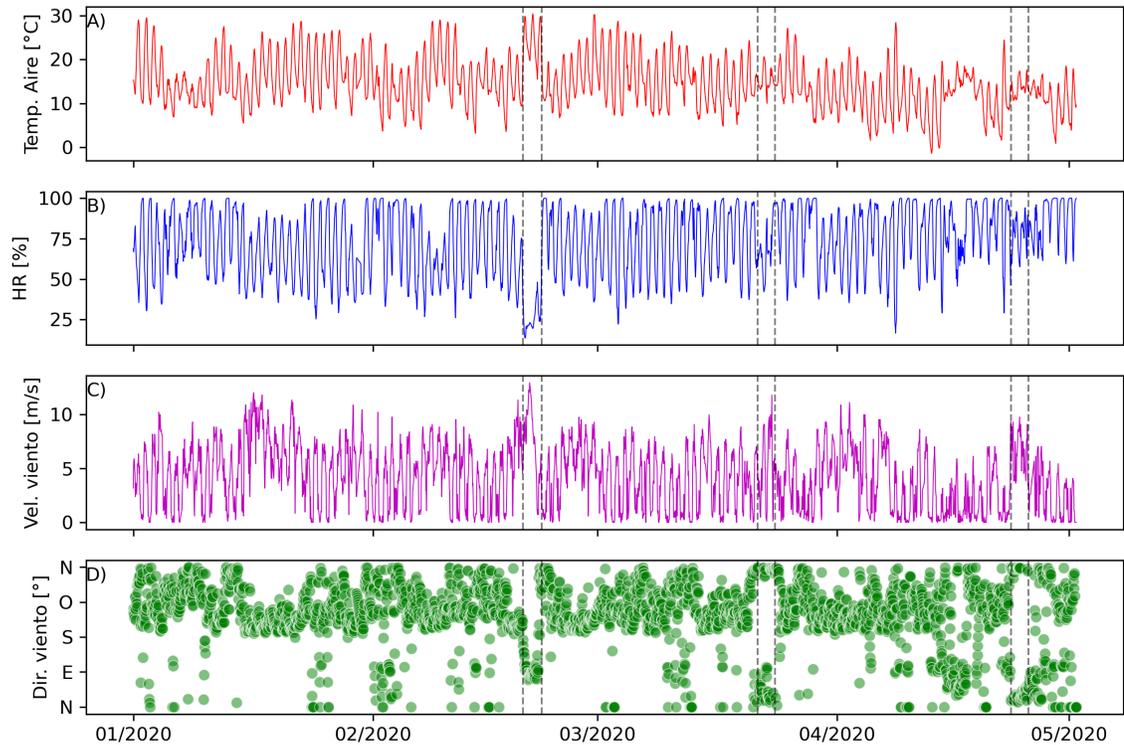


Figura 3.11: Forzantes climáticas en Febrero 2020. En A) temperatura del aire; B) humedad relativa , C) velocidad del viento y D) dirección del viento.

### 3.5.2. Parámetros físico-químicos

En el lago Villarrica existen 7 estaciones de monitoreo vigentes que realizan observaciones de parámetros físico-químicos en el lago Villarrica. Se detalla el código BNA, coordenadas geográficas y fechas de muestreo de estas estaciones en la Tabla 3.3. La frecuencia de muestreo corresponden, generalmente, a 2 mediciones en verano y 2 en primavera. Cada una de estas se realizan a distintas profundidades en las distintas estaciones. Las variables de interés para el desarrollo de este estudio son la temperatura, nitrógeno total y fósforo total. Estas observaciones permitieron calibrar el modelo hidrodinámico y de calidad de aguas. En la Figura 3.12 se observa como se distribuyen estas estaciones de monitoreo en el espacio.

Tabla 3.3: Descripción de las estaciones de monitoreo vigentes dispuestas por la DGA.

Estación	Código BNA	Coordenadas UTM (datum, huso)	Fecha de muestreo
Pelagial Villarrica	09420005	742775 E - 5648639 N (WGS84, 18)	24/10/2018 14:15; 29/01/2019 13:15; 27/02/2019 12:00; 20/11/2019 13:00; 03/12/2019 12:00; 29/01/2020 14:15; 24/02/2020 14:15.
La Poza	09420007	742775 E - 5648639 N (WGS84, 18)	23/10/2018 16:45; 28/01/2019 11:30; 26/02/2019 14:30; 19/11/2019 11:00; 29/01/2020 11:45; 27/02/2020 10:45.
Litoral Villarrica	09420011	741038 E - 5648014 N (WGS84, 18)	24/10/2018 10:00; 28/01/2019 14:00; 26/02/2019 13:00; 19/11/2019 12:30; 03/12/2019 11:00; 28/01/2020 13:30; 26/02/2020 11:00.
Pelagial Centro	09420010	750739 E - 5650548 N (WGS84, 18)	24/10/2018 11:15; 29/01/2019 11:45; 27/02/2019 12:00; 20/11/2019 12:15; 03/12/2019 14:00; 29/01/2020 13:45; 26/02/2020 12:15.
Litoral Sur	09420012	750780 E - 5646596 N (WGS84, 18)	24/10/2018 10:30; 28/01/2019 13:00; 26/02/2019 13:45; 19/11/2019 12:30; 04/12/2019 12:00; 28/01/2020 10:15; 26/02/2020 14:00.
Litoral Norte	09420014	746988 E - 5656378 N (WGS84, 18)	24/10/2018 13:30; 29/01/2019 11:00; 27/02/2019 11:00; 20/11/2019 15:45; 03/12/2019 13:00; 28/01/2020 14:30; 26/02/2020 11:30.
Litoral Pucón	09420013	243157 E - 5649300 N (WGS84, 19)	23/10/2018 15:45; 24/10/2018 13:30; 28/01/2019 12:30; 27/02/2019 13:00; 19/11/2019 11:15; 04/12/2019 11:00; 29/01/2020 12:00; 26/02/2020 14:15.

Estaciones de monitoreo vigentes en el lago Villarrica, Chile.  
Proyección UTM, WGS84 H18.

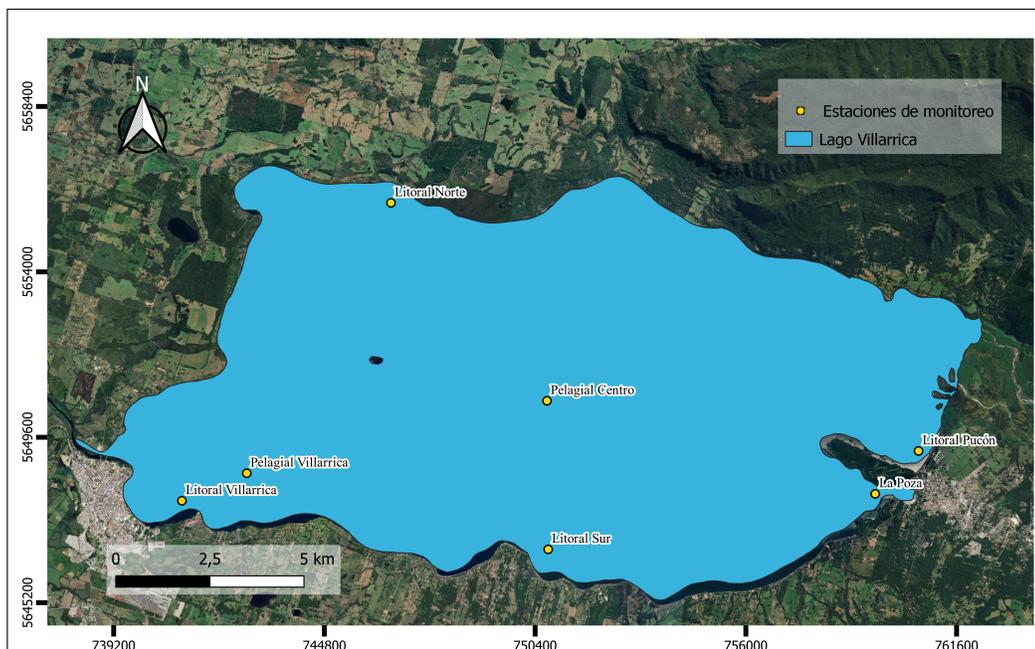


Figura 3.12: Estaciones de monitoreo de parámetros físico-químicos en el lago Villarrica. Fuente: Elaboración propia.

# Capítulo 4

## Modelo Numérico

Delft3D es un software desarrollado por el centro de investigación Deltares. Este centro de investigación se enfoca en estudios de cuerpos de agua superficial y acuíferos, y se ubica en la ciudad de Delft, Holanda. Mediante este software se busca modelar la hidrodinámica del lago Villarrica, con el fin de obtener un modelo de calidad de aguas y la trayectoria de partículas ante potenciales descargas que pueden ocurrir en el cuerpo de agua. Para esto, se hizo uso de los siguientes módulos de Delft3D:

- Delft3D-FLOW: Módulo que permite obtener la hidrodinámica del cuerpo de agua, mediante la resolución de ecuaciones RANS y de transporte. Este modelo es calibrado haciendo uso de mediciones en terreno de perfiles de temperatura.
- D-Water Quality: Módulo que permite obtener un modelo de calidad de aguas, mediante la resolución de ecuaciones de advección-difusión-reacción y el acoplamiento de los resultados obtenidos de la hidrodinámica. Este modelo es calibrado haciendo uso de mediciones en terreno de amonio, nitrato y fosfato.
- D-Waq Part: Módulo que permite obtener la evolución de trazadores conservativos y trazadores lagrangianos en el tiempo, mediante las ecuaciones de advección-difusión. Este modelo se podría calibrar en base a velocidades del lago, las cuales no se posee información para el periodo de estudio. Es por esto que se ocupa el campo de velocidades obtenido en la hidrodinámica.

A continuación, se describe el modelo hidrodinámico y de calidad de agua utilizados en este estudio.

### 4.1. Modelación Hidrodinámica

#### 4.1.1. Características del modelo

##### 4.1.1.1. Tamaño de la malla e intervalo de paso

Para diseñar la malla y el paso de tiempo, se debe considerar un valor tal que se obtenga una simulación estable. Para esto se ocupó la siguiente condición:

- Número de Courant

$$C = \frac{V\Delta t}{\Delta x} < 1 \quad (4.1)$$

donde  $V$  es la velocidad del flujo,  $\Delta t$  es el paso de tiempo de la simulación y  $\Delta x$  es la resolución de la grilla.

Haciendo uso del módulo RGFGRID se refinó la malla computacional del Lago Villarrica. Con esto se obtuvo una grilla en coordenadas cartesianas con 255 celdas en la dirección Este-Oeste y 128 celdas en la dirección Norte-Sur, para el cual se adoptó una resolución espacial de 90 m en el plano horizontal y un  $\Delta t = 1$  min, haciendo válida la condición del número de Courant, ya que en un lago se esperan velocidades inferiores a 1 m/s. Adicionalmente haciendo uso del levantamiento batimétrico realizado por el Instituto Geográfico Militar (IGM) y del módulo QUICKIN, fue posible realizar una interpolación triangular debido a la baja densidad de puntos. Obteniendo como resultado la batimetría en toda la superficie del lago.

Con respecto a la malla vertical, Delft3D permite seleccionar un sistema de coordenadas  $\sigma$  o coordenadas  $Z$ . Las coordenadas  $\sigma$  permite que las capas se adapten según la superficie libre y la batimetría. Por otro lado, las coordenadas  $Z$  permiten que la grilla mantenga capas paralelas a la superficie libre, por lo que cada capa mantiene un  $\Delta z$  constante.

Considerando que el lago Villarrica presenta una estratificación en la época estival, se optó por desarrollar la malla vertical en coordenadas  $Z$ . Esta consta de una malla de 20 capas, donde la zona del epilimnion posee una mayor resolución. La decisión de optar por coordenadas  $Z$  surge a partir de que las líneas horizontales son casi paralelas a la termoclina, por lo que es posible entregar una mayor resolución a esta zona. Esto es importante para reducir la mezcla artificial de propiedades escalares como la salinidad y/o temperatura. Sin embargo, la elección de este sistema de coordenadas no permite representar de forma precisa la zona del hipolimnion, a menos que se considere un número mayor de capas, lo que se traduce en un mayor costo computacional. Dada la configuración del modelo, se puede decir que este contiene 652.800 elementos. A continuación, se presenta la estructura vertical utilizada en el modelo hidrodinámico del lago Villarrica.

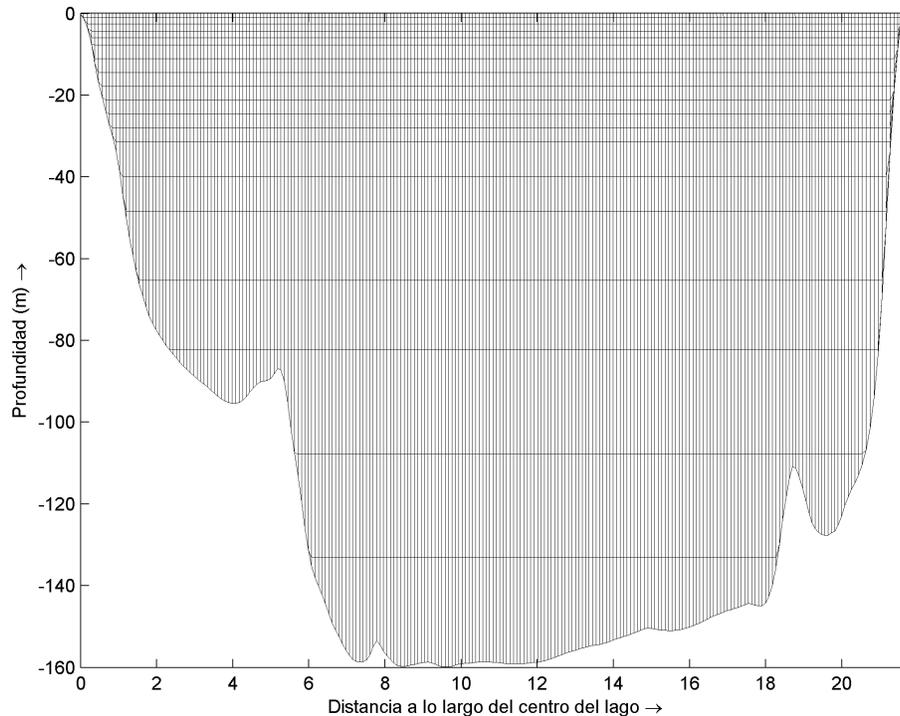


Figura 4.1: Estructura vertical utilizada en el modelo hidrodinámico.

#### 4.1.1.2. Condiciones Iniciales

El modulo FLOW de Delft-3D permite seleccionar distintas opciones para las condiciones iniciales. Estas pueden ser muy simples, como asumir valores uniformes de temperatura y nivel de agua en todo el lago o bien, de mayor detalle, para el cual se requieren valores iniciales que varían en el espacio obtenidos de una simulación anterior.

El lago Villarrica se encuentra completamente mezclado en invierno y los vientos son la principal fuente de energía cinética. Al considerar que los vientos en invierno son bajos, se esperan velocidades bajas en el cuerpo lacustre. Debido a esto, se consideró una situación inicial en el mes de agosto con una temperatura uniforme de 10 °C y una situación de reposo.

#### 4.1.1.3. Condiciones de borde

Para las condiciones de bordes asociada al lago Villarrica, se consideran los principales afluentes y efluentes de este, es decir el río Trancura y río Toltén respectivamente. Estos fueron delimitados mediante el conjunto de nodos frontera de la malla correspondientes. Para el resto de los bordes del lago se esperan velocidades normales nulas. Además, considerando que se tiene una simulación de gran escala, se considera un esfuerzo de corte nulo en los bordes del lago. En el caso de la superficie libre, se considera como condición de borde el esfuerzo de corte realizado por el viento, el cual se puede definir su magnitud según la ecuación:

$$|\vec{\tau}_s| = \rho_a C_d U_{10}^2 \quad (4.2)$$

donde  $\vec{\tau}_s$  es el esfuerzo de corte del viento en superficie;  $\rho_a$  la densidad del aire;  $C_d$  el coeficiente de arrastre y  $U_{10}$  la velocidad del viento a 10 m de altura.

El caudal efluente utilizado en el modulo FLOW, se determinó según la altura de aguas que se presenta en la salida de lago Villarrica. Para poder hacer efectiva esta configuración, se obtuvo la curva de descarga. Esta fue elaborada a partir de las mediciones registradas en la estación fluviométrica Río Toltén en Villarrica 3.3 la cual tiene mediciones de caudal y altura de aguas.

En el caso del caudal afluente, correspondiente al río Pucón, no se tenía un buen registro en la estación fluviométrica Río Pucón en Balseadero Quelhue 3.3, por lo que se adoptó el relleno de datos considerando la siguiente ecuación:

$$Q_a = Q_e + E - P \quad (4.3)$$

donde  $Q_a$  es el caudal afluente;  $Q_e$  caudal efluente; E la evaporación y P la precipitación. Para determinar los flujos evaporativos y de precipitación, se hizo uso del producto grillado del CR2MET. En la Figura 4.2 se observa la serie de flujos evaporativos y precipitación, así como también los caudales efluentes y caudales afluentes simulados. Para la condición de borde del afluente, se consideró el caudal afluente promedio de la serie, obteniendo  $Q_a = 200 \text{ m}^3/\text{s}$ .

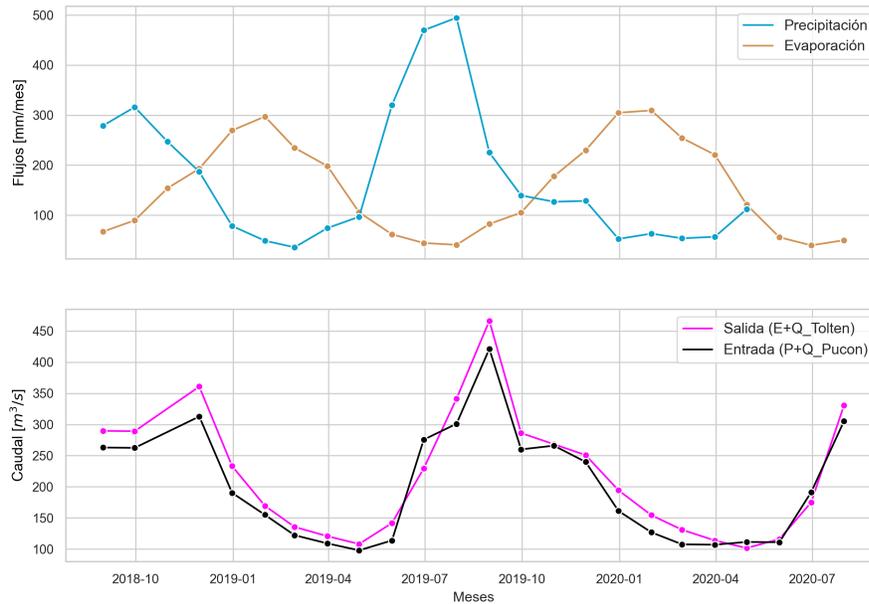


Figura 4.2: Series mensuales de evaporación, precipitación, caudal afluente y efluente del lago Villarrica para el periodo agosto 2018 - julio 2020.

## 4.2. Calibración

Considerando las condiciones mencionadas anteriormente, se agregaron las forzantes que requiere el modelo a una escala horaria desde agosto 2018 a julio 2020 (periodo de modelación). A partir de este periodo, se utilizó el primer año (agosto 2018-julio 2019) como calentamiento o mas bien conocido como "Warm-Up", el cual se compararon los resultados a partir de los perfiles de temperatura obtenidos en el lago Villarrica según las distintas estaciones dispuestas por la DGA (Ver Figura 3.12). La función objetivo de la calibración se basó en disminuir el error cuadrático medio (RMSE) y error absoluto medio (MAE). En complemento a esto, se buscó maximizar la métrica propuesta por Willmott (1981) conocida como "Metric Skill Model (MSM)" y permite medir el desempeño del modelo a través de la siguiente ecuación:

$$MSM = 1 - \frac{\sum (T_{sim} - T_{obs})^2}{\sum (|T_{sim} - \bar{T}_{obs}| + |T_{obs} - \bar{T}_{obs}|)^2} \quad (4.4)$$

donde  $T_{sim}$  es la temperatura simulada;  $T_{obs}$  la temperatura observada y  $\bar{T}_{obs}$  hace referencia al promedio de la muestra de temperaturas observadas.

En la Figura 4.3 se analiza visualmente la dispersión que se tiene entre los resultados observados y simulados a través la función identidad. En primer lugar, se puede observar que las temperaturas en el periodo de validación se encuentran mas dispersas que las de calibración. Sin embargo, los valores de bajas temperaturas son simulados correctamente en ambos periodos. Luego, al fijarnos en temperaturas mas altas, se podría señalar que el modelo reproduce de forma adecuada la temperatura para el periodo de calibración. Al observar el segmento medio, se observa una mayor dispersión con respecto al resto de los segmentos, siendo la estación Litoral Pucón la más crítica. Por último se puede apreciar que existe una mayor cantidad de puntos en la zona superior a la línea segmentada, por lo que se puede decir que en el modelo reproduce una estructura térmica con una mayor cantidad de calor en el estrato superior de la columna de agua.

A modo de cuantificar los resultados obtenidos en la calibración, se adjuntan los valores de RMSE y MAE obtenidos para primavera y verano en cada una de las estaciones en la Tabla 4.1. De esto se puede señalar que los mejores resultados se obtienen en la estación la poza y pelagial centro, las cuales poseen una menor variabilidad. Finalmente los resultados en el periodo de calibración del modelo hidrodinámico se adjuntan en la Tabla 4.2 y para medir el nivel de predicción del modelo se obtuvo un  $MSM = 0.907$  en todo el periodo de estudio (calibración y validación), por lo que el modelo predice de buena forma la estructura térmica del lago Villarrica.

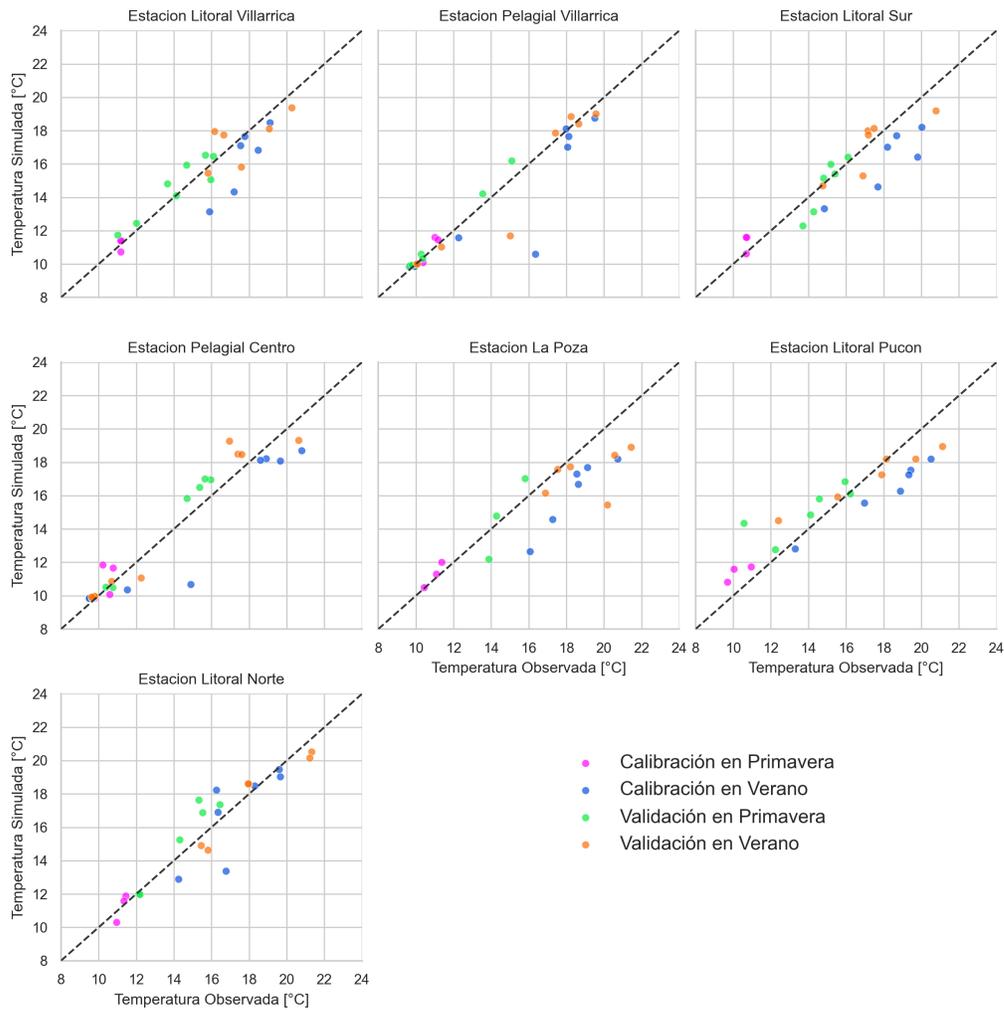


Figura 4.3: Diagrama de dispersión entre las temperaturas simuladas y observadas con respecto a la función identidad.

