

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXVI CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**CARACTERIZACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURAS EN EL LAGO
LLANQUIHUE PARA PERIODOS DE CAMBIO ESTACIONAL (18/10/2021-29/05/2022)**

JUAN JOSÉ GUTIÉRREZ SEPÚLVEDA¹
JUAN PABLO TORO LABBÉ²

RESUMEN

Este trabajo corresponde a una caracterización de la distribución espacial y temporal de temperaturas al interior del lago Llanquihue. Para lograr esto, se empleó el modelo numérico tridimensional semi implícito SI3D, una herramienta que permite cuantificar temperaturas, velocidad de corrientes y tasas de transporte a lo largo de la columna vertical de agua. Se analizaron las temperaturas en dos etapas con periodos de tiempo y puntos seleccionados estratégicamente. La primera etapa abarcó desde el 18 de octubre de 2021 hasta el 29 de mayo de 2022, con énfasis en cuatro puntos específicos del lago mientras que en la segunda etapa se analizaron los periodos del 01 de diciembre de 2021 al 01 de febrero de 2022, y del 01 de marzo al 01 de mayo de 2022 y se definieron 10 puntos de estudio, según un perfil transversal del lago, basado en una investigación muy reciente realizada por Abarca et al. (2023), y considerando la dirección promedio del viento en el lago.

De los resultados numéricos se deducen las tasas diarias de cambio de temperatura al interior del lago Llanquihue, así como el cambio temporal de la profundidad del epilimnion, relevante para entender los procesos de mezcla que ocurren en el lago.

¹Estudiante Ingeniería Civil, Universidad Andres Bello – j.gutierrezsepulve1@uandresbello.com

²Carrera de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Andres Bello – juan.toro.l@unab.cl

1. INTRODUCCION

La variabilidad de la temperatura en los lagos tiene una gran influencia sobre los procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren en ellos (Schmidt et al., 2018; Ahmedov, 2012). Los cambios de la temperatura interna de los lagos en periodos de cambio estacional dependen de varios factores que incluyen la velocidad del viento, la temperatura del aire, la humedad relativa y la radiación solar (Schmidt et al., 2018; Halfman, 1993). Cuantificar la distribución de temperaturas permite también comprender la distribución de densidades verticales (Boehler y Schultze, 2008), estimar los niveles de oxígeno en diferentes estratos del lago (Escobar et al., 2009) e incluso predecir la presencia de flora terrestre cercana al lago (O'Connor et al., 2011).

En Chile, los lagos patagónicos constituyen ambientes acuáticos relativamente poco estudiados (Abarca et al., 2023), lo cual es un impedimento para la comprensión de las respuestas de los lagos ante cambios que puedan producirse en el tiempo (Boehler y Schultze, 2008). La instrumentalización de los lagos y el uso de modelos 3D, constituyen por lo tanto herramientas muy útiles para el estudio de los cambios temporales en las propiedades de los lagos (Rueda, 2001; Smith et al., 2005; Valbuena, 2022; Abarca et al., 2023).

El Lago Llanquihue, se ubica en la región de Los Lagos y es el segundo lago más grande de Chile (Ortiz, 2020), con una superficie aproximada de 870 km² y una profundidad máxima cercana a los 317 metros. En términos de temperaturas, el lago presenta un comportamiento monomítico con estratificación en verano (Martínez, 2014), donde la termoclina se sitúa a una profundidad de aproximadamente 40 metros durante el periodo estival (Abarca et al., 2023).

Si bien, existe evidencia de estudios previos sobre las temperaturas en el lago Llanquihue (Geller, 1992), la información disponible es limitada y requiere un análisis más exhaustivo para comprender plenamente las características térmicas de este. En este contexto, se realizó una caracterización detallada de los patrones de temperatura en el lago Llanquihue, que incluye una descripción de la variabilidad temporal y espacial. Para ello, se utilizó el modelo computacional SI3D el cual permite desarrollar modelaciones hidrodinámicas en 3 dimensiones (Anguita., et al, 2015). Este modelo fue diseñado para su aplicación en estuarios (Llebot, 2007), pero ha sido adaptado para estudio de lagos tales como el Lago Tahoe (Rueda, 2001), Lago Titicaca (Céspedes y Flores, 2015), Clear Lake (Rueda et al., 2003), entre otros. El presente trabajo corresponde, por lo tanto, a una caracterización de la distribución de temperaturas en el lago Llanquihue para diversos intervalos comprendidos entre el 18/10/2021 y el 29/05/2022. En particular, se pretende cuantificar los cambios espaciales de temperatura en el lago Llanquihue para una profundidad y periodo de tiempo dados; definir los periodos de mayor cambio en las temperaturas y finalmente cuantificar las tasas de cambio en °C/día, para distintos periodos, ubicaciones y profundidades dentro del lago.

2. MODELO SI3D

SI3D funciona en base a las ecuaciones RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes), formadas por el conjunto de las tres ecuaciones de momentum, más la ecuación de conservación de la masa.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial z} + w \frac{\partial u}{\partial z} - f v = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_H \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_H \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_V \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \frac{\rho}{\rho_0} g - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (2)$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} + u \frac{\partial s}{\partial x} + v \frac{\partial s}{\partial z} + w \frac{\partial s}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_H \frac{\partial s}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_H \frac{\partial s}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_V \frac{\partial s}{\partial z} \right) + \Delta_s \quad (3)$$

$$\rho = \rho(s) \quad (4)$$

u, v, w = velocidades medias en los ejes x, y, z .

f = Parámetros de Coriolis.

ρ = Variación de densidad respecto a ρ_0 .

s = Escalar activo (temperatura o solidos suspendidos).

p = Presión.

A_H, A_V = Coeficiente de transferencia de momentum en régimen turbulento horizontal y vertical.

D_H, D_V = Coeficientes de transferencia para el escalar s .

Δ_s = Divergencia de la radiación solar descendente.

Para la resolución de estas ecuaciones, el modelo semi implícito SI3D utiliza un sistema trapezoidal Leapfrog de tres niveles (Smith, 2006), el cual es un método numérico utilizado para resolver ecuaciones diferenciales de segundo orden, distribuidas en el tiempo y sirve para resolver las ecuaciones que gobiernan el modelo. Para discretizar el dominio espacial, el software utiliza un sistema de grillas uniformes con diferencias finitas para los ejes “ x ” e “ y ”, lo cual permite integrar las coordenadas de la ubicación de los bordes del lago. Para la caracterización en profundidad a lo largo del eje z , utiliza un modelo multinivel (Rueda, 2001).

3. IMPLEMENTACION DEL MODELO

Se definieron cinco periodos de modelación, los cuales se dividen en 2 etapas, tal como se detalla en la Tabla 1. Para cada una de estas etapas se analizaron distintos puntos de interés dentro del lago, los que se muestran en la Figura 1.

Tabla 1. Resumen periodos de tiempo modelados

	Fecha inicio – Fecha fin
Etapa 1	18-10-2021 - 26-01-2022
	26-01-2022 - 11-04-2022
	11-04-2022 - 29-05-2022
Etapa 2	01-12-2021 - 01-02-2022
	01-03-2022 - 01-05-2022

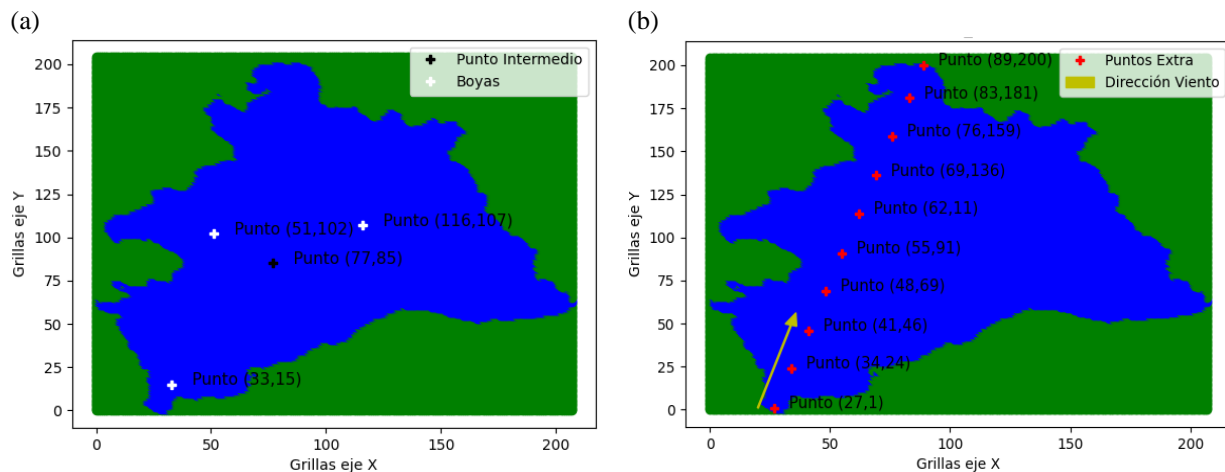


Figura 1. (a) Puntos analizados en la etapa 1; en color blanco se muestran los 3 puntos correspondientes a las boyas INNOBEX y en negro un punto intermedio definido para el estudio. (b) Puntos analizados en la etapa 2; en color rojo, se muestran los 10 puntos de muestreo los que conectan el punto de partida y el punto final propuesto por Abarca et al. (2023).

Para cada periodo de modelación fueron necesarios cinco documentos (Tabla 2), los que definen los inputs para el modelo SI3D.

Tabla 2. Inputs SI3D y programas utilizados

Documento	Programa Utilizado	Procesados en	Utilidad
h	LagoLlanquihue_BathyFormatting.m	Matlab	Grilla y Condiciones Geométricas
	LagoLlanquihue_GridGenerator.m	Matlab	
	Bathy2Si3D_LagoLlanquihue.py	Python	
surfbc	surfbc4si3d_Llanquihue_v7.m	Matlab	Condiciones de Borde
si3d_init	InitialConditions_LagoLlanquihue.py	Python	Temperaturas Iniciales
si3d_layer	InitialConditions_LagoLlanquihue.py	Python	Profundidad por Capa
si3d_inp	bloc de notas	Manualmente	Interfase

- **Grilla y condiciones geométricas:** El archivo “h” contiene la información geométrica del lago adaptada para el tamaño de grilla definida (200 metros para el eje x e y).
- **Condiciones iniciales (Temperaturas Iniciales y Profundidad por Capa):** Las condiciones iniciales fueron obtenidos en base a datos empíricos de temperatura para distintas profundidades en la columna de agua, en base a la misma información se obtienen ambos documentos. El punto (33,15), analizado en la Etapa 1, tiene asociado una profundidad de 45 metros, mientras que en la Etapa 2, se analizaron tres profundidades distintas: 0.5, 30 y 50 metros aproximadamente.
- **Condiciones de borde:** Aquí se define la duración de la modelación, además de contener las condiciones de borde ordenadas de tal forma que el modelo las pueda procesar. Esta

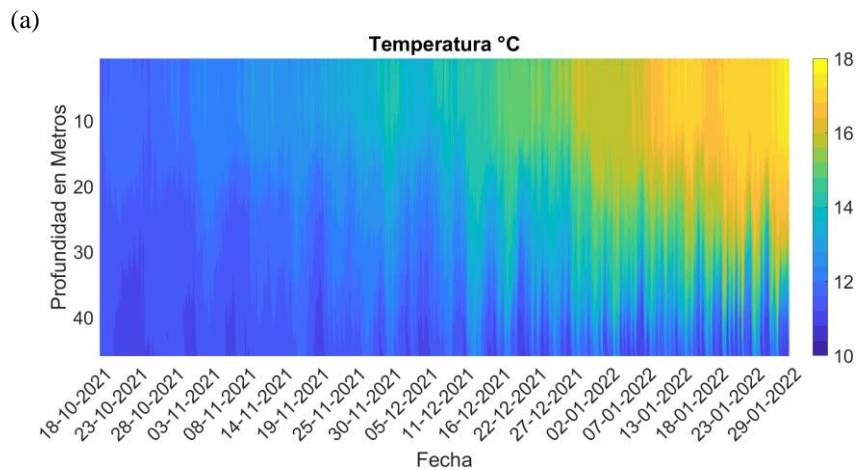
información se obtuvo desde una base de datos donde se encuentran registros de la temperatura en la superficie (°C), presión atmosférica (kPa), dirección (grados) y velocidad del viento (cm/s), humedad relativa (%) y radiación de onda corta (W/m^2) entre el 18 de octubre de 2021 y el 29 de mayo de 2022. Debido a que existían fechas sin datos disponibles fue necesario realizar un proceso de relleno de información. Para esto se ajustaron diversas distribuciones de probabilidad a los datos disponibles y luego fueron sometidos a una prueba de bondad de Kolmogorov para así seleccionar la distribución que más se asemejaba a la propia distribución de los datos. Posterior a esto se generaron datos de manera aleatoria. Una metodología alternativa podría considerar la sustitución de los datos faltantes con información proveniente desde una estación meteorológica cercana, algo que en esta oportunidad no fue estudiado.

4. RESULTADOS

El análisis fue dividido en dos etapas. La primera incluye el periodo entre el 18 de octubre de 2021 y el 29 de mayo de 2022, con 3 subperiodos (ver Tabla 1). Se analizaron 4 puntos, 3 de los cuales corresponden a la ubicación de boyas oceanográficas. La segunda etapa incluye los periodos del 01 de diciembre de 2021 al 01 de febrero de 2022 y del 01 de abril de 2022 al 01 de mayo de 2022. Se analizaron 10 puntos ubicados en una línea recta entre dos zonas de interés propuestas por Abarca et al. (2023).

4.1. RESULTADOS ETAPA 1

En la Figura 2 se presentan los resultados de la modelación para la ubicación (33,15), la cual tiene asociada una profundidad máxima de aproximadamente 45 metros y se encuentra en el lado sur del Lago Llanquihue.



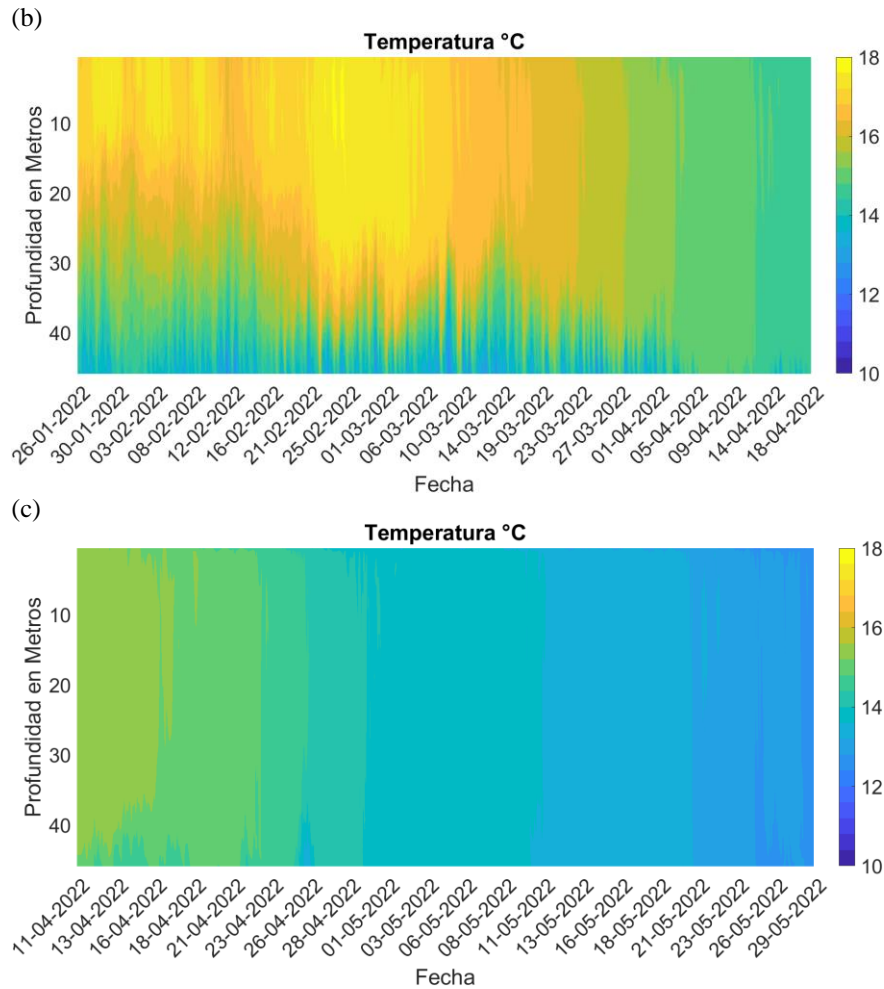


Figura 2. Temperaturas en la Vertical Punto (33,15) con una profundidad de 45 metros. (a) 18/10/2021 al 29/01/2022, (b) 26/01/2022 al 18/04/2022, (c) 11/04/2022 al 29/05/2022.

- a. Figura 2(a) - Periodo 18/10/2021 al 26/01/2022: Se observa que, en los primeros días de este periodo hasta el 15 de diciembre aproximadamente, existe una menor diferencia de temperaturas entre las capas superiores e inferiores del lago, con variaciones menores a 2°C . Después del 15 de diciembre, se observa un aumento sostenido de la temperatura del lago. Aunque solo se muestra el punto (33,15), la temperatura en la superficie del lago aumenta en, aproximadamente, $0.06^{\circ}\text{C}/\text{día}$ para los 4 puntos, partiendo con 11.5°C aproximadamente para terminar con una temperatura promedio de 17.4°C . Este aumento se relaciona con el cambio estacional de primavera-verano.
- b. Figura 2(b) - Periodo 26/01/2022 al 11/04/2022: Desde los primeros días de este periodo hasta aproximadamente el 10 de febrero, se nota un leve aumento en la temperatura de las capas superficiales del lago, de aproximadamente 0.5°C en el periodo de 21 días. Posterior al 10 de febrero, la temperatura empieza a descender con una tasa de cambio aproximada de 0.06°C por día. Este descenso tiene relación con el periodo de cambio estacional entre verano y otoño. La temperatura máxima modelada fue de 18.00°C y ocurre el día 02 de marzo de 2022.

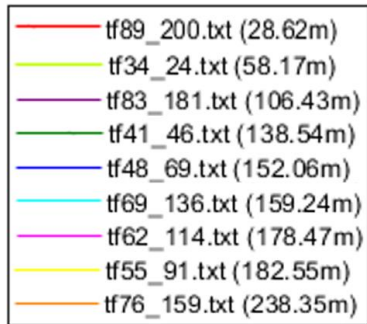
- c. Figura 2(c) - Periodo 11/04/2022 al 29/05/2022: Se obtuvo una temperatura máxima de 15.6 °C el día 11 de abril de 2022. Desde los primeros días de mayo y debido al descenso de la temperatura ambiental, la estratificación del lago comienza a disminuir, al igual que la temperatura en las capas superiores, para llegar a finales de mayo a temperaturas cercanas a los 12°C.

4.2. RESULTADOS ETAPA 2

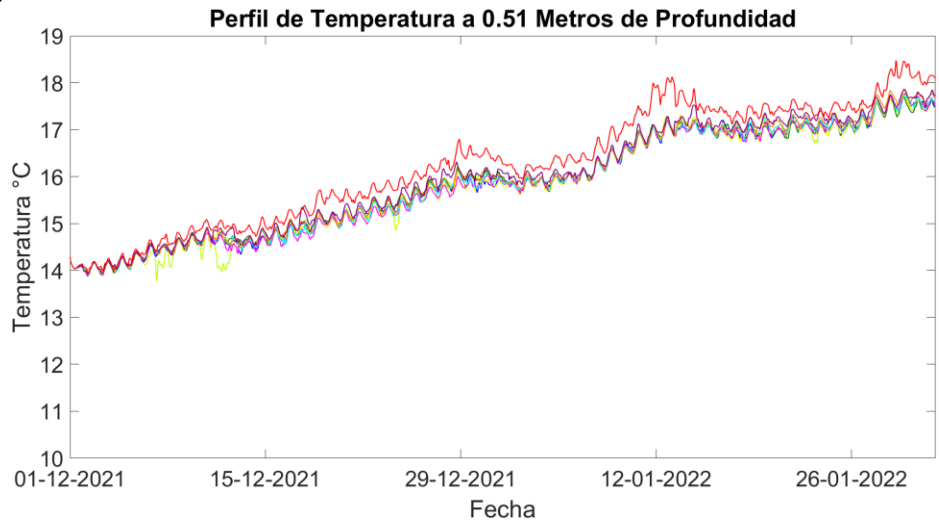
En la Figura 3(a) se muestran los 9 puntos modelados identificados con distintos colores; se especifican las coordenadas correspondientes a cada punto en el lago y las correspondientes profundidades máximas. Por ejemplo, la nomenclatura “tf89_200.txt (28.62m)” corresponde al punto (89,200) que tiene una profundidad máxima asociada de 28.62 m. En la Figura 3(b), (c) y (d), se presentan las temperaturas obtenidas para el periodo de tiempo comprendido entre el 01/12/2021 y el 01/02/2022. Estos resultados ofrecen información sobre las temperaturas modeladas para los puntos en estudio para tres profundidades distintas. El punto (89,200) - línea de color rojo - tiene asociado una profundidad máxima de 28.62 m, entonces desaparece de las Figuras 3(c) y 3(d) que tienen profundidades máximas superiores.

En la Figura 4 se presentan los resultados correspondientes al lapso comprendido entre el 01 de marzo de 2022 y el 01 de mayo de 2022, periodo en el cual se observó una disminución de la temperatura del lago. Los gráficos, tienen la misma distribución de colores representada en la Figura 3(a) y corresponden a los mismos puntos estudiados en el periodo anterior.

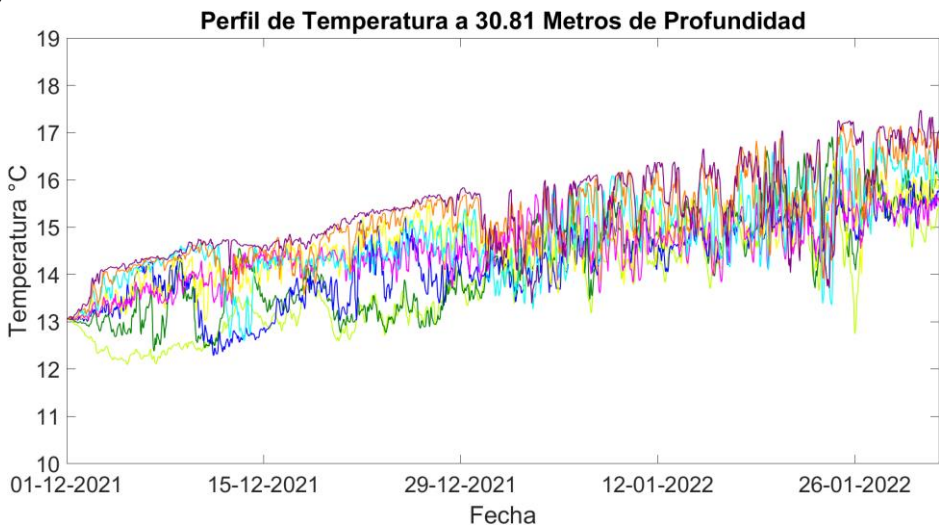
(a)



(b)



(c)



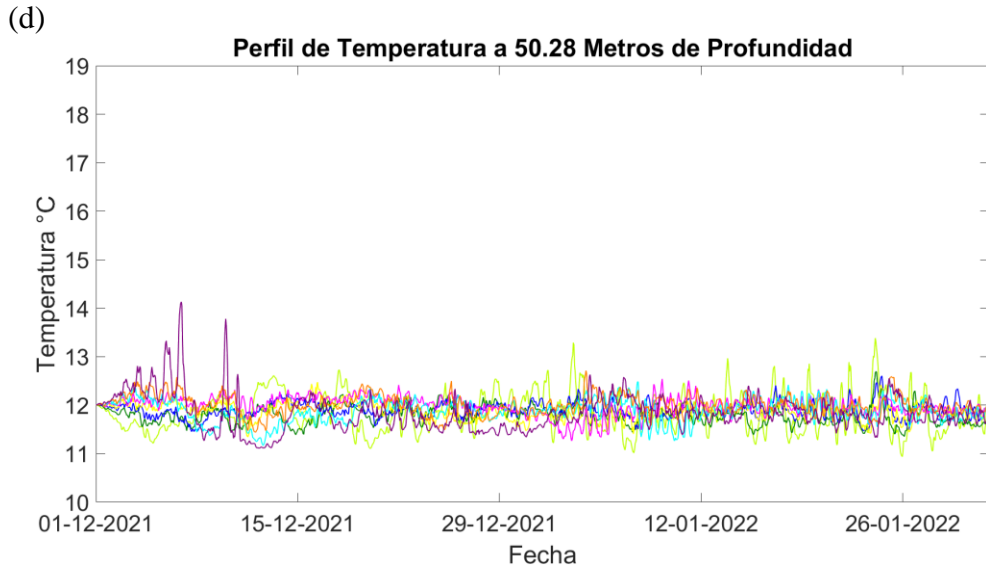
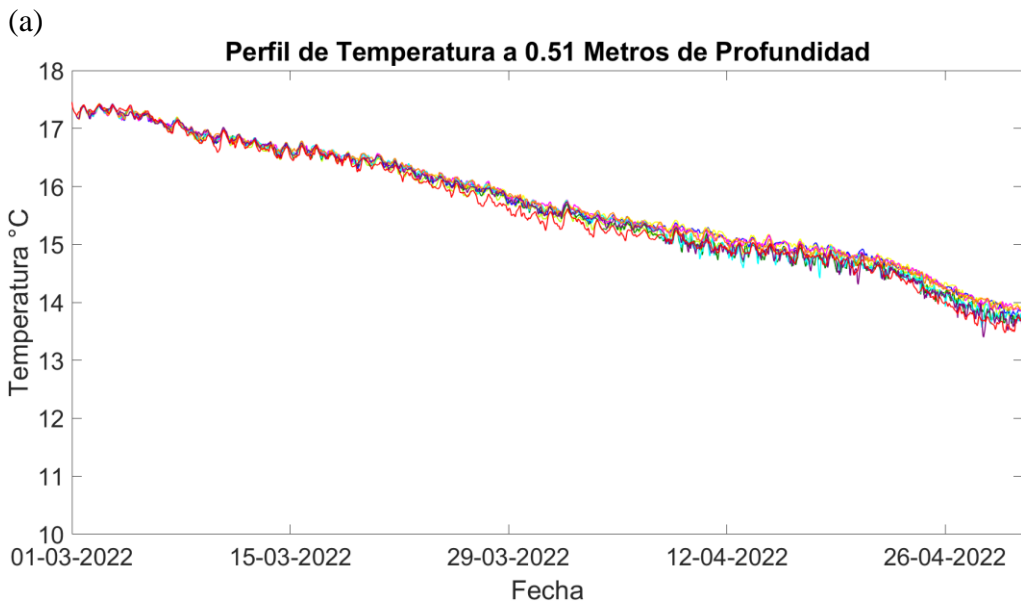


Figura 3. (a) Ubicación de puntos y profundidades máximas de acuerdo a colores, (b) Perfil Temperatura 0.5 metros 01/12/2021 al 01/02/2022, (c) Perfil Temperatura 30 metros 01/12/2021 al 01/02/2022, (d) Perfil Temperatura 50 metros 01/12/2021 al 01/02/2022.



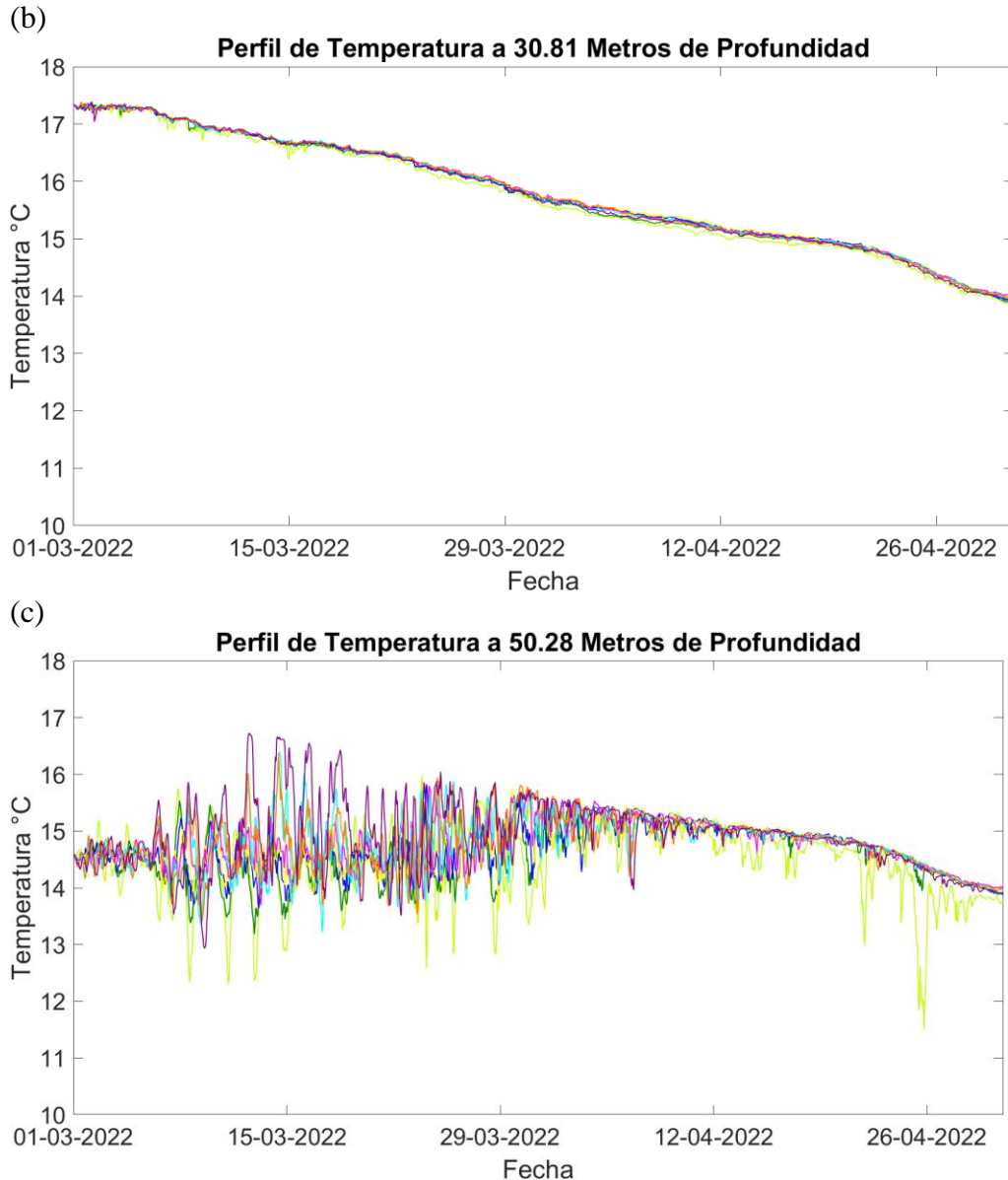


Figura 4. Perfil de temperaturas para el periodo 01/03/2022 - 01/05/2022 para tres profundidades. (a) 0.51 metros, (b) 30.81 metros, (c) 50.28 metros.

- d. Figