



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

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LA
ESTRATIFICACIÓN Y MEZCLA EN LAGUNA CARÉN PARA
LAS ÚLTIMAS 5 DÉCADAS**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL

LUCAS ANDRE GODOY GARRIDO

PROFESOR GUÍA:
ALBERTO DE LA FUENTE STRANGER

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ANA LUCÍA PRIETO SANTA
YARKO NIÑO CAMPOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por Fondecyt Regular 1221191

SANTIAGO DE CHILE
2024

Resumen

El presente Trabajo de Título tiene por objetivo el estudiar el comportamiento termodinámico de la Laguna Carén, durante el periodo comprendido entre los años 1973 y 2023. Específicamente, se busca identificar un comportamiento que ha sido descrito en estudios recientes, el cual corresponde a ciclos de estratificación y mezcla a nivel intra-diario.

Para modelar el comportamiento hidrodinámico de la Laguna Carén, se desarrolla un modelo tridimensional utilizando el *software* AEM3D, que resuelve las ecuaciones RANS y de transporte de calor. Se enfoca en la temperatura como variable de estudio para comprender su distribución temporal y espacial y detectar los ciclos de estratificación-mezcla. Para conocer el flujo de calor, tanto en superficie como en sedimentos, se utilizarán las forzantes climáticas obtenidas del reanálisis atmosférico ERA 5 y condiciones del lecho de la laguna previamente calibrados en estudios realizados previamente.

Luego, se comparan los resultados del modelo con los datos recogidos en terreno, esto con el objetivo de validar el modelo realizado, y reconocer principalmente si las forzantes climáticas obtenidas a partir del reanálisis sirven o no para estudios similares a futuro.

Se alcanzaron los objetivos propuestos: se comprendió el comportamiento termodinámico de la laguna y las influencias climáticas en las últimas cinco décadas. Se identificaron patrones cíclicos en la estratificación durante las tardes y una tendencia a la mezcla nocturna, respaldando la hipótesis de ciclos, especialmente entre octubre y diciembre. El viento fue el principal agente de mezcla, y la radiación fue fundamental para la variación térmica. Además, se confirmó la utilidad de las variables climáticas obtenidas del reanálisis ERA 5 para estudios similares.

Para mi madre y mis abuelos.

Agradecimientos

Quisiera expresar mi profundo agradecimiento a todas las personas que contribuyeron de manera significativa a la realización de este trabajo. Su apoyo, orientación y aliento fueron fundamentales para alcanzar este logro académico.

En primer lugar, quiero agradecer a mi profesor guía, Alberto, por su dedicación, paciencia y valiosas sugerencias que guiaron este proyecto desde sus primeras etapas hasta su conclusión.

Quiero agradecer a mis amigos y amigas por los buenos momentos compartidos. A aquellos que están y a los que estuvieron.

Agradecer a cada chileno, por darme la oportunidad de estudiar de manera gratuita la carrera que siempre tanto quise.

Agradezco a mi novia por tolerar mi mal genio y, además, por estar siempre presente para escucharme, incluso cuando se tomaba el tiempo de prestar atención a mis explicaciones sobre los avances en mi trabajo.

Finalmente, agradecer a mi familia, por su paciencia y apoyo emocional, los cuales fueron importantísimos durante cada paso de este viaje académico.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Hipótesis de estudio	2
1.3. Objetivos	2
1.4. Organización del informe	4
2. Marco Teórico	5
2.1. Antecedentes Generales	5
2.2. Antecedentes de la Zona de Estudio	6
2.3. Marco Teórico	7
2.3.1. Temperatura de la laguna	7
2.3.2. Frecuencia de Boyantez	12
2.3.3. Indicadores	13
3. Metodología	16
3.1. Zona de Estudio	16
3.2. Variables de entrada al modelo AEM3D	18
3.2.1. Modelo de elevación digital	18

3.2.2.	Series de datos obtenidas de ERA5	20
3.2.3.	Escalamiento	22
3.3.	AEM3D	23
3.3.1.	Preprocesamiento	23
3.3.2.	Condiciones iniciales	24
3.3.3.	Condiciones de borde temporales	24
3.3.4.	Control de configuración	25
3.3.5.	Control de salida	26
3.4.	Ciclos de Estratificación y mezcla	27
3.5.	Validación del modelo	28
4.	Resultados	30
4.1.	Validación de forzantes climáticas recogidas de ERA 5	30
4.2.	Validación del modelo	32
4.3.	Forzantes climáticas	33
4.4.	Análisis Temporal	35
4.5.	Análisis espacial	47
5.	Conclusión	50
5.1.	Discusión de resultados	50
5.1.1.	Validación de las forzantes climáticas	50
5.1.2.	Validación del modelo	50
5.1.3.	Forzantes climáticas	51
5.1.4.	Análisis temporal	52

5.1.5. Análisis espacial	54
5.2. Comentarios finales	54
Bibliografía	56
Anexos	59

Índice de Tablas

3.1. Cotas que limitan el cuadrante que inscribe a la Laguna Carén	19
3.2. Valores del Coeficiente de difusión térmica de los sedimentos y de la Capacidad Calórica por unidad de volumen de los sedimentos	25
3.3. Valores de albedo y coeficiente de arrastre del viento	26
4.1. Gradiente de las forzantes climáticas durante los últimos 50 años.	34
4.2. Gradientes de las forzantes climáticas durante los últimos 50 años para el período comprendido entre octubre y diciembre .	39
4.3. Gradiente de la temperatura modelada de la laguna.	49

Índice de Ilustraciones

2.1. Fuente de calor superficial (H). Fuente: Castillo, 2017.	8
2.2. Fuente de calor en el fondo de la laguna. Fuente: Elaboración propia.	12
3.1. Vista sur Laguna Carén. Fuente: Román, 2017.	17
3.2. Cartografía de la Laguna Carén. Fuente: Elaboración propia. .	18
3.3. Modelo de elevación digital para Laguna Carén. Fuente: Elaboración propia.	20
3.4. Ubicación de las boyas y de la Estación Meteorológica. Fuente: Román, 2017.	29
4.1. Validación Intensidad de viento (m/s)	30
4.2. Validación Temperatura del aire (°C)	31
4.3. Validación Humedad relativa (-)	31
4.4. Validación del modelo	32
4.5. Promedio anual de las forzantes climáticas	33
4.6. 1973 a 1979.	35
4.7. 1980 a 1989.	36
4.8. 1990 a 2000.	36
4.9. 2000 a 2009.	37

4.10. 2010 a 2020.	37
4.11. Promedio de forzantes climáticas para los periodos octubre-diciembre de cada año.	39
4.12. Perfil de temperatura medido por boya sur.	40
4.13. Perfil de temperatura de la laguna modelado en punto de estudio.	40
4.14. Comparación frecuencia de boyantez obtenida de las mediciones respecto a frecuencia de boyantez obtenida de la modelación.	41
4.15. Porcentaje de tiempo que la laguna estratifica y porcentaje de tiempo que mezcla para cada año del periodo de estudio.	42
4.16. Comparación de tiempo que estratifica la laguna con respecto a temperaturas anómalas producto el fenómeno de El Niño.	43
4.17. Correlación temperaturas anómalas producto de ENSO y periodo anual de estratificación.	43
4.18. Frecuencia de boyantez, temperatura del aire e intensidad de vientos a escala horaria	44
4.19. Frecuencia de boyantez a escala horaria para periodo comprendido entre octubre y fines de diciembre	45
4.20. Frecuencia de boyantez a escala mensual	45
4.21. Calor sensible y calor latente durante noviembre de 1980	46
4.22. Perfil de temperatura noviembre de 1980	46
4.23. 1975 a 1995.	47
4.24. 2000 a 2020.	48
4.25. Temperatura promedio modelada de la laguna en función del tiempo	49
A.1. Caudal de entrada a la laguna período comprendido entre años 1973 y 2017.	59
A.2. Caudal de entrada a la laguna a partir del año 2017.	60

A.3. Profundidad de la laguna en el punto de estudio en función del tiempo para modelación realizada en AEM3D.	60
A.4. Ubicación de la región 1+2. Fuente: CIIFEN (https://www.ciifen.org/)	61

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

Los cuerpos de agua de poca profundidad (someros) corresponden a ecosistemas de gran relevancia a nivel global, ya que estos contribuyen sustancialmente al mundo de ciclos biogeoquímicos y constituyen importantes reservorios de biodiversidad (Lanza, 2007). En consideración a estos ecosistemas, es necesario reconocer la relación que existe entre el comportamiento hidrodinámico de los cuerpos de agua y las variables climáticas que afectan en los procesos.

El estudio de la temperatura del agua en cuerpos de agua someros es crucial debido a que estos lugares son idóneos para la creación de ecosistemas, y la temperatura es uno de los factores principales que afectan el desarrollo de la vida en estos entornos. Por lo tanto, al comprender cómo varía la temperatura en un cuerpo de agua somero, se puede obtener información valiosa sobre las condiciones ambientales en las que este se encuentra (Baladrón, 2011).

En el último tiempo se han realizado estudios en distintos cuerpos de agua someros, en estos se ha observado una alta variabilidad intra-diaria en procesos de estratificación y mezcla (Baladrón, 2011), lo cual podría generar una limitación en el suministro de oxígeno a distintos niveles de la laguna, generándose condiciones anóxicas en las zonas más profundas (Masunaga, *et al.* 2019). Lo anterior condiciona la subsistencia de organismos presentes en este tipo de ecosistemas, como lo son los productores primarios, los cuales corresponden a un elemento clave para determinar las condiciones de calidad

de agua en la laguna (Zunino, 2018).

1.2. Hipótesis de estudio

Se espera que el comportamiento termodinámico de la laguna esté fuertemente condicionado por las forzantes climáticas, en especial por la intensidad del viento, la radiación solar y la temperatura del aire.

En invierno se espera un comportamiento de mezcla continua, es decir, que el gradiente de temperaturas en función de la profundidad sea de baja magnitud y no varíe su valor considerablemente durante toda la estación, este comportamiento sería explicado principalmente por una baja temperatura del aire y por una gran cobertura de nubes durante esta época.

Sin embargo, acercándose al verano se espera una condición de estratificación, es decir que el valor del gradiente térmico en función de la profundidad aumente, producto principalmente de el aumento de temperatura en la superficie de la laguna, debido a la temperatura del aire y el efecto de la radiación durante el día. Aunque además, se esperan jornadas en las cuales, producto de una alta intensidad de viento, la laguna mezcle y el gradiente térmico reduzca su magnitud, creándose de esta forma ciclos de estratificación y mezcla, los cuales corresponden a una discontinuidad, ya sea de la condición de estratificación o mezcla presente en el cuerpo de agua. También se espera observar estos ciclos previamente mencionados, cuando exista una alta variabilidad intra-diaria en la temperatura del aire, por ejemplo, que en la noche la temperatura baje drásticamente, y de esta forma la temperatura en la superficie baje de forma tal que alcance valores similares a los que existen en la profundidad, obteniéndose así la condición de mezcla.

1.3. Objetivos

El objetivo principal corresponde a conocer la distribución temporal y espacial de la temperatura en la Laguna Carén durante los últimos 50 años mediante la creación de un modelo en el *software* AEM3D, usando como variables de entrada las forzantes climáticas obtenidas a partir del reanálisis atmosférico ERA 5.

Además, como objetivos secundarios se establecen los siguientes:

1. Conocer la variación de temperatura en la laguna para los últimos 50 años. Para ello se procesan las variables de salida del modelo y se obtiene la temperatura promedio de la laguna en cada instante de tiempo, luego a esto se le ajusta una regresión lineal y se obtiene la variación estimada de la temperatura en la laguna.
2. Comprender el comportamiento de las forzantes climáticas para los últimos 50 años, mediante el escalamiento de las series de datos obtenidas del reanálisis atmosférico ERA 5, con el uso de las series de datos medidas en terreno y el posterior ajuste de regresiones lineales de cada serie escalada.
3. Identificar la existencia de ciclos de estratificación y mezcla durante el año en la laguna. Se entenderá por ciclo de estratificación y mezcla, a una discontinuidad, ya sea de la condición de estratificación o mezcla que se presente en la laguna. Esto se logrará calculando la Frecuencia de boyantez (N), parámetro el cual al conocer su valor se sabrá si la laguna mezcla (N bajo) o estratifica (N alto).
4. Establecer una correlación entre las forzantes climáticas de Intensidad de viento y Temperatura del aire con los ciclos de estratificación y mezcla. Esto se logra comparando los valores de Longitud de Monin Obukhov (Parámetro que indica la influencia del viento en la termodinámica de la laguna), la variación de temperatura de aire (Se crea un parámetro que indica si la variación de temperatura es alta o baja) y el valor de N . Y mediante un análisis de gráficos se deduce cual es la condición atmosférica que más influye en los procesos de estratificación-mezcla.
5. Validar el modelo comparando los resultados con datos medidos en terreno. Esto se hace ponderando las temperaturas obtenidas a partir del modelo un punto de estudio y se comparan con la ponderación de las temperaturas medidas en terreno, las cuales corresponden a temperaturas medidas en termistores equi espaciados desde la superficie a la parte profunda del cuerpo de agua.

1.4. Organización del informe

- **Capítulo 1: Introducción:** Se presentan los hechos que motivan el estudio, además de la hipótesis de estudio y los objetivos que busca resolver el presente trabajo.
- **Capítulo 2: Revisión Bibliográfica:** En esta sección, se analizan y resumen las investigaciones previas relacionadas al tema de estudio. Además se presenta el marco teórico, en el cual se exponen las principales ecuaciones que se resuelven para la obtención de resultados.
- **Capítulo 3: Metodología:** Aquí se describe detalladamente la metodología utilizada para llevar a cabo el trabajo. Primero se presenta el método utilizado para la obtención de variables de entrada del modelo, luego se explica el modelo que se construyó para la obtención de resultados y finalmente se explica el método utilizado para la validación del modelo.
- **Capítulo 4: Resultados:** Se presentan los resultados del modelo, incluyendo gráficos, tablas y datos relevantes.
- **Capítulo 5: Conclusión:** Se explica si se logró o no cumplir con los objetivos, además, se realizan comentarios generales respecto a los resultados obtenidos.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Antecedentes Generales

Los lagos someros (o lagunas) ocupan una posición intermedia en el gradiente entre lo que se conoce por lagos profundos y humedales. El límite de altura aceptado comunmente para diferenciar entre lagos someros y profundos es de 3 metros, sin embargo, las condiciones tanto morfológicas como climatológicas pueden modificar dicho límite (Bécares *et al.*, 2004).

La estratificación térmica de un cuerpo de agua es un fenómeno en el cual el agua se divide en distintas capas con distintas temperaturas, y estas no logran mezclarse fácilmente, debido a sus diferencias de densidad producto del gradiente térmico. Dentro de este contexto, se tiene que los lagos se clasifican según regímenes de mezcla térmica, ya que la frecuencia de mezcla impulsa procesos ecosistémicos clave, incluida la disponibilidad de oxígeno bentónico, la re suspensión de sedimentos, el reciclaje de nutrientes y carbono, y la producción y emisiones de gases de efecto invernadero, entre otros (Holgerson *et al.* 2022).

En el año 1983, Lewis Jr. propuso incorporar a los cuerpos de agua poco profundos (lagos someros, entre ellos) en los regímenes de estratificación y mezcla, proponiendo cuatro categorías polimícticas (es decir, mezcladas varias veces al año) basadas en si los sistemas eran fríos (cubiertos de hielo en cualquier época del año) o cálidos (sin capa de hielo) y si la mezcla fue continua (diaria) o discontinua (no ocurrió todos los días). Lewis Jr. (1983) sugirió que el límite entre la mezcla continua y discontinua era de aproximadamente

20 m de profundidad para distancia recorrida por el viento de 25 km, y que este límite disminuía en profundidad a medida que la distancia recorrida por el viento disminuía. Este trabajo llevó a suponer que todos los cuerpos de agua lénticos poco profundos estaban bien mezclados (Holgerson *et al.* 2022)

Sin embargo, estudios recientes demuestran la existencia de cuerpos de agua someros en los cuales existe mezcla discontinua (existen periodos en que el cuerpo de agua estratifica), en especial durante el periodo de verano, en donde la laguna estratifica durante el día y mezcla nuevamente durante la noche (Holgerson *et al.* 2016).

2.2. Antecedentes de la Zona de Estudio

En la zona se cuenta con un estudio realizado para conocer el comportamiento hidrodinámico y de calidad del agua, a través de la instalación y operación de una estación de monitoreo ambiental (Román, 2017). Mediante este estudio se logró modelar la distribución de temperaturas en la laguna y se observó un marcado comportamiento a escala diaria, en el cual la laguna comienza estando en condición de mezcla durante la mañana, y luego al medio día aproximadamente, por la principal acción de la radiación y el gradiente térmico, esta estratifica. Los datos fueron tomados en tres campañas de medición, cada una de las cuales duró 1 mes aproximadamente y dieron inicio a mediados de noviembre de 2016 y finalizaron a mediados de marzo del 2017.

Además, se cuenta con la aplicación de un modelo tridimensional de la distribución de la temperatura para el año 2017, pero en este no se consideró el efecto del flujo de calor en los sedimentos (Sáez, 2024). Debido principalmente a lo anterior, el modelo no logró simular los ciclos de estratificación y mezcla en la laguna, de lo que se dedujo la importancia de considerarlo para la identificación de dichos ciclos. Además, no se consideraron flujos afluentes al cuerpo de agua, lo cual se tradujo en la pérdida de agua sostenida en la laguna debida a procesos evaporativos.

También se cuenta con la aplicación de un modelo unidimensional para conocer el comportamiento hidrodinámico en la Laguna Carén para un periodo de aproximadamente un mes, comprendido entre los días 18 de noviembre y 6 de diciembre de 2016 (Romero, 2018), en el cual sí se consideró el efecto del flujo de calor en los sedimentos. Lamentablemente, pese a los esfuerzos, el modelo no logró simular los ciclos de estratificación y mezcla de manera

efectiva, a lo que el autor propuso 3 posibles razones, en resumen, una de ellas mencionaba que el hecho de considerar un modelo unidimensional podía no ser preciso, y las otras dos hablaban respecto a fallas inherentes de la modelación.

2.3. Marco Teórico

2.3.1. Temperatura de la laguna

A continuación se presenta la ecuación de transporte de calor para un flujo en movimiento que resuelve el modelo elaborado en AEM3D (Romero, 2018). Esta ecuación unifica las ecuaciones de RANS, junto a las ecuaciones de transporte de calor, y con ella se logra determinar la distribución temporal y espacial de la temperatura en la laguna:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial z} (k_z A \frac{\partial T}{\partial z}) + \frac{H + H_g}{(\rho c_p)_w} \quad (2.1)$$

donde:

T: Temperatura del agua [°C]

z: Profundidad de la columna de agua [m]

t: Variable independiente temporal [s]

A: Área horizontal en función de la profundidad [m^2]

k_z : Coeficiente de difusión turbulenta y molecular de calor para el agua [m^2/s]

$(\rho c_p)_w$: Capacidad calórica por unidad de volumen del agua [$J/(m^3C^\circ)$]

H: Término fuente que representa fuente o sumidero de calor por unidad de volumen asociado a la radiación de onda corta que puede penetrar la superficie del agua [$J/(m^3s)$]

H_g : Término que representa fuente o sumidero de calor por unidad de volumen asociado al flujo de calor en los sedimentos [$J/(m^3s)$]

El primer término del lado derecho de la ecuación (2.1) está determinado principalmente por el área transversal de la laguna en distintas profundidades (A). Además, k_z responde a la viscosidad turbulenta del fluido, la cual está determinada por principalmente por la velocidad del flujo, la cual a su vez está principalmente determinada por la velocidad del viento en la superficie de la laguna. Para determinar k_z , AEM3D no modela la ecuación de difusión directamente, sino que usa un esquema eurístico, donde a partir de comparar energía disponible para mezclar dos celdas, y la necesaria para que se mezclen, define si se mezclan o no esas celdas (Hodges, *et al.*, 2000).

El segundo término del lado derecho de la ecuación (2.1) está sujeto a condiciones de borde presentes en la interfaz agua-atmósfera como en la interfaz agua-sedimentos. Estas condiciones se presentan en los siguientes acápite.

Interfaz agua-atmósfera

Primero se reconoce la fuente de calor superficial (H), la cual está determinada por un balance de calor radiativo, como se muestra en la Figura (2.1) y se resuelve mediante la ecuación (2.2).

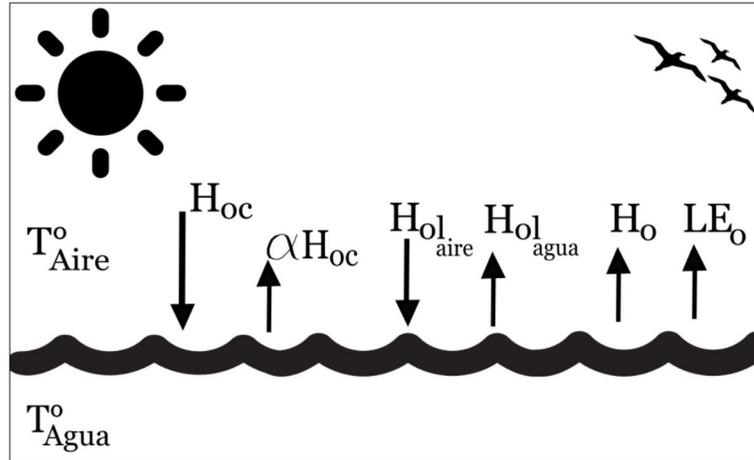


Figura 2.1: Fuente de calor superficial (H). Fuente: Castillo, 2017.

$$H = (1 - \alpha)H_{oc} + H_{ol_{aire}} - H_{ol_{agua}} - H_0 - LE_0 \quad (2.2)$$

donde:

α : Albedo de la laguna

H_{oc} : Radiación de onda corta incidente

$H_{ol_{aire}}$: Radiación de onda larga emitida desde el aire hacia el cuerpo de agua.
Esta se determina a través de la siguiente ecuación:

$$H_{ol_{aire}} = (0,7 + 5,95 \cdot 10^{-5} e_a^{\frac{1500}{T_{aire}}}) \sigma \varepsilon_{aire} T_{aire}^4 - 0,3 \sigma \varepsilon_{aire} C T_{aire}^4 \quad (2.3)$$

donde:

σ : Constante de Stefan-Boltzman [-]

T_{aire} : Temperatura del aire [°K]

C : Fracción del cielo cubierta [-]

ε_a : Emisividad del aire [-]

e_a : Presión parcial de vapor, la cual se puede obtener a partir de la siguiente relación:

$$e_a = \frac{HR \cdot e_{as}}{100} \quad (2.4)$$

donde:

HR : Humedad relativa obtenida desde el reanálisis atmosférico [-]

e_{as} : Presión parcial de vapor para el aire saturado [milibares]. Esta se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$e_{as} = 6,11 \exp \frac{17,27(T_{aire} - 273,25)}{T_{aire} - 35,95} \quad (2.5)$$

$H_{ol_{agua}}$: Radiación de onda larga emitida desde el cuerpo de agua hacia el aire. Esta se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$H_{ol_{agua}} = \sigma \varepsilon_{agua} T_{agua}^4 \quad (2.6)$$

donde:

ε_{agua} : Emisividad del agua [-] (valor adoptado de 0.97 (de la Fuente y Niño 2010))

T_{agua} : Temperatura del agua, variable a modelar, por lo cual se genera un sistema acoplado de ecuaciones.

H_0 : Calor sensible. Este se obtiene mediante la ley de Fick, cuya ecuación se presenta a continuación:

$$H_0 = -\left(\frac{100}{P}\right)^{0,285} (\rho c_p)_{aire} \kappa^2 I \frac{T_{agua} - T_{aire}}{\ln\left(\frac{z_{wind}}{z_0}\right) \ln\left(\frac{z}{z_{0e}}\right)} \quad (2.7)$$

donde:

P : Presión atmosférica [hPa]

$(\rho c_p)_{aire}$: Capacidad calórica del aire [J/(kg°C)]

κ : Constante de Von Karman [-], aproximadamente igual a 0.41

I : Intensidad de viento [m/s]

z_{wind} : Altura donde se mide el viento [m], para este caso se considera a 10 metros

z_0 : Rugosidad de la superficie donde se mide el esfuerzo de corte [m].
Para determinar z_0 se utiliza la siguiente fórmula (Charnock, 1950)

z_{0e} : Rugosidad de la superficie donde se mide el esfuerzo de corte [m].

z_{0e} puede ser considerado como una fracción de z_0 (Garrat, 1994):

$$z_{0e} = \frac{z_0}{7,389} \quad (2.8)$$

LE_0 : Calor latente. Este puede calcularse mediante la siguiente ecuación:

$$LE_0 = EL_w \rho_{aire} \quad (2.9)$$

donde:

E : Tasa de evaporación. Esta se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$E = -0,622 \frac{\rho_{aire}}{P} \kappa^2 I \frac{(e(z) - e_0)}{\ln\left(\frac{z_{wind}}{z_0}\right) \ln\left(\frac{z}{z_{0e}}\right)} \quad (2.10)$$

donde:

ρ_{aire} : Densidad promedio del aire [$\frac{kg}{m^3}$].

κ : Constante de Von Karman [-].

P : Presión atmosférica [Pa].

$e(z)$: Presión de vapor medida en z [hPa].

e_0 : Presión de vapor medida en $z = z_0e$ [hPa]. La presión de vapor se define como una función de la humedad relativa del aire y la presión de vapor de saturación:

$$e(z) = \frac{HR}{100} e_s(T_{aire}) \quad (2.30)$$

$$e_s(T) = 6,11 \exp\left(\frac{17,625 \cdot T_{aire}}{T_{aire} + 243,04}\right) \quad (2.31)$$

donde:

$e(z)$: Presión de vapor medida en z [hPa].

HR : Humedad relativa del aire [%].

$e_s(T_{aire})$: Presión de vapor de saturación [hPa] calculada con la temperatura del aire.

Para e_0 , se toma en $z = z_0e$ con una humedad relativa de 100 %, lo que resulta en que la presión de vapor es igual a $e_0 = e_s(T_{agua})$.

L_w : Calor latente del agua [J/kg]. Se asume igual a 2.26.

ρ_{aire} : Densidad promedio del aire [kg/m^3]. Igual a 1.3.

Interfaz agua-sedimentos

Luego, se reconoce la fuente de calor en las profundidades (H_g), como se muestra en la Figura (2.2) , la cual corresponde a los sedimentos. La ecuación que determina el flujo de calor desde o hacia ellos corresponde a la ecuación (2.11).

$$H_g = -k_s(\rho c_p)_s \left. \frac{\delta T_s}{\delta z} \right|_{z=0} \quad (2.11)$$

donde:

T_s : Temperatura de los sedimentos [$^{\circ}\text{C}$]

k_s : Coeficiente de difusión para los sedimentos [m^2/s]

$(\rho c_p)_s$: Capacidad calórica por unidad de volumen de los sedimentos [$\text{J}/(\text{m}^3\text{C}^{\circ})$]

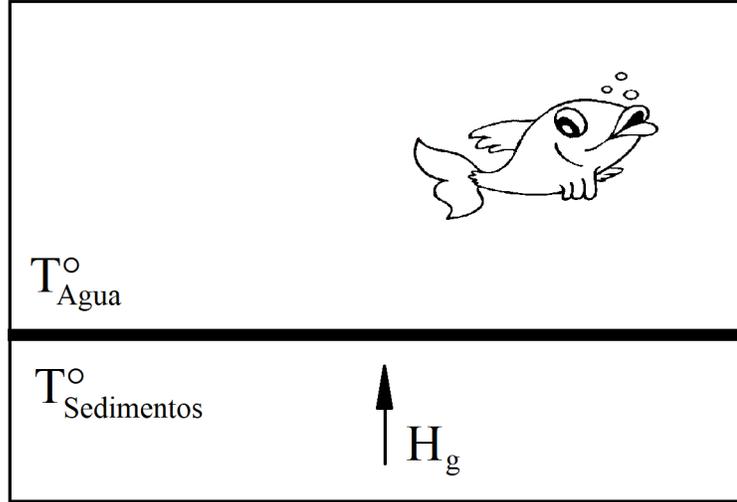


Figura 2.2: Fuente de calor en el fondo de la laguna. Fuente: Elaboración propia.

Para la resolución de la ecuación (2.11), se establecieron las siguientes condiciones de borde (Sáez, 2024), considerando el origen del sistema de coordenadas en la interfaz agua-sedimentos:

$$T_s(z = 0) = T_w \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial T_s}{\partial z}(z = 10m) = 0 \quad (2.13)$$

donde:

T_s : Temperatura de los sedimentos [$^{\circ}\text{C}$]

T_w : Temperatura del agua [$^{\circ}\text{C}$]

Tanto la ecuación (2.11), como las condiciones de borde (2.12) y (2.13), fueron añadidas a los modelos que resuelve AEM3D, a través de la modificación de su código (Sáez, 2024).

2.3.2. Frecuencia de Boyantez

La frecuencia de boyantez, también conocida como frecuencia de Brunt-Väisälä o simplemente frecuencia de Brunt, es un concepto importante en el estudio hidrodinámico de la estratificación en cuerpos de agua como océanos,

lagos y otros sistemas acuáticos. Esta frecuencia se utiliza para comprender cómo se distribuye la densidad en un fluido en función de la profundidad y cómo esto afecta el comportamiento de las corrientes y la estratificación térmica.

La estratificación se refiere a la separación vertical de capas de agua con diferentes propiedades físicas, como la densidad y la temperatura. La frecuencia de boyantez (N) se relaciona con esta estratificación y se define matemáticamente de la siguiente manera (Romero, 2018):

$$N = \sqrt{\beta g \frac{dT_w}{dz}} \quad (2.14)$$

donde:

β : Coeficiente de expansión térmica [$1/^\circ\text{C}$] (Se usa un valor de $2,2 \cdot 10^{-4}$)

g : Aceleración de gravedad [m/s^2] (9.81)

En el presente estudio, se determina un valor único y representativo para la frecuencia de boyantez en la columna de agua para cada intervalo de tiempo (N_m). Este valor se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$N_m = \sqrt{\beta g \frac{T_{wH} - T_{w0}}{H}} \quad (2.15)$$

donde:

T_{wH} : Temperatura en el punto más profundo de la laguna [$^\circ\text{C}$]

T_{w0} : Temperatura en la superficie de la laguna [$^\circ\text{C}$]

H : Profundidad de la laguna [m]

2.3.3. Indicadores

A continuación se presenta la construcción de distintos indicadores los cuales permiten cuantificar el efecto de las forzantes climáticas sobre el comportamiento hidrodinámico de la laguna.

Un indicador que cuantifica el efecto del viento en el balance radiativo sobre la laguna, es la longitud de Monin-Obukhov (Imberger, 1985), que representa la distancia donde la energía entregada por el viento iguala a la inyectada por los efectos boyantes o de diferencia de energía potencial. El lugar geométrico formado por estas profundidades muestra el área influenciada por el viento.

La longitud de Monin-Obukhov (l) se calcula como:

$$l = \frac{u^{*3}}{B} \quad (2.16)$$

donde:

u^* : Velocidad de corte en la superficie (m/s). Para el cálculo de la velocidad de corte sabemos que la velocidad del viento sigue una distribución logarítmica con respecto a la altura, la cual está determinada por la siguiente ecuación

$$\frac{u}{u^*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (2.17)$$

donde:

κ : Constante de Von Karmann [-].

u : Velocidad de viento [m/s].

z_0 : Rugosidad de la superficie. Esta se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$z_0 = e^{-\kappa/\sqrt{C_{D10}}} \quad (2.18)$$

donde:

C_{D10} : Coeficiente de arrastre del viento medido a 10 metros de la superficie.

B : Flujo boyante [m^2/s^3]. Este se calcula como:

$$B = \frac{g\alpha_{ec}H^*\rho_1}{c_p} \quad (2.19)$$

donde:

α_{ec} : Coeficiente de expansión del agua [$1/^\circ\text{C}$].

H^* : Flujo neto de energía W/m^2 .

c_p : Calor específico del agua [$J/(kg^\circ\text{C})$].

ρ_1 : Densidad del primer estrato de agua [kg/m^3].

Con el objetivo de cuantificar el efecto de la variación de la temperatura en los procesos de estratificación y mezcla, se considera como indicador la exponencial de la variación térmica del aire con respecto al tiempo ($\phi(T)$). Al tenerse en cuenta que los resultados que entrega la modelación de temperatura de vientos son cada 6 horas, se construye el indicador de la siguiente forma:

$$\phi(T) = e^{|dT/dt|} \quad (2.20)$$

donde dT/dt corresponde a la variación de la temperatura con respecto al tiempo [$^\circ\text{C}/\text{hr}$], y se obtiene de la siguiente forma:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{T_n - T_{n-1}}{t_n - t_{n-1}} = \frac{T_n - T_{n-1}}{6[\text{hr}]} \quad (2.21)$$

donde T_n corresponde al n -ésimo dato de temperatura del aire [$^\circ\text{C}$] utilizado en la modelación.

Capítulo 3

Metodología

3.1. Zona de Estudio

La zona de estudio corresponde a la Laguna Carén (ver Figura (3.2)), ubicada en la Región Metropolitana, Chile, específicamente en la comuna de Pudahuel. Para llegar a la laguna desde la comuna de Santiago se debe tomar la avenida Libertador Bernardo O'Higgins con dirección hacia el poniente, luego tomar la Ruta 68 con dirección a Valparaíso y finalmente, luego de 10 a 15 km (11 minutos sin tráfico, aproximadamente) recorridos en la ruta 68, se debe tomar la salida Laguna Carén/Pudahuel.

El clima en la zona de estudio se define como templado mediterráneo semiárido, con una media anual de temperaturas de 14°C, y una media de precipitaciones anuales de 356.2 mm, caracterizado además por una estación seca y de radiación alta durante el verano, y otra, con precipitaciones y nubosidad durante el invierno (Alvarado *et al.*, 2018).



Figura 3.1: Vista sur Laguna Carén. Fuente: Román, 2017.

El nivel del pelo de agua de la laguna es de 470 [msnm], y su georreferenciación en el plano corresponde a un plano cartesiano cuyo origen se encuentra ubicado en el vértice más hacia el noroeste de la laguna, cuyas coordenadas en grados sexagesimales son -33.41°N , -70.85°S . En la Figura (3.2) se presenta una cartografía de la zona de estudio georreferenciada mediante el uso de coordenadas UTM.

Dentro del modelo que se realiza, se escoge un punto en particular de la laguna para la obtención de un perfil representativo del comportamiento de la temperatura de la laguna en función de la profundidad. Este se ubica aproximadamente a unos 1200 metros hacia el sur del origen del sistema de coordenadas, y 1650 hacia el este de este. La profundidad aproximada de la laguna en este punto en particular es de 2.1 metros. La ubicación de dicho punto queda definida en la Figura (3.2).

La laguna tiene un afluente hacia la zona norponiente, el cual corresponde al Estero Carén, y un efluente ubicado hacia el oriente de la laguna, el Estero Lampa. La ubicación de ambos esteros se presenta en la Figura (3.2).

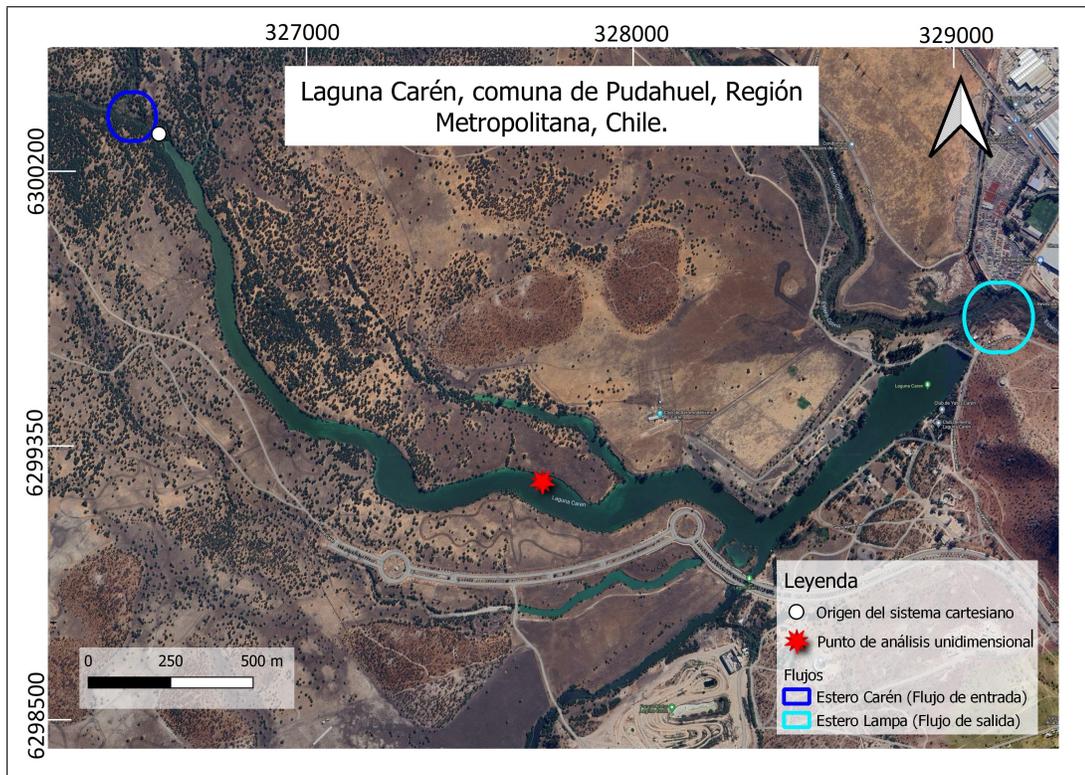


Figura 3.2: Cartografía de la Laguna Carén. Fuente: Elaboración propia.

3.2. Variables de entrada al modelo AEM3D

3.2.1. Modelo de elevación digital

Se necesita conocer la morfología de laguna, para obtener variables de entrada al modelo, como lo es el área en función de la profundidad y el tiempo ($A(z, t)$). Es por ello que se crea un modelo de elevación digital de la laguna.

Para lo anterior, se cuenta con una batimetría realizada el año 2017 mediante el uso de una sonda de escaneo modelo *echoMAP 42dv* de la marca *GARMIN*, la cual funciona mediante la reflexión de ondas en el fondo del cuerpo de agua (Sáez, 2022).

Luego, se genera una grilla, la cual tiene un tamaño de 78 celdas de ancho por 105 celdas de largo y cada una de las celdas tiene un tamaño igual a 25×25 metros. Esta grilla se encuentra georreferenciada de forma tal que la latitud crece hacia arriba y la longitud hacia la derecha de ella. Sus límites longitudinales y latitudinales se presentan en la Tabla (3.1).

Tabla 3.1: Cotas que limitan el cuadrante que inscribe a la Laguna Carén

Coordenada límite	UTM	Grados sexagesimales
Norte	6300323	-33° 25' 22.24"
Sur	6298448	-33° 26' 21.59"
Este	329011	-70° 50' 20.78"
Oeste	326411	-70° 52' 2.71"

Después, los datos de profundidad medidos en cada punto son asociados al centroide de la celda más cercana, y con esto se procede a hacer uso del Método de Interpolación por el Inverso de la Distancia (IDW por sus iniciales en inglés, *Inverse Distance Weighting*) para conocer el valor de la profundidad de la laguna en las celdas restantes.

$$Z(u) = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{d_i^p}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^p}} \quad (3.1)$$

donde:

$Z(u)$: Variable profundidad en una celda u de la grilla

n : Número de puntos conocidos en la vecindad de u utilizados en la interpolación.

Z_i : Variable profundidad conocida en la celda i de la grilla

d_i : Distancia entre el centroide de la celda i y el centroide de la celda u

p : Parámetro de potencia que controla la influencia de la distancia en la interpolación. En este caso se usa un valor de $p = 2$

En la Figura (3.3) se muestra una representación visual del modelo de elevación digital generado, en el cual se observa que la profundidad de la laguna es menor hacia su lado oeste, y mayor hacia el este, alcanzando valores máximos de 3 metros aproximadamente.

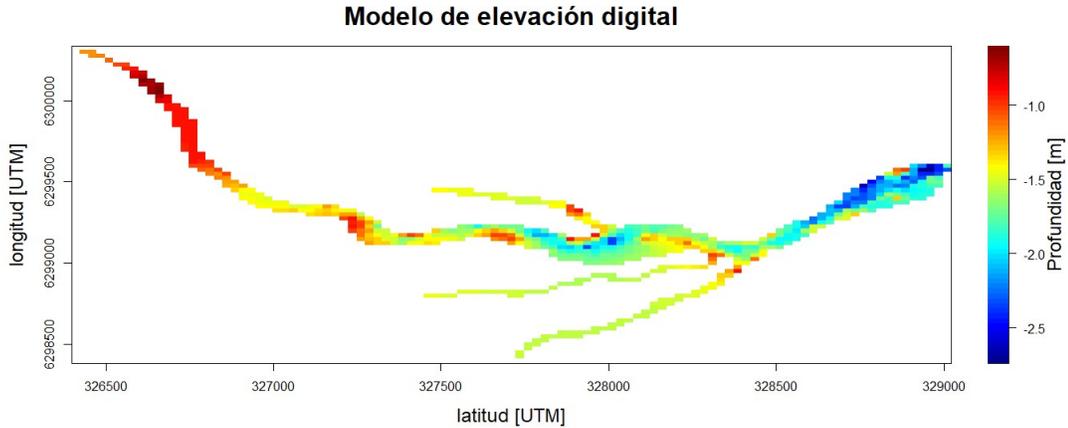


Figura 3.3: Modelo de elevación digital para Laguna Carén. Fuente: Elaboración propia.

3.2.2. Series de datos obtenidas de ERA5

Para lograr realizar el estudio, primero es necesario identificar qué variables afectan en el comportamiento hidrodinámico de la laguna. Para lograr lo anterior, se debe reconocer primero que los procesos de mezcla y los intercambios de calor se producen principalmente en dos interfaces: La interfaz laguna-atmósfera y la interfaz laguna-sedimentos.

En cuanto a la interfaz laguna-atmósfera, es en donde ocurren los procesos de intercambio radiativo más importantes, junto a los procesos de mezcla vertical, inducidos principalmente por el viento y cambios de temperatura atmosférica (Masunaga *et al.*, 2019).

Luego, tenemos la interfaz laguna-sedimentos, en donde se genera un intercambio de calor de tal forma que amortigua los cambios de temperatura en el cuerpo de agua. Ya que cuando baja (aumenta) la temperatura de la columna de agua, los sedimentos se encargan de liberar (retener) energía, aumentando (disminuyendo) así su temperatura (de la Fuente *et al.*, 2019).

Gracias a lo anterior, se reconocen los principales factores que participan en los procesos termodinámicos del cuerpo de agua, los cuales corresponden a: 1) Condiciones atmosféricas a nivel superficial: como lo son la magnitud y dirección del viento, la humedad relativa, temperatura atmosférica, entre otras. 2) Las propiedades de los sedimentos: como lo son la conductividad térmica y el calor específico.

Las series de datos serán obtenidas a partir del reanálisis global de datos

atmosféricos ERA5, el cual incorpora un registro detallado de la atmósfera a nivel global. Este reanálisis presenta una resolución horizontal de 31 km, además de una toma de datos para cada hora (Hersbach *et al.*, 2020), lo cual la hace una avanzada base de datos para la realización de estudios climatológicos. En este caso en particular, se utilizará como fuente de datos atmosféricos para la zona de estudio.

Las variables climáticas recogidas desde el reanálisis atmosférico corresponden a series de datos horarias desde las 00:00 hrs del día 1 de enero de 1973 hasta las 00:00 hrs del día 1 de enero de 2023 de las siguientes variables atmosféricas: 1) Velocidad de viento meridional [m/s], 2) Velocidad del viento zonal [m/s], 3) Temperatura del aire [°K], 4) Temperatura de punto de rocío [°K], 5) Presión atmosférica relativa [atm], 6) Radiación solar [W/m²] y 7) Fracción de cielo cubierta [-].

Las series de datos tuvieron que ser posteriormente transformadas a distinto formato o unidad de medida. En el caso de las componentes de viento meridional y zonal, fueron convertidas a Intensidad de viento (I en m/s) y Dirección de viento (D en grados sexagesimales) a través de las ecuaciones (3.2) y (3.3), las cuales se presentan a continuación:

$$I = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (3.2)$$

donde:

u: Velocidad de viento zonal [m/s]

v: Velocidad de viento meridional [m/s]

$$D = \arctan \frac{u}{v} \quad (3.3)$$

Para el caso de la temperatura del aire, esta tuvo que ser corregida a grados Celcius [°C], para lo anterior bastó restarle 273 a toda la serie. Para el caso de la radiación, ésta tuvo que ser transformada a [J/m²], por lo que cada dato de radiación solar tuvo que ser dividido por el paso temporal en segundos, es decir, 3600 segundos (1 hora). Además, se obtuvo la Humedad Relativa (HR) a partir de la siguiente relación:

$$T_d = \frac{b \left(\frac{aT}{b+T} + \ln HR \right)}{a - \left(\frac{aT}{b+T} + \ln HR \right)} \quad (3.4)$$

donde:

T_d : Temperatura del punto de rocío [°C]

a: Igual a 17.27 [°C]

b: Igual a 237.7 [°C]

T: Temperatura del aire [°C]

3.2.3. Escalamiento

Se ajustaron coeficientes para escalar los datos obtenidos a partir del reanálisis atmosférico ERA 5, para ello se utilizaron las mediciones in situ proporcionadas por Sáez (2022) con el fin de reflejar las condiciones climáticas locales.

En primer lugar, se escaló la serie de datos de intensidad de viento multiplicándola por un factor de 1.61, el cual fue determinado a partir de la correlación observada entre los datos medidos y los obtenidos del reanálisis, como se ilustra en la Figura (4.1).

A continuación, se escaló la serie de datos de temperaturas del aire multiplicándola por un factor de 0.91, el cual fue deducido de la correlación entre los datos medidos y los obtenidos del reanálisis, como se muestra en la Figura (4.2).

Finalmente, los valores de humedad relativa fueron ajustados multiplicando la serie por un factor de 0.97, determinado a partir de la correlación entre los datos medidos y los obtenidos del reanálisis, según se representa en la Figura (4.3).

3.3. AEM3D

Se generó un modelo tridimensional la distribución espacial y temporal de la temperatura de la laguna, desde el 1 de enero 1973 hasta el 31 de diciembre de 2022 haciendo uso del método de simulación numérica que resuelve el *software* AEM3D.

Dicho método, resuelve las ecuaciones viscosas e inestables de RANS para flujos incompresibles utilizando el supuesto hidrostático para la presión, es decir, la presión es la misma en todas las direcciones en una profundidad dada. Los procesos que permite simular este *software* incluyen respuestas baroclínicas y barotrópicas, efectos rotacionales, forzamiento de las mareas, tensiones del viento, forzamiento térmico de la superficie, flujos de entrada, flujos de salida y transporte de sal, calor y escalares pasivos, entre otros (Hodges *et al.*, 2016).

Los módulos que AEM3D resuelve en el caso de este modelo en particular, corresponden a Estratificación Térmica, Termodinámica en Superficie, Viento y Flujos de entrada y Salida. Adicionalmente, se resuelve la condición de transporte de flujo en los sedimentos, mediante un modulo agregado posteriormente (Sáez, 2022).

AEM3D es una línea de comando ejecutable, la cual se comunica con el usuario mediante archivos, donde la creación de estos está a cargo del usuario. A continuación se presentan los archivos que el usuario debe crear, los cuales son en total 9 y se clasifican en: 1) Preprocesamiento, 2) Condiciones iniciales, 3) Condiciones de borde temporales, 4) Control de salida.

3.3.1. Preprocesamiento

- Archivo que contiene la información asociada al modelo de elevación digital creado para la laguna. En este, además de considerar la grilla creada, la cual tiene una discretización de 25 por 25 metros en el plano (dx, dy), se indica la discretización en la vertical igual a 10 centímetros (dz).
- Archivo en el que se especifica la localización de las entradas o salidas de flujos desde o hacia la laguna. En este caso, se ha considerado únicamente la entrada de un flujo en la celda 30,15 del modelo digital desarrollado. Se designa como punto de entrada de flujo debido a que

coincide con el punto de entrada del estero Carén, y se establece un caudal de ingreso teórico para contrarrestar la pérdida de agua en la laguna producto de la evaporación.

3.3.2. Condiciones iniciales

- Archivo en donde se establece como condición inicial la temperatura y la salinidad en la columna de agua ubicada en la celda 43,66 del modelo de elevación para el día 1 de enero de 1973 a las 00:00 hrs. En el caso de la temperatura, se indicó que esta fuera igual a 20°C en superficie, con una variación de -1°C cada 50 centímetros hacia la profundidad. En el caso de la salinidad, se consideró uniforme en toda la columna de agua e igual a 0 ppt. Aunque esta condición inicial está definida en un único punto, su validez se extiende a todo el dominio. Fue concebida teniendo en cuenta las necesidades específicas del modelo y se implementó como una solución provisional para asegurar la operación del este.

3.3.3. Condiciones de borde temporales

- Archivo que contiene la información de las forzantes climáticas obtenidas desde ERA5 y posteriormente escaladas.
- Archivo que contiene la información de las series de caudales de entrada a la laguna en función del tiempo. El flujo de entrada se consideró igual al flujo evaporativo y para estimar el flujo evaporativo se hizo correr el modelo sin flujo de entrada, con lo cual se estableció una correlación entre el flujo evaporativo y la radiación solar. Dicha correlación se presenta en la ecuación (3.5).

$$Q_E \approx RS \cdot 6,53 \cdot 10^{-5} \quad (3.5)$$

donde:

Q_E : Caudal evaporado, el cual se consideró igual al caudal de entrada [m^3/s].

RS: Radiación solar [W/m^2]

Pese al intento de mantener el nivel de la columna de agua constante, esto no fue posible, y en el año 1997 el modelo dejó de iterar debido a

una cota de superficie muy baja. Por lo que en este año se reinicia el modelo, restableciendo la condición inicial, considerando nuevamente una profundidad de 2.1 metros en el lugar e interpolando la distribución de temperaturas obtenidas en el último paso temporal del modelo previo. El modelo volvió a caer el año 2015, y se realizó un proceso análogo al descrito previamente para completar la modelación, aunque para esta ocasión, se amplificó el caudal de entrada por un factor de 1.15.

El caudal entrante a la laguna previo al 2017, el caudal entrante posterior a este año y la profundidad de la laguna en el punto de estudio en función del tiempo son graficadas en las Figuras (A.1), (A.2) y (A.3) de anexos, respectivamente.

- Archivo que contiene las propiedades del flujo de entrada. Se consideran condiciones de Temperatura, PH y Salinidad uniformes, iguales a 20°C, 7 y 0 ppt, respectivamente.
- Archivo que contiene las propiedades de los sedimentos. Se consideraron valores constantes para el coeficiente de difusión térmica de los sedimentos (k_s) y la capacidad calórica por unidad de volumen ($(\rho c_p)_s$) de estos. En la Tabla (3.2) se especifican sus valores. Estos valores se obtuvieron mediante un módulo añadido al modelo AEM3D, en el cual se calibraron y determinaron previamente valores constantes, tanto para $(\rho c_p)_s$, como para k_s (Sáez, 2022). Estos valores se presentan en la Tabla (3.2).

Tabla 3.2: Valores del Coeficiente de difusión térmica de los sedimentos y de la Capacidad Calórica por unidad de volumen de los sedimentos

Parámetro	Valor calibrado
k_s [m/s^2]	$1,9097 \cdot 10^{-6}$
$(\rho c_p)_s$ [$J/(m^3C^\circ)$]	$5,7 \cdot 10^6$

3.3.4. Control de configuración

- En este archivo se indica el directorio de los demás archivos, y de esta forma la línea de comando puede encontrarlos y trabajar con ellos. Además, en este archivo se indican los módulos que simula el modelo, los cuales corresponden a: 1) Termodinámica en superficie. 2) Termodinámica en sedimentos. 3) Flujos de entrada y salida. 4) Transporte de temperatura y salinidad. También en este archivo se indican los valores de parámetros asociados a los módulos previamente mencionados,

como lo es el valor del albedo (α), el cual adopta un valor de 0.08, considerando un sistema oligotrófico, es decir, un bajo contenido de nutrientes (Baladrón, 2011). Además se indica el valor del coeficiente de arrastre del viento (C_d) igual a 0.001 (Romero, 2018). Los valores de los coeficientes previos se presentan en la Tabla (3.3).

Tabla 3.3: Valores de albedo y coeficiente de arrastre del viento

Parámetro	Valor calibrado
α [-]	0,08
C_d [-]	0,001

3.3.5. Control de salida

- Archivo en el cual se indican los parámetros para la obtención de los archivos de salida del modelo. Estos contienen lo que se indica a continuación:
 1. *profile.nc*: En este archivo se presenta un perfil unidimensional, el cual está en función de la profundidad, ubicado en la celda 43,66 del modelo de elevación digital previamente creado. En este se recogen series de datos cada 6 horas (series de datos para las 0, 6, 12 y 18 horas de cada día) durante 50 años a partir del año 1973 (dt). Las variables medidas fueron: humedad relativa, intensidad de viento, radiación solar incidente, flujo de calor sensible, flujo de calor latente y flujo de calor de onda corta.
 2. *sheet_bot.nc*: En este archivo se presenta un perfil bidimensional en la parte profunda de la laguna. En este se recogen series de datos para la misma discretización temporal utilizada en *profile.nc*. La variable que se midió corresponde a la temperatura del agua en cada una de las celdas más profundas de la laguna.
 3. *sheet_top.nc*: En este archivo se presenta un perfil bidimensional en la superficie de la laguna. En este se recogen series de datos para la misma discretización temporal utilizada en *profile.nc*. La variable que se midió corresponde a la temperatura del agua en cada una de las celdas más superficiales de la laguna.
 4. *sheet_avg.nc*: En este archivo se presenta un perfil bidimensional en la parte intermedia de la laguna. En este se recogen series de

datos para la misma discretización temporal utilizada en profile.nc. La variable que se midió corresponde a la temperatura del agua en cada una de las celdas de la parte media de la laguna.

3.4. Ciclos de Estratificación y mezcla

Un ciclo de estratificación y mezcla (en adelante los ciclos) corresponde a una discontinuidad en la condición, ya sea de mezcla o de estratificación presente en un cuerpo de agua. Para cuantificar estos ciclos, se establece un valor umbral para la frecuencia de boyantez, cuando esta es menor a dicho valor, se tiene una condición de mezcla, y lo contrario ocurre cuando esta es mayor a dicho umbral (estratifica). Sin embargo, no existe un criterio de cuan bajo o cuan alto debe ser este valor para establecer si existe condición de mezcla o de estratificación, es por ello que se recurre a un análisis de interpretación visual de los gráficos y se ajusta un valor medio para dicho umbral.

Para conocer la relación que existe entre los ciclos y las forzantes climáticas se analiza no solo el comportamiento de las forzantes como tal, si no además el del flujo de calor en superficie. Este flujo proporciona información clave respecto al comportamiento de las forzantes climáticas sobre la termodinámica de la laguna:

Calor Sensible:

- El flujo de calor sensible está relacionado con la transferencia de energía térmica entre el agua y el aire debido a diferencias de temperatura. Un flujo de calor sensible positivo significa que la superficie del agua se está calentando, mientras que uno negativo indica enfriamiento.

Calor Latente:

- El flujo de calor latente está relacionado con la evaporación y la condensación en la superficie del agua. Un flujo de calor latente positivo indica evaporación, lo que puede enfriar la superficie del agua, y uno negativo implica condensación, lo que la calienta.

- Un viento fuerte y aire seco tienden a aumentar la evaporación y, por lo tanto, el enfriamiento del agua. Mientras que un viento débil y una humedad relativa mayor, debiera disminuir la tasa de evaporación.

Radiación de Onda Corta:

- La radiación de onda corta, principalmente la radiación solar incidente, se consideró como una fuente significativa de calor para la superficie del agua. Un flujo de radiación de onda corta positivo indicó un aporte de calor, mientras que uno negativo señaló una pérdida de energía hacia el espacio, lo que resultaba en enfriamiento.
- Estos datos subrayaron la importancia de la radiación solar en el calentamiento del agua, especialmente en condiciones soleadas.

A partir de la hipótesis de estudio, se espera que la existencia de ciclos ocurra en días cuando exista una alta variación en la intensidad de vientos, o bien, en días cuando la variación térmica intra diaria del aire sea alta.

3.5. Validación del modelo

Con el objetivo de saber si las forzantes climáticas obtenidas a partir del reanálisis atmosférico ERA5 son válidas como variables de entrada al modelo, estas se comparan con las mediciones realizadas en terreno. Las variables a comparar corresponden a Humedad relativa, Intensidad del aire y Temperatura del aire. El periodo de comparación se encuentra acotado por los datos recogidos en terreno, entre el día 1 de enero del 2017 al 20 de enero del 2020.

Los datos recogidos en terreno fueron medidos gracias a la instalación de una estación meteorológica al sur oeste de la zona de estudio (Román, 2017), la cual se representa por una cruz de flechas en la Figura (3.4).

Luego, con el objetivo de validar los resultados del modelo, se procede a comparar la temperatura promedio diaria modelada con la medida en terreno.

Para la medición de la temperatura en la laguna se hizo instalación de sensores térmicos en dos puntos de la laguna (Román, 2017). En cada uno de ellos se hizo instalación de 9 sensores térmicos, donde el más cercano a la



Figura 3.4: Ubicación de las boyas y de la Estación Meteorológica. Fuente: Román, 2017.

superficie se encuentra a 10 cm de profundidad, y los siguientes se ubicaron equi-espaciados cada 30 cm hacia la parte profunda (dz de las mediciones). Estos puntos se pueden identificar en terreno mediante la instalación de dos boyas, las cuales se muestran en la Figura (3.4) representadas por dos burbujas blancas, siendo la de la izquierda la boya sur y la de la derecha la boya norte.

Después, utilizando un criterio de proximidad, se comparan los datos medidos por la Boya sur y la distribución de temperaturas modelada en el punto de estudio establecido en la Figura (3.2).

Se observa que el punto de estudio y el punto en donde se ubica la boya difieren en profundidad, además, la discretización de la profundidad del modelo (10 cm) difiere al distanciamiento en el posicionamiento de las estaciones de medición (30 cm). Por lo que para que los datos sean comparables, se compara el promedio de la temperatura en la columna de agua modelada versus la medida en donde se encuentra la boya sur.

El intervalo de comparación entre los valores de temperatura de la laguna medidos y simulados se encuentra acotado entre el día 18 de noviembre de 2016 y 20 de enero de 2020.

Capítulo 4

Resultados

4.1. Validación de forzantes climáticas recogidas de ERA 5

Con el objetivo de validar las forzantes climáticas utilizadas en la modelación (ERA 5), estas se comparan con las mediciones obtenidas por las estación meteorológica instalada en las cercanías de la laguna (Medido).

Primero, en la Figura (4.1) se validan los valores de intensidad de viento (I) utilizados en la modelación.

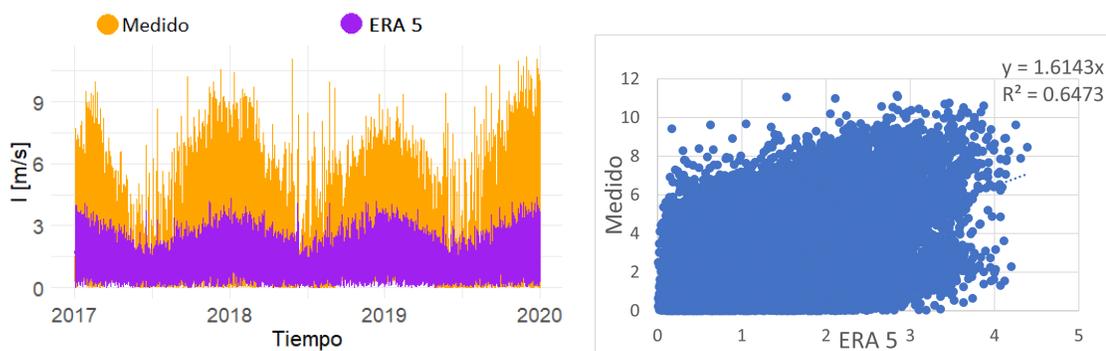


Figura 4.1: Validación Intensidad de viento (m/s)

Luego, se validan los valores de temperatura del aire (T_a) utilizados en el modelo. Los resultados se presentan en la Figura (4.2).

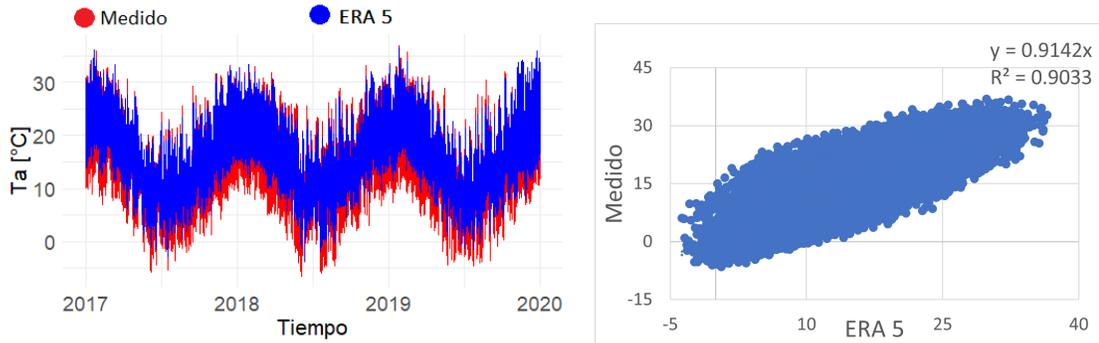


Figura 4.2: Validación Temperatura del aire ($^{\circ}\text{C}$)

Finalmente, se validan los valores de humedad relativa (HR) utilizados en el modelo en la Figura (4.3).

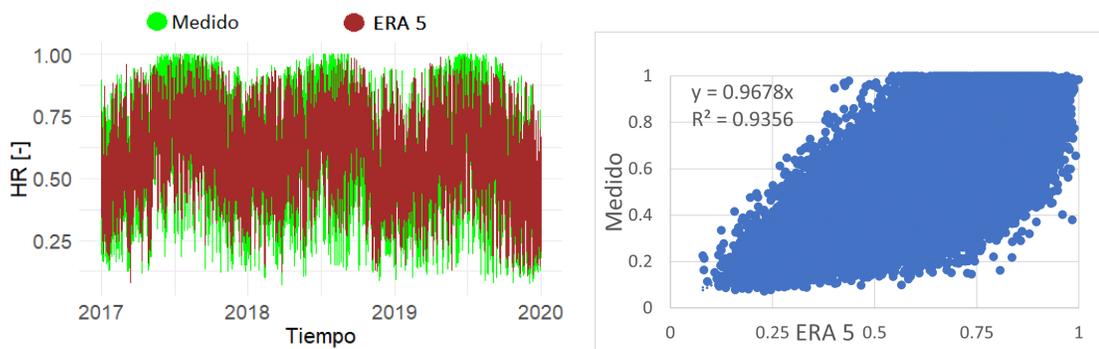


Figura 4.3: Validación Humedad relativa (-)

La correlación entre la Intensidad de viento medida y la obtenida a partir de ERA 5 se considera aceptable, dado que el coeficiente de determinación (R^2) se sitúa en torno a 0.6. Por otro lado, la correlación entre las mediciones de Temperatura del aire (T_a) y Humedad relativa (HR) y las obtenidas de ERA 5 es alta, con un R^2 mayor a 0.9. Estos resultados respaldan el uso de las condiciones climáticas obtenidas a partir del reanálisis atmosférico.

4.2. Validación del modelo

En esta sección se busca validar los resultados del modelo. Para ello, se hace comparación del promedio de temperatura en el punto de estudio (MODELO) con respecto al promedio de temperatura de la laguna medido en la boya sur (MEDIDO). Los resultados se presentan en la Figura (4.4).

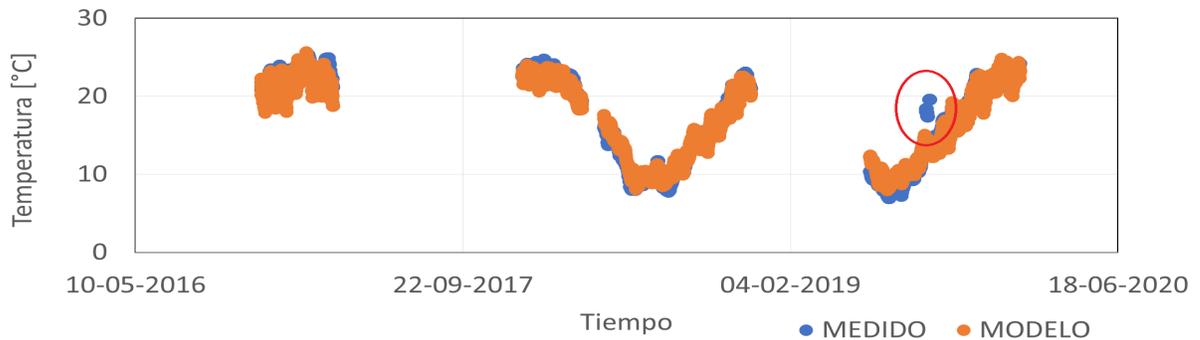


Figura 4.4: Validación del modelo

De la figura (4.4) se deduce una alta correlación entre la temperatura promedio de la laguna medida y modelada para el periodo comprendido entre el noviembre del 2016 y enero del 2020, a excepción de las mediciones encerradas en un círculo rojo, que son las únicas que escapan de la tendencia. Según lo anterior, se valida la modelación realizada en el presente estudio.

4.3. Forzantes climáticas

En la Figura (4.5) se presenta el promedio anual de las distintas forzantes climáticas consideradas en la modelación y se ajusta una regresión lineal para cada una de ellas, cuya pendiente se presenta en la Tabla (4.1), con el objetivo de conocer la tendencia de cada una de ellas en los últimos 50 años.

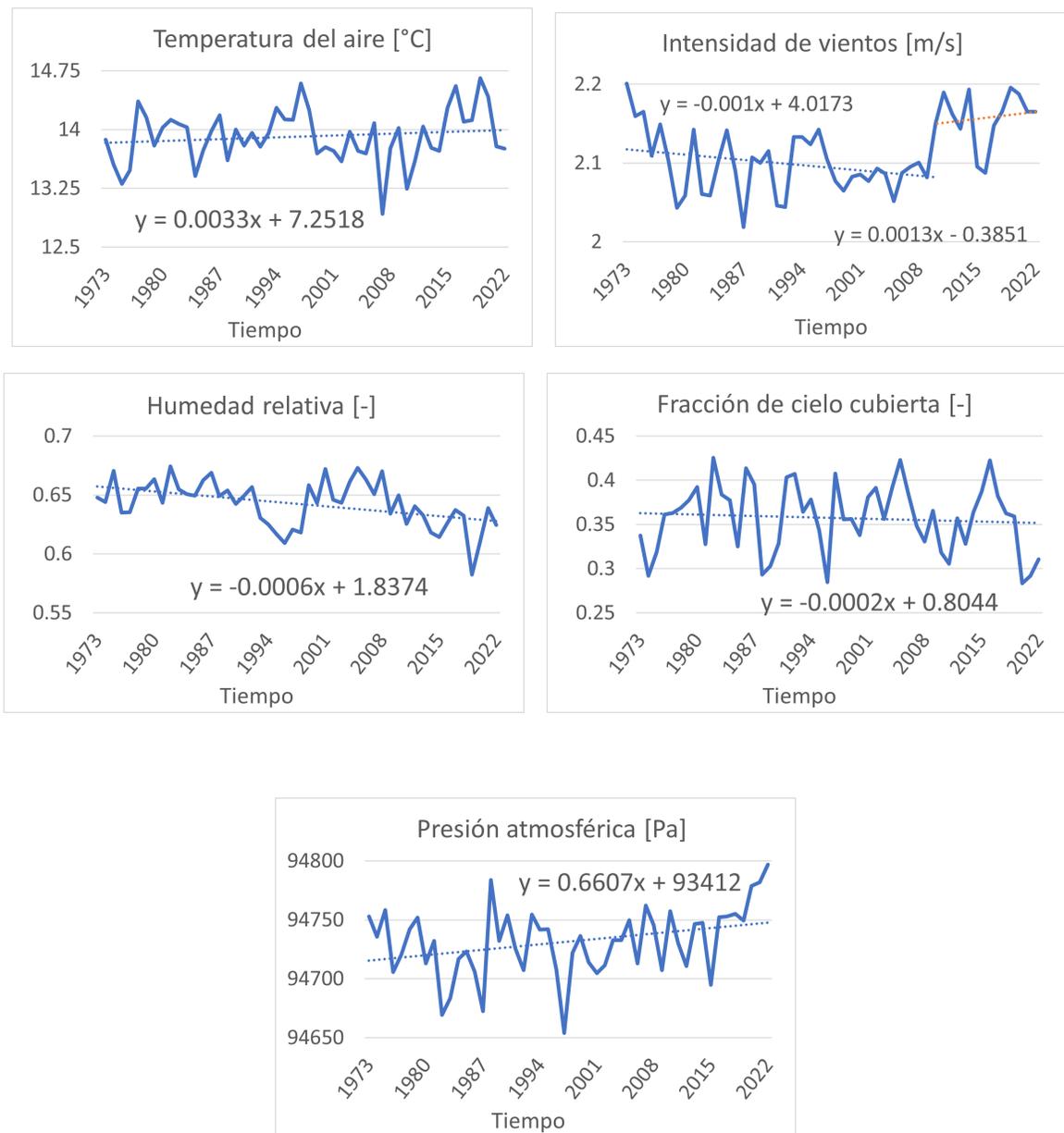


Figura 4.5: Promedio anual de las forzantes climáticas

Tabla 4.1: Gradiente de las forzantes climáticas durante los últimos 50 años.

Forzante Climática	Gradiente
Temperatura del aire	0.033 [°C/década]
Intensidad de vientos (1973 a 2010)	-0.01 [m/s/década]
Intensidad de vientos (2010 a 2023)	0.013 [m/s/década]
Humedad relativa	-0.6 [%/década]
Fracción de cielo cubierta	-0.2 [%/década]
Presión atmosférica	6.6 [Pa/década]

De la Tabla (4.1) se deduce un aumento decadal en la temperatura del aire de 0.033 grados Celcius aproximadamente. En cuanto a la intensidad de vientos se observa una disminución decadal de 0.01 metros por segundo desde el año a 1973 hasta el 2010, año en el que toma una tendencia al aumento de 0.013 metros por segundo por década. En cuanto a la humedad relativa, esta disminuye a una escala de 0.6 por ciento por década. Por otra parte, la fracción de cielo cubierta disminuye a una escala de un 0.2 por ciento por cada década. Finalmente, la presión atmosférica aumenta en 6.6 Pascales por cada década.

4.4. Análisis Temporal

Con el propósito de identificar la(s) variable(s) que mayor correlación tiene(n) con la frecuencia de Boyantez, se presentan las 6 Figuras siguientes, en donde se grafican los resultados de la Frecuencia de Boyantez, Longitud de Monin Obukhov, Variación de temperatura del aire y Flujo Boyante en función del tiempo para el periodo completo de estudio:

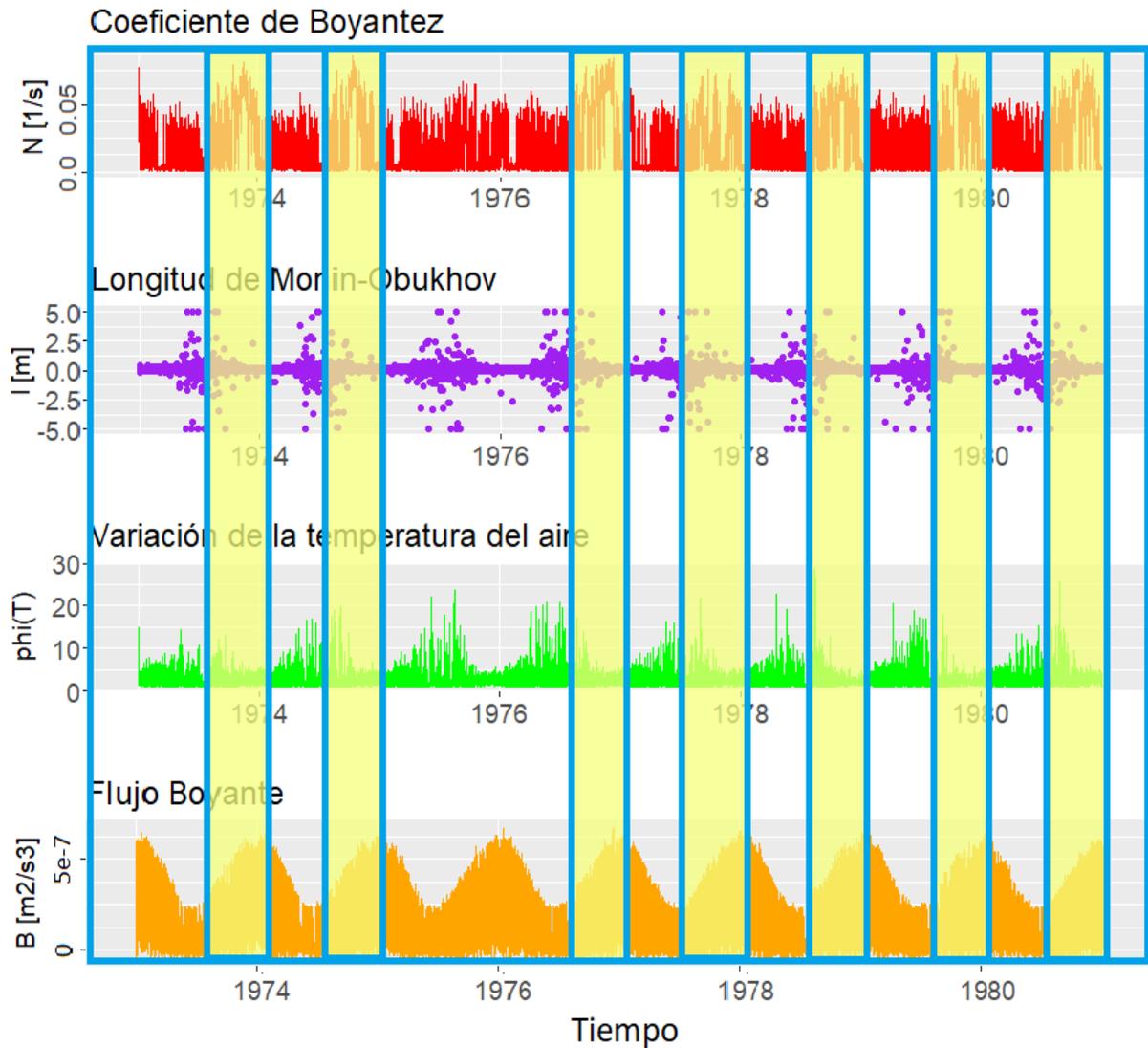


Figura 4.6: 1973 a 1979.

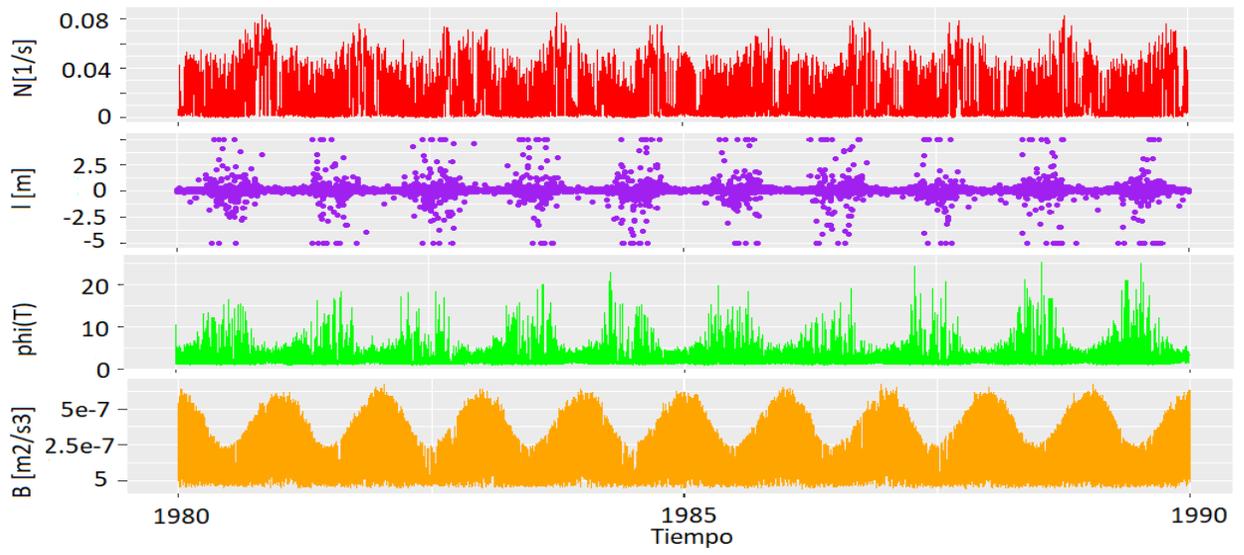


Figura 4.7: 1980 a 1989.

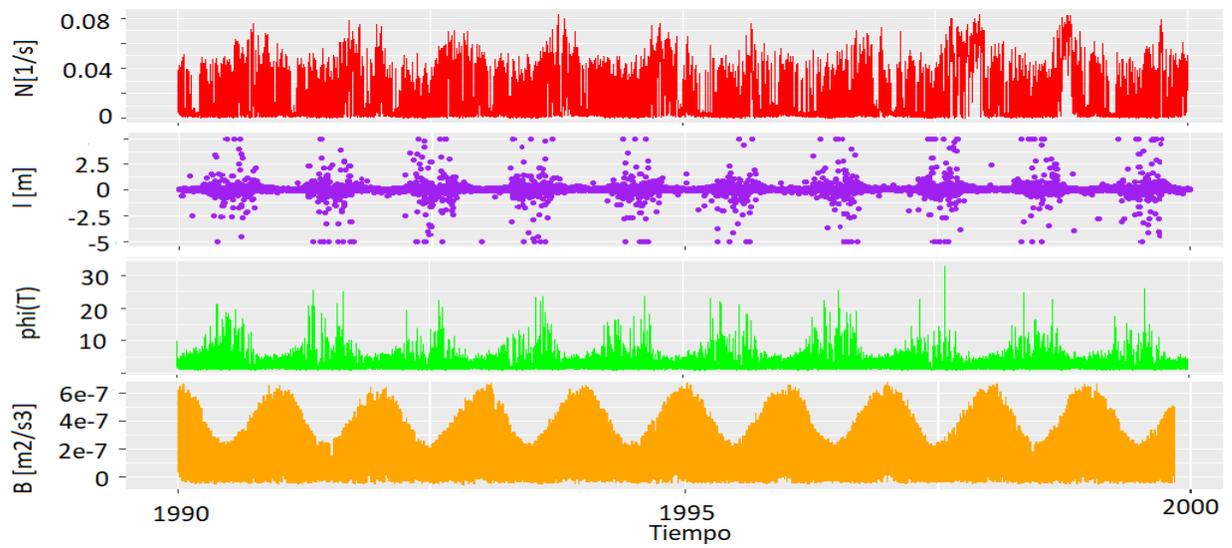


Figura 4.8: 1990 a 2000.

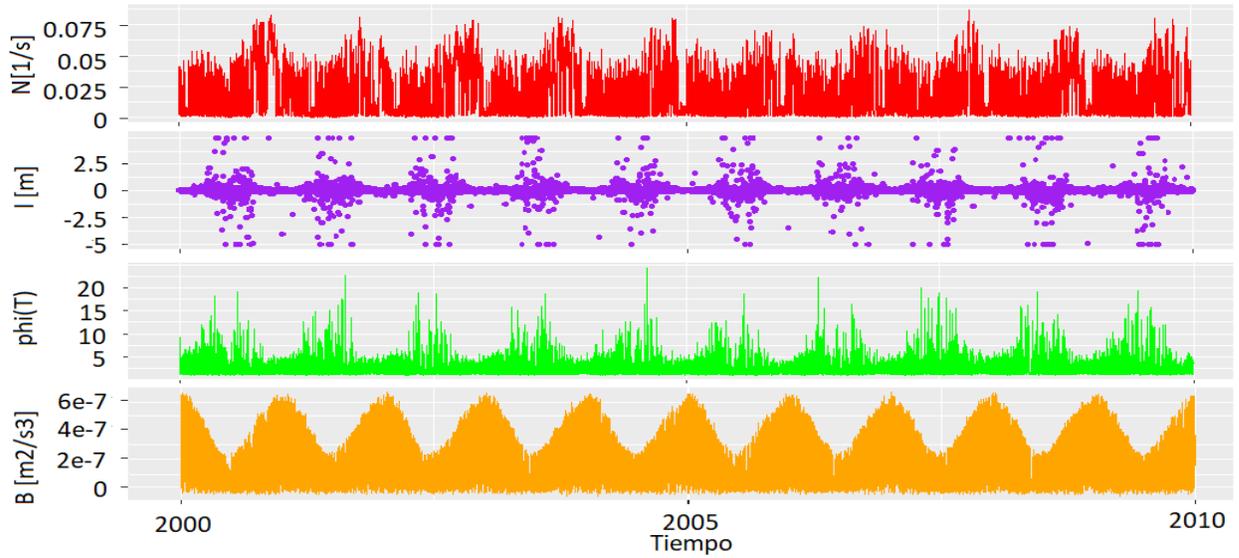


Figura 4.9: 2000 a 2009.

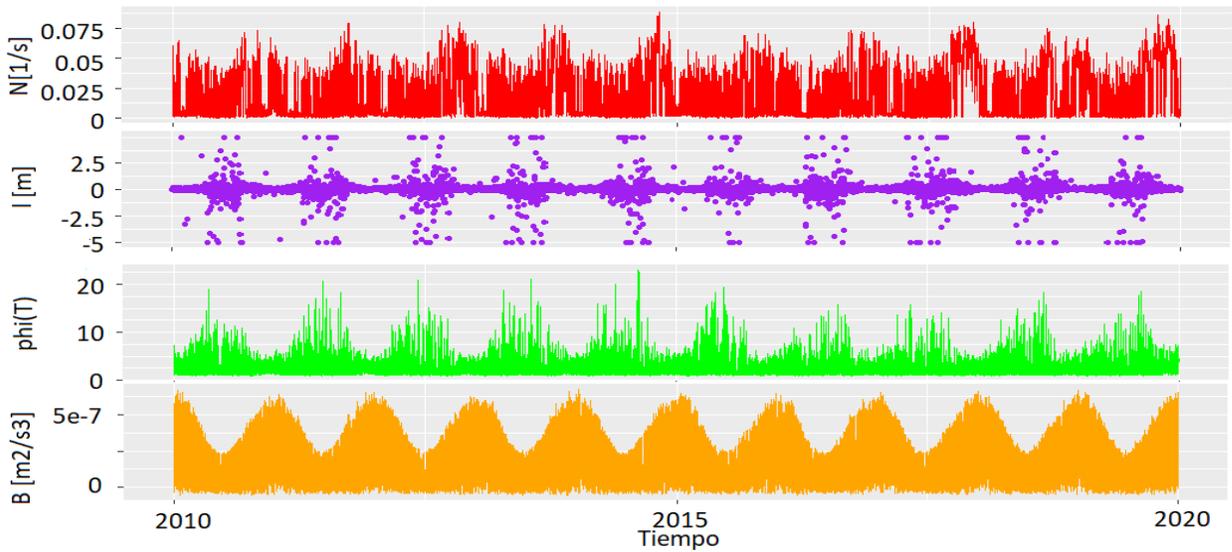
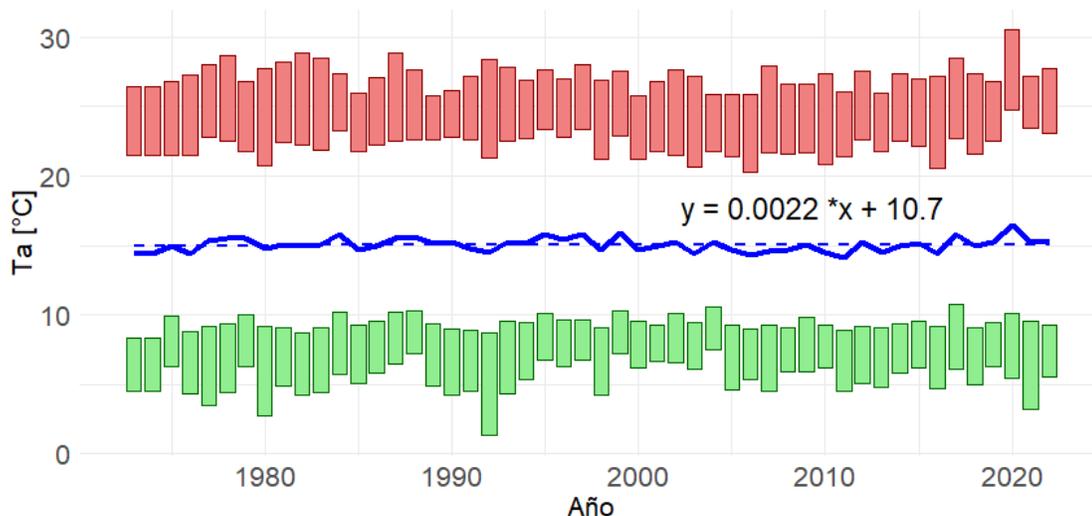


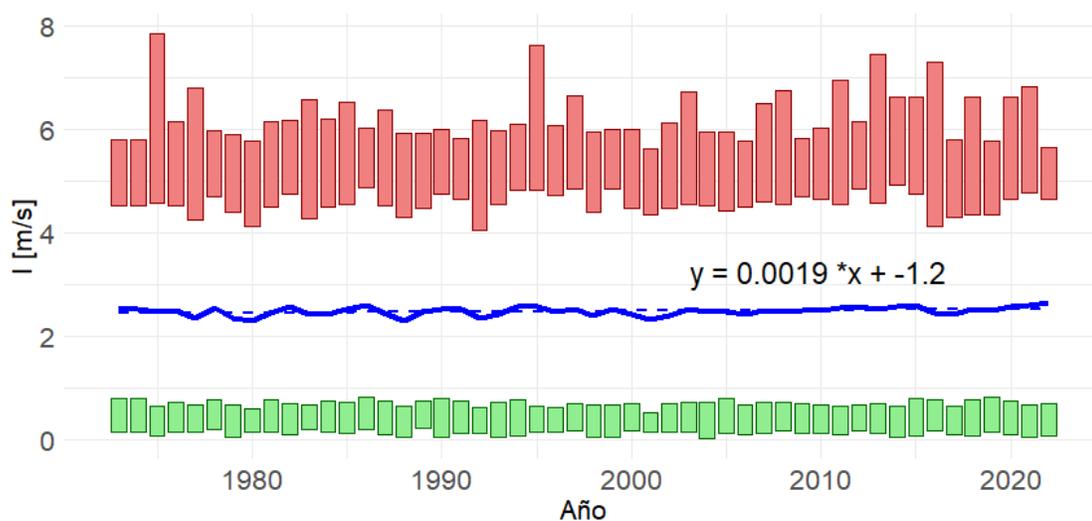
Figura 4.10: 2010 a 2020.

En cuanto a las Figuras de la (4.6) a la (4.10) se observa una tendencia estacional marcada, tanto para N , como para l y $\phi(T)$. En cuanto a N , se observa que alcanza valores máximos entre los meses de octubre y diciembre, del orden de 0.07 [1/s] , es decir, la laguna estratificaría más esta época del año. En lo que respecta a l , este alcanza valores máximos durante la época de invierno, mientras que en verano oscila en torno a 0. el mismo comportamiento se observa del parámetro $\phi(T)$, que es más grande en invierno, es decir, en esta época se tendría la mayor variación térmica intra diaria.

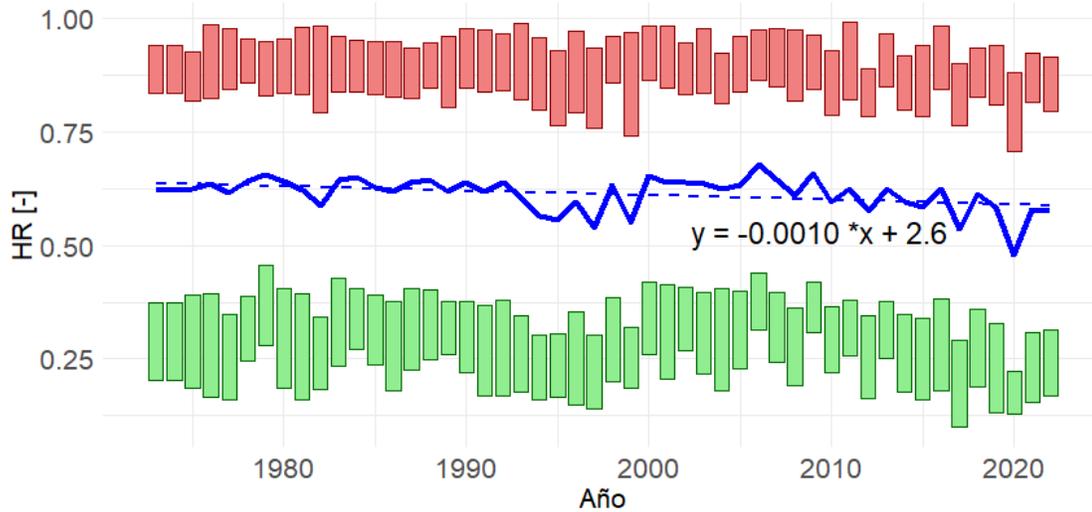
A continuación, con el objetivo de conocer la tendencia de las forzantes climáticas para el periodo entre octubre y diciembre (se considera este periodo ya que es en el que más estratifica la laguna), se grafican las variables correspondientes a Intensidad de Viento, Humedad Relativa y Temperatura del aire para el período comprendido entre principios de octubre y fines de diciembre de cada año del periodo de estudio. En estas Figuras, con una línea azul se presenta el promedio de la forzante climática, y en cuadrados verdes y rojos los deciles 1 y 10 respectivamente. Además, se ajusta una regresión lineal del promedio de cada forzante y su respectiva ecuación:



a) Temperatura del aire (Ta).



b) Intensidad de vientos (I).



c) Humedad relativa (HR).

Figura 4.11: Promedio de forzantes climáticas para los periodos octubre-diciembre de cada año.

Posteriormente, en la tabla (4.2) se presentan los gradientes de las forzantes climáticas para los periodos entre octubre y diciembre.

Tabla 4.2: Gradientes de las forzantes climáticas durante los últimos 50 años para el período comprendido entre octubre y diciembre

Gradiente	Valor
Ta [°C/década]	0.022
I [m/s/década]	0.019
HR [%/década]	-1

Con el propósito de comparar la estratificación medida en la laguna y la estratificación modelada, se presentan las Figuras (4.13) y (4.12), en donde se muestran los perfiles de temperatura unidimensionales modelados en el punto de estudio y medidos por la boya sur, respectivamente, para el periodo comprendido entre el 18 de noviembre de 2016 y el 18 de enero de 2017. Se consideró este periodo ya que los datos medidos por los termistores estaban completos, luego, en la Figura (4.14) se comparan las frecuencias de boyantez obtenidas de la modelación y las obtenidas de las mediciones.

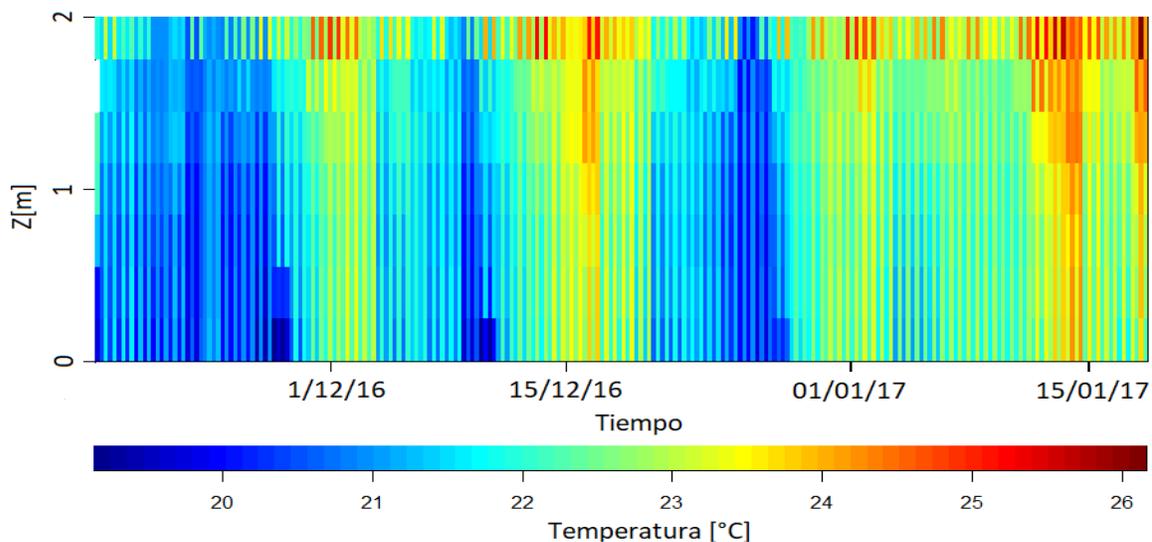


Figura 4.12: Perfil de temperatura medido por boya sur.

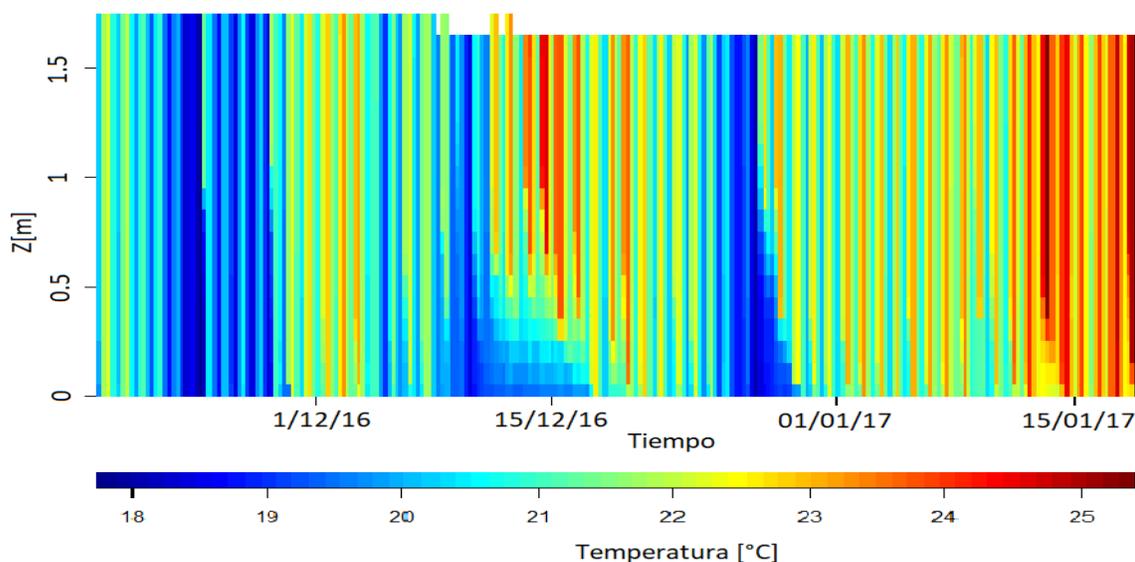


Figura 4.13: Perfil de temperatura de la laguna modelado en punto de estudio.

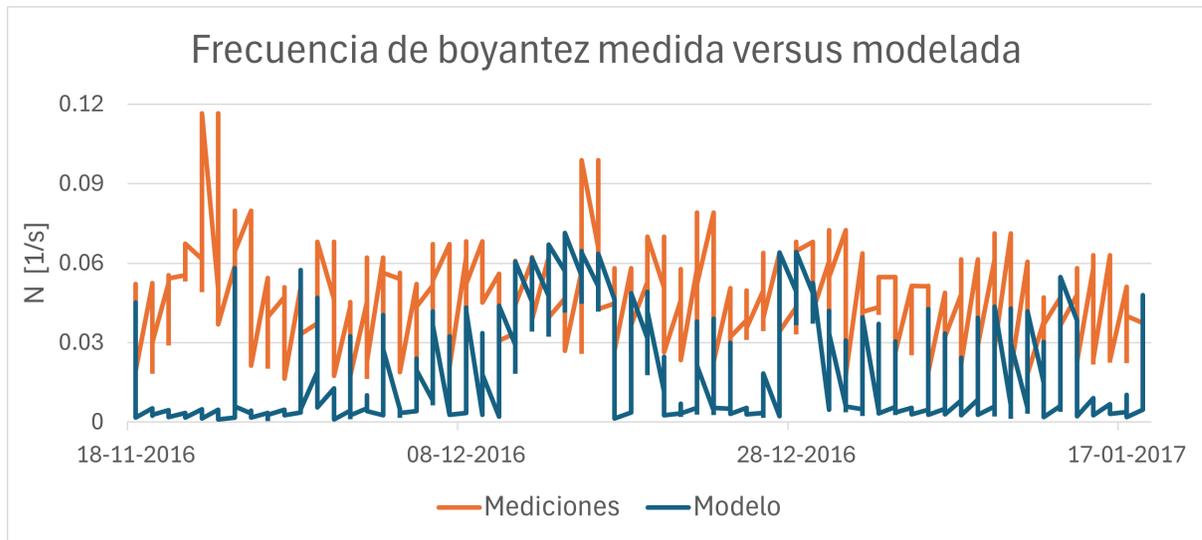


Figura 4.14: Comparación frecuencia de boyantez obtenida de las mediciones respecto a frecuencia de boyantez obtenida de la modelación.

De las Figuras (4.12) y (4.13) se deduce una gran correlación temporal de la temperatura de la laguna a escala mensual, la cual oscila entre los 18 y 26 grados Celcius.

Con respecto a la Figura (4.14), se deduce que no existe correlación entre la Frecuencia de boyantez calculada a partir de las mediciones y de la obtenida de la modelación, lo cual indicaría que el modelo no replica con exactitud procesos de estratificación y mezcla a escala mensual.

Luego, con el objetivo de conocer para cada año si la laguna permaneció mayor tiempo mezclada o estratificada, se muestra en la Figura (4.15) el porcentaje de tiempo durante cada año en el cual la laguna experimentó estratificación según lo modelado. Para determinar la presencia de mezcla o estratificación, se estableció un valor umbral para la frecuencia de boyantez, el cual se fijó en 0.04, valor aproximado al promedio de los valores mínimos y máximos que adoptó la frecuencia de boyantez durante todo el periodo de estudio en la modelación. En aquellos casos en los que la frecuencia de boyantez fuera inferior a dicho umbral, se clasificó como mezcla, mientras que se consideró estratificación en el caso contrario.

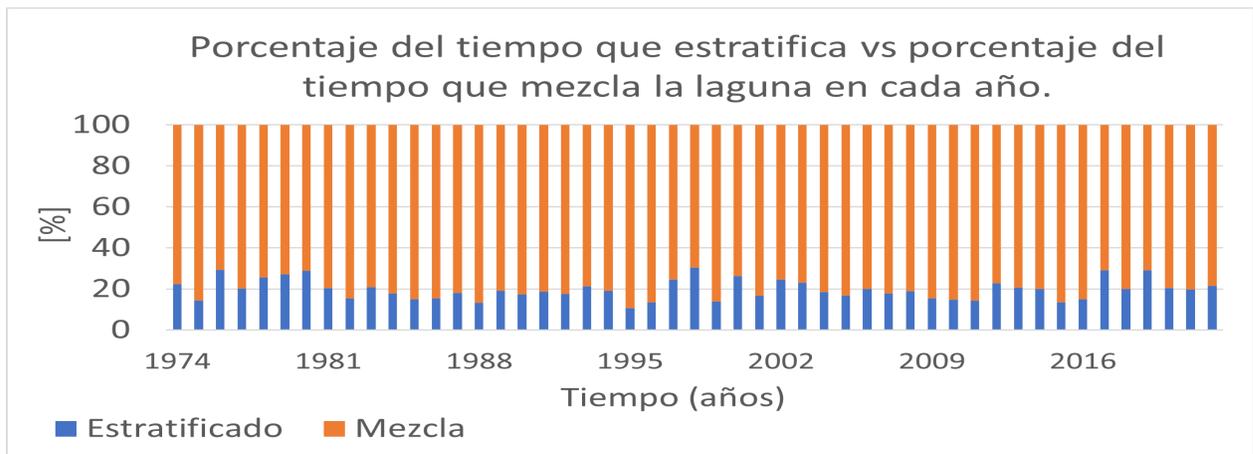


Figura 4.15: Porcentaje de tiempo que la laguna estratifica y porcentaje de tiempo que mezcla para cada año del periodo de estudio.

Según el valor umbral adoptado de 0.04 [1/s], se tiene que el cuerpo de agua permanece mayormente mezclado para todos los años del período de estudio (entre un 20 y un 40% del tiempo), siendo los años 1975, 1998, 2017 y 2019 los años en que más estratificó.

Luego, con el propósito de explicar el por qué en ciertos años la laguna estratifica más con respecto a otros, se presentan las Figuras (4.16) y (4.17), en las cuales se compara el porcentaje de tiempo anual que estratifica la laguna con respecto al promedio de temperaturas anómalas anuales producto del fenómeno de El Niño (ENSO) en la región 1+2, ubicada frente a las costas de Perú, la cual se presenta en la Figura (A.4) de anexos.

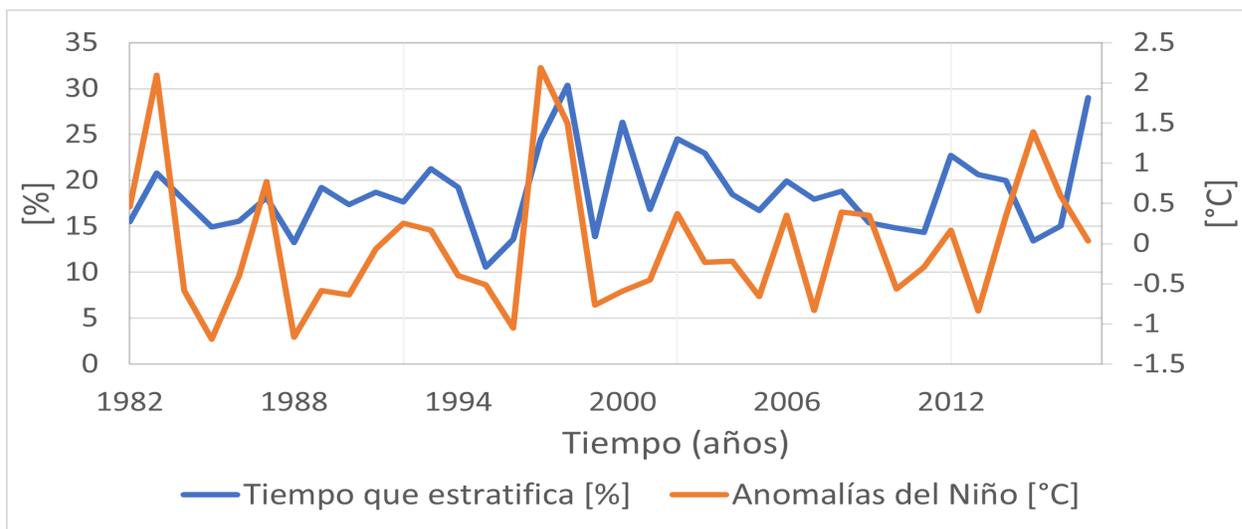


Figura 4.16: Comparación de tiempo que estratifica la laguna con respecto a temperaturas anómalas producto el fenómeno de El Niño.

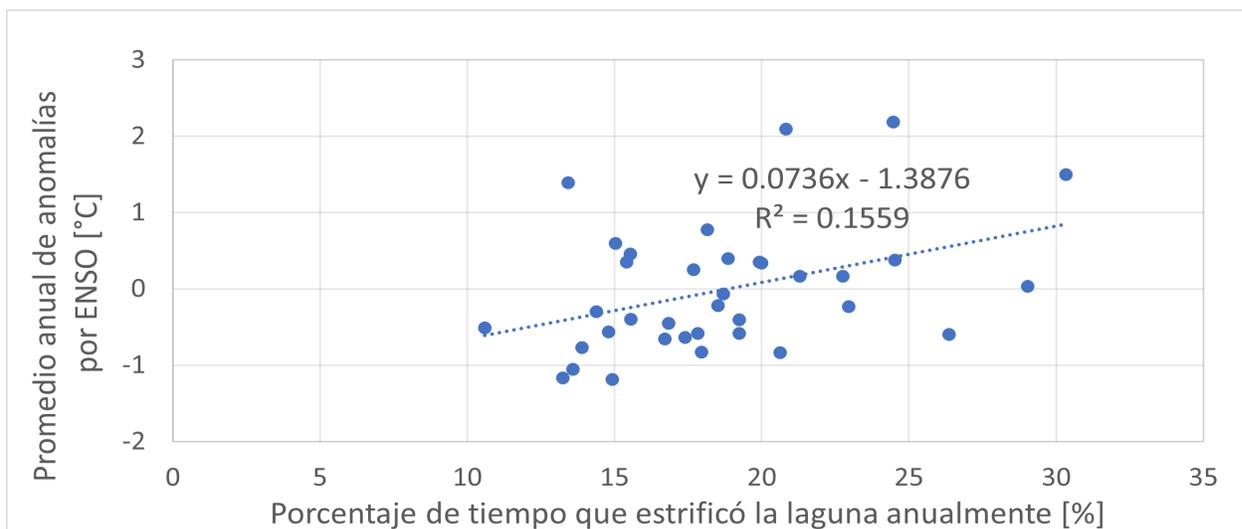


Figura 4.17: Correlación temperaturas anómalas producto de ENSO y periodo anual de estratificación.

Pese a los esfuerzos, no se distingue una correlación clara entre anomalías ENSO y periodo de estratificación de la laguna.

Con el propósito de conocer el comportamiento horario de la frecuencia de boyantez, y su correlación respecto a temperatura de aire e intensidad de vientos, se presentan los *boxplots* de las series de datos del periodo completo de frecuencia de boyantez, intensidad de vientos y temperatura del aire, organizados según la hora del día (0, 6, 12 y 18 horas) en las Figuras (4.18). Esta representación gráfica es visualizar la variabilidad de los datos a lo largo del día para diferentes horas.

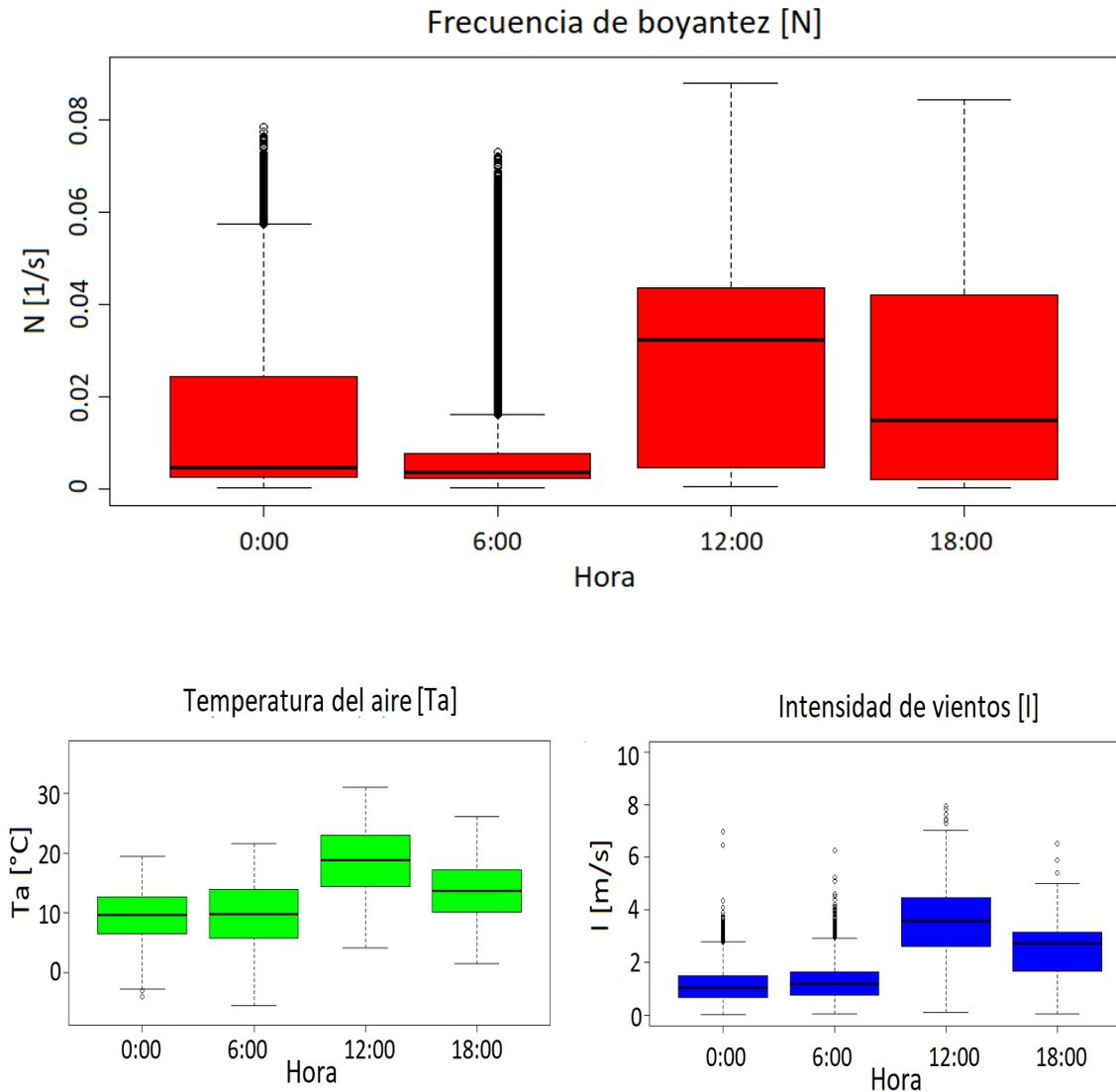


Figura 4.18: Frecuencia de boyantez, temperatura del aire e intensidad de vientos a escala horaria

Adicionalmente, se presenta la Figura (4.19), que es el mismo gráfico presentado en la Figura (4.18(a)), pero acotada al periodo entre principios de octubre y fines de diciembre. Se presenta esta Figura, debido a que este periodo corresponde al periodo en que la frecuencia de boyantez alcanza sus valores máximos durante los 50 años.

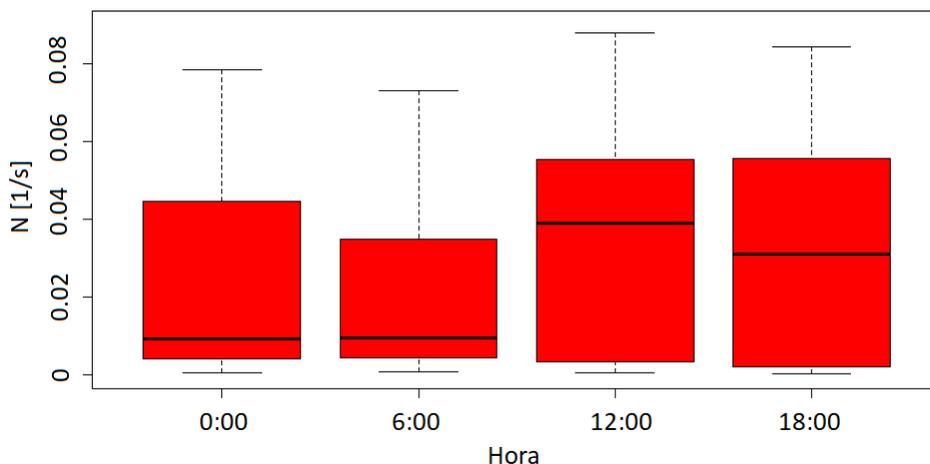


Figura 4.19: Frecuencia de boyantez a escala horaria para periodo comprendido entre octubre y fines de diciembre

En la Figura (4.20) se presenta el *boxplot* para la frecuencia de boyantez a nivel mensual. El propósito de esta imagen es visualizar como varía la frecuencia de boyantez durante el transcurso del año.

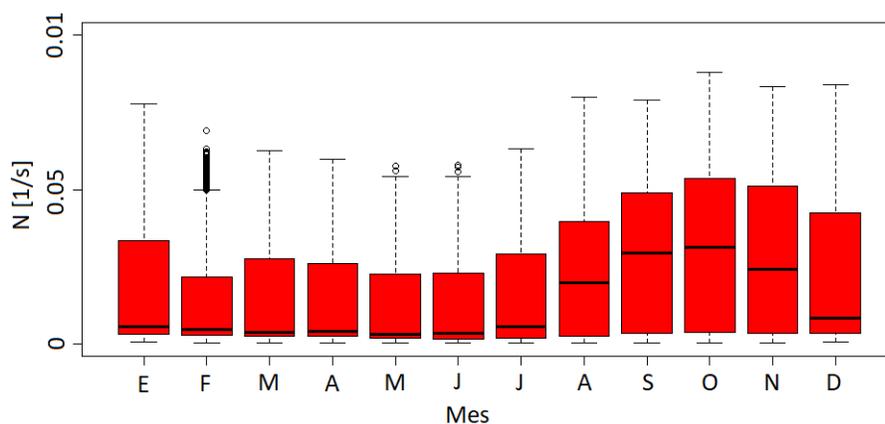


Figura 4.20: Frecuencia de boyantez a escala mensual

Con el propósito de conocer la relación existente entre los procesos de estratificación y mezcla, y los flujos de calor latente y sensible en la superficie de la laguna, se escoge el mes de noviembre del año 1980 para comparar a través de las Figuras (4.21) y (4.22) los flujos de calor y la distribución de temperatura en el punto de estudio.

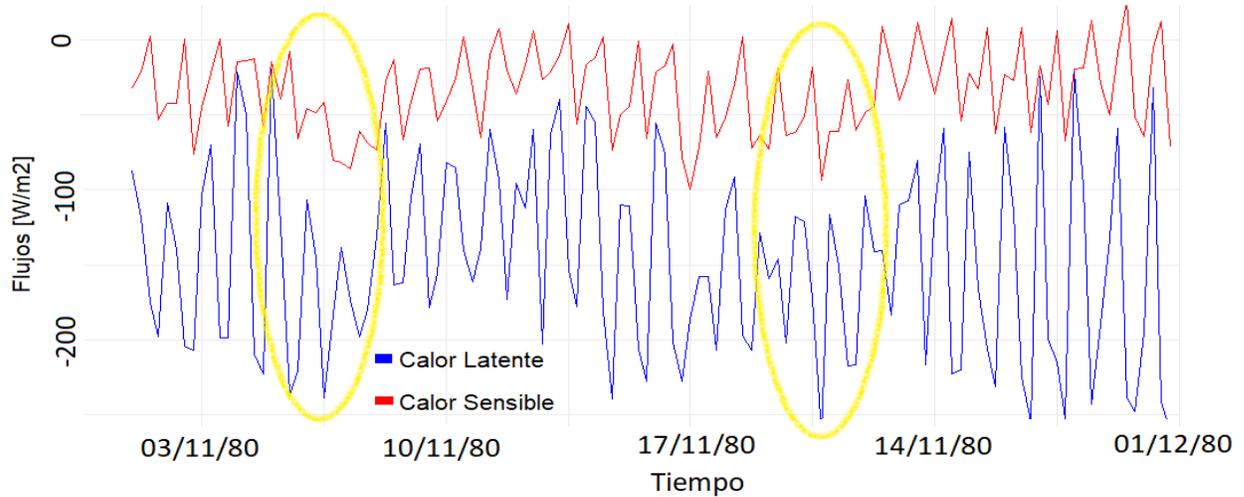


Figura 4.21: Calor sensible y calor latente durante noviembre de 1980

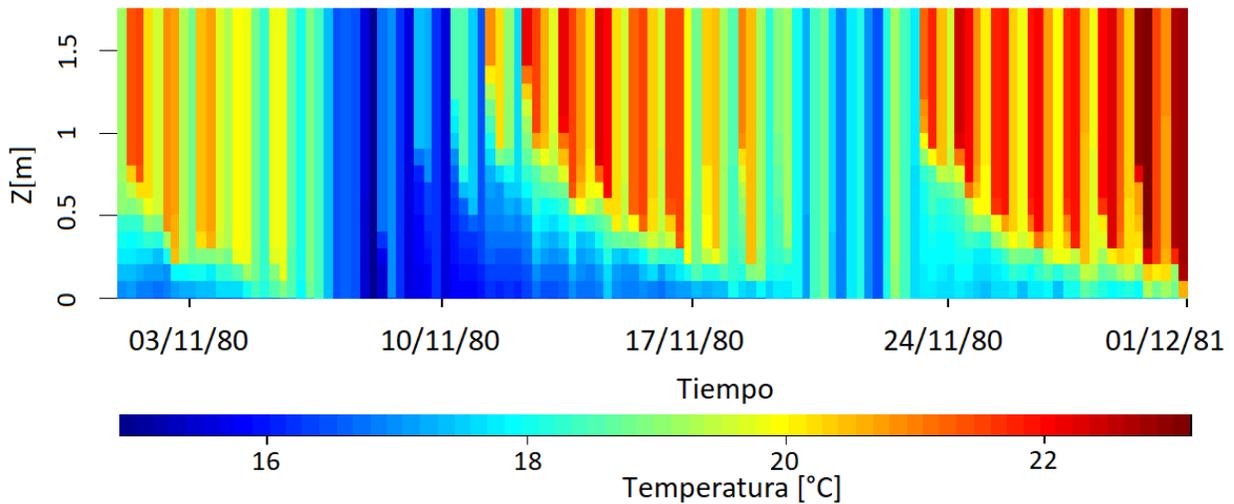


Figura 4.22: Perfil de temperatura noviembre de 1980

Basándonos en los datos de estas representaciones gráficas, se puede inferir una relación directa entre los flujos de calor sensible y latente en relación con la temperatura del cuerpo de agua, con un ligero retraso temporal, dado que los valores mínimos de flujo de calor (marcados en círculos amarillos) ocurren justo antes de las mínimas temperaturas registradas en el cuerpo de agua.

4.5. Análisis espacial

Con el objetivo de conocer la distribución espacial de la temperatura de la laguna, en las Figuras (4.23) y (4.24) se presenta la temperatura del agua promedio entre los meses de octubre y diciembre en la zona profunda, zona media y superficie de la laguna para los años 1975, 1980, 1985, 1990 y 1995, 2000, 2005, 2010, 2015 y 2020. Además, en círculos rojos se muestra el lugar de la laguna en donde más variaría la temperatura en la vertical, según un análisis visual de las Figuras.

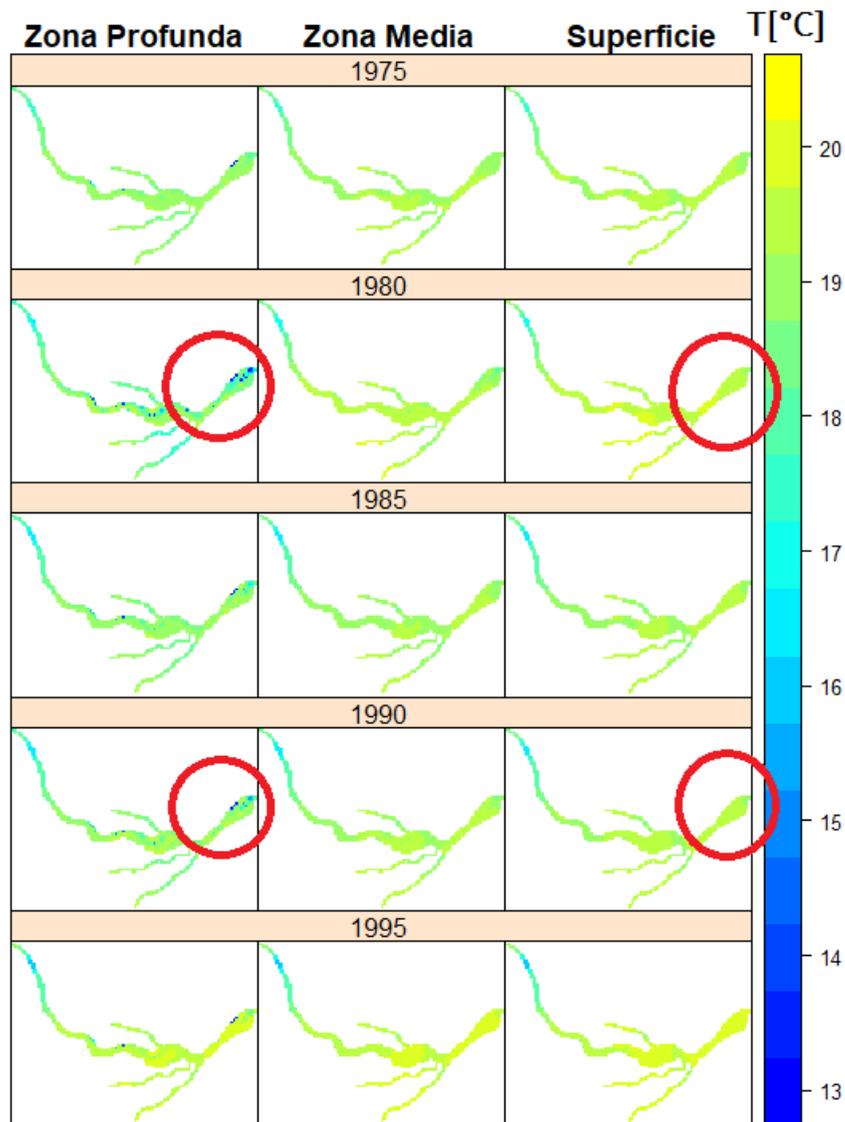


Figura 4.23: 1975 a 1995.

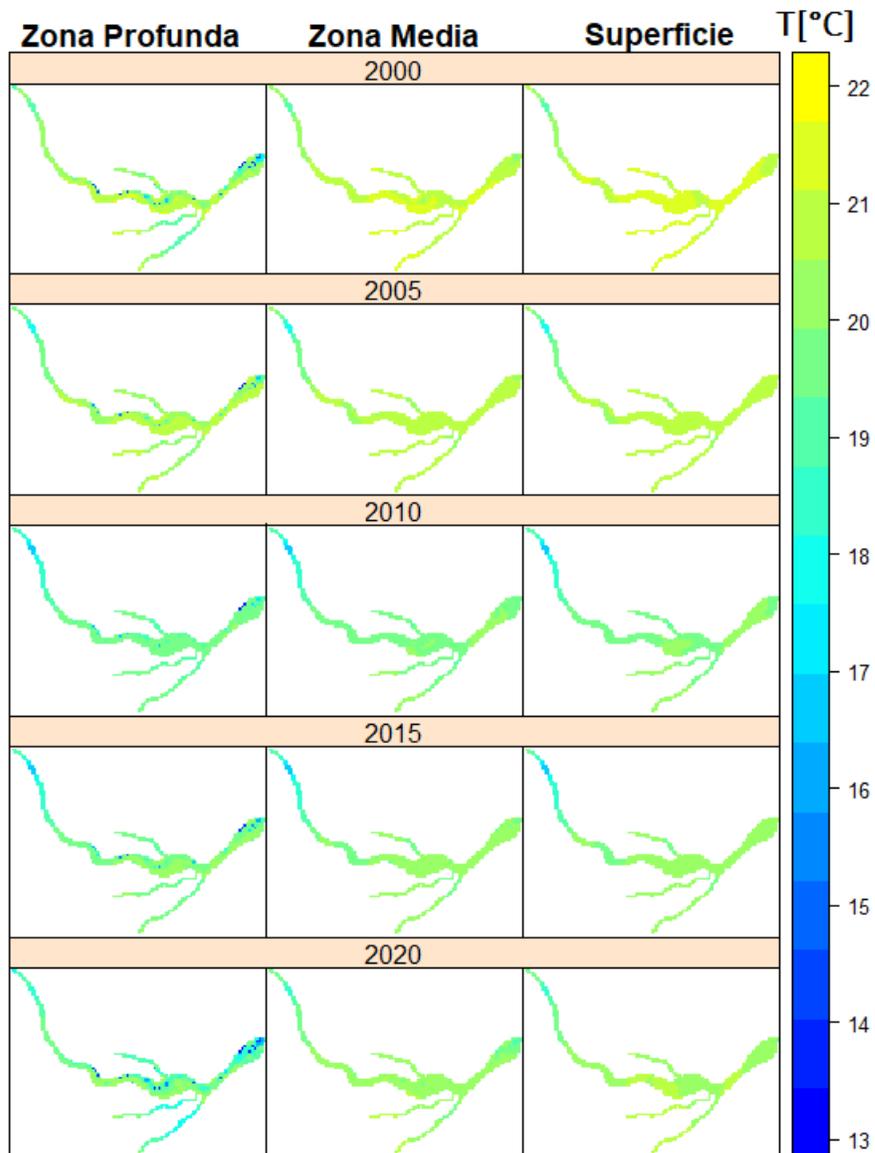


Figura 4.24: 2000 a 2020.

Además, de las Figuras (4.23) y (4.24), se observa que la temperatura en estas fechas oscila entre los 13 y 21 grados Celcius, teniéndose las menores temperaturas hacia la parte profunda y al Este del cuerpo de agua, y esta aumentaría hacia el centro y la superficie de la laguna.

Finalmente, con el objetivo de establecer una tendencia global de la temperatura de la laguna en todo el periodo de estudio, se presenta en la Figura (4.25) el promedio de temperatura de la parte superficial, parte media y parte profunda en función del tiempo, a lo que se le ajustó una regresión lineal para conocer la tendencia en los últimos 50 años. El gradiente térmico se presenta en la Tabla (4.3).

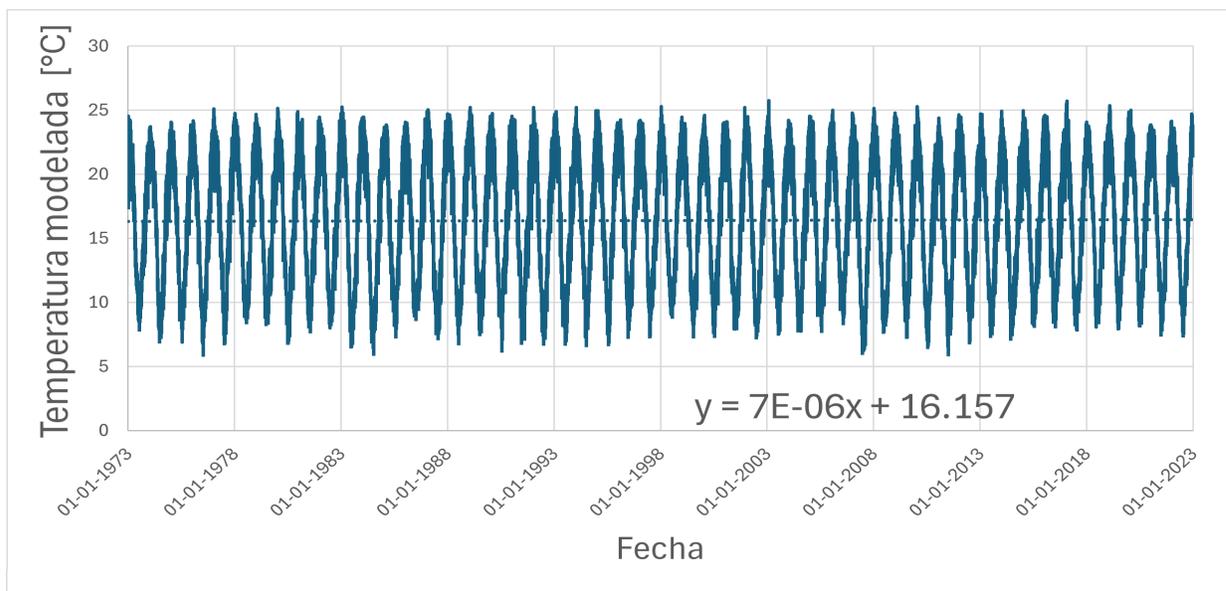


Figura 4.25: Temperatura promedio modelada de la laguna en función del tiempo

Tabla 4.3: Gradiente de la temperatura modelada de la laguna.

Gradiente	Valor
[°C/día]	$7 \cdot 10^{-6}$
[°C/año]	$2,5 \cdot 10^{-3}$
[°C/década]	0,025

Luego, según el gradiente térmico obtenido de la Tabla (4.3), se tiene que la temperatura de la laguna ha aumentado 0.13 grados Celcius en los últimos 50 años aproximadamente.

Capítulo 5

Conclusión

5.1. Discusión de resultados

5.1.1. Validación de las frozantes climáticas

Con respecto a la Figura (4.1), se observa una pobre correlación entre intensidad de viento medida y utilizada en la modelación, esto ocurre debido a que los datos medidos variaban más a escala horaria y diaria con respecto a los utilizados en el modelo, logrando solo una correlación a grandes escalas temporales (meses y años).

Por otro lado, en cuanto a las Figuras (4.2) y (4.3), se observa una correlación evidente entre los datos de temperatura de aire y humedad relativa derivados del reanálisis y aquellos medidos por la estación meteorológica. Esta observación sugiere que, en el contexto de investigaciones en la Laguna Carén para periodos de escalas temporales similares a las del presente estudio (50 años), es válido utilizar los datos de temperatura y humedad relativa obtenidos a partir del reanálisis.

5.1.2. Validación del modelo

En cuanto a la validación del modelo que se llevó a cabo comparando los perfiles de temperatura en la Figura (4.4), se logró establecer una correlación entre el promedio de toda la columna de agua, desde la superficie hasta la

parte más profunda, tanto en las mediciones como en el modelo. Sin embargo, la Figura no refleja la correlación presente en los procesos de estratificación, es decir, no proporciona información sobre si el modelo reproduce fielmente los eventos de estratificación o mezcla que se observan en las mediciones de la laguna. En los siguientes capítulos se profundiza más respecto a la correlación que existe entre los procesos de estratificación y mezcla medidos y modelados, a través de un análisis detallado, principalmente de la frecuencia de boyantez.

5.1.3. Forzantes climáticas

En relación al gradiente de los promedios anuales de las forzantes climáticas influyentes obtenidos en la Tabla (4.1), se evidencia una tendencia al alza en la temperatura del aire, la intensidad de los vientos y la presión atmosférica. Por otro lado, se observa que la fracción de cielo cubierta y la humedad relativa han experimentado una disminución a lo largo del tiempo. Estos hallazgos señalan que las condiciones climáticas en la zona de estudio han evolucionado hacia un clima más cálido y seco.

En cuanto a las tendencias de las forzantes climáticas durante el periodo octubre-diciembre presentadas en la Figura (4.11), se tiene que para la temperatura del aire esta es similar durante verano y el resto del año, ya que en verano la tendencia corresponde a un aumento de 0.0022 grados Celcius por año, mientras que para el año completo el aumento es de 0.003 grados Celcius por año. Por otro lado, en cuanto a la variación de intensidad de vientos se dedujo una variación negativa entre los años 1973 y 2010 para el período completo de estudio (-0.001 metros por segundo por año), y entre los años 2010 y 2022 se observó un incremento de 0.0013 metros por segundo por año, mientras que para el período comprendido entre octubre y diciembre se observó un gradiente positivo de 0.0019, lo cual se traduce en que se han intensificado más los vientos durante el período octubre-diciembre que en el resto del año. Finalmente, la humedad relativa ha decaído más entre octubre y diciembre que en el resto del año (-0.0010 contra -0.0006 por año), lo cual indica que el periodo cercano al fin de la primavera ha ido siendo más seco con respecto al resto del año.

5.1.4. Análisis temporal

A partir de la modelación en el punto de estudio, se aprecia en la Figura (4.6) que la frecuencia boyante máxima alcanza valores picos, especialmente alrededor de 0.07 1/seg durante los meses comprendidos entre octubre y fines de diciembre. Además, se advierte que los periodos en los cuales la Frecuencia de Boyantez alcanza su valores máximos ocurren justo después de los picos de Longitud de Monin Obukhov. Esto sugiere una correlación directa que evidencia el impacto del viento en la mezcla dentro de la laguna, ya que a mayor Longitud de Monin Obukhov menor es la Frecuencia de boyantez.

En lo que respecta al efecto anticipado de la variación de la temperatura del aire en la estratificación de la laguna, en las Figuras de la (4.6) a la (4.10) se observa que el periodo de mayor variabilidad intra-horaria de temperatura (otoño-invierno), no coincide con los picos de Frecuencia de boyantez, este hallazgo sugiere que el factor predominante que influye en los procesos de estratificación y mezcla en el cuerpo de agua es, de hecho, el efecto del viento. Por otra parte, en verano, se tienen valores de N menores, esto sugiere una condición de mezcla, similar a lo que ocurre en invierno-otoño. Sin embargo, en este caso, se tiene dicha condición debido a que la variabilidad térmica intra-diaria es muy baja y no producto del efecto del viento, lo que no permite que ocurran procesos de estratificación, si no que se tenga una condición de mezcla constante durante la época estival.

En lo que respecta a las Figuras (4.12) y (4.13) se observa una clara correlación a escala mensual de la temperatura promedio en la columna de agua modelada, con respecto a la medida en la boya sur. En cuanto a la estratificación, en la Figura (4.14) no se observa una clara correlación entre la frecuencia de boyantez obtenida gracias a las mediciones y la obtenida a partir del modelo, lo cual muestra que para cortas escalas de tiempo (del orden de meses), el modelo no logra replicar los ciclos de estratificación mezcla de manera precisa, lo anterior se atribuye a que en estas escalas de tiempo la correlación entre las forzantes climáticas medidas en terreno y las obtenidas a partir de reanálisis atmosférico es baja, en especial la correlación entre intensidades de viento medida y modelada. Sin embargo, se aprecia que ambas frecuencias de boyantez poseen el mismo orden de magnitud (modelada y medida), lo cual indicaría la correlación entre ambas frecuencias de boyantez considerando escalas temporales más grandes (años y décadas). Pese a ser de similar magnitud, la frecuencia de boyantez obtenida a partir de las mediciones sigue siendo en promedio mayor (oscila entre 0.02 a 0.12 [1/s]) a la obtenida a partir

de la modelación (oscila entre 0 y 0.07 [1/s]), lo anterior puede ser atribuido a una imprecisa calibración de los coeficientes asociados a las propiedades de los sedimentos, como lo son el coeficiente de difusión térmica y la capacidad calórica de estos (Sáez, 2022).

En cuanto a la Figura (4.15), se observa un comportamiento oscilante en la frecuencia que estratifica la laguna durante cada año en el periodo de estudio. Para dar explicación a este comportamiento, se presentó la Figura (4.16), en la cual se aprecia una ligera correlación entre los años que más (menos) estratifica, con las anomalías positivas (negativas) de temperatura producto el fenómeno de El Niño. Dicha correlación no es clara, esto debido al efecto de las demás forzantes climáticas sobre los procesos de estratificación y mezcla, principalmente, a la acción del viento.

En la Figura (4.18) se observa que valores máximos de frecuencia de boyantez se alcanzan en los periodos del medio día y conforme se acerca la tarde noche estos valores van decayendo. En esta Figura en particular se observa una correlación directa entre frecuencia boyante y altas temperaturas de aire e intensidades de viento. Sin embargo, el viento tendría un efecto tardío de tal forma que la laguna mezcla conforme van pasando las horas hacia las 18:00 horas. Los valores máximos de frecuencia de boyantez en el mediodía estarían explicados principalmente por una alta radiación incidente en el cuerpo de agua.

En lo que respecta a la Figura (4.19) se observa un comportamiento similar al de la frecuencia de boyantez para el periodo completo (4.18), sin embargo en este caso para las 00:00 y la 6:00 horas no son considerados valores atípicos las frecuencias boyantes en torno a los 0.06 y 0.08 [1/s], es decir, es más frecuente que la laguna esté más estratificada en dichas horas.

De la Figura (4.20) se observa el mismo comportamiento descrito según la Figura (4.6) para cada mes. Además, también se puede apreciar que el mes en que la laguna se encuentra mayor tiempo mezclada corresponde al mes de enero, esto puede atribuirse a las altas intensidades de viento existentes durante estas fechas, restándole importancia a la variación intra-diaria de temperatura y al efecto de la radiación sobre los procesos de estratificación.

La correlación existente entre los flujos de calor sensible y calor latente con respecto a la termodinámica de la laguna que se deduce de las imágenes (4.21) y (4.22), es que existe un pequeño desfase temporal entre los valores mínimos (máximos) de flujo de calor sensible y latente (encerrados en amarillo) y las

temperaturas frías (cálidas) del cuerpo de agua. La relación entre los flujos de calor y los procesos de estratificación no es clara a partir del análisis de las imágenes.

5.1.5. Análisis espacial

En cuanto a las Figuras (4.23) y (4.24), en la primera se puede apreciar encerrado en rojo en los círculos de la izquierda que las temperaturas mínimas se alcanzan en la parte más hacia el este de la laguna en la zona profunda y aumentan hacia la superficie (círculo rojo derecho). El hecho de que las temperaturas mínimas sean en la parte este de la laguna en la zona profunda, estaría relacionado principalmente con que esa corresponde a la zona más profunda de la laguna como se muestra en la imagen (3.3), por lo que no se puede deducir que exista un gradiente de temperaturas distinto en esta zona con respecto a otras zonas de la laguna. Sin embargo, es en la zona oeste de la laguna donde se observa una temperatura uniformemente baja con respecto a la zona del centro de la laguna (temperaturas en torno a los 17 grados Celcius), siendo que esta es la zona menos profunda de la laguna. Lo anterior puede ser explicado por el efecto que tiene el viento en la disminución de temperaturas en dicha zona.

Con respecto a la Figura (4.25) se observa un comportamiento estacional marcado de la temperatura de la laguna, variando entre los 5 grados Celcius en invierno y 25 grados Celcius en verano. Además, en la Tabla (4.3) se observa una pendiente positiva de muy baja magnitud para el ajuste lineal realizado a la serie de datos de temperatura promedio modelada, lo cual indicaría que, en base a la modelación, la temperatura promedio del cuerpo de agua no habría variado siquiera un grado entre el comienzo y el final del periodo de estudio.

5.2. Comentarios finales

Se logra cumplir con los objetivos propuestos. Primero, se logra conocer el comportamiento tanto de la temperatura de la laguna como el de las forzantes climáticas para distintas escalas temporales. Además, se logra modelar los procesos de estratificación en la laguna gracias a considerar el flujo de calor en los sedimentos, sin embargo la laguna no estratifica tanto como en las mediciones obtenidas en terreno. Lo anterior es posible atribuirlo a la sensibilidad

del modelo respecto a los parámetros de entrada, como lo son el coeficiente de arrastre de viento, el albedo, la reflectancia en sedimentos, la capacidad calorífica de estos, entre otras.

También, es posible distinguir en la variación a escala horaria de la Frecuencia de boyantez, el comportamiento cíclico que existe en la estratificación durante las horas de la tarde y su tendencia a la mezcla durante la noche, validando la hipótesis respecto a ciclos, específicamente en la época de primavera, entre los meses de octubre y diciembre.

También, se logró establecer la correlación entre las forzantes climáticas y los procesos de estratificación y mezcla, destacando principalmente al viento como el agente principal en la mezcla del cuerpo de agua. Además, se reconoció a la radiación incidente como principal agente en el aumento de la temperatura del agua.

En cuanto al uso de las forzantes climáticas obtenidas a partir del reanálisis atmosférico ERA 5, se deduce que, en cuanto a Temperatura de aire y Humedad relativa, se asemejan a las medidas en terreno, por lo que pueden ser utilizadas para modelaciones como las del presente estudio. Sin embargo, no se recomienda utilizar las series de Intensidad de viento recogidas desde ERA 5, esto debido a que no ajustan bien, e incluso los valores máximos medidos en terreno llegan a triplicar a las series recogidas del reanálisis. En cuanto a las otras forzantes climáticas (Presión atmosférica y Fracción de cielo cubierta), se desconoce si son representativas, debido a que no se cuenta con mediciones en terreno de dichas variables.

Finalmente, en cuanto a la validación del modelo, esta se logró llevar a cabo mediante la comparación de la temperatura promedio del cuerpo de agua en función del tiempo y las mediciones obtenidas en terreno mediante el uso de termistores, observándose una alta correlación entre ellas.

Bibliografía

- [1] Alvarado, A., Huerta, A., Palma, Á., & Rodríguez, S. (2018). Variación estacional de la diversidad de coleópteros epigeos en la Laguna Carén (Santiago, Chile). *Revista Colombiana de Entomología*, 44(2), 266-272.
- [2] Baladrón, M. (2011). “Estudio de la Termo-Hidrodinámica del Ecosistema Humedal Ciénagas del Name.” Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 146p.
- [3] Bécares, E., Conty, A., Rodríguez-Villafañe, C. y Blanco, S. 2004. Funcionamiento de los lagos someros mediterráneos. *Ecosistemas* 2004(2).
- [4] Botero, R. *et al.* (2013). Efecto estacional de los afluentes en la estructura térmica de un pequeño embalse neotropical, La Fe, Colombia. *Dyna*, 80(177), 152-161.
- [5] Bozkurt, D., Rojas, M., Boisier, J. P., Rondanelli, R., Garreaud, R., & Gallardo, L. (2019). Dynamical downscaling over the complex terrain of southwest South America: present climate conditions and added value analysis. *Climate Dynamics*, 53(11), 6745-6767.
- [6] de la Fuente, A., and Niño, Y. 2010. “Temporal and spatial features of the thermohydrodynamics of shallow salty lagoons in northern Chile.” *Limnol. Oceanogr.* 55(1): 279-288.
- [7] de la Fuente, A., Ordóñez, C., and Pérez, R. 2016. “Diffusional mass transfer coefficient at the water-sediment interface for wind-induced flow in very shallow lagoons.” *Environ Fluid Mech* (16): 539-558.
- [8] Díaz Cordero, G. (2012). El cambio climático. Ciencia y sociedad.

- [9] Garratt, J. R. 1994. “The atmospheric boundary layer”. Cambridge Atmospheric and Space Science Series, 37: 89–134.
- [10] Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., ... & Thépaut, J. N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999-2049.
- [11] Hodges, B. R. *et al.* Aquatic Ecosystem Model: AEM3D, User Manual; Hydronumerics: Docklands, Australia, 2016.
- [12] Hodges, B. R., Imberger, J., Saggio, A., & Winters, K. B. (2000). Modeling basin-scale internal waves in a stratified lake. *Limnology and oceanography*, 45(7), 1603-1620.
- [13] Holgerson, M. A., Richardson, D. C., Roith, J., Bortolotti, L. E., Finlay, K., Hornbach, D. J., ... & Webb, J. R. (2022). Classifying mixing regimes in ponds and shallow lakes. *Water Resources Research*, 58(7).
- [14] Holgerson, M. A., Zappa, C. J., & Raymond, P. A. (2016). Substantial overnight reaeration by convective cooling discovered in pond ecosystems. *Geophysical Research Letters*, 43(15), 8044-8051..
- [15] Imberger, J. (1985). The diurnal mixed layer. *Limnology and Oceanography*, 30(4), 737–770.
- [16] Lanza, S. B. (2007) Ecología trófica de los peces en lagunas someras.
- [17] Lewis Jr, W. M. (1983). A revised classification of lakes based on mixing. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 40(10), 1779-1787.
- [18] Masunaga, E., & Komuro, S. (2020). Stratification and mixing processes associated with hypoxia in a shallow lake (Lake Kasumigaura, Japan). *Limnology*, 21(2), 173-186.
- [19] Román, E. M. (2017). Laguna Carén: Estudio de su hidrodinámica y calidad del agua, a partir de la instalación y operación de una estación de monitoreo ambiental.
- [20] Romero, G. (2018). Modelo termodinámico para evaluar la evolución a largo plazo de una laguna somera con aplicación en Laguna Carén, Chile.

- [21] Sáez, Bastián (2024). Caracterización de los procesos de estratificación y mezcla de una laguna somera a través del desarrollo de un modelo 3D. Aplicación Laguna Carén.
- [22] Zunino, J. (2018). Lagunas someras como ecosistemas centinelas de la variabilidad climática: respuesta de las comunidades fitoplanctónicas. [Tesis de Doctor en Biología] Universidad Nacional del Sur.

Anexos

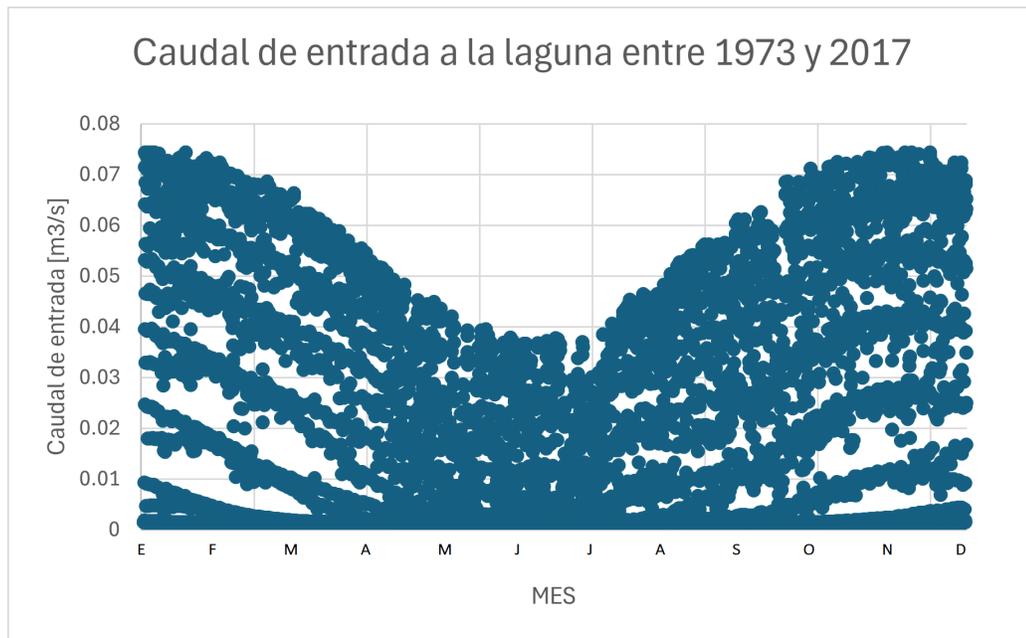


Figura A.1: Caudal de entrada a la laguna período comprendido entre años 1973 y 2017.

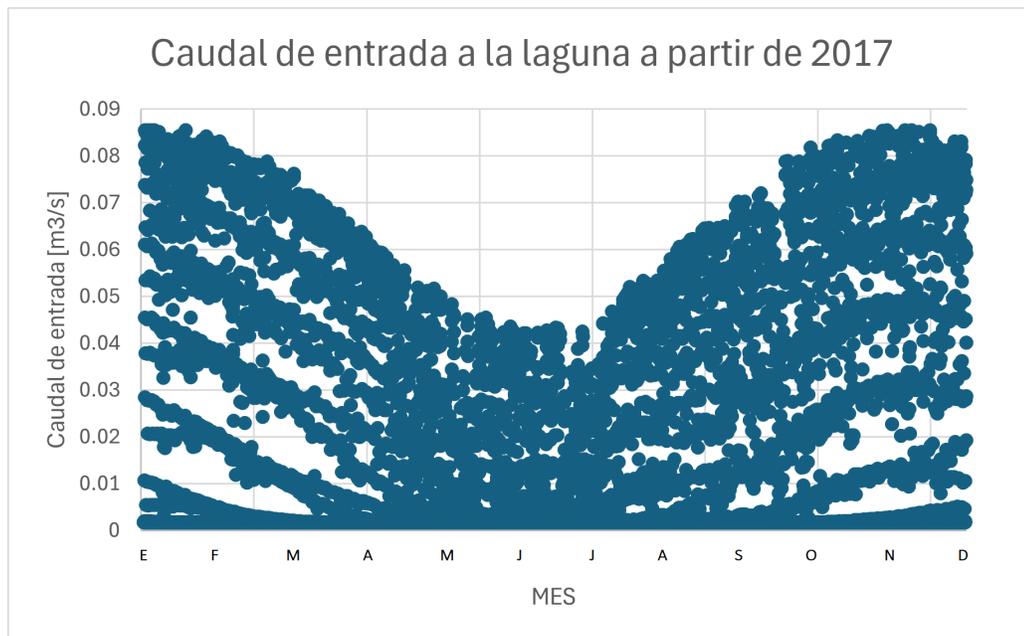


Figura A.2: Caudal de entrada a la laguna a partir del año 2017.

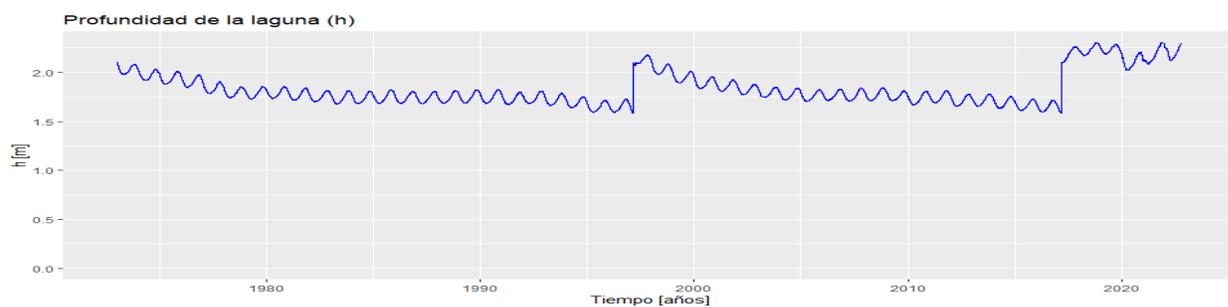


Figura A.3: Profundidad de la laguna en el punto de estudio en función del tiempo para modelación realizada en AEM3D.

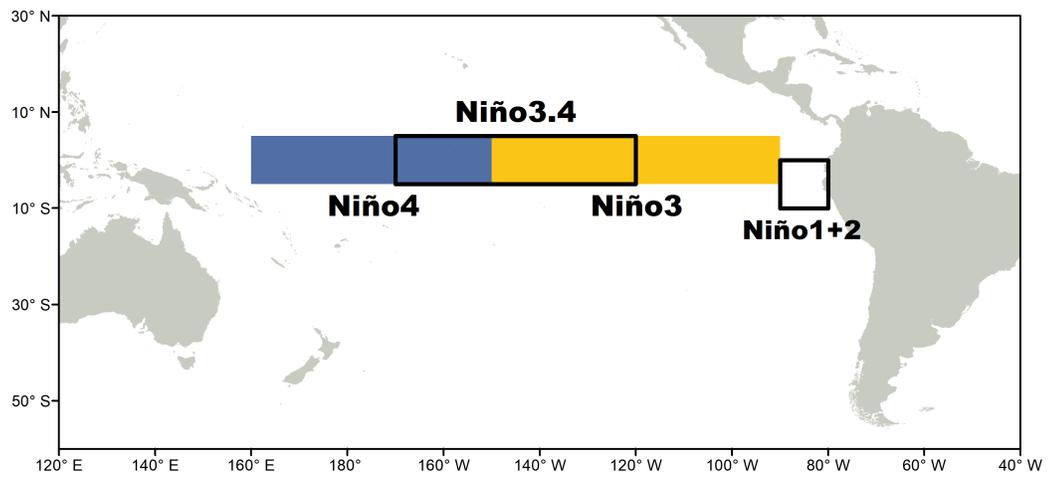


Figura A.4: Ubicación de la región 1+2. Fuente: CIIFEN (<https://www.ciifen.org/>).