Tabla 4.1: RMSE y MAE para los perfiles de temperatura en cada estación de monitoreo del Lago Villarrica para el periodo de calibración (agosto 2018-julio 2019).

Punto de observación	Primavera		Verano		Todo el periodo	
	RMSE [°C]	MAE [°C]	RMSE [°C]	MAE [°C]	RMSE [°C]	MAE [°C]
Litoral Villarrica	0.20	0.20	1.04	0.77	0.62	0.48
Pelagial Villarrica	0.27	0.24	1.81	1.08	1.04	0.66
Litoral Sur	0.65	0.62	0.73	0.64	0.69	0.63
Pelagial Centro	0.71	0.57	1.32	0.83	1.02	0.70
La Poza	0.43	0.43	1.16	1,04	0.80	0.73
Litoral Pucón	1.23	1.16	1.02	0.80	1.12	0.98
Litoral Norte	0.18	0.17	2.44	2.00	1.31	1.09

Tabla 4.2: RMSE y MAE de los perfiles de temperatura a nivel global en el Lago Villarrica para el periodo de calibración (agosto 2018-julio 2019).

	Primavera		Verano		Todo el periodo	
Periodo	RMSE [°C]	MAE [°C]	RMSE [°C]	MAE [°C]	RMSE [°C]	MAE [°C]
Calibración	0.52	0.48	1.36	1.02	0.94	0.75

A continuación se resumen los parámetros físicos requeridos por el modelo hidrodinámico que fueron más relevantes al momento de la calibración.

Tabla 4.3: Parámetros utilizados para realizar la calibración del modelo hidrodinámico en el lago Villarrica.

Parámetro	Unidad	Valor
Coefficiente de Chézy	m	110
Viscosidad turbulenta horizontal	$m^2/s$	5
Difusividad turbulenta horizontal	$m^2/s$	5
Viscosidad turbulenta vertical	$m^2/s$	0
Difusividad turbulenta vertical	$m^2/s$	0
Profundidad Secchi	m	11
Número de Dalton	-	0.0015
Número de Stanton	-	0.0015

### 4.3. Modelo Calidad de aguas

El modelo de calidad de aguas se elaboró con la misma resolución espacial del modelo hidrodinámico. Esto quiere decir 90 m en el plano horizontal y 20 capas en la vertical, definidas según coordenadas Z. Para este modelo se adoptó un intervalo de tiempo  $\Delta t = 1$  hr.

Este modelo busca representar la evolución de nutrientes, específicamente nitrato, amonio y fósforo, los cuales son esenciales para el proceso de eutrofización. Para esto fue necesario involucrar distintos procesos que se encuentran dentro de la librería de Delft3D, los que permiten entregar una mejor representación de la evolución de estos nutrientes. Algunos de los procesos/sustancias agregadas fueron: presencia de biomasa algal, oxígeno disuelto, serie de tiempo de la radiación solar, entre otras. Haciendo uso del modulo BLOOM, se incorporó el grupo de algas denominadas Diatomeas.

#### 4.3.1. Características del modelo

##### 4.3.1.1. Condiciones iniciales

A continuación se presentan en la Tabla 4.4, las condiciones iniciales requeridas por el modelo. La selección del valor para el nitrógeno y fósforo, fue bajo el criterio de tener un lago inicialmente en estado Meso-oligotrófico.

Tabla 4.4: Condiciones iniciales para el modelo de calidad de agua.

Sustancia	Unidad	Valor
Oxígeno Disuelto	mg/L	10
Amonio	mg/L	0.03
Nitrato	mg/L	0.11
Ortofosfato	mg/L	0.01

#### 4.3.1.2. Condiciones de borde

Las condiciones de borde son la entrada del río Pucón y la salida del río Toltén, las cuales fueron incorporadas previamente en el modelo hidrodinámico. Para estimar la carga con la que ingresan los nutrientes, se tuvo presente el estudio realizado por UFRO (2020). En el caso del nitrógeno total, se consideró que el nitrato corresponde a un 60 % y el amonio un 25 %, el cual fue un número estimado por Bruning (2018). A continuación, en la Tabla 4.5 se presentan las concentraciones de las sustancias descargadas mediante el río Pucón.

Tabla 4.5: Cargas de nutrientes utilizadas como condición de borde para el modelo de calidad de agua.

Sustancia	Unidad	Valor
Oxígeno Disuelto	mg/L	9
Amonio	mg/L	0.05
Nitrato	mg/L	0.015
Ortofosfato	mg/L	0.002

#### 4.3.2. Calibración

La calibración del modelo de calidad de agua, se realizó en función del nitrógeno total y fósforo total. Para esto se incorporó la metodología empleada por Bruning (2018) donde se considera que el nitrógeno total es la suma de nitrato y amonio, mientras que el ortofosfato representa el fósforo total. Las observaciones de nitrato, amonio y ortofosfato, se obtuvieron a partir de las estaciones de monitoreo de la DGA 3.12.

En la Figura 4.4 se presenta un gráfico de dispersión entre la concentración simulada y observada, el cual permite visualizar el desempeño que tuvo el modelo e interpretar si se está sobrestimando o subestimando la presencia de algún nutriente.

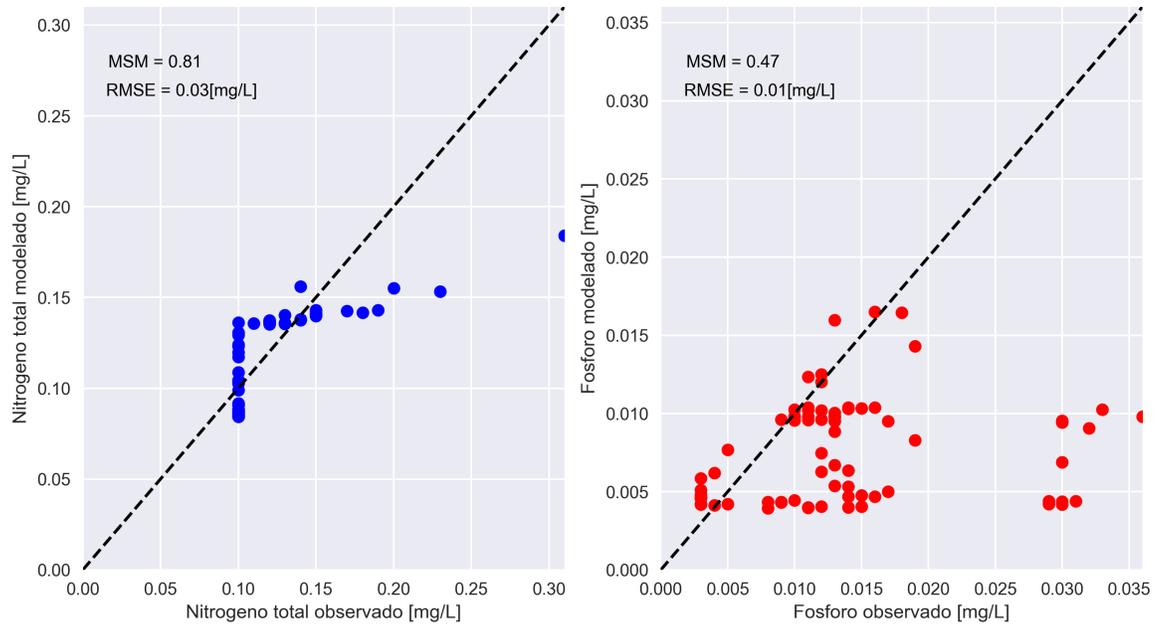


Figura 4.4: Dispersión entre los nutrientes modelados y observados con la función identidad. En el panel izquierdo se tiene registro del Nitrógeno total y en el panel derecho el fósforo total.

# Capítulo 5

## Resultados y Discusión

### 5.1. Modelo Hidrodinámico

Como antecedente importante de este estudio se tiene el trabajo realizado por Galaz (2020), que se basó en generar un modelo hidrodinámico del lago Villarrica durante el periodo de agosto 2013 - julio 2015. La resolución espacial de su modelo fue de  $\Delta x=120$  m y una estructura vertical con coordenadas  $\sigma$  de 20 capas. La resolución temporal fue de  $\Delta t= 1.5$  minutos. En dicho estudio, se obtuvo como resultado de la calibración un  $\overline{RMSE} = 2.03$  °C y  $\overline{MAE}=1.74$  °C, siendo mayor el error en las estaciones ubicadas en la zona litoral.

En la literatura se señala que, los modelos hidrodinámicos con coordenadas  $Z$  obtienen un mejor rendimiento por sobre los de coordenadas  $\sigma$ . Su ventaja es que permiten tener una mayor resolución en la zona del metalimnion y epilimnion, debido a que estas se forman con líneas paralelas a la superficie libre. En cambio las coordenadas  $\sigma$  no permiten tener una buena resolución de esta región en algunos sectores, por ejemplo, en los bordes del lago donde existan fuertes pendientes, lo que induce a una mezcla artificial en propiedades escalares como la temperatura (Deltares, 2014b). Por otro lado, una de las desventajas de las coordenadas  $Z$  es que se pierde nivel de detalle en las capas del fondo. Sin embargo para efectos de este estudio, no se requiere una mayor resolución para el hipolimnion.

A partir de los resultados de las métricas de calibración utilizadas en este estudio, se obtuvo un  $\overline{RMSE} = 0.94$  °C,  $\overline{MAE}=0.74$  y  $MSM = 0.91$  (ver Tabla 4.2), lo que indica que el modelo obtuvo un buen rendimiento. De hecho, la implementación de las coordenadas  $Z$ , disminuyó los errores aproximadamente en un 54%. Además, en este estudio se elaboró un modelo con una resolución espacial y temporal menor que la utilizada en el estudio realizado por Galaz (2020), por lo que también pueden ser factores que contribuyeron a la mejora en las métricas establecidas.

#### 5.1.1. Estratificación térmica

Diversos autores han señalado que el lago Villarrica presenta una fuerte estratificación en verano y mezcla completa en invierno (Campos et al., 1983; Meruane, 2005; Rozas, 2011; Ulloa, 2011). En la Figura 5.1 se muestra la evolución de la estructura térmica en el periodo de estudio, para un punto ubicado en el centro del lago Villarrica. Es posible observar que la

interfaz de densidad se ubica aproximadamente a 20 m de profundidad en los meses verano, lo cual es acorde a lo señalado por (Galaz, 2020).

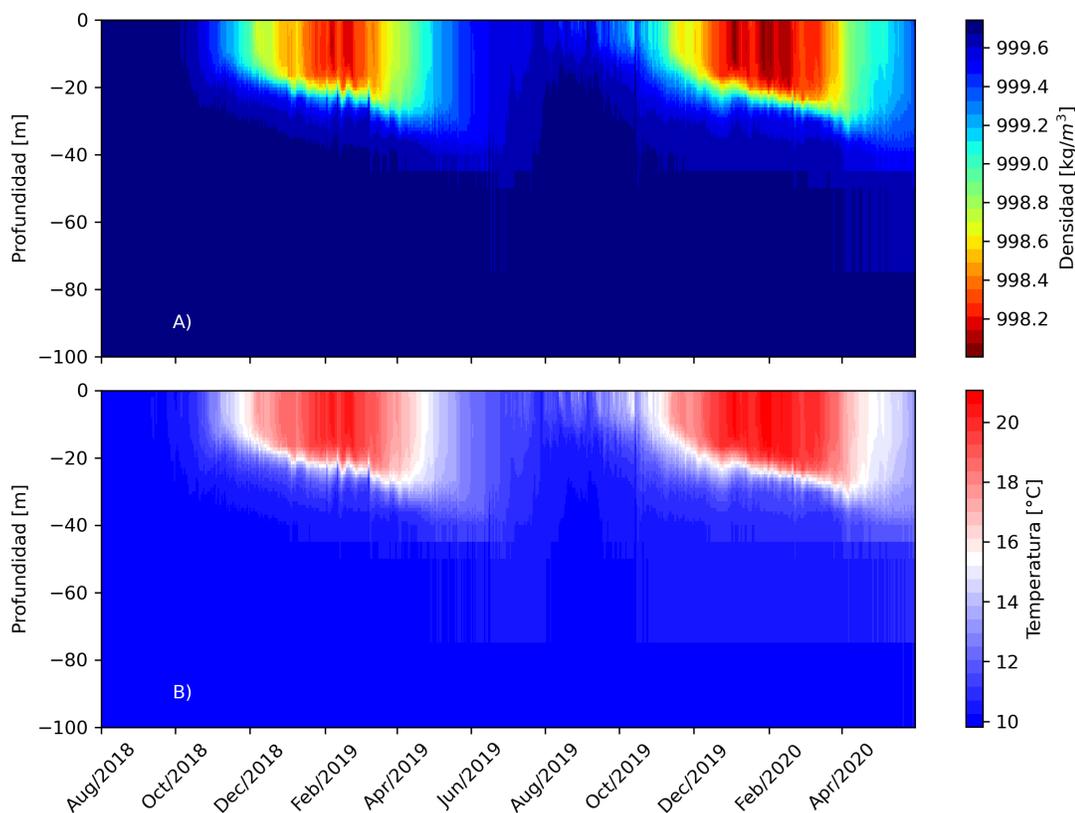


Figura 5.1: Evolución de la estructura térmica y de densidad en el periodo Agosto 2018 - Julio 2020, a partir de un punto en el centro del lago Villarrica.

En la Figura 5.2 se observa la evolución de la estratificación en el lago Villarrica a nivel mensual para el periodo de calibración. Esta contiene el valor promedio de las temperaturas obtenidas por el modelo, su rango de variabilidad ( $\bar{T} \pm \sigma$ ), un rango de mínimo/máximo de temperaturas simuladas y también las observaciones obtenidas en terreno por las distintas estaciones de monitoreo presentes en el lago.

El lago Villarrica se encuentra en mezcla completa en el mes de Agosto y luego comienza levemente a estratificarse en la temporada de primavera. En los meses de verano se logra una fuerte estratificación estable, la cual se genera debido a las condiciones atmosféricas y meteorológicas presentes en dicha estación del año. En este caso, la radiación solar que actúa sobre la superficie libre del lago genera un gradiente de temperatura debido a la difusión de calor hacia aguas más profundas. Como consecuencia, se produce una redistribución en la columna de agua, provocando una estratificación en dos capas con una termoclina ubicada aproximadamente a 20 m.

Desde abril a julio, el lago experimenta una pérdida de calor, por lo que su estratificación se empieza a debilitar. Dicho esto, se puede decir que el lago Villarrica se clasifica como un lago monomítico temperado, con un estrato superior a 20° C e inferior a 10 °C. Estos resultados confirman las observaciones realizadas por Campos et al. (1983) y al mismo tiempo, corresponden a los señalados por Meruane (2005); Rozas (2011); Galaz (2020).

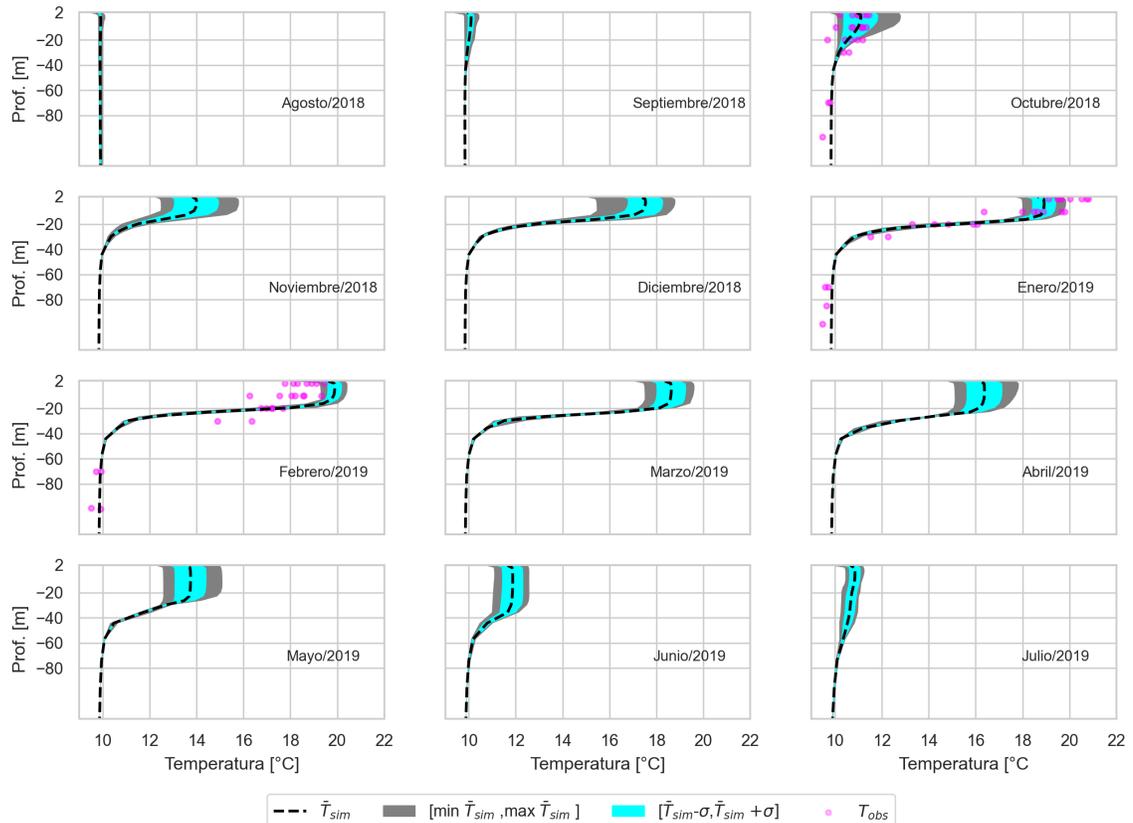


Figura 5.2: Evolución mensual de la estructura térmica promedio (línea segmentada) y observaciones de temperatura realizadas por la DGA (puntos) en el lago Villarrica en el periodo agosto 2018 - julio 2019.

Al comparar las observaciones y las simulaciones en la Figura 5.2, se advierte que existe una acertada representación del comportamiento de la temperatura en profundidad, a excepción del mes de febrero. En este mes se sobrestimó el calor que contiene el epilimnion, obteniendo temperaturas mayores a las observadas. Esto da indicios de que la configuración del modelo hidrodinámico, no reproduce un adecuado balance de calor en la columna de agua. Se sospecha que el parámetro asociado a la transparencia (*Secchi Depth*), adoptado en el modelo para el mes de febrero, debe ser menor. Probablemente este parámetro se ve reducido en este mes debido a la presencia de fitoplancton, el cual reduce la profundidad que penetra la radiación en la columna de agua. Las observaciones realizadas por Fundación red de nuevas ideas (2020) señalan una transparencia de 3,5 m, en la zona pelágica, lo cual es considerablemente menor al valor establecido en esta calibración.

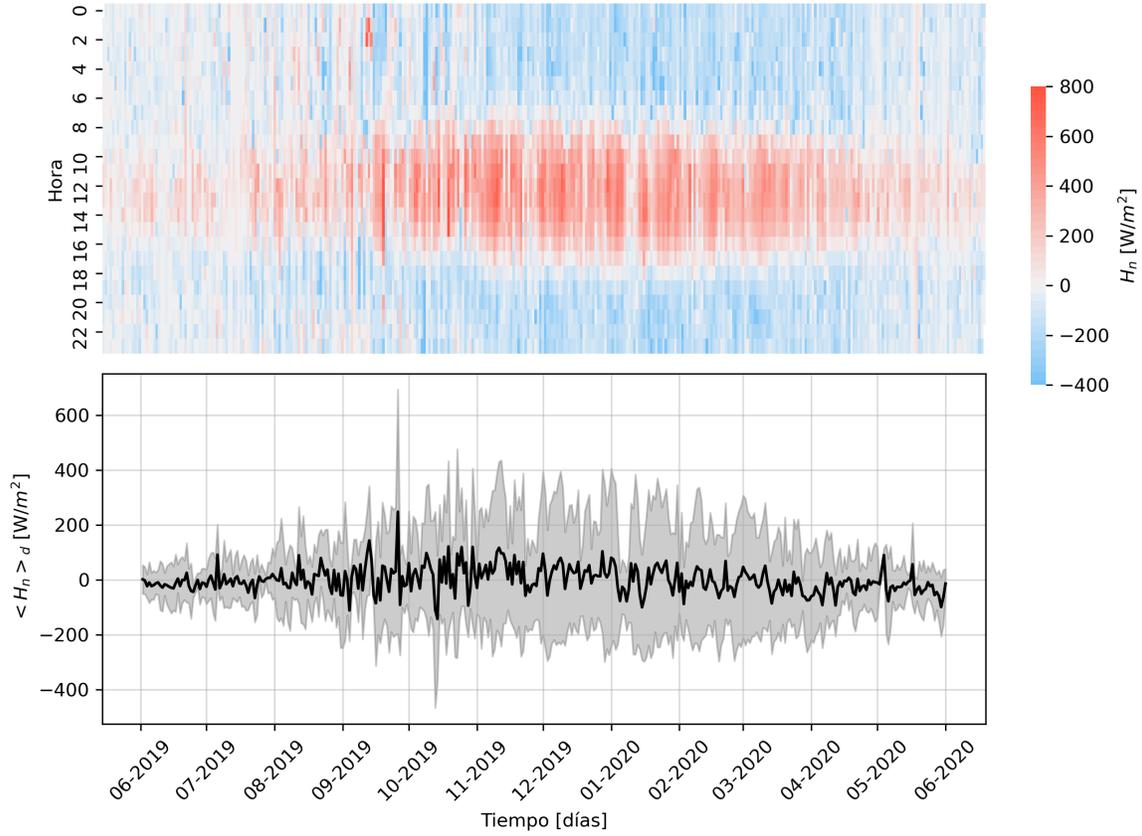


Figura 5.3: Panel superior: Flujo de calor a nivel horario del lago Villarrica para el periodo de validación. Panel inferior: Flujo de calor promedio diario y su variabilidad en el periodo de validación.

En el panel superior de la Figura 5.3 se puede apreciar la variación del flujo de calor neto a nivel horario para cada día dentro del periodo de validación, obtenida a partir de la siguiente ecuación:

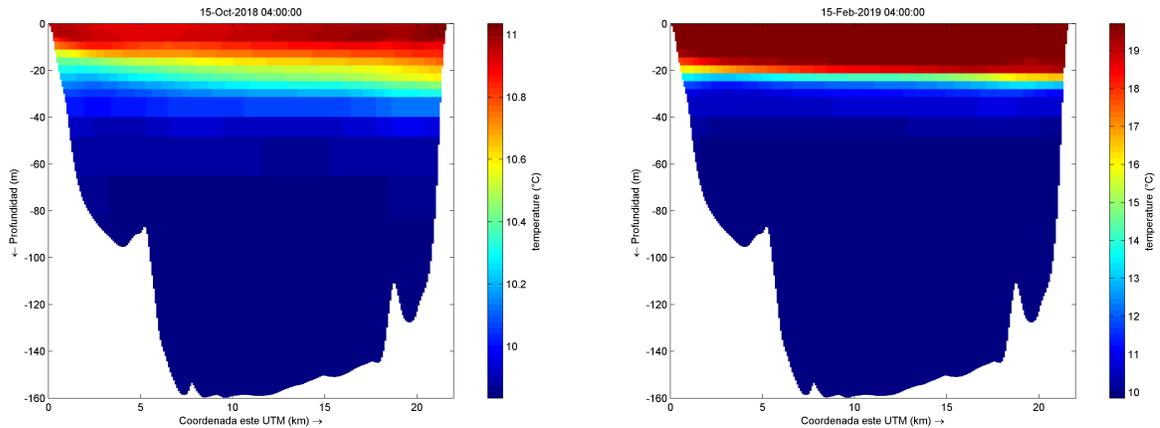
$$H_n = \frac{\partial T}{\partial t} \rho_w c_d \Delta z_s \quad (5.1)$$

donde  $H_n$  es el flujo de calor;  $\rho_w$  es la densidad del agua en la capa superior;  $c_d$  es la capacidad térmica del agua;  $\Delta z_s$  es el espesor de la capa superficial.

En el comienzo de esta serie, se puede observar que durante la temporada de invierno, el lago Villarrica experimenta una ganancia de calor entre las 10 y 15 horas, mientras que la mayor parte del día el lago pierde calor. Las magnitudes de este flujo son las menores en comparación al resto de la serie de tiempo. Esto se debe a que en este periodo la temperatura del aire y la radiación registra sus valores mas bajos durante el año, tal como se puede ver en las Figuras 3.6 y 3.7. Esto implica que ingresa una menor cantidad de calor en los momentos en que la radiación solar incide en el cuerpo de agua, y también que la interacción entre la atmósfera y la columna de agua genera un flujo de calor negativo en la mayor parte del día.

Posteriormente durante el periodo primavera-verano, se observa que el ancho de banda asociado a la ganancia de calor se incrementa, de manera que el lago Villarrica experimenta ganancias de calor entre las 8 y 17 horas aproximadamente. La magnitud de ambos flujos de calor en este período se ven incrementados. En el caso del flujo de calor positivo, se produce porque la radiación solar incidente se encuentra en el periodo de mayor intensidad, mientras que el flujo negativo, se explica debido a que en las noches, la temperatura del aire disminuye considerablemente, por lo que en la interacción entre el cuerpo de agua y la atmósfera al buscar el equilibrio térmico, se genera un importante flujo de calor desde la fuente de mayor temperatura (lago) hacia la de menor temperatura (atmósfera). Finalmente desde otoño a invierno, vuelve a disminuir las horas en las que el lago experimenta una ganancia de calor y disminuye la magnitud de los flujos de calor de entrada y salida.

En el panel inferior de la Figura 5.3, se observa mediante una línea de color negro los flujos promedios diarios y mediante la banda gris su rango de variabilidad. Debido a que en primavera-verano se presentan los mayores flujos de salida y entrada, la variabilidad aumenta considerablemente, mientras que en invierno se presenta la menor variabilidad.



(a) Estratificación débil en la columna de agua del lago Villarrica registrada el 15/Oct/2018 04:00:00.

(b) Estratificación fuerte en la columna de agua del lago Villarrica registrada el 15/feb/2019 04:00:00.

Figura 5.4: Perfiles de temperatura en la dirección Oeste-Este en dos instantes. En estos se puede diferenciar como se visualiza una fuerte y una débil estratificación en la columna de agua del lago Villarrica.

En la Figura 5.4 se puede apreciar la evolución de la estratificación térmica en base a un perfil de temperaturas en dos instantes. El lago Villarrica en el mes de octubre presenta estratificaciones débiles, tal como se puede observar en la Figura 5.4a. En cambio, en febrero la columna de agua contiene una gran cantidad de calor, presentando una marcada estratificación.

### 5.1.2. Respuesta del lago a la acción del viento

En el lago Villarrica el viento se considera como el principal forzante que aporta energía cinética turbulenta y momentum, debido a la ausencia de fuertes afluentes y efluentes en el sistema. Esto hace necesario estudiar los distintos fenómenos que se generan como respuesta ante la acción de este.

Con el fin de evaluar la respuesta que tiene el lago frente a la acción del viento, se consideraron tres puntos de observación P1, P3 y la estación de monitoreo del centro del lago (ver Figura 3.12). Estos puntos se encuentran alineados con la dirección Oeste-Este, correspondiente al eje donde se encuentra la máxima longitud horizontal del lago Villarrica y se concentra la dirección de los vientos actuantes. Además, da pie para analizar el efecto que causan los vientos tipo Puelche. Uno de estos es la ocurrencia de *upwelling*, ya que Meruane (2005) destaca la importancia de estos vientos debido a su alta intensidad. Para el punto P1, ubicado en la zona litoral, se analizó en base al número de Wedderburn ( $W$ ) la existencia de afloramiento de la termoclina en la superficie, el cual ocurre si  $W=1$  según Shintani et al. (2010). Este parámetro adimensional fue obtenido a partir de la ecuación 2.16, en el cual se consideró un largo preferencial  $L = 22$  km,  $h_1$  como la profundidad de la termoclina y los valores de las densidades del epilimnion e hipolimnion obtenidos mediante los resultados del modelo hidrodinámico.

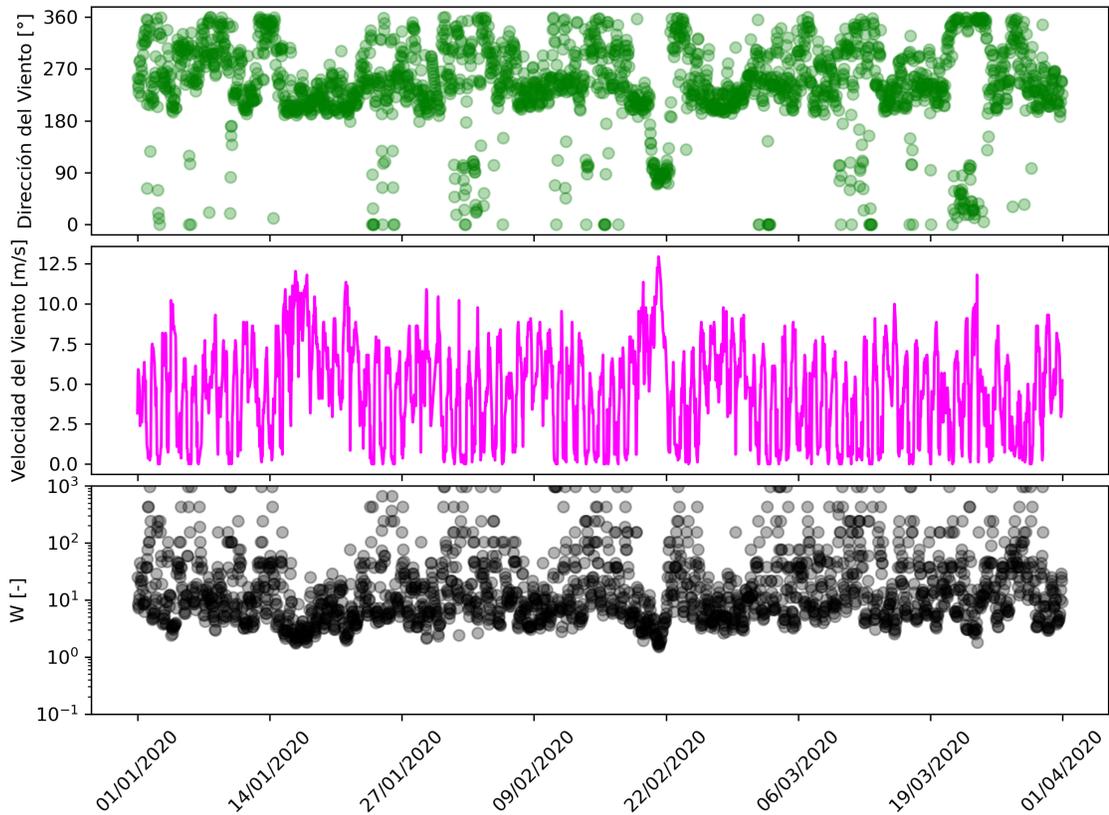


Figura 5.5: Dirección del viento, velocidad del viento y numero de Wedderburn obtenido del lago Villarrica en Febrero 2020.

De la Figura 5.5 se puede deducir que no existe *upwelling* para el periodo de validación, ya que  $W > 1.5$  en todo el dominio. Sin embargo, este valor al ser cercano a 1, se debe analizar con mayor detalle, debido a que esta variable se obtuvo mediante la aproximación lineal de  $W$  (Ecuación 2.16). Uno de los problemas que tiene esta aproximación, es que no considera la variación de la dirección con la que actúa el viento, por lo que el largo  $L$  no se mantiene constante. La solución a esto es incorporar los efectos dados por la batimetría del lago, tal como lo plantea Shintani et al. (2010).

En base a los resultados numéricos, se registra que los valores más bajos de  $W$  se asocian a vientos de mayor magnitud, lo cual es lo esperado. El mínimo valor de  $W$  se encuentra entre el 20 y 22 de febrero, el cual proviene desde el este, y por lo visto en la Figura 3.11, se identifica este evento como el viento Puelche de mayor intensidad y duración. Con esto se evidencia la importancia que podrían tener estos eventos en la ocurrencia de *upwelling*, sin embargo, al tener en cuenta el enfoque lineal del número de Wedderburn, el aporte de energía entregada por el viento no fue suficiente.

Al utilizar la ecuación 2.20, se obtuvo un número de Burger asociado al periodo de estratificación del lago Villarrica igual a 0.4. Al ser un número menor a la unidad, al igual que el reportado en el estudio de Meruane (2005), se deben considerar los efectos de la ro-

tación terrestre en la hidrodinámica del lago. Debido a esto, se espera como respuesta del sistema lacustre en periodo de estratificación, la generación de ondas internas de gran escala, específicamente ondas Kelvin y Poincaré. Para determinar las frecuencias dominantes en el sistema (en términos energéticos), se realizó un análisis espectral para las oscilaciones de la termoclina, los cuales se realizaron en el punto P1 y en la estación de monitoreo ubicada en el centro del lago (ver Figura 3.12). La elección de estos puntos se basó en analizar las fluctuaciones en la zona litoral y pelágica de las oscilaciones de la termoclina. La presencia de ondas internas varía según la zona en la que se encuentre la observación. Además, se realizó un análisis espectral sobre la serie de tiempo del viento que actúa en el centro del lago, lo que permite identificar las frecuencias de mayor contenido energético y analizar una posible interacción entre las ondas internas y este forzante.

Las fluctuaciones de la termoclina se obtuvieron descontando el promedio de la profundidad que alcanza, en la serie de tiempo estudiada. Haciendo uso de la transformada de Fourier, se obtuvo el análisis espectral de las oscilaciones, con el fin de determinar las frecuencias características para el contenido energético de las ondas internas (Rahman et al., 2011). En la Figura 5.6 se presenta dicho análisis para las observaciones entre Enero 2020 y Marzo 2020 en el centro del lago (panel superior) y P1 (panel inferior), respectivamente.

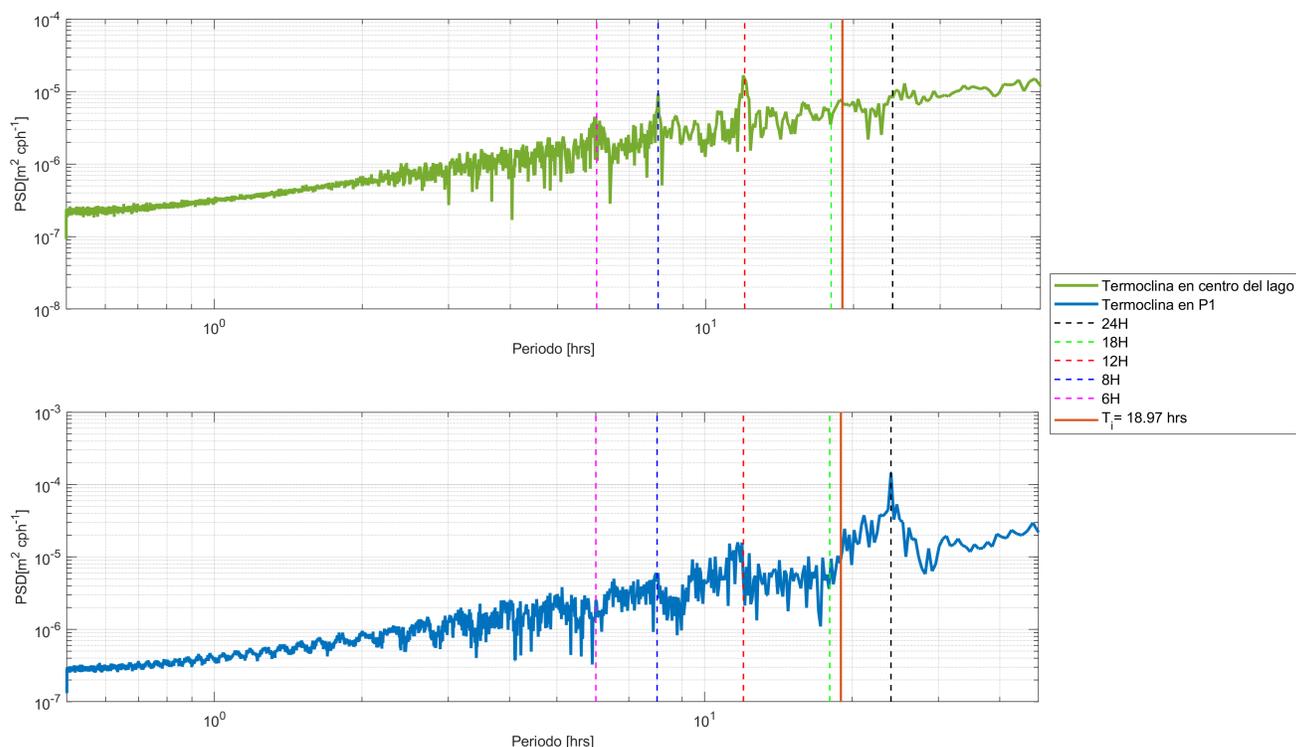


Figura 5.6: Densidad de potencia espectral (PSD) de las oscilaciones de la termoclina para el periodo enero 2020-marzo 2020. En el panel superior: PSD en el centro del lago; En el panel inferior: PSD en la zona litoral.

En el panel superior de la Figura 5.6, se observan peaks de energía para periodos cercanos

a las 12, 8 y 6 horas, los cuales poseen un contenido energético similar. En cambio, en P1 se observa que el mayor peak de energía corresponde a un periodo de 21 horas. Para los periodos menores (mayores frecuencias), se observan peaks de energía cercanos a las 8 y 6 horas, pero su contenido energético disminuye considerablemente. Cabe destacar que al realizar un análisis espectral para el periodo enero 2020 - abril 2020, no se tiene una serie de tiempo tan extensa, de modo que se permita evaluar el contenido energético de las fluctuaciones para periodos mayores que los mostrados en esta figura. Tomando en cuenta que la frecuencia inercial del lago Villarrica tiene un periodo  $T_i = 18.97$  hrs, se podría explicar la existencia de sus peaks para energías super-inerciales mediante la presencia de ondas Poincaré, mientras que los peaks de energía sub-inerciales podrían ser explicados por las ondas Kelvin.

En la Figura 5.7 se observa el análisis espectral de la intensidad del viento para el periodo Agosto 2018- Julio 2020. Al igual que los análisis espectrales de las oscilaciones de la termoclina, se descontó el promedio de la serie de tiempo de intensidad del viento, para así obtener la energía de las fluctuaciones de esta forzante. Para los periodos de 24 y 12 horas, se encuentran los mayores peaks de energía, lo cual es lo esperado debido a su periodicidad, además, se observa que existe un peak de energía en un periodo de 3 meses, lo cual representa la frecuencia a nivel estacional. Para los periodos de 8 y 6 horas se encuentran peaks energéticos bastante pronunciados, sin embargo, su contenido energético es aproximadamente 10 veces menor que el peak de 24 horas. Es por esto que se caracteriza la frecuencia dominante de la intensidad del viento el periodo de un día.

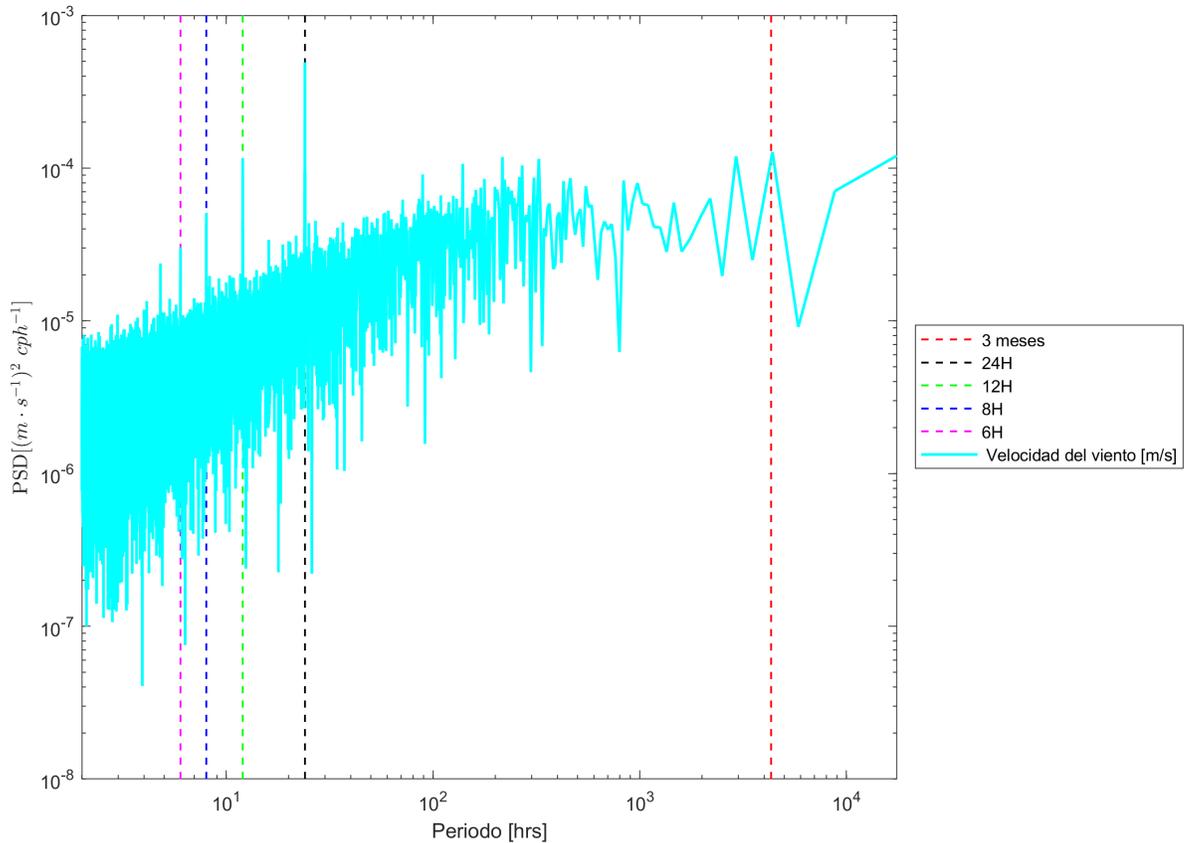


Figura 5.7: Densidad de potencia espectral (PSD) de las fluctuaciones de la termoclina en el centro del lago Villarrica para el periodo Enero 2020-Abril 2020.

Rozas (2011) obtuvo en su estudio distintos modos normales de oscilación para ondas internas de gran escala con su respectiva frecuencia. En este se observó la presencia de una onda Kelvin con un periodo cercano a las 21 horas. Esta onda concentra la mayor cantidad de energía proporcionada por el viento, a comparación del resto de los modos de oscilación. Además, confirmó la presencia de una interacción resonante entre el viento de periodicidad diaria y la onda Kelvin mencionada, el cual permite explicar el aumento en las amplitudes de las oscilaciones observadas en la termoclina ubicada en la zona litoral.

A partir de los resultados de las Figuras 5.6 y 5.7, se puede decir que el periodo dominante del viento y el obtenido a partir de la densidad espectral en P1, son muy cercanos, siendo de 24 y 21 horas, respectivamente. Esto indicaría que existe una interacción resonante entre el viento de periodicidad diaria y las oscilaciones de la termoclina en la zona litoral, lo cual es acorde a lo señalado por Rozas et al. (2014).

A modo de visualizar la oscilación de la termoclina en el lago Villarrica, se analizó particularmente el periodo correspondiente a Febrero 2020, ya que este posee vientos de alta intensidad. Además, este periodo posee el evento Puelche de mayor intensidad y duración, comprendido entre el 20 y 22 de febrero (ver Figura 3.11). Antes de ocurrir dicho evento, los vientos soplaban con una dirección preferente desde el Oeste, por lo que la interfaz superficial

se peralta en el extremo este del lago, cercano a la ciudad de Pucón. En efecto, la interfaz de densidad tiende a inclinarse en sentido contrario a la superficie libre, por lo que se espera un peraltamiento en el extremo Oeste, cercano a la ciudad de Villarrica.

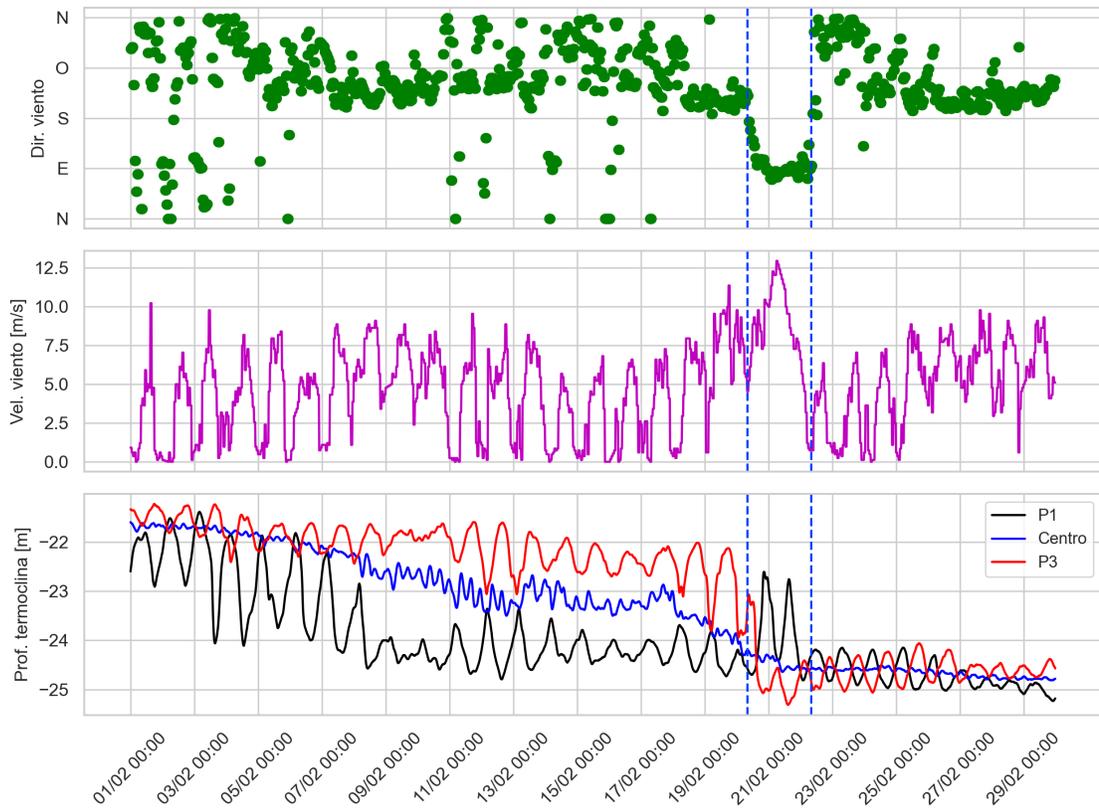


Figura 5.8: Dirección del viento y velocidad del viento en el centro del lago Villarrica, y variación en la termoclina en P1, P3 y centro del lago en el mes de febrero 2020.

En la Figura 5.8 se muestra la oscilación de la termoclina para los puntos P1, P3 y el centro del lago. Antes de que ocurra el evento Puelche (línea azul segmentada), se evidencia que la termoclina se encuentra peraltada en el extremo Oeste del lago (cercano a la ciudad de Villarrica). En el momento en que los vientos empiezan a soplar desde el Este, la termoclina se invierte, peraltándose en el extremo Este (cercañas de la ciudad de Pucón).

Con respecto a las oscilaciones que ocurren en P1 y P3, se observa que estas poseen una mayor amplitud con respecto a las que ocurren en el centro del lago en el mes de Febrero, las cuales en el inicio y final del mes, prácticamente no experimentan una oscilación. Esto se puede atribuir a que la energía proporcionada por el viento a las ondas internas, se distribuye en su mayoría a la onda Kelvin fundamental (Rozas et al., 2014). Sin embargo, entre el 9 y 11 de Febrero existe un aumento en la amplitud de la termoclina en el centro del lago, mientras que en las oscilaciones en P1 y P3 una disminución. Esto puede ser atribuido a que la energía proporcionada por el viento entrega una mayor porción a las ondas que interactúan en el

centro, tal como lo hacen las ondas Poincaré.

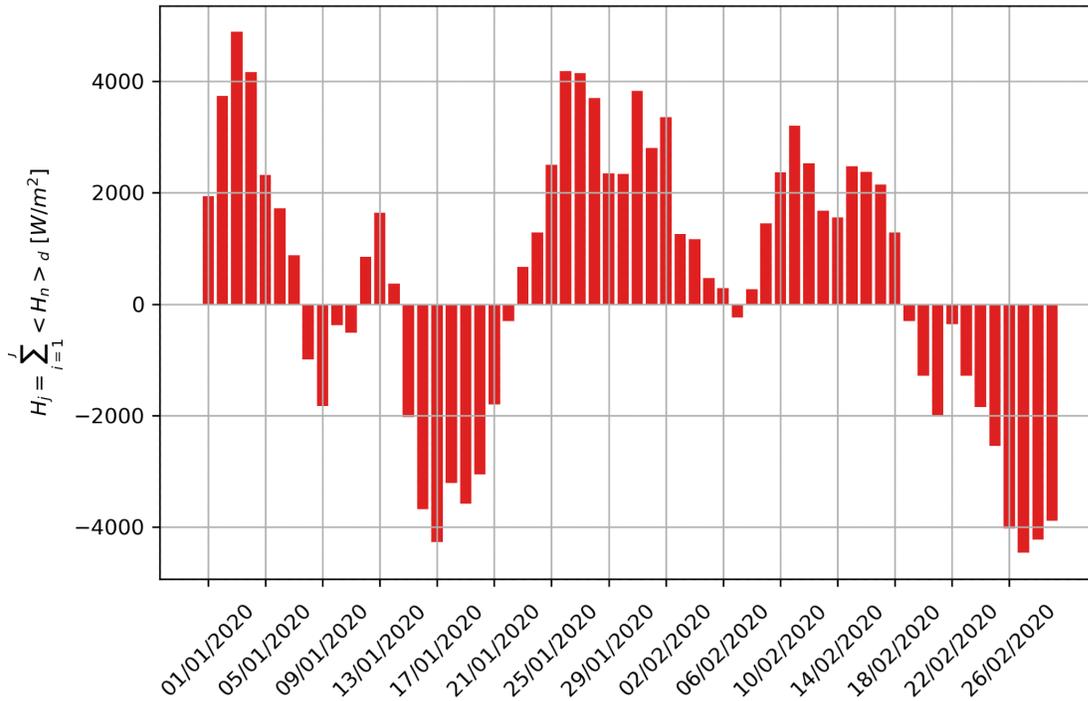


Figura 5.9: Flujo de calor diario acumulado para el periodo enero y febrero 2020 medido en el centro del lago Villarrica.

En la Figura 5.9 se observa el flujo de calor acumulado desde Enero 2020 hasta Febrero del mismo año. Entre el 17 y 20 de Febrero se observa un decaimiento de la termoclina bastante pronunciado, el cual esta ligado a la perdida de calor en el lago. Con respecto a la ganancia de calor que existe entre el 14 y 17 de Febrero, la termoclina en este periodo experimenta un leve aumento en su profundidad. Es posible afirmar que los aumentos en profundidad de la termoclina se debe a que el lago experimenta ganancias de calor. Cabe destacar que estas ganancias o perdidas son balances de calor que se realizaron en la superficie libre del lago y fue calculada con la ecuación 5.1.

### 5.1.3. Campo de velocidades del lago Villarrica

Uno de los resultados importantes para este estudio es la obtención del campo de velocidades en tres dimensiones, ya que este determinará el transporte en los modelos de partículas y calidad de agua. A partir del estudio realizado por Meruane (2005) se obtuvieron patrones de circulación considerando los resultados de su modelo hidrodinámico en dos dimensiones, los cuales ayudan a entender la dinámica del lago Villarrica ante la presencia de eventos Puelches. Sin embargo, al ser un modelo en dos dimensiones se pierde información sobre la circulación en las distintas capas, lo que implica que no se adviertan ciertos fenómenos, como por ejemplo la presencia de vórtices dentro del lago. Dicho esto, no se puede considerar como circulación general la circulación propuesta por Meruane (2005), ya que en verano las ondas

internas son las que dominan la circulación general del lago (Rozas, 2011; Rozas et al., 2014).

A continuación se presenta la circulación general del lago Villarrica para las temporadas de invierno y verano en el periodo de validación. Mediante un mapa de colores se muestra la magnitud de la velocidad para la zona del epilimnion, metalimnion e hipolimnion en verano, mientras que para la temporada de invierno se observa en toda la columna de agua, ya que el sistema presenta mezcla completa. La dirección del campo de velocidades esta dada por vectores representados con una flecha color blanco, los cuales están normalizados.

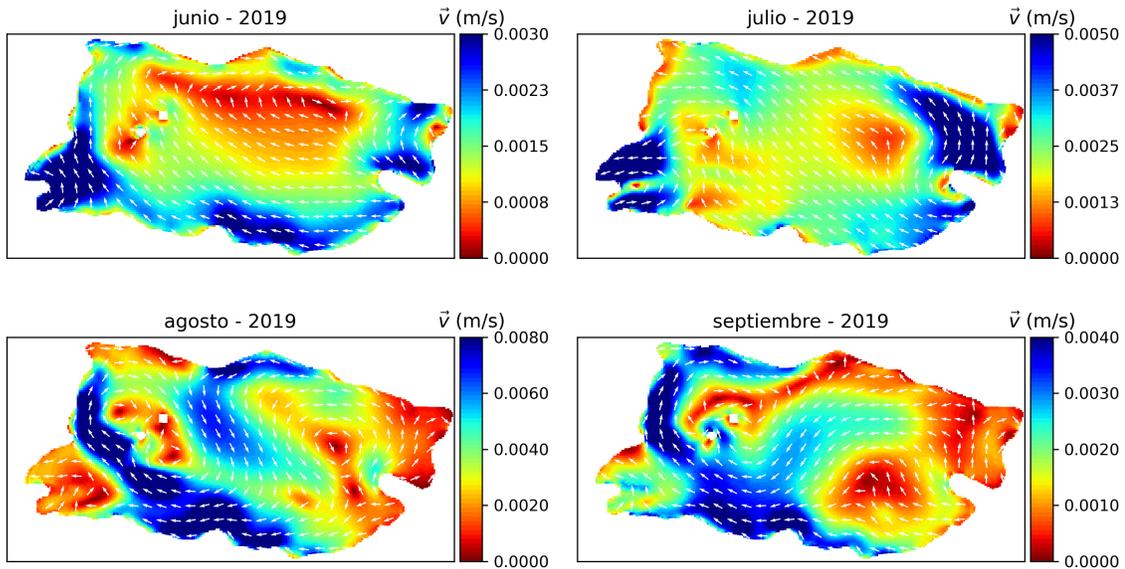


Figura 5.10: Campo de velocidad promediado para la temporada de invierno 2019 (14-60 m de profundidad). La escala de colores representa la velocidad del flujo en m/s y las flechas blancas indican la dirección del flujo.

En la Figura 5.10 se aprecia la circulación a nivel mensual correspondiente al periodo junio - septiembre 2019. En esta temporada el lago Villarrica, se encuentra en mezcla completa. Es posible observar que se comienzan a generar vórtices que giran en contra de las agujas del reloj, los cuales se ubican en las cercanías del centro del lago. Esto se observa con mayor claridad en el mes de agosto, ya que la dirección del flujo indica la clara presencia de un vórtice en la zona centro-oeste del lago, cuyo centro contiene velocidades de baja magnitud. En el mes de septiembre, se aprecia que estas estructuras se desplazan hacia el sur.

Por otro lado, se puede decir que el flujo que ingresa por el río Pucón, transita por la ribera sur y norte en la temporada de invierno. En el mes de agosto se observa una fuerte corriente por la ribera norte, la cual se desplaza hacia la ribera sur por el centro del lago. En Septiembre, se observa una fuerte corriente que proviene de la ribera sur y luego transita hacia el norte, generando un flujo que tiende a girar en torno a la isla Aillaquillén.

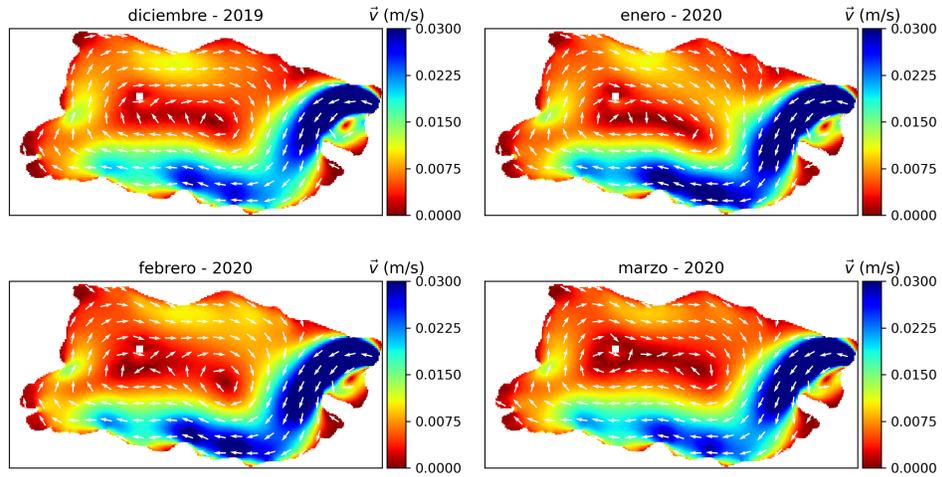


Figura 5.11: Campo de velocidades promediado en la zona del hipolimnion (10 - 20 m de profundidad). La escala de colores representa la velocidad del flujo en m/s y las flechas blancas indican la direcci3n del flujo.

En la Figura 5.11, se muestra la circulaci3n del campo de velocidades promediado mensualmente en el epilimnion en la temporada de verano. En esta se observa que existe una circulaci3n preferente por los bordes del lago en sentido cicl3nico. Adem3s, existe una fuerte corriente que proviene del r3o Puc3n, la que se propaga por la ribera sur del cuerpo de agua. Por otro lado, en el centro del lago se concentran las velocidades mas bajas, las que tienden a ser nulas. A modo de comparaci3n entre los meses de verano, se puede observar que en enero y febrero se encuentran las corriente de mayor intensidad en la ribera sur. Sin embargo, no es posible visualizar mayores diferencias entre cada uno de estos meses.

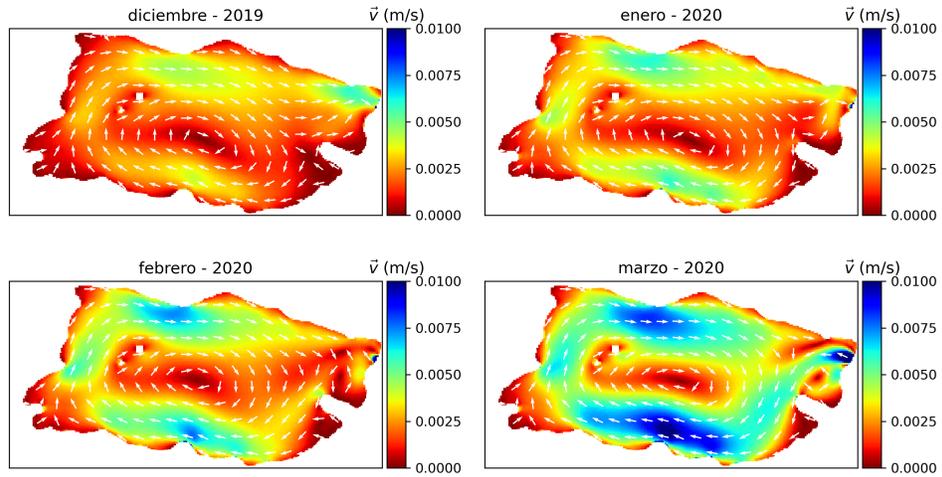


Figura 5.12: Campo de velocidades promediado en la zona del hipolimnion (40 - 20 m de profundidad). La escala de colores representa la velocidad del flujo en m/s y las flechas blancas indican la dirección del flujo.

En la Figura 5.12 se observa la circulación general en la zona del metalimnion, cuyo transito se realiza en sentido antihorario por los bordes del lago. A comparación de la circulación obtenida en la zona del epilimnion (Figura 5.11), se permite apreciar con mayor claridad el aumento de velocidades en los bordes del lago, especialmente entre los meses de enero, febrero y marzo. Teniendo en cuenta que este flujo se desarrolla en torno a la termoclina, se intuye la presencia de la onda Kelvin fundamental, lo cual es acorde al estudio realizado por Rozas et al. (2014)

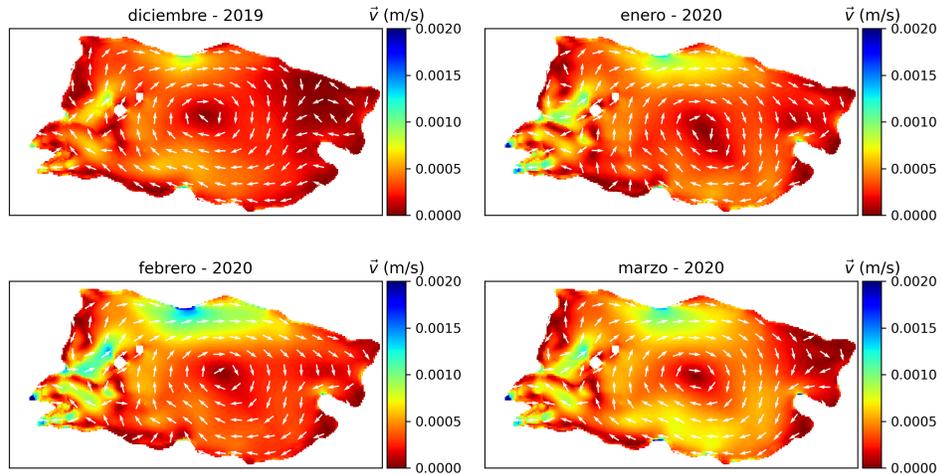


Figura 5.13: Campo de velocidades promediado en la zona del hipolimnion (70 - 40 m de profundidad). La escala de colores representa la velocidad del flujo en m/s y las flechas blancas indican la direcci3n del flujo.

En la Figura 5.13, se muestra la circulaci3n del campo de velocidades promediado mensualmente en el hipolimnion en la temporada de verano. Es posible observar que las velocidades se caracterizan por ser mucho mas bajas que las obtenidas en la zona del epilimnion e hipolimnion. Sin embargo, estas poseen una circulaci3n en sentido cicl3nico, de igual manera que las reportadas en las Figuras 5.11 y 5.12.

En la Figura 5.14, se registra la din3mica de las temperaturas en la capa que se sitúa la termoclina posterior a un evento Puelche. En esta, se evidencia que las temperaturas poseen una rotaci3n cicl3nica, similar al modo de oscilaci3n que posee la onda Kelvin fundamental encontrada por Rozas (2011), adem3s, esta oscilaci3n se realiza en un periodo cercano a las 24 hrs. Dicho esto, es posible afirmar la presencia de la onda Kelvin, la cual modula la circulaci3n general del lago Villarrica.

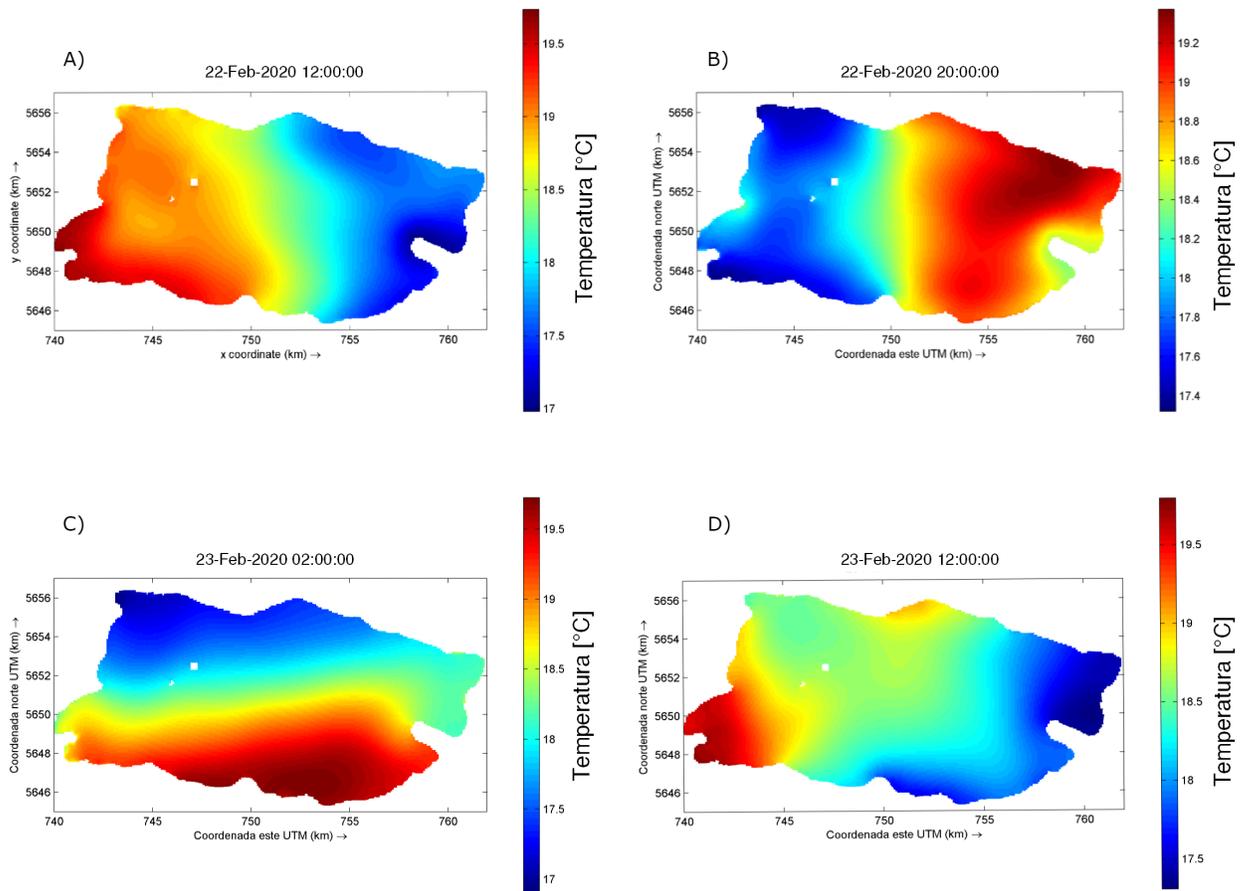


Figura 5.14: Campo temperaturas medido a 20 m de profundidad para el 22 y 23 de febrero 2020. La escala de colores representa la temperatura en  $^{\circ}\text{C}$ .

De forma general y a partir de los resultados de las Figuras 5.10, 5.11, 5.12 y 5.13, se puede sostener que se logró representar de manera general el campo de velocidades en las temporadas de invierno y verano. No obstante, hay que señalar que este campo de velocidades no permite observar con detalle la presencia de vórtices, debido a que el modelo utiliza las ecuaciones RANS. A pesar de ello se advierte la presencia de estructuras de gran tamaño en verano y en agosto 2019, los cuales se visualizan en el centro del lago Villarrica. Cabe destacar que en la temporada de invierno, al considerar la velocidad en capas inferiores a 15 metros de profundidad, no fue posible obtener una circulación general esperada, ya que se observaban flujos con trayectorias de carácter uniforme en todo el lago. Considerando lo anterior se sospecha que, si bien la configuración adoptada en el modelo hidrodinámico entrega buenos resultados en función de la estructura térmica, el perfil de velocidades está expuesto a errores.

Teniendo presente los resultados de este estudio, se podría seguir calibrando el modelo hidrodinámico revisando parámetros como la viscosidad turbulenta horizontal, coeficiente de Chézy, o revisar los distintos supuestos adoptados en este modelo, tales como la condición de nula fricción en los bordes del lago y la corrección de la intensidad de los vientos desde la estación meteorológica al centro del lago, entre otros. Esto con el objetivo de representar con

mayor exactitud el campo de velocidades, y teniendo en cuenta la maximización de la métrica asociada al rendimiento del modelo MSM y minimización de las métricas asociadas al error, tales como el RMSE y MAE, en función de las temperaturas medidas en las estaciones de monitoreo dispuestas por la DGA.

Previendo mejoras a futuro, se podría realizar un modelo numérico con una mayor resolución espacial a nivel horizontal y vertical, así como también, disminuir el paso de tiempo en la obtención de los resultados del modelo, ya que en este estudio, los datos se almacenaban cada 2 horas y podría estar sujeto a pérdida de información de la dinámica del lago. Junto con esto, si bien el primer paso para realizar un modelo hidrodinámico es calibrar en base a temperaturas, al considerar que esta variable no es tan dinámica, se podría añadir la calibración con mediciones del perfil de velocidades en los bordes y centro del lago, a través de un ADCP.

## 5.2. Modelo de partículas

D-Waq Part es un modelo tridimensional que permite analizar la trayectoria de partículas a partir de descargas artificiales en distintos puntos del lago. Para efectos de este estudio, se adoptó la metodología elaborada por Abarca et al. (2022), la cual consiste en dos experimentos: el primero consta de una descarga de trazadores conservativos y en el segundo una descarga de trazadores lagrangianos. Ambas descargas son continuas y se realizan desde el río Pucón. En la Tabla 5.1 se detallan las configuraciones adoptadas en cada simulación:

Tabla 5.1: Resumen de las simulaciones de trayectoria de partículas realizadas.

Nombre	Experimento	Zona de influencia	Periodo
$V_V$	Número 2	Villarrica	Verano (15/12/2019-15/03/2020)
$I_V$	Número 2	Villarrica	Invierno (01/06/2019-01/09/2019)
$A_V$	Número 1	Villarrica	Validación (01/08/2019-31/07/2020)
$V_R$	Número 2	Ribera Sur	Verano (15/12/2019-15/03/2020)
$I_R$	Número 2	Ribera Sur	Invierno (01/06/2019-01/09/2019)

### 5.2.1. Propagación de trazadores conservativos

En el primer experimento se consideró la descarga de trazadores conservativos, cuyo transporte se puede modelar con la siguiente ecuación:

$$\frac{D\bar{c}}{Dt} = \nabla \cdot (D_i \nabla c) + S(x_0) \quad (5.2)$$

donde  $\bar{c}$  es la concentración del trazador;  $Dc/Dt$  representa la derivada material;  $D_i$  representa la difusividad efectiva del trazador en cada componente (i=x,y,z), es decir, el coeficiente de difusividad turbulenta calculada con el modelo  $\kappa$ - $\epsilon$  sumado la difusividad molecular;  $S(x_0)$  es un termino fuente que modela la descarga continua en la coordenada  $x_0$  (Deltares, 2014a).

Dado que el afluente más importante que posee el lago Villarrica es el río Pucón, se conside-

ró solo la descarga artificial  $A_V$  para observar la propagación de los trazadores conservativos en distintos puntos del lago. Se consideraron como zonas de interés las localidades de Villarrica, Pucón y la ribera sur del lago Villarrica, debido al importante asentamiento humano que existe en estas zonas. También se añadió el sector La Poza como zona de interés, debido a su atractivo turístico y recreativo. En la Figura 5.15 se observan los distintos puntos de observación que permitieron medir la concentración asociada al trazador no conservativo.

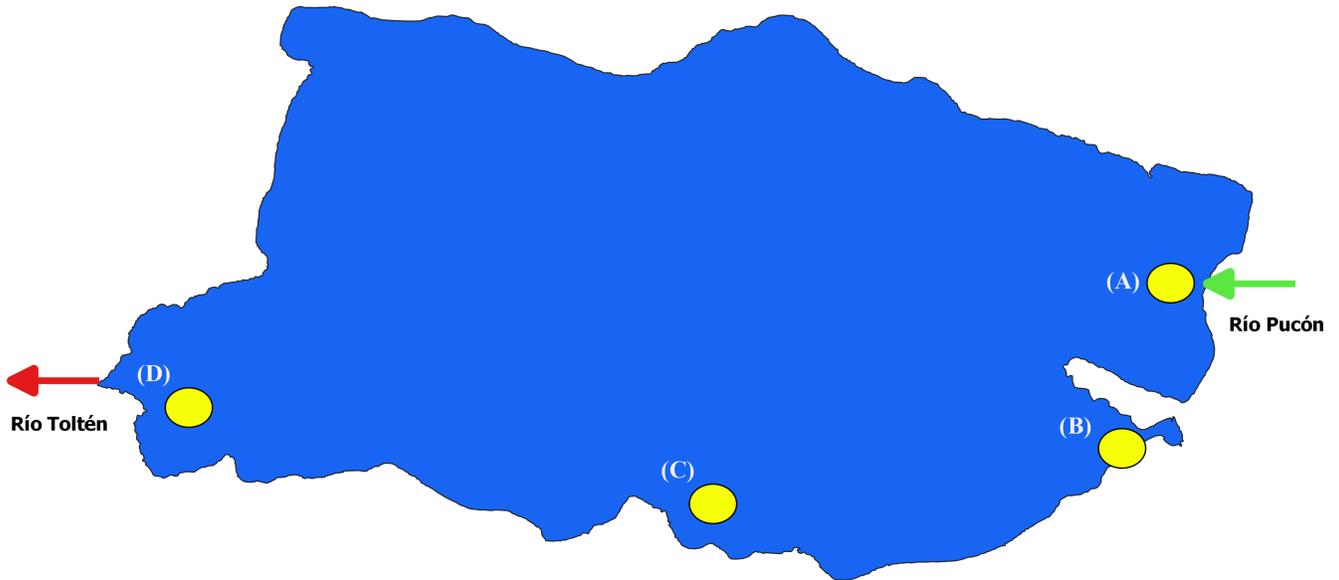


Figura 5.15: Puntos de observación utilizados para la simulación  $A_V$ . (A): Litoral Pucón; (B): La Poza; (C) Litoral Sur; (D) Villarrica.

En la Figura 5.16, se tienen los resultados numéricos de la simulación  $A_V$ . Esta figura permite observar la evolución de las concentraciones del trazador conservativo en cada punto de monitoreo, registradas cada una hora. Estas concentraciones fueron promediadas en el epilimnion (3-19 m) e hipolimnion (30-68 m) y normalizadas por la concentración máxima de la serie de tiempo. Cada uno de los cuatro paneles hace referencia a la concentración medida en su respectivo punto de observación.

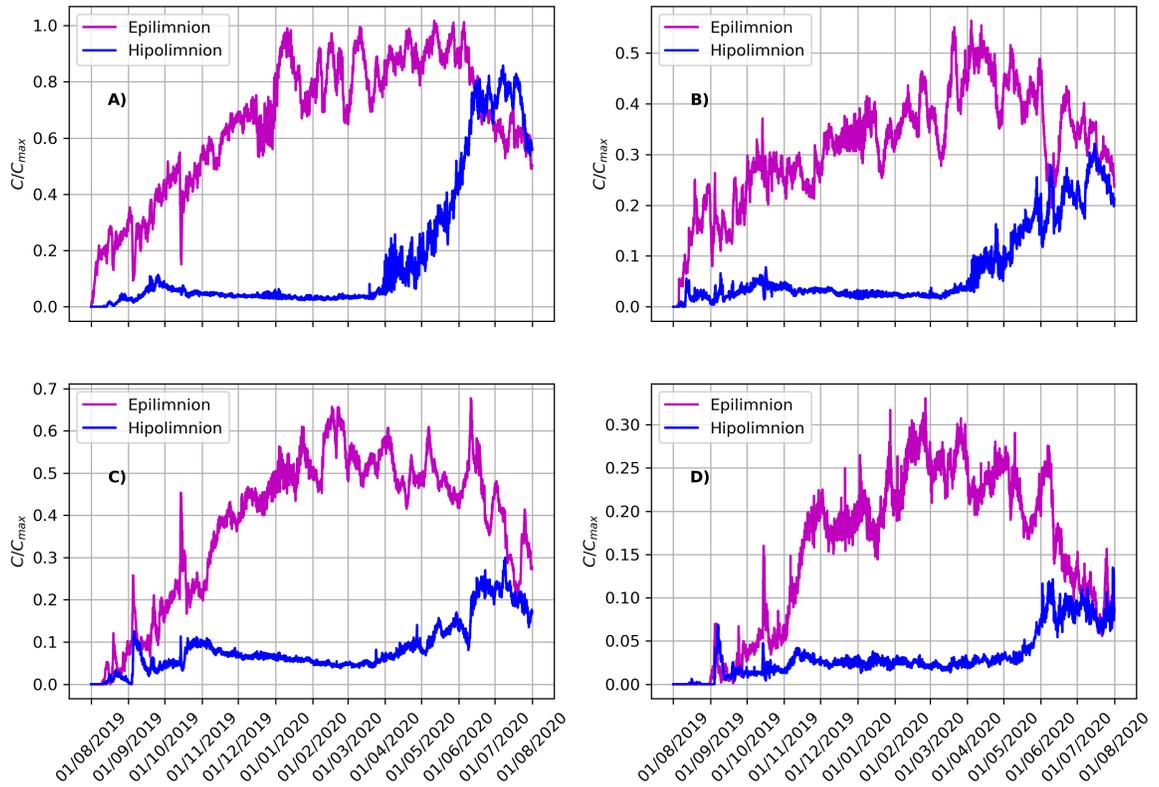


Figura 5.16: Evolución de trazadores conservativos descargados continuamente desde el río Pucón entre el 01/08/2019 y 31/07/2020 hacia el lago Villarrica. Los paneles A), B), C) y D) hacen referencia a los distintos puntos de medición de la concentración, denominados como: Litoral Pucón, La Poza, Litoral Sur y Litoral Villarrica, respectivamente. Cada uno de los paneles posee una escala distinta para  $C/C_{max}$ .

La descarga artificial comenzó en un periodo de invierno, debido a que el lago se encuentra totalmente mezclado lo cual permite observar la evolución de los trazadores en la fase de calentamiento y enfriamiento del lago. Como era de esperar, en el panel A se alcanzan los mayores valores de concentración al ser la estación más cercana a la descarga. Del mismo modo, en panel D se registran las mínimas concentraciones, siendo esta la estación más lejana de la descarga. En A, B y C se observa que las partículas comienzan a llegar antes del mes, mientras que en D, son las que llegan con mayor retraso, siendo este tiempo aproximadamente un mes.

En cada uno de los puntos de observación, la concentración comienza a aumentar simultáneamente en el hipolimnion e epilimnion. A mediados del mes de octubre, el lago comienza a experimentar la ganancia de calor en sus capas superiores, por lo que la columna de agua se redistribuye formando la estratificación del cuerpo lacustre. Justamente en este periodo, se puede observar que las partículas comienzan a transitar preferentemente por el epilimnion, ya que se advierte que la concentración empieza a aumentar considerablemente, mientras que en el hipolimnion decae hasta fines del verano 2020, lo que implica que en el verano se encuentra

la mayor diferencia de concentración presente en ambas capas. Esto se explica debido a que las descargas se realizan a una profundidad de 5 m, por lo que al existir un fuerte gradiente de densidad, los desplazamientos verticales entre ambas capas se encuentran limitados. Junto con ello se evidencia también que, en A, B, C y D, se presentan fuertes oscilaciones en el estrato superior durante todo el período. Esto como consecuencia de la interacción con los flujos turbulentos. Mientras que, el hipolimnion decae de forma lineal hasta llegar a principios del mes de marzo.

Durante el periodo de marzo a agosto 2020, la estratificación que presenta el lago se vuelve mas débil. Debido a esto, las partículas comienzan a circular por el hipolimnion, aumentando su concentración en esta capa y buscando el equilibrio en la concentración en toda la columna de agua, el cual se logra en la temporada de invierno con un lago mezclado completamente. Por último, en A, C y D, se registra que la concentración observada en el epilimnion va disminuyendo en el sentido de las agujas del reloj, y al considerar los peaks de cada serie, se puede decir que las partículas se mueven debido a la ocurrencia de una rotación ciclónica del flujo por el borde del lago, la cual esta principalmente gobernada por la onda Kelvin fundamental.

En el caso de B, se llega a una menor concentración que la encontrada en C, a pesar de que la distancia entre la descarga y C es menor también, se observa una poca coherencia en los peaks de concentración al comparar con el resto de las observaciones. Esto se puede explicar con la circulación general del lago obtenida en Verano (Figuras 5.11 y 5.12), donde se observa que el campo de velocidades sugiere que las partículas al avanzar por las cercanías de la península de Pucón tienden a seguir su trayectoria por el borde del lago sin entrar en esta región. En el caso de las partículas que entran al sector La Poza, estas se mantienen circulando a bajas velocidades y posiblemente encerradas por la acción de pequeños vórtices.

### 5.2.2. Conectividad Física

En el segundo experimento, se realizó la descarga de trazadores lagrangianos, de masa y volumen nulos, cuya trayectoria se modela por la siguiente ecuación:

$$x_p^{(n)}(t + \Delta t) = x_p^{(n)}(t) + \int_t^{t+\Delta t} \bar{v}(x(t), t) dt \quad (5.3)$$

donde  $x_p^n$  es la posición de la partícula n-ésima advectada por el campo de velocidades  $\bar{v}$ , resuelta mediante las ecuaciones RANS en el modelo hidrodinámico.

Para efectos de este estudio, se realizaron las descargas  $V_v$ ,  $V_r$ ,  $I_v$ ,  $I_r$  desde el río Pucón, el cual al ser el principal afluente del lago, se puede identificar como una zona de potencial descarga al cuerpo lacustre. Como regiones de interés se consideró el litoral sur y Villarrica debido al importante asentamiento que existe en las cercanías de estas zonas. El objetivo de este experimento se basó en obtener una escala del tiempo que demora cada partícula desde el momento en que ingresa al lago hasta llegar a la zona de interés, y también trazar el camino preferencial de estas.

Cada una de las Figuras 5.17 y 5.18 están compuestas por 2 paneles, que representan las

descargas a las 2 zonas de interés en temporada de invierno y verano. La información contenida en cada gráfica permite visualizar el tiempo de residencia promedio que se obtuvo en cada celda mediante una escala de colores y símbolos que significan lo siguiente: Los colores más azulados indican un mayor tiempo de retención e indica las zonas en que las partículas permanecieron mayor tiempo dentro del cuerpo de agua y llegaron en algún instante a la zona de interés. Por el contrario, los colores que tienden a un color rojizo señalan los menores tiempos de residencia y muestran el camino por el cual se llegó mas rápido a la zona objetivo desde el instante en que ingresó al cuerpo de agua. El punto negro con un borde calipso indica la zona de descarga de los trazadores y con una cruz negra con borde calipso la zona de destino. Esta zona de destino se formó mediante la intersección entre los bordes del lago y un rectángulo, el cual está representado de color blanco. Cabe destacar que dentro del lago pueden existir otros píxeles color blanco, que indica las zonas donde las partículas que llegaron a la zona de interés, no transitaron y señalar también que todas las figuras presentan una celda color blanco en la zona Centro-Oeste del lago, que corresponde a la isla Aillaquillén. Por ultimo, las partículas que se descargaron artificialmente al lago y no llegaron a la zona objetivo, no son consideradas en el calculo del tiempo de residencia.

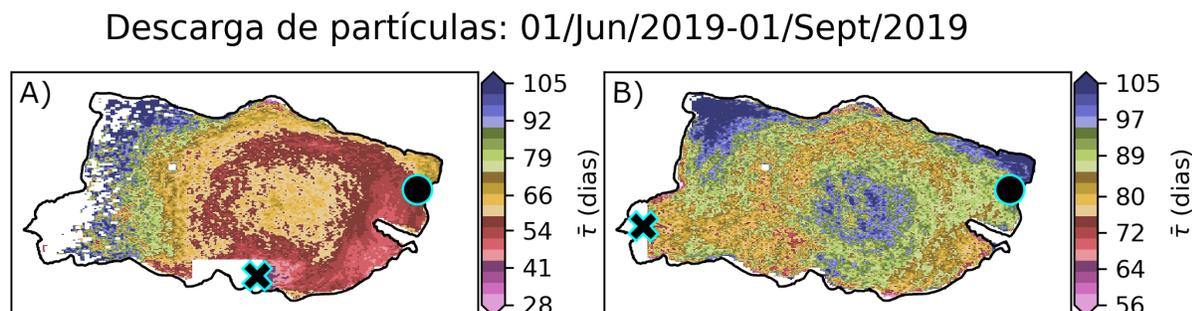


Figura 5.17: Mapas de tiempo de residencia promedio por celda y caminos preferenciales a partir de una descarga continua de trazadores lagrangianos. La descarga se realizó en el periodo de Invierno 2019, desde el río Pucón hacia el litoral sur del lago Villarrica (A) y hacia la ciudad de Villarrica (B).

La primera simulación corresponde a las descargas  $I_v$  e  $I_r$ , en las que se consideraron 5000 partículas para su ejecución y un intervalo de tiempo entre cada descarga de 1 hora. Las partículas en este periodo de tiempo al estar en mezcla completa, pueden viajar por toda la columna de agua, tal como se vio en los resultados de la sección *Propagación de Trazadores Conservativos*.

En la Figura 5.17 se observa en A que las partículas viajan preferentemente por el borde sur y una porción de las partículas que transitan inicialmente hacia el litoral norte, siguen una trayectoria en sentido contrario a las agujas del reloj, la cual permite llegar a la zona objetivo. En B de la misma figura, se observa que las partículas viajan preferentemente por los bordes costeros para llegar hacia la ciudad de Villarrica. Al comparar las escalas de tiempo entre A y B, se puede ver que el tiempo en llegar hacia Villarrica es en promedio el doble que se demora en llegar a la zona del litoral sur en la temporada de Invierno.

Esto se explica por la circulación general vista para invierno (ver Figura 5.10. Las zonas de mayor tiempo de retención, son consecuencia de la presencia de grandes vórtices en la zona centro, y también en la zona noroeste extremo superior izquierdo). En el caso de las trayectorias que marcan un menor tiempo de residencia, se registra una tendencia en partículas que transitan por los bordes norte y sur. Sin embargo, las partículas que llegan hasta Villarrica y viajan inicialmente por el borde sur, se ven discontinuadas por el efecto de los vórtices presentes, el cual no fue posible de observar claramente en estos resultados.

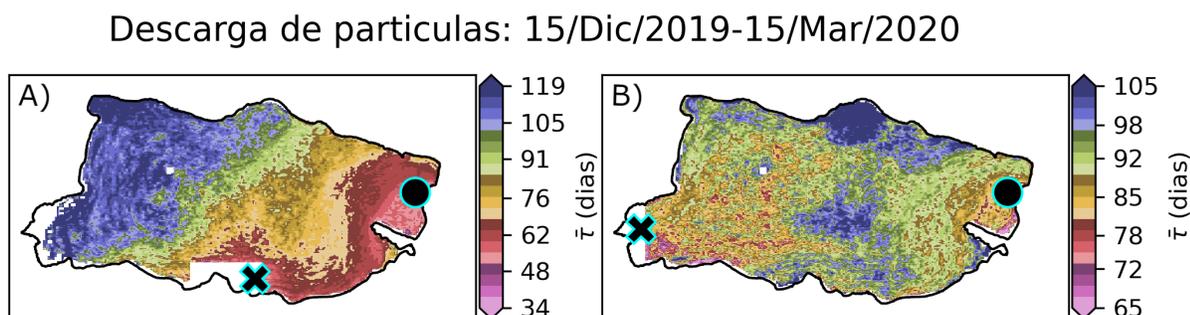


Figura 5.18: Mapas de tiempo de residencia promedio por celda y caminos preferenciales a partir de una descarga continua de trazadores lagrangianos. La descarga se realizó en el periodo de Verano 2020, desde el río Pucón hacia el litoral sur del lago Villarrica (A) y hacia la ciudad de Villarrica (B).

La segunda simulación corresponde a las descargas  $V_v$  y  $V_r$ . Se consideró un modelo con 5000 partículas para su ejecución y un intervalo de tiempo entre cada descarga de 30 minutos, ya que con una hora no se observaban adecuadamente los caminos preferenciales. Los trazadores lagrangianos fueron descargados en el epilimnion, ya que según lo obtenido en los resultados anteriores, las partículas en la temporada de Verano-Otoño tienden a viajar solo por el epilimnion, por lo que se vuelve interesante analizar los patrones de circulación en

dicha región.

Al considerar los antecedentes hidrodinámicos del lago Villarrica, en esta temporada la hidrodinámica del lago, esta gobernada en su mayoría por la interacción resonante entre el viento de periodicidad diaria y la onda Kelvin fundamental. Además la presencia de eventos Puelche altera la circulación presente en el lago. En efecto, la circulación del lago en verano presenta grandes diferencias comparadas con las de invierno tal como se pudo observar en las Figuras 5.10, 5.11, 5.12 y 5.13. En la Figura 5.18, se observa en A un tránsito preferente por el borde sur del lago Villarrica, el cual se ve curvado por la presencia de vórtices en la cercanía. En el caso de las partículas que poseen un mayor tiempo de retención estas se encuentran en la zona oeste del lago. En el panel B, no se permite observar de forma clara una trayectoria preferente de las partículas. Sin embargo, existe un indicio de que la trayectoria de las partículas por el borde sur y zona centro-norte son la circulación preferente. Con respecto a las zonas de mayor tiempo de retención, estas se concentran en el centro del lago, las cuales pueden ser explicadas por ondas Poincaré y en el litoral norte, debido a las corrientes que se generan en la interacción entre la onda Kelvin (rotación a favor de las agujas del reloj) y las ondas Poincaré (rotación en contra de las agujas del reloj).

Tabla 5.2: Parámetros estadísticos del tiempo de residencia promedio obtenido en cada uno de los experimentos de trazadores lagrangianos.

<b>Simulación</b>	<b>Promedio [días]</b>	<b>Desviación estándar [días]</b>	<b>Mínimo [días]</b>
$I_v$	78.7	32.2	6.6
$I_r$	46.5	25.7	2.6
$V_v$	82.54	24.52	23.64
$V_r$	54.78	29.36	5.19

A modo de comparación entre las Figuras 5.17 y 5.18, se puede evidenciar que en verano se tiene una preferencia de tránsito por el borde sur del lago, lo cual se atribuye a la presencia de la onda Kelvin fundamental que circula en sentido horario por los bordes del lago, caracterizada como la onda que adquiere la mayor energía proveniente del viento (Rozas et al., 2014). En este mismo periodo, se observa que las trayectorias tienden a estar más confinadas al borde costero, de tal forma que no se visualiza de forma clara el tránsito por el borde sur desde Pucón hacia la ciudad de Villarrica.

Al considerar los resultados de la Tabla 5.2 se aprecia que, según los resultados obtenidos en este estudio, las partículas en verano tienden, en promedio, a un mayor retardo en llegar a la zona de destino. Esto no es un resultado intuitivo, ya que en este periodo los vientos en promedio poseen una mayor intensidad, por lo que se esperan mayores velocidades en el lago. Según lo señalado, todo indica que las partículas recorren mayores distancias en este periodo como consecuencia de la presencia de vórtices en el lago Villarrica. Finalmente, se puede observar que en el sector La Poza en verano, las partículas tienden a retenerse en esta zona, lo que permite complementar a los resultados obtenidos en la sección anterior (Figura 5.16),

Pese a obtener resultados que muestran la trayectoria preferencial que poseen las partículas al ser descargadas desde el río Pucón hacia una zona de interés, los resultados no permiten observar grandes estructuras que son esperables dada las dimensiones del lago. Esto apoya la idea de que pese al buen resultado en la calibración mediante temperaturas, el campo de velocidades está sujeto a errores. Teniendo una mejor representación del campo de velocidades, se espera observar mayores estructuras presentes en el lago, y también observar una trayectoria preferencial de forma más clara en la descarga en verano hacia Villarrica (Panel B de la Figura 5.18, la que probablemente sea mediante el borde sur del lago Villarrica debido a la acción de la onda Kelvin fundamental. Sin embargo, se debe destacar que la conectividad física es una herramienta importante para comprender y poder predecir cómo se transportan los nutrientes y contaminantes en su interior, ya que con esto se permite mantener y/o mejorar la calidad de aguas de un lago (Cimatoribus et al., 2019).

### 5.3. Modelo Calidad de Aguas

D-Water Quality es un modulo tridimensional que permite modelar una amplia gama de sustancias en un espacio mediante una malla computacional predefinida. La ecuación de transporte a resolver involucra procesos advectivos, difusivos y reacciones de tipo biológicas, químicas, entre otras. Al estar en presencia de un flujo turbulento, se debe descomponer el flujo y la concentración, de tal forma que  $u = \bar{u} + u'$  y  $C = \bar{C} + C'$ , y finalmente promediar la ecuación de advección-difusión sobre la turbulencia. Con estas consideraciones, la ecuación que describe el transporte en el modelo de calidad de aguas se define como:

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} = -\vec{\bar{u}} \cdot \vec{\nabla} \bar{C} + \vec{\nabla} \cdot (\vec{D} \cdot \vec{\nabla} C) + S(\vec{x}_0) + f(k, \bar{C}, T) \quad (5.4)$$

donde D hace referencia a la suma de la difusividad molecular y la difusividad turbulenta, resuelta por el modelo  $\kappa - \epsilon$ ;  $\bar{u}$  es el campo de velocidad promedio obtenido a partir del modelo hidrodinámico;  $f(k, \bar{C}, T)$  son las reacciones dependientes de las constantes cinéticas k, la concentración  $\bar{C}$  y la temperatura T;  $S(x_0)$  es un termino que fuente relacionado a las descargas y salidas que ocurren en  $\vec{x}_0$ .

El modelo desarrollado en este estudio tiene como objetivo evaluar la condición trófica del lago Villarrica. Es por esto que dentro de este modelo, se modelaron los siguientes nutrientes inorgánicos disueltos: nitrato ( $NO_3^-$ ), amonio ( $NH_4^+$ ) y ortofosfato ( $PO_4^-$ ), los cuales son esenciales en la eutrofización de un cuerpo lacustre (Wetzel, 2001). En complemento a esto se implementó el modelo BLOOM, el cual permite incorporar la dinámica de distintos grupos de biomasa algal. Este consiste en técnicas de optimización que distribuye los recursos disponibles en términos de nutrientes y luz entre las distintas especies de algas, buscando la máxima tasa de crecimiento de estas. Para efectos de este estudio, solo se incluyó como microorganismo las Diatomeas, las cuales son el grupo de algas de mayor abundancia en el lago Villarrica (EULA, 2021).

En base a los resultados de la calibración (ver Figura 4.4), podemos afirmar que se obtuvo un buen desempeño del modelo al simular el nitrógeno total, ya que presenta un alto MSM = 0.81 y una baja variabilidad, ya que RMSE = 0.03 [mg/L]. Sin embargo, el desem-

peño del modelo para el fósforo, no se ajusta de forma correcta a las observaciones, ya que se obtiene un MSM = 0.47 y un RMSE = 0.01 [mg/L]. De la Figura 4.4, se deduce que el modelo está subestimando la concentración de fósforo en una importante cantidad de puntos.

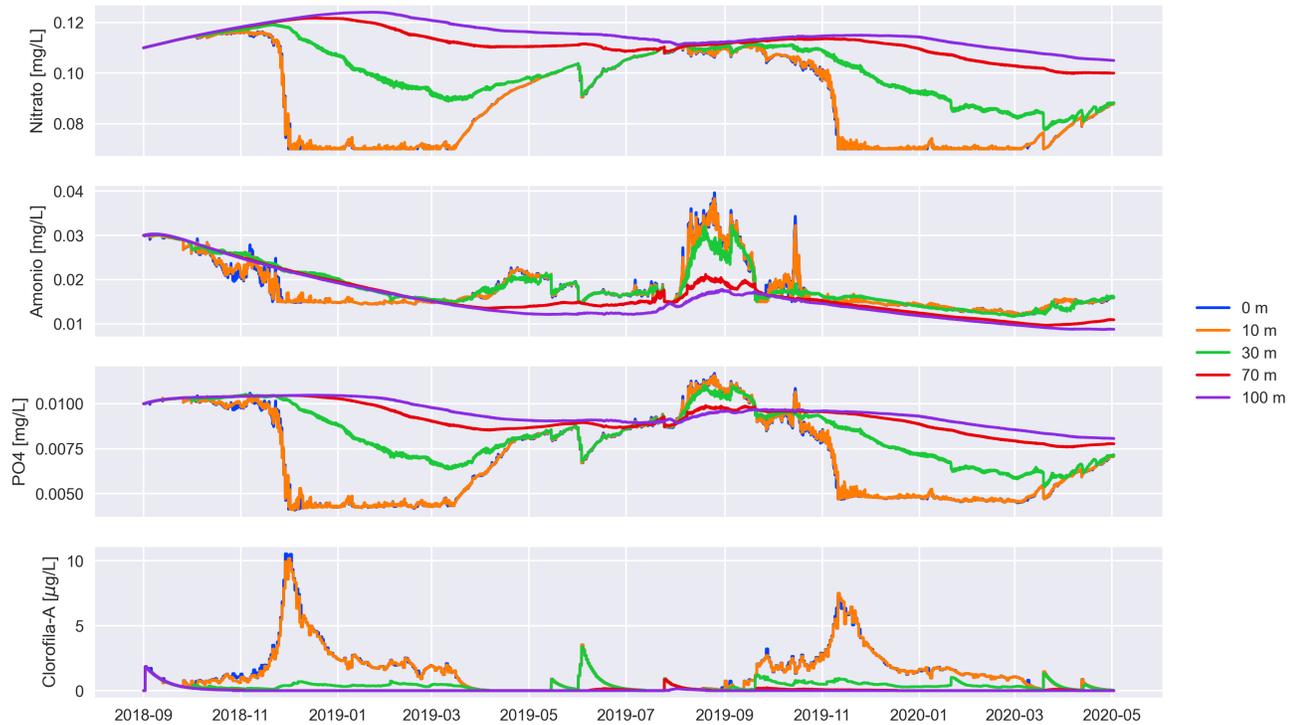


Figura 5.19: Evolución de la concentración de nitrato, amonio, fosfato y clorofila para el periodo de estudio en el centro del lago Villarrica.

En la Figura 5.19 se observa la evolución de la concentración de amonio, nitrato, ortofosfato y clorofila-A en el centro del lago, a distintas profundidades. Es posible evidenciar que, tanto como el nitrato y ortofosfato, presentan un decaimiento bastante marcado a inicios de diciembre en las capas más superficiales por lo que, en estas capas las condiciones de luz solar, temperatura y disponibilidad de nutrientes son favorables para el crecimiento de algas. Esto se comprueba al observar la serie de Clorofila-A, la que en estas fechas experimenta un crecimiento marcado en su concentración, llegando a su peak en el mes de diciembre. Cabe destacar que las diatomeas poseen una baja resistencia a la radiación solar, lo que explicaría el rápido descenso de clorofila-A en el mes de diciembre. Probablemente al incorporar una mayor cantidad de especies de algas en la simulación, tales como algas verdes y cianobacterias, la presencia de clorofila-A sería mayor en los meses de enero y febrero, ya que estas especies poseen una mayor resistencia a la radiación solar.

En el caso de las capas más profundas, se puede observar que a los 30 m existe un crecimiento menor de algas, por lo que los nutrientes disminuyen levemente. Capas mayores a 70 m, no poseen ninguna interacción con las algas, lo que se debe a que no se tiene la disponi-

bilidad suficiente de energía proporcionada por el sol. En el caso del amonio su disminución no es tan abrupta, ya que su concentración se encuentra en disminución debido al proceso de nitrificación ( $NH_4^+ \rightarrow NO_2^- \rightarrow NO_3^-$ ). Luego, en el momento en que existe una proliferación de algas, el amonio decae rápidamente.

Al iniciar la temporada de otoño, la disponibilidad de nutrientes se comienza a equilibrar en profundidad, lo cual se produce hasta fines del invierno. Esto se debe a que en este periodo, la energía proveniente del sol no es suficiente. Al iniciar la primavera del año 2019, los nutrientes en las capas más superficiales empiezan a disminuir levemente hasta llegar el evento de proliferación de algas, el cual alcanza menores concentraciones debido a que en esta simulación se tenía una mayor concentración de nutrientes para dicho evento.

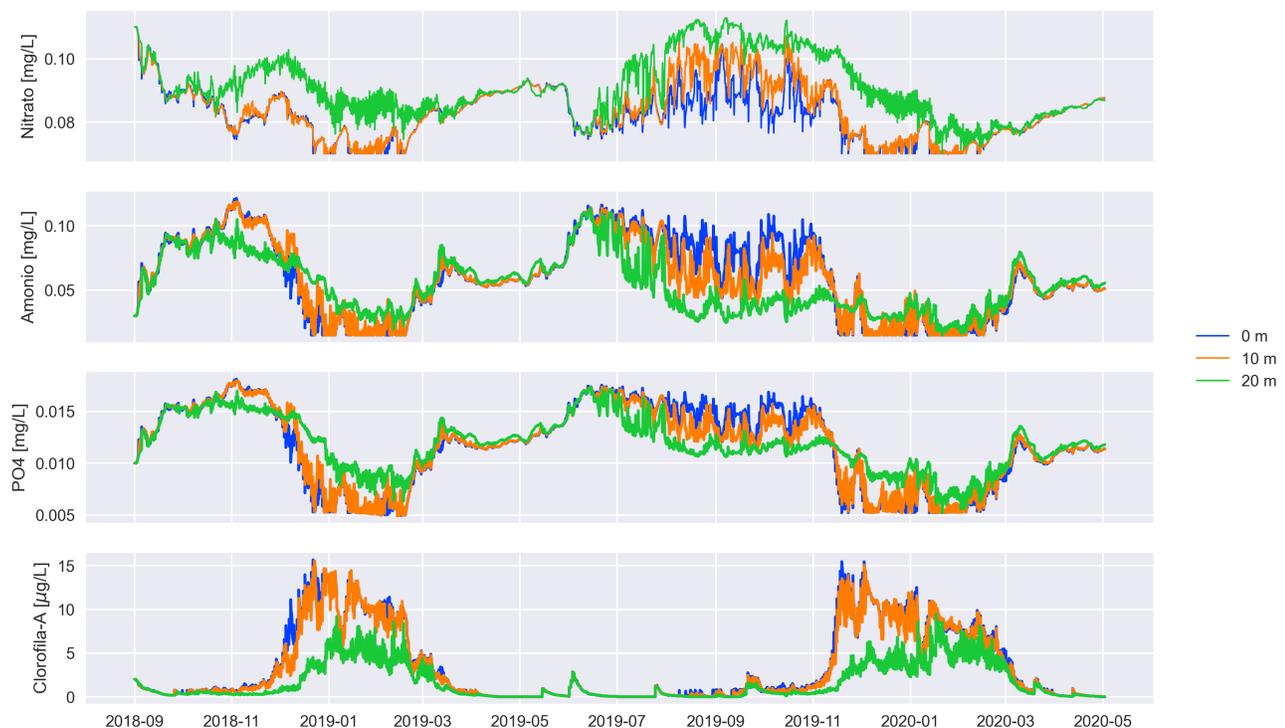


Figura 5.20: Evolución de la concentración de nitrato, amonio, fosfato y clorofila para el periodo de estudio en la estación de monitoreo litoral Pucón del lago Villarrica.

En la Figura 5.20 se observa un resultado similar a los encontrados anteriormente, con la diferencia de que estos se observan en el punto más cercano al único afluente que se considera en este modelo, el cual se denomina litoral Pucón. Se aprecia que en este punto de observación se tiene la misma dinámica en los nutrientes a nivel estacional, con la diferencia que se encuentra una mayor cantidad de nutrientes y por ende, una mayor concentración de clorofila-A.

Con respecto al transporte de nutrientes y clorofila-A , se analizaron tres escenarios distintos para la temporada primavera-verano correspondiente al periodo de validación, los cuales se describen en la Tabla 5.3:

Tabla 5.3: Escenarios que permite describir el transporte de nutrientes y clorofila-A en el lago Villarrica según un instante de tiempo y profundidad de la capa.

<b>Escenario</b>	<b>Fecha</b>	<b>Profundidad [m]</b>	<b>Descripción</b>
1	15/11/2019	10	Período de máxima concentración de clorofila-A.
2	23/02/2020	20	Período en el que termina un evento tipo Puelche.
3	19/03/2020	3	Período de baja clorofila-A , mientras que la concentración de nutrientes aumenta.

En las Figuras 5.21, 5.23 y 5.24, se observa la evolución de los nutrientes (Paneles A, B y C) y clorofila-A (Panel D) para distintos instantes. Considerando que el transporte de nutrientes está dado por la Ecuación 5.4, se puede decir que estos se mueven a través de una componente advectiva, difusiva, reactiva y una fuente asociada a los afluentes y efluentes.

### 5.3.1. Escenario 1

Según lo expuesto en la Figura 5.21, se puede decir que en A, B y C, la componente advectiva transporta los nutrientes por el borde norte del lago Villarrica. La componente difusiva hace que se vea un efecto difuminado en la concentración de nutrientes y se observa también, un movimiento de las concentraciones hacia la zona centro del cuerpo lacustre, siendo mas significativa en C. Con respecto a la componente reactiva del amonio, se puede observar que este nutriente se consume con mayor rapidez que el nitrato y el ortofosfato, debido a que este se consume primero que el nitrato por características adoptadas en el modelo, y también por el proceso de nitrificación, en el cual se genera nitrato a partir del amonio. Esto explica porqué el nitrato mantiene una concentración alta mientras se transporta por el litoral norte.

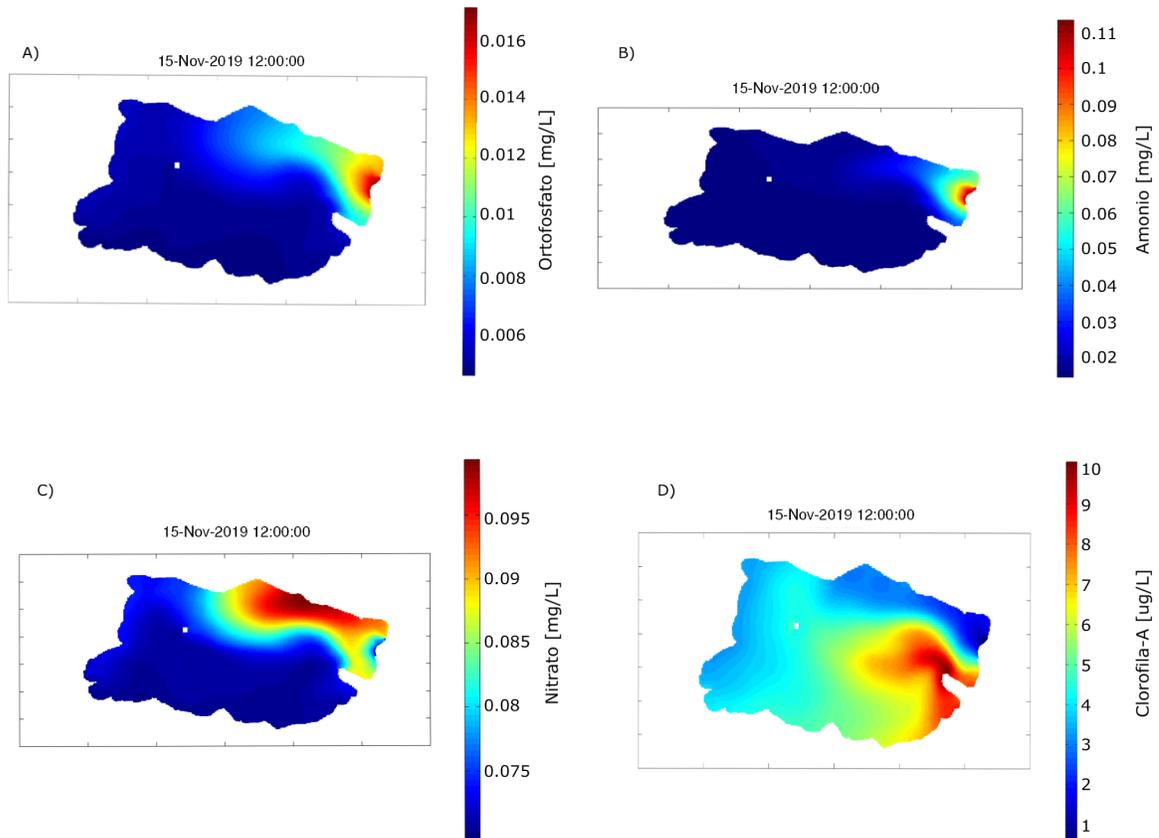


Figura 5.21: Evolución de los nutrientes y clorofila-A para el día 15/11/2019 a 10 m de profundidad. A) Ortofosfato, B) Amonio, C) Nitrato y D) Clorofila-A.

A partir de lo señalado anteriormente, podemos decir que en este escenario, la componente advectiva transporta en gran parte a los nutrientes, al cual se suma el transporte por difusión, pero se advierte que a 10 m de profundidad existe un consumo importante de nutrientes por parte del fitoplancton, ya que se observa el resto de las zonas con una menor concentración y homogénea. El consumo en esta capa, está dado por el consumo de nitrato a partir de la clorofila-A. Esto hace sospechar que el parámetro *Secchi Depth* está sobrestimado, debido a que este parámetro regula la cantidad de calor que se obtiene en profundidad, a partir de la radiación solar que penetra en la columna de agua. Sin embargo, esto tiene un sentido físico, ya que un valor de 11 m para un lago con las características del lago Villarrica es muy alto. Por lo que se podría adoptar un valor medio de las mediciones de transparencia obtenidas en los monitoreos que realizan en el cuerpo lacustre (Fundación red de nuevas ideas, 2020).

Con respecto a D, se observa que la mayor concentración de clorofila se encuentra en un área cercana a Pucón, llegando a una concentración superior a  $9 \mu\text{g}/\text{L}$ . A partir de los resultados de la simulación, se podría decir que en esta zona según la clasificación de Smith (ver Tabla 2.1), el lago presenta condiciones eutróficas por nitrógeno, fósforo y clorofila-A.

En la Figura 5.22, se puede observar como varía el transporte a mayor profundidad. En este caso, se muestra como se distribuye el nitrato a 30 m de profundidad, en el cual claramente se observa una componente difusiva que mueve al nutriente desde la zona de máxima

concentración.

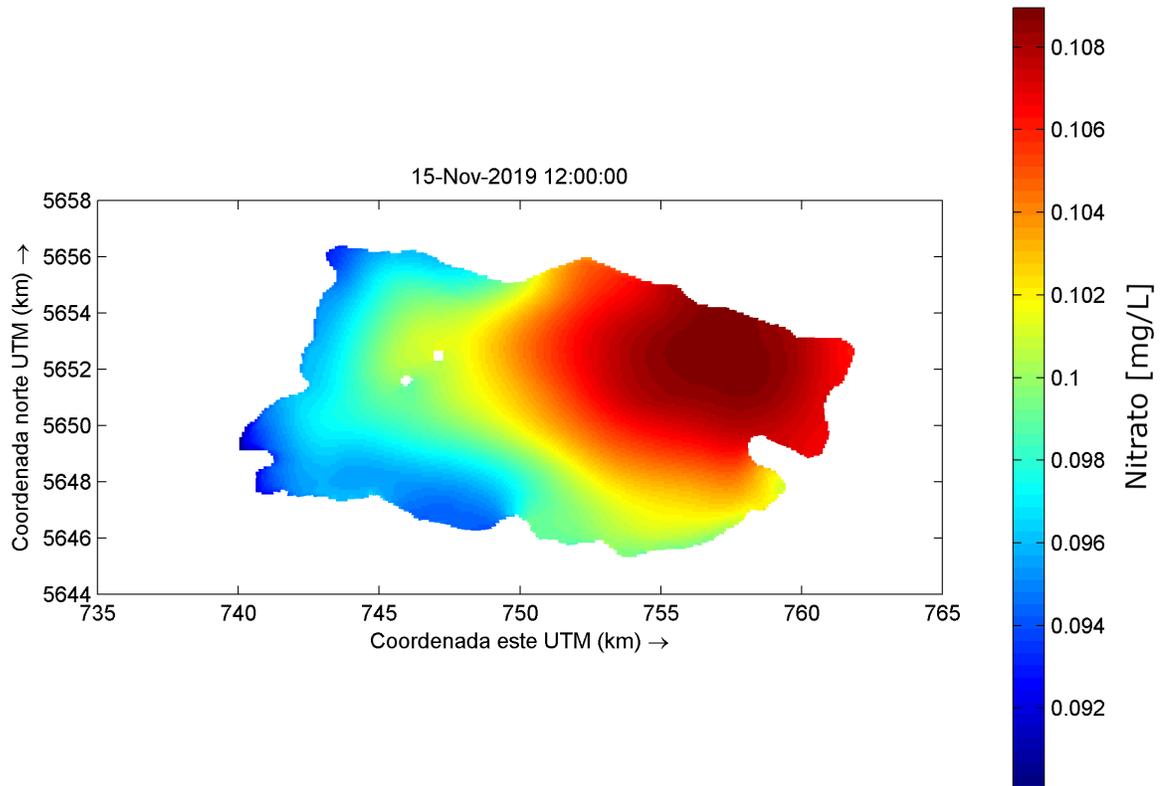


Figura 5.22: Evolución del Nitrato para el día 15/11/2019 a 30 m de profundidad.

### 5.3.2. Escenario 2

A partir de la Figura 5.23, se observa la evolución de concentración de nutrientes y clorofila-A en un periodo de fuerte estratificación, específicamente después del evento Puelche que ocurre entre el 20 y 22 de febrero del 2020. A modo de recordatorio, en estas fechas se obtuvo la circulación del flujo, en el que se verificó la presencia de la onda Kelvin (ver Figura 5.12).

En A y B, es posible apreciar que ambos nutrientes se concentran a las salidas del río Pucón, en los que se aprecia, levemente, el efecto difusivo que dispersa a estos hacia el Oeste. En C, se evidencia el tránsito del nitrato producido por la onda Kelvin fundamental, la cual posee una circulación ciclónica por los bordes del lago. Cabe destacar que, su mayor concentración se encuentra a las salidas del río Pucón, al igual que el resto de los nutrientes.

Con respecto a D, registra que nuevamente la mayor concentración de clorofila-A, se encuentra en las cercanías del afluente, debido a que en esta zona se encuentra la mayor cantidad de nutrientes. Con respecto al transporte advectivo de la clorofila-A, se observa una concentración distribuida en los bordes del lago.

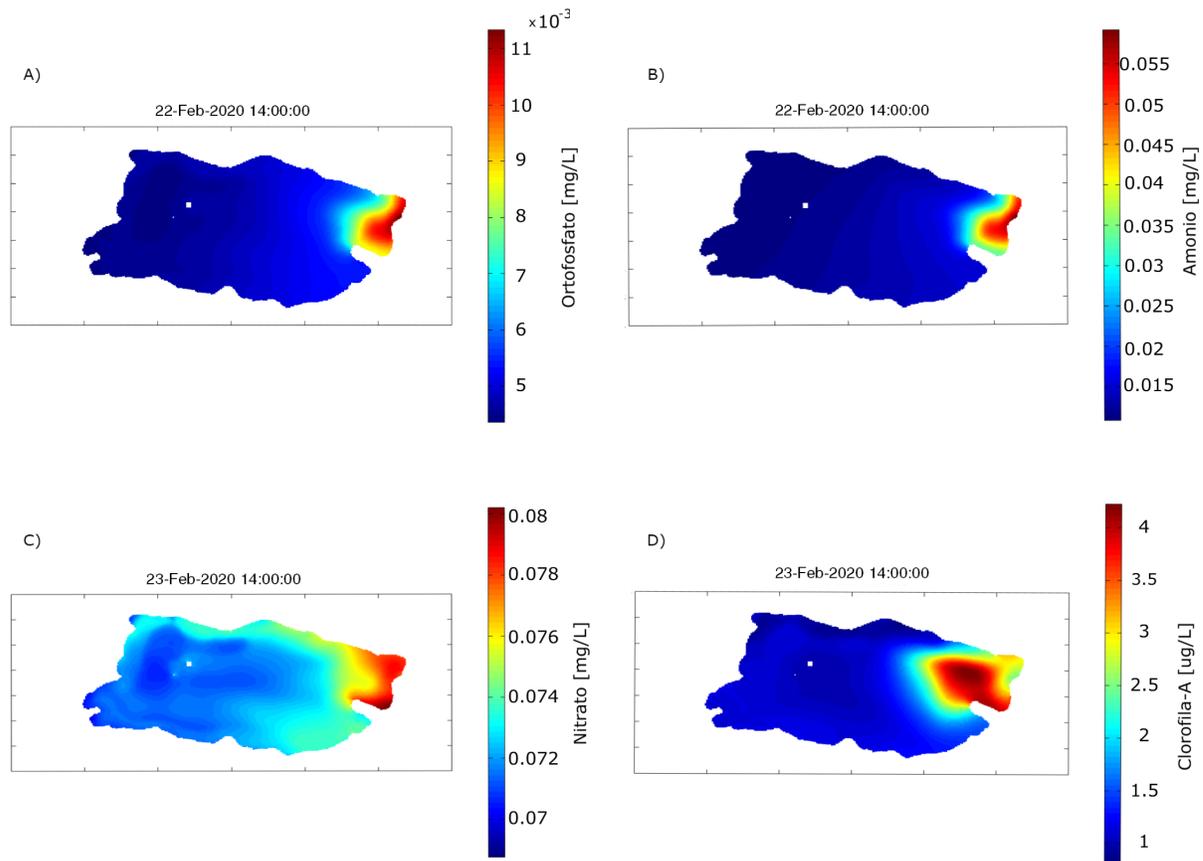


Figura 5.23: Evolución de los nutrientes y clorofila-A para el día 22/02/2020 a 20 m de profundidad. A) Ortofosfato, B) Amonio, C) Nitrato y D) Clorofila-A.

### 5.3.3. Escenario 3

En la Figura 5.24, se observa la evolución de nutrientes y clorofila-A a una profundidad de 3 m, en un periodo en el cual disminuye la energía proveniente del sol, por lo que se reduce considerablemente la tasa de crecimiento de algas, en comparación del mes donde existe la mayor intensidad de energía proveniente del sol. Junto a esto, los nutrientes comienzan a aumentar debido a que no son consumidos por la biomasa algal.

En A y B, se puede observar que la componente advectiva del transporte de nutrientes hace que estos circulen por el borde sur del lago. En cambio la componente difusiva transporta en menor medida los nutrientes hacia la zona oeste del lago. Por otro lado, la componente reactiva realiza la función de distribuir uniformemente la concentración en el resto de las zonas del lago (color azul).

En C es posible observar que el nitrato reacciona con menor rapidez, lo que confirma lo analizado en los escenarios 1 y 2. El nitrato se transporta en gran medida por la advección, transitando por el borde sur. Los efectos de la difusión turbulenta, promueve que el estrato se encuentre menos confinado al borde este del lago, ya que se aprecia un transito de la concentración hacia la zona noroeste del lago.

Finalmente en D, la clorofila-A posee la misma distribución horizontal que en C, marcando un máximo en el sector La Poza, con concentraciones de clorofila-A menores que las reportadas en el escenario 1 y 2.

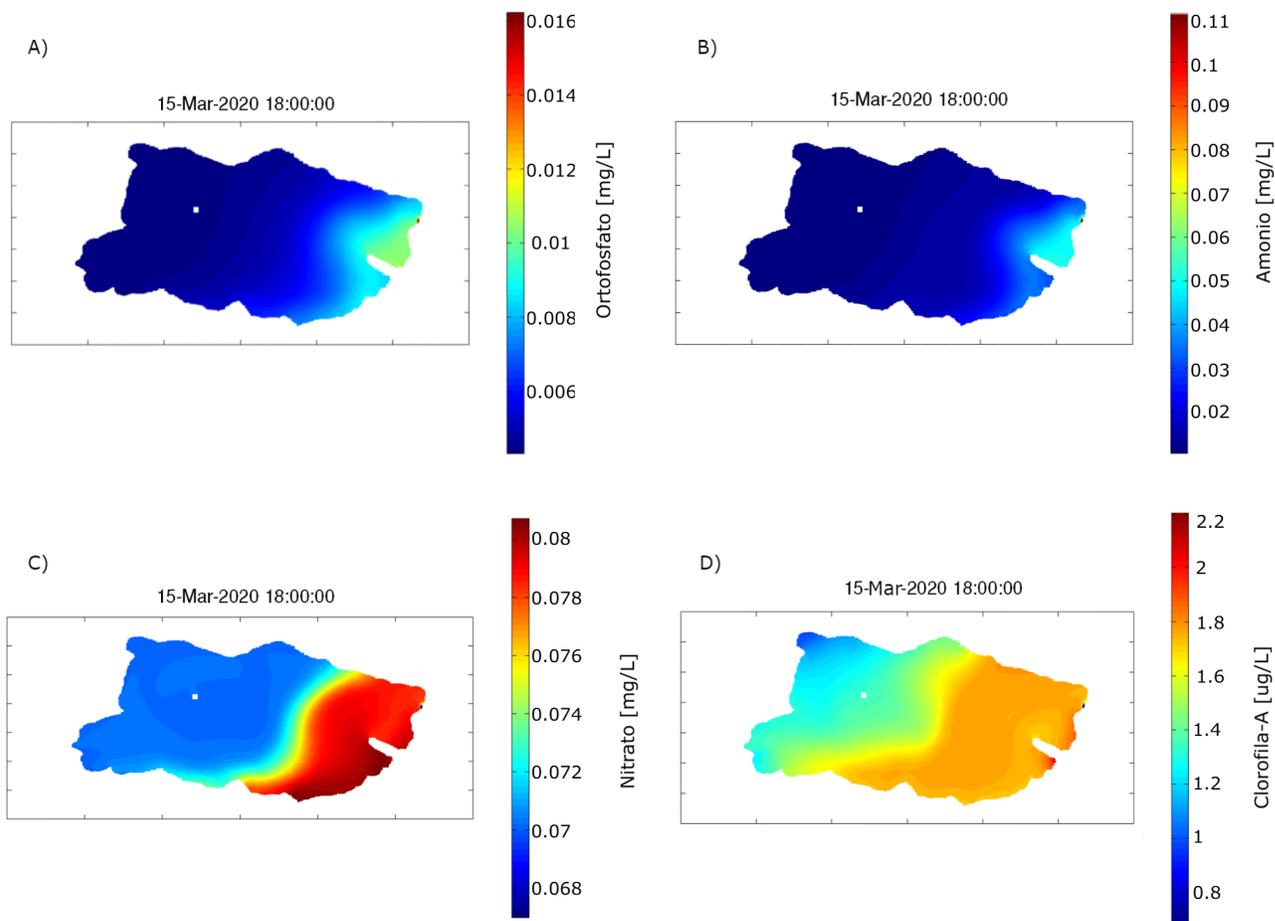


Figura 5.24: Evolución de los nutrientes y clorofila-A para el día 19/03/2020 a 3 m de profundidad. A) Ortofosfato, B) Amonio, C) Nitrato y D) Clorofila-A.

Bravo (2021) obtuvo resultados de la distribución de concentración de clorofila-A en el lago Villarrica a partir de un procesamiento de imágenes satelitales en distintas fechas, los cuales fueron utilizados para la validación del modelo de calidad de aguas. En la Figura 5.25, se observa que la distribución de la clorofila-A se mueve por el borde sur del lago y que la máxima concentración se sitúa en el sector La Poza. Esto coincide con lo obtenido por el modelo de calidad de aguas, por lo que si se logra reproducir un comportamiento similar en la distribución horizontal de clorofila para un sector del lago. Sin embargo en la Figura 5.25, se reporta la circulación de clorofila-A desde la ribera sur hacia las cercanías de la isla Aillaquillén, la cual no se logró replicar en la Figura 5.24.

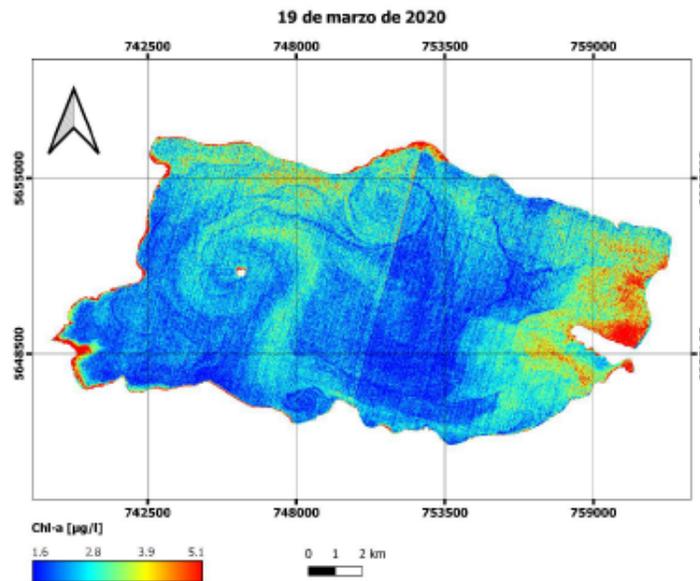


Figura 5.25: Distribución de la concentración de clorofila-A correspondiente al 19 de marzo del 2020. Rescatado de (Bravo, 2021).

En las Figuras 5.26 y 5.27, se compararon ambos resultados correspondientes a enero 2020. En este caso, es posible apreciar que se observa que la clorofila sigue una trayectoria similar a lo observado por Bravo (2021), sin embargo, el modelo numérico indica que los nutrientes tienden a retenerse en las cercanías del afluente y no son capaces de transportar su masa hacia el resto del lago, llegando a máximos de  $10 \mu\text{g}/L$ . Esto refuerza la idea de que el transporte de masa posee deficiencias en las componentes advectivas, y también en la tasa de crecimiento de algas. Esta última, ya que en las Figuras 5.19 y 5.20, se observa un crecimiento muy rápido de la concentración de clorofila en el instante que se presentan condiciones favorables, y luego decae hasta llegar a una nula concentración. Para mejorar esto se debe: incorporar una mayor cantidad de especies de algas en la simulación, de modo que se puedan optimizar la disponibilidad de nutrientes en función del tiempo; revisar los parámetros asociados al crecimiento de algas; reducir el parámetro "Secchi Depth", ya que es muy probable que el modelo esté sobrestimando la cantidad de calor almacenada en el periodo de verano; corregir la serie de temperatura del afluente, la cual se asumió cercana a la temperatura con la que se encuentra el lago Villarrica, por lo que probablemente el ingreso de nutrientes se concentra en niveles más superficiales, debido a que no se genera una corriente de densidad desde el río Pucón al lago Villarrica.

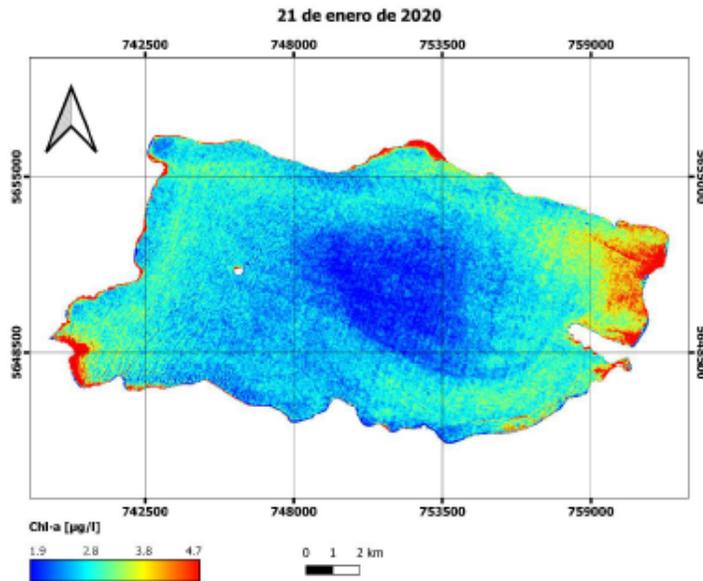


Figura 5.26: Distribución de la concentración de clorofila-A correspondiente al 21 de enero del 2020. Rescatado de (Bravo, 2021).

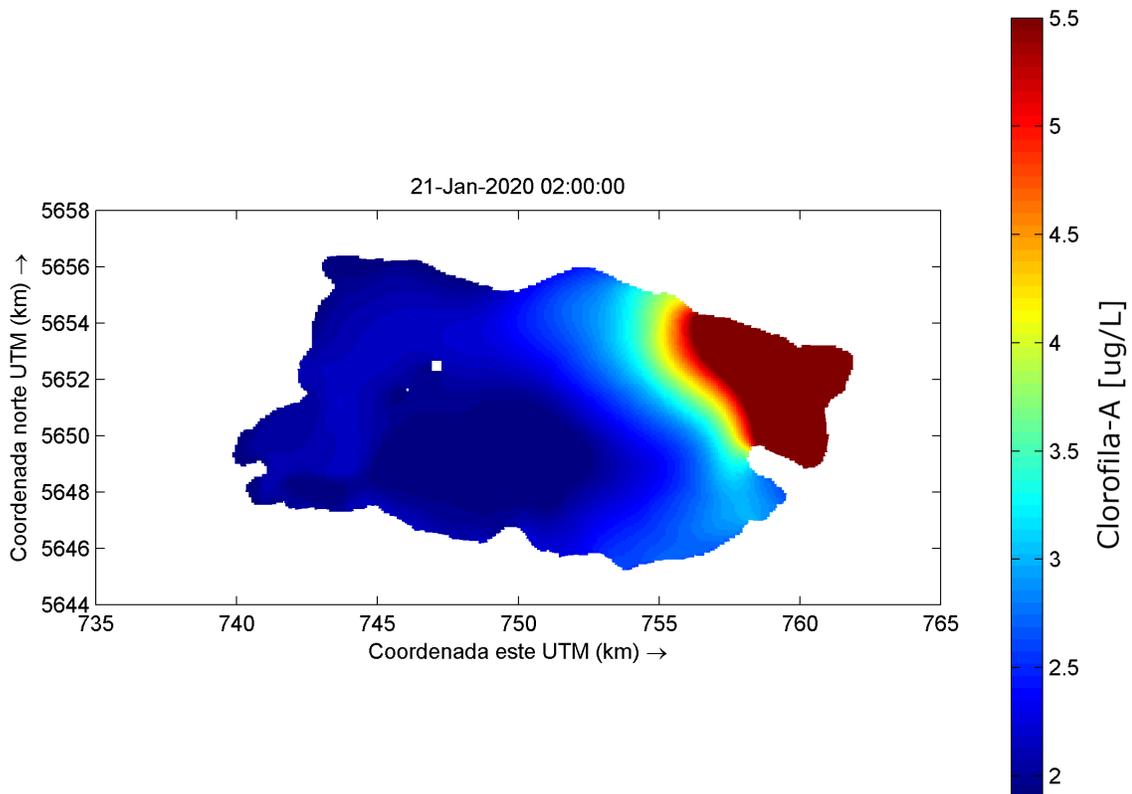


Figura 5.27: Distribución de la concentración de clorofila-A correspondiente al 21 de enero del 2020 obtenida mediante el modelo numérico.

De esta forma, y a modo de resumen, podemos señalar que este modelo de calidad de aguas incorpora los procesos básicos que ocurren en el lago Villarrica. Aún así, existen una serie de

procesos importantes para representar la dinámica del cuerpo de agua, y que con el propósito de simplificar la compleja dinámica que poseen los lagos, no fueron tomados en cuenta en este estudio. Algunos de estos son: la interacción del cuerpo de agua con los sedimentos, las descargas proveniente de las fosas sépticas ubicadas en la ribera sur y la sedimentación de algas. Es importante señalar también que se tomó una serie de supuestos que simplifican nuestro análisis, tales como: considerar solo la especie de algas más abundante en el lago Villarrica, lo cual es incorrecto, ya que existe una gran variedad de grupos presentes en el lago (EULA, 2021). Junto con esto, el ciclo del fósforo adoptado por el modelo numérico no considera los procesos de adsorción, precipitación y disolución, así como también, no se tomó en cuenta el levantamiento de sedimentos realizado por plantas acuáticas, cuya función es actuar como bombas que devuelven el fósforo contenido en materia orgánica muerta hacia la columna de agua (Bruning, 2018).

Pese a esto, se obtuvo un modelo simplificado que permite simular el transporte de nitrógeno y fósforo, a partir de la calibración del modelo numérico, en función de las estaciones de monitoreo dispuestas por la DGA. Además, se logró identificar de manera correcta el periodo en el que existe presencia de algas y la dinámica que posee el sistema ante la presencia de este agente. Con esto, se pudo verificar que el transporte de clorofila-A obtenido a partir del modelo numérico, muestra cierta concordancia con los resultados obtenidos de estudios anteriores (Bravo, 2021), observando de manera general que existen patrones de circulación en común en las cercanías de Pucón. Sin embargo, en otras zonas del lago no se logró reproducir adecuadamente el transporte de nutrientes y clorofila debido a la simplificación del modelo, y un posible error en el campo de velocidades.

A modo de finalización se debe destacar que, se logró obtener una similitud en los caminos preferenciales encontrados mediante la conectividad física en el inicio de su trayectoria, observando que los nutrientes transitan por las vías preferentes, pero a medida que se alejan del afluente, su propagación se ve distorsionada por los efectos difusivos y reactivos propios de los nutrientes y de la interacción con el lago Villarrica. Por último, se hace interesante la necesidad de complementar los resultados de un modelo de calidad de aguas con imágenes satelitales, los cuales permiten validar resultados obtenidos, y también abre espacio para estudiar otros fenómenos que pueden estar relacionados. Uno de estos podría ser la ocurrencia de *upwelling*, debido a que en verano, el hipolimnion se considera una capa con abundancia de nutrientes, por lo que la presencia de este fenómeno permitiría un masivo crecimiento de algas en esta temporada, lo cual es perjudicial para la calidad del agua.

# Capítulo 6

## Conclusiones

En la presente investigación se implementó un modelo numérico tridimensional mediante el software Delft3D, que pretende reproducir los procesos de la termo-hidrodinámica del lago Villarrica en un periodo comprendido entre agosto 2018 y julio 2020. Junto a esto, se incorporó un modelo de calidad de aguas y la conectividad física de dicho cuerpo de agua. A continuación se presentan las principales conclusiones, basadas en los alcances de los objetivos propuestos en este estudio.

Se logró caracterizar las distintas forzantes meteorológicas a nivel estacional que fueron necesarias para el correcto uso del modelo hidrodinámico, tales como temperatura, radiación solar, humedad relativa, nubosidad y dirección e intensidad del viento. Estas variables se asumieron uniformes en toda la extensión del lago Villarrica. De este conjunto de forzantes, solamente a la velocidad del viento se le aplicaron correcciones en su magnitud, debido a requerimientos del modelo hidrodinámico, y en búsqueda de representar los vientos que actúan en el centro del lago.

Se logró implementar un modelo hidrodinámico, cuyos resultados fueron evaluados a partir de mediciones de temperatura dispuestas por la Dirección General de Aguas (DGA), en 7 estaciones de monitoreo, entregando buenos resultados del modelo radiativo a partir de distintas métricas utilizadas, destacando el uso de coordenadas  $Z$  por sobre las coordenadas  $\sigma$  en este modelo. Sin embargo, al realizar un análisis del campo de velocidades, se observó solamente la presencia de vórtices de gran tamaño, no permitiendo observar en detalle la presencia de estas estructuras, lo cual se atribuye a que el modelo hace uso de las ecuaciones RANS. Además, no fue posible obtener el campo de velocidades promedio en los meses de invierno al considerar las capas mas superficiales, ya que se observaban trayectorias uniformes, acorde a la acción del viento. Esto advierte que el perfil de velocidades podría estar deformado por algún parámetro y/o supuestos adoptados en la modelación. A raíz de esto, se puede señalar que si bien, un modelo termo-hidrodinámico debe ser calibrado inicialmente en base a temperaturas, se sugiere complementar la calibración con otra variable más dinámica, la cual podría ser el oxígeno disuelto.

Al evaluar la respuesta del lago ante la acción del viento en el periodo de estudio, se verificó que no hay presencia de *upwelling*. Sin embargo, el numero de Wedderburn se calculó a partir de una aproximación lineal, obteniendo valores de  $W$  cercanos a 1. Pese a que el *upwelling* no se produce siempre, se debe analizar  $W$  con mayor detalle, tal como podría ser

con la incorporación de la batimetría en su formulación (Shintani et al., 2010). Con respecto a los resultados obtenidos a través de la densidad espectral, se puede decir que, se verifica la existencia de un viento de periodicidad diaria y una onda kelvin, registrada en la zona litoral, que posee su mayor contenido energético en un periodo de 21 horas, cercano al periodo del viento. A partir de esto, se puede decir que ambos entran en resonancia, de modo que la onda Kelvin fundamental gobierna en su mayoría la hidrodinámica del lago Villarrica (Rozas, 2011). De acuerdo a lo observado en el campo de velocidades, se puede decir que se advierte la presencia de vórtices en la zona centro del lago para verano e invierno, y una preferencia de circulación ciclónica (a favor de las agujas del reloj) a través de los bordes en verano, lo cual se atribuyó a la presencia de la onda Kelvin fundamental.

Con respecto al modelo de partículas, al realizar el experimento del trazador conservativo, se observó que, las partículas transitan por el epilimnion en el periodo de estratificación, mientras que viajan por toda la columna de agua en los periodos en que el lago se encuentra en mezcla completa. Esto ocurre debido a que las partículas fueron lanzadas en la capa del epilimnion, por lo que debido al efecto de la interfaz de densidad que limita los desplazamientos verticales entre ambas capas, las partículas quedan "encerradas" en la capa superior. Por otro lado, al observar los resultados de los trazadores lagrangianos, se observó que existe una diferencia en los caminos preferenciales entre verano e invierno, siendo los resultados de invierno los que poseen en promedio un menor tiempo de residencia. Sin embargo, en este experimento se esperaba observar mayores estructuras que indiquen la presencia de vórtices, lo cual se atribuye a que la simulación se obtiene con las ecuaciones RANS, las cuales advierte la presencia de vórtices de mayor tamaño, así como también a la resolución utilizada en el modelo hidrodinámico.

Con respecto al modelo de calidad de aguas, se realizó la calibración en base a mediciones de nitrógeno total y fósforo total registradas en 7 estaciones de monitoreo. Estos resultados entregaron un buen rendimiento del modelo para la simulación de nitrógeno con un MSM= 0.81 y RMSE = 0.03 mg/L, mientras la modelación de fósforo presentó mayores deficiencias con un MSM = 0.47 y RMSE = 0.01 mg/L. En ambos casos se observó una tendencia a la subestimación de concentración simulada.

La implementación de este modelo, permitió observar la interacción entre los procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren en el lago Villarrica, específicamente la evolución del nitrato, amonio y fósforo, considerando la presencia de biomasa algal. Entre noviembre y marzo, existen condiciones favorables para el crecimiento de algas, debido a que se disponen las condiciones de temperatura y energía proveniente del sol. En este periodo el modelo logró identificar la presencia de algas. Sin embargo, se debe ajustar el modelo para regular la tasa de crecimiento/decaimiento de algas en el lago Villarrica, y así representar con mayor exactitud la dinámica que ocurre en el cuerpo de agua. Dentro de las mejoras que se pueden realizar al modelo de calidad de agua, se destaca (1) integrar una mayor cantidad de especies de algas; (2) corregir el parámetro *Secchi Depth* en el mes de febrero; (3) corregir la serie de temperatura del afluente.

A modo de validación, se comparó la distribución de clorofila-A simulada con el modelo de calidad de aguas y los resultados obtenidos en el estudio realizado por Bravo (2021), en las que se encontraron similitudes en la distribución horizontal pero con diferencias importantes

en la escala de magnitud de la concentración de clorofila. En base a esto, se infiere que la subestimación de la concentración fósforo y clorofila en algunos sectores del lago Villarrica, se atribuye a las deficiencias en la configuración del modelo mencionadas anteriormente, así como también, se debe incorporar mayor detalle en los procesos y representar de mejor forma el campo de velocidades, ya que la componente advectiva del transporte de nutrientes adquiere gran importancia. De esta forma se espera que el balance entre el consumo de nutrientes por parte de las algas y el aumento de nutrientes aportados por el afluente se encuentre en mayor equilibrio, así como también, la tasa de crecimiento/decaimiento de algas.

Finalmente, se destaca la capacidad del modelo Delft3D-FLOW, con un sistema de coordenadas tipo  $Z$ , para evaluar la reproductibilidad de la dinámica que posee la estructura térmica en lagos. Sin embargo, para obtener un modelo más robusto se deben realizar observaciones con una mayor periodicidad, ya que se puede estar ocultando la presencia de fenómenos importantes que ocurren en el lago Villarrica. Además, se destaca la importancia de complementar la calibración con mediciones de velocidad en el lago, con el fin de obtener una adecuada representación de la termo-hidrodinámica, y así acoplar este modelo con el resto de módulos disponibles en el software Delft3d de forma correcta. Por otro lado, se destaca la conectividad física como una herramienta útil para predecir los caminos preferenciales que adquiere una potencial descarga de contaminantes en el lago, ya que permite identificar y notificar zonas de peligro a consecuencia del contaminante vertido. Finalmente, se consideró la necesidad de complementar los resultados de un modelo de calidad de aguas con imágenes satelitales, los cuales permitieron validar los resultados de clorofila obtenidos de manera distribuida en todo el cuerpo de agua. Por otro lado, se abre espacio para estudiar fenómenos que requieran utilizar ambas herramientas, tal como podría ser el *upwelling* en Pucón, cuya ocurrencia podría darse en presencia de un viento tipo Puelche.

# Bibliografía

- Abarca, J. (2018). Modelación hidrodinámica del lago Llanquihue. *Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería con mención en Recursos y Medio Ambiente Hídrico. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.*
- Abarca, J., Ulloa, H., y Niño, Y. (2022). Basin-scale hydrodynamics and physical connectivity in a great patagonian lake. *Under review in Journal of Great Lake Research.*
- Antenucci, J., y Imberger, J. (2001). Energetics of long internal gravity waves in large lakes. *Limnology and Oceanography*, 46(7), pp. 1760-1773.
- Bravo, J. (2021). Diagnóstico de la condición trófica del lago Villarrica utilizando imágenes satelitales. *Memoria para optar al Título de Ingeniera Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.*
- Bruning, M. (2018). Estudio de aporte de carga de nutrientes por fuentes contaminantes y análisis de escenarios de descontaminación mediante un modelo de calidad de aguas en el lago Villarrica. *Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería Mención Química. Departamento de Ingeniería Química, Biotecnología y Materiales, Universidad de Chile.*
- Campos, H., Steffen, W., Román, C., Zuñiga, L., y Agüero, G. (1983). Limnological studies in the lake Villarrica morphometric, physical, chemical, planktonical factors and primary productivity. *Archiv für Hydrobiologie*, 4, pp. 371-406.
- Cimatoribus, A. A., Lemmin, U., y Barry, D. A. (2019). Tracking lagrangian transport in lake Geneva: A 3D numerical modeling investigation. *Limnology and Oceanography*, 64, pp. 1252-1269.
- Cole, T., y Wells, S. (2006). Ce-qual-w2: A two-dimensional, laterally averaged, hydrodynamic and water quality model, version 3.5. *Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad Estatal de Portland, Oregon, Estados Unidos.*
- Cushman-Roisin, B., y Beckers, J.-M. (2011). Introduction to geophysical fluid dynamics: physical and numerical aspects. *International geophysics series*, 101(2), pp. 395-419.
- Decreto 19. Ministerio Del Medio Ambiente. (2013). Establece normas secundarias de calidad ambiental para la protección de las aguas continentales superficiales del lago Villarrica. *Diario Oficial de la República de Chile.*
- Decreto 43. Ministerio Del Medio Ambiente. (2018). Declara zona saturada por clorofila-A, transparencia y fósforo disuelto, a la cuenca del lago Villarrica. *Diario Oficial de la República de Chile.*
- Deltares. (2014a). 3D/2D modelling suite for integral water solutions: Hydro-

Morphodynamics. , 710.

- Deltares. (2014b). *Delft3d 3D/2D modelling suite for integral water solutions Hydro-Morphodynamics*.
- Dirección General de Aguas. (2014). Evaluación de la condición trófica de la red de control de lagos de la dga. santiago. *Diario Oficial de la República de Chile*..
- Dirección General de Aguas. (2018). Análisis de la relación entre la concentración de clorofila “a” y la transparencia de los lagos monitoreados por la red de calidad de la dga, y elaboración de un ranking de lagos basado en el estado trófico otorgado por estos parámetros. *Diario Oficial de la República de Chile*..
- Donoso, G. (2011). Water policy in Chile. *Springer International Publishing*.
- Fundación red de nuevas ideas. (2020). Reporte 11: Monitoreo lago Villarrica, en Pucón 2020.
- Galaz, F. (2020). Modelación numérica de la hidrodinámica del lago Villarrica ad portas del anteproyecto del plan de descontaminación aprobado mediante resolución exenta n°437/2020 del ministerio del medio ambiente. *Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile*.
- Hodges, B., Imberger, J., Saggio, A., y Winters, K. B. (2000). Modeling basin-scale internal waves in a stratified lake. *Limnol. Oceanogr.*, 45(7), 1603–1620.
- ILEC. (2005). *Managing Lakes and their Basins for Sustainable Use: A Report for Lake Basin Managers and Stakeholders*. International Lake Environment Committee Foundation: Kusatsu, Japan.
- Imberger, J., y Hamblin, P. F. (1992). Dynamics of lakes, reservoirs, and cooling ponds. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 14, pp. 153-187.
- Imberger, J., y Patterson, J. (1990). Physical limnology. *Advances in Applied Mechanics*, 27, pp. 303–475.
- Imboden, D., y Wüest, A. (1995). Mixing mechanisms in lakes. *Physics and Chemistry of Lakes*, pp. 83-138.
- Ji, Z.-G. (2008). Hydrodynamics and Water Quality: Modelling Rivers, Lakes and Estuaries. *John Wiley and Sons, Inc*.
- Mazzeo, N., Clemente, J., García-Rodríguez, F., Gorga, J., Kruk, C., Larrea, D., ... Scasso, F. (2002). Eutrofización: Causas, consecuencias y manejo. *Domínguez, A. Prieto, R. G. (ed.). Perfil ambiental del Uruguay*, pp. 39-56.
- Meruane, C. (2005). El efecto del viento Puelche sobre la hidrodinámica y calidad de aguas del lago Villarrica. *Memoria para optar al Título de Ingeniera Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile*. doi: 10.13140/RG.2.1.1275.9760
- Ministerio del Medio Ambiente. (2011). Análisis General de Impacto Económico y Social del anteproyecto de Normas Secundarias de Calidad Ambiental para la Protección de las Aguas del Lago Villarrica. *Diario Oficial de la República de Chile*..
- Ministerio del Medio Ambiente. (2020a). Análisis General de Impacto Económico y Social del anteproyecto de Normas Secundarias de Calidad Ambiental para la Protección de

- las Aguas del Lago Villarrica. *Diario Oficial de la República de Chile.*
- Ministerio del Medio Ambiente. (2020b). *Resolución exenta n° 437.*
- Mitra, A., Fazli, P., Zaman, S., y Pramanick, P. (2014). Lakes and their origin.
- Mortimer, C. H. (1952). Water movements in lakes during summer stratification; evidence from the distribution of temperature in windermere. *Phil. Trans. R. Soc. London, 236: 355-398.*
- Mortimer, C. H. (1974). Lake hydrodynamics. *Mitt. Int. Ver., Limnol., 20: 124-197.*
- Niño, Y. (2019a). Response of a stratified water body to wind surface set-up and interfacial displacement. *Curso de Hidrodinámica Ambiental, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.*
- Niño, Y. (2019b). Stratification and mixing in lakes and reservoirs. *Curso de Hidrodinámica Ambiental. Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.*
- Oertli, B., Cereghino, R., y Miracle, M. R. (2009). Lakes and their origin. *Hydrobiologia, 634: 1-9.*
- Rahman, M., Roshid, H., Mozid, M., y Mamun, M. (2011). A comparative study of wavelet transform and fourier transform. *Journal of Physical Sciences, 15, pp. 149-160.*
- Rozas, C. (2011). Análisis modal para el estudio de resonancia de ondas internas excitadas por el viento en el lago Villarrica. *Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería con mención en Recursos y Medio Ambiente Hídrico. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.*
- Rozas, C., de la Fuente, A., y Ulloa, H. (2014). Quantifying the effect of wind on internal wave resonance in lake villarrica. *Environ Fluid Mechanics, 14, pp. 849-871.*
- Shintani, T., de la Fuente, A., Niño, Y., y Imberger, J. (2010). Generalizations of the wedderburn number: Parameterizing upwelling in stratified lakes. *Limnol. Oceanogr., 55(3), pp. 1377-1389.*
- Smith, V. H., Tilman, G. D., y Nekola, J. C. (1999). Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems. *Environmental Pollution, 100, pp. 179-196.*
- Spigel, R. H., y Imberger, J. (1990). The classification of mixed-layer dynamics in lakes of small to medium size. *J. Phys. Oceanogr., 10, pp. 1104-1121.*
- Stevens, C., y Imberger, J. (1996). The initial response of a stratified lake to a surface shear stress. *Journal of Fluid Mechanics, 312, pp. 39-66.*
- Ulloa, H. (2011). Estudio experimental de la respuesta de ondas internas gravitacionales afectadas por la rotación terrestre en un flujo estratificado. *Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.*
- Ulloa, H., de la Fuente, A., y Niño, Y. (2014). An experimental study of the free evolution of rotating, nonlinear internal gravity waves in a two-layer stratified fluid. *Journal of Fluid Mechanics, 742, pp. 308-339.*
- Ulloa, H., Winters, K., de la Fuente, A., y Niño, Y. (2015). Degeneration of internal kelvin

waves in a continuous two-layer stratification. *Journal of Fluid Mechanics*, 777, pp. 68-96.

Universidad de Concepción. (2021). Evaluación de la condición trófica en cuerpos lacustres monitoreados por la DGA. *Departamento de Sistemas Acuáticos. Centro EULA, Chile.*

Universidad de la Frontera. (2020). Evaluación de medidas de reducción de nutrientes (nitrógeno y fósforo) en base al análisis de escenarios, como insumo para la preparación del anteproyecto del plan de descontaminación de la cuenca del lago Villarrica.

Wetzel, R. G. (2001). *Limnology: lake and river ecosystems* (3.<sup>a</sup> ed.). Academic Press.

Willmott, C. J. (1981). On the validation of models. *Physical Geography*, 2, pp. 184-194.

# ANEXOS

## Anexo A

### Calibración del modelo hidrodinámico

Tabla A.1: Calibración a partir temperaturas en la estación centro del lago Villarrica.

Fecha	Profundidad de muestreo [m]	Temperatura observada [°C]	Temperatura modelada [°C]
24-10-2018	0	10.22	11.51719
24-10-2018	10	10.77	11.54097
24-10-2018	30	10.59	10.25129
24-10-2018	70	9.8	9.859774
24-10-2018	100	9.47	9.841375
29-01-2019	0	20.8	19.47975
29-01-2019	10	19.66	19.49817
29-01-2019	30	11.52	10.98798
29-01-2019	70	9.59	9.888665
29-01-2019	100	9.48	9.853156
27-02-2019	0	18.9	19.38322
27-02-2019	10	18.59	19.39014
27-02-2019	30	14.9	11.14028
27-02-2019	70	9.73	9.909969
27-02-2019	100	9.51	9.861949

Tabla A.2: Calibración a partir temperaturas en la estación pelagial Villarrica del lago Villarrica.

<b>Fecha</b>	<b>Profundidad de muestreo [m]</b>	<b>Temperatura observada [°C]</b>	<b>Temperatura modelada [°C]</b>
24-10-2018	0	11.01	11.44
24-10-2018	10	11.17	11.43
24-10-2018	30	10.37	10.28
24-10-2018	70	9.72	9.88
29-10-2018	0	19.5	19.41
29-01-2019	10	17.98	19.34
29-01-2019	30	12.26	10.87
29-01-2019	70	9.72	9.92
29-01-2019	85	9.65	9.89
27-02-2020	0	18.13	19.30
27-02-2020	10	18.05	19.32
27-02-2020	30	16.36	11.27
27-02-2020	70	9.94	9.93
27-02-2020	100	9.92	9.89

Tabla A.3: Calibración a partir temperaturas en la estación litoral norte del lago Villarrica.

<b>Fecha</b>	<b>Profundidad de muestreo [m]</b>	<b>Temperatura observada [°C]</b>	<b>Temperatura modelada [°C]</b>
24-10-2018	0	11.44	11.59
24-10-2018	10	11.34	11.58
24-10-2018	20	10.96	10.83
29-10-2018	0	19.65	19.38
29-01-2019	10	16.35	19.41
29-01-2019	20	14.24	18.14
29-01-2019	0	19.6	19.68
27-02-2020	0	18.29	19.42
27-02-2020	10	16.26	19.45
27-02-2020	20	16.76	19.10

Tabla A.4: Calibración a partir temperaturas en la estación litoral Pucón del lago Villarrica.

<b>Fecha</b>	<b>Profundidad de muestreo [m]</b>	<b>Temperatura observada [°C]</b>	<b>Temperatura modelada [°C]</b>
23-10-2018	10	10.04	11.54
23-10-2018	20	9.69	11.09
24-10-2018	0	10.96	11.53
28-01-2018	0	20.52	19.65
28-01-2018	10	18.88	19.63
28-01-2018	20	13.29	14.68
27-02-2019	0	19.44	19.45
27-02-2019	10	19.33	19.42
27-02-2019	20	16.98	18.69

Tabla A.5: Calibración a partir temperaturas en la estación litoral sur del lago Villarrica.

<b>Fecha</b>	<b>Profundidad de muestreo [m]</b>	<b>Temperatura observada [°C]</b>	<b>Temperatura modelada [°C]</b>
23-10-2018	0	10.74	11.44
23-10-2018	10	10.7	11.49
24-10-2018	20	10.68	11.05
28-01-2018	0	20.02	19.42
28-01-2018	10	19.8	19.29
28-01-2018	20	14.84	14.69
26-02-2019	0	18.69	19.49
26-02-2019	10	18.2	19.47
26-02-2019	20	17.68	17.19

Tabla A.6: Calibración a partir temperaturas en la estación litoral Villarrica del lago Villarrica.

<b>Fecha</b>	<b>Profundidad de muestreo [m]</b>	<b>Temperatura observada [°C]</b>	<b>Temperatura modelada [°C]</b>
23-10-2018	0	11.2	11.37
23-10-2018	10	11.18	11.40
24-10-2018	20	11.18	10.98
28-01-2018	0	19.11	19.34
28-01-2018	10	18.48	19.18
28-01-2018	20	15.9	15.72
26-02-2019	0	17.77	19.36
26-02-2019	10	17.54	19.38
26-02-2019	20	17.19	17.29

Tabla A.7: Calibración a partir temperaturas en la estación la poza del lago Villarrica.

<b>Fecha</b>	<b>Profundidad de muestreo [m]</b>	<b>Temperatura observada [°C]</b>	<b>Temperatura modelada [°C]</b>
23-10-2018	0	11.36	11.84
23-10-2018	10	11.09	11.46
24-10-2018	20	10.43	10.86
28-01-2018	0	20.73	19.51
28-01-2018	10	18.63	19.49
28-01-2018	20	16.07	14.02
26-02-2019	0	19.12	19.48
26-02-2019	10	18.54	19.46
26-02-2019	20	17.26	18.09

# Anexo B

## Calibración del modelo de calidad de aguas

Tabla B.1: Calibración a partir de fósforo total y nitrógeno total en la estación litoral norte del lago Villarrica.

Fecha	Profundidad de muestreo [m]	Nitrógeno observado [mg/L]	Nitrógeno modelado [mg/L]	Fósforo observado [mg/L]	Fósforo modelado [mg/L]
24-10-2018	0	0.120	0.135	0.013	0.010
24-10-2018	10	0.130	0.135	0.017	0.010
24-10-2018	20	0.140	0.138	0.017	0.010
29-01-2019	0	-	0.085	0.014	0.004
29-01-2019	10	-	0.085	0.015	0.004
29-01-2019	20	-	0.094	0.017	0.005
27-02-2019	0	0.100	0.09	0.029	0.004
27-02-2019	10	0.100	0.09	0.030	0.004
27-02-2019	20	0.100	0.09	0.030	0.004

Tabla B.2: Calibración a partir de fósforo total y nitrógeno total en la estación litoral Pucón del lago Villarrica.

<b>Fecha</b>	<b>Profundidad de muestreo [m]</b>	<b>Nitrógeno observado [mg/L]</b>	<b>Nitrógeno modelado [mg/L]</b>	<b>Fósforo observado [mg/L]</b>	<b>Fósforo modelado [mg/L]</b>
23-10-2018	10	-	0.184	0.018	0.016
24-10-2018	20	-	0.181	0.016	0.016
24-10-2018	0	0.31	0.184	0.013	0.016
28-01-2019	0	0.1	0.09	0.013	0.005
28-01-2019	10	0.1	0.09	0.014	0.005
28-01-2019	20	0.1	0.120	0.013	0.009
27-02-2019	0	0.1	0.123	0.03	0.009
27-02-2019	10	0.1	0.124	0.03	0.009
27-02-2019	20	0.1	0.131	0.033	0.010

Tabla B.3: Calibración a partir de fósforo total y nitrógeno total en la estación litoral sur del lago Villarrica.

<b>Fecha</b>	<b>Profundidad de muestreo [m]</b>	<b>Nitrógeno observado [mg/L]</b>	<b>Nitrógeno modelado [mg/L]</b>	<b>Fósforo observado [mg/L]</b>	<b>Fósforo modelado [mg/L]</b>
24-10-2018	0	0.13	0.140	0.012	0.010
24-10-2018	10	0.15	0.141	0.011	0.010
24-10-2018	20	0.15	0.142	0.015	0.010
28-01-2019	0	0.1	0.085	0.009	0.004
28-01-2019	10	0.1	0.086	0.01	0.004
28-01-2019	20	0.1	0.103	0.012	0.006
27-02-2019	0	0.1	0.088	0.003	0.005
27-02-2019	10	0.1	0.088	0.003	0.005
27-02-2019	20	0.1	0.099	0.033	0.006

Tabla B.4: Calibración a partir de fósforo total y nitrógeno total en la estación litoral Villarrica del lago Villarrica.

<b>Fecha</b>	<b>Profundidad de muestreo [m]</b>	<b>Nitrógeno observado [mg/L]</b>	<b>Nitrógeno modelado [mg/L]</b>	<b>Fósforo observado [mg/L]</b>	<b>Fósforo modelado [mg/L]</b>
24-10-2018	0	0.11	0.136	0.01	0.010
24-10-2018	10	0.13	0.136	0.011	0.010
24-10-2018	20	0.12	0.137	0.01	0.010
28-01-2019	0	0.1	0.084	0.008	0.004
28-01-2019	10	0.1	0.084	0.011	0.004
28-01-2019	20	0.1	0.091	0.016	0.005
26-02-2019	0	0.1	0.086	0.004	0.004
26-02-2019	10	0.1	0.086	0.003	0.004
26-02-2019	20	0.1	0.092	0.003	0.005

Tabla B.5: Calibración a partir de fósforo total y nitrógeno total en la estación la poza del lago Villarrica.

<b>Fecha</b>	<b>Profundidad de muestreo [m]</b>	<b>Nitrógeno observado [mg/L]</b>	<b>Nitrógeno modelado [mg/L]</b>	<b>Fósforo observado [mg/L]</b>	<b>Fósforo modelado [mg/L]</b>
24-10-2018	0	0.11	0.156	0.01	0.013
24-10-2018	10	0.13	0.155	0.011	0.012
24-10-2018	20	0.12	0.153	0.01	0.012
28-01-2019	0	0.1	0.086	0.008	0.005
28-01-2019	10	0.1	0.087	0.011	0.005
28-01-2019	20	0.1	0.104	0.016	0.007
26-02-2019	0	0.1	0.087	0.004	0.005
26-02-2019	10	0.1	0.086	0.003	0.005
26-02-2019	20	0.1	0.091	0.003	0.005

Tabla B.6: Calibración a partir de fósforo total y nitrógeno total en la estación pelagial Villarrica del lago Villarrica.

Fecha	Profundidad de muestreo [m]	Nitrógeno observado [mg/L]	Nitrógeno modelado [mg/L]	Fósforo observado [mg/L]	Fósforo modelado [mg/L]
24-10-2018	0	0.12	0.136	0.012	0.010
24-10-2018	10	0.12	0.136	0.009	0.010
24-10-2018	30	0.15	0.140	0.013	0.010
24-10-2018	70	0.18	0.142	0.01	0.010
29-01-2019	0	-	0.085	0.011	0.004
29-01-2019	10	-	0.085	0.012	0.004
29-01-2019	30	-	0.106	0.014	0.006
29-01-2019	70	-	0.123	0.019	0.008
27-02-2019	0	0.1	0.086	0.003	0.004
27-02-2019	10	0.1	0.086	0.005	0.004
27-02-2019	30	0.1	0.104	0.004	0.006
27-02-2019	70	0.1	0.117	0.005	0.008

Tabla B.7: Calibración a partir de fósforo total y nitrógeno total en la estación centro del lago Villarrica.

Fecha	Profundidad de muestreo [m]	Nitrógeno observado [mg/L]	Nitrógeno modelado [mg/L]	Fósforo observado [mg/L]	Fósforo modelado [mg/L]
24-10-2018	0	0.12	0.137	0.011	0.010
24-10-2018	10	0.14	0.138	0.01	0.010
24-10-2018	30	0.17	0.143	0.011	0.010
24-10-2018	70	0.15	0.143	0.014	0.010
24-10-2018	100	0.19	0.143	0.016	0.010
29-01-2019	0	-	0.085	0.009	0.004
29-01-2019	10	-	0.085	0.008	0.004
29-01-2019	30	-	0.114	0.012	0.007
29-01-2019	70	-	0.136	0.013	0.010
29-01-2019	100		0.141	0.014	0.010
27-02-2019	0	0.1	0.086	0.031	0.004
27-02-2019	10	0.1	0.086	0.029	0.004
27-02-2019	30	0.1	0.109	0.03	0.007
27-02-2019	70	0.1	0.129	0.032	0.009
27-02-2019	100	0.1	0.136	0.036	0.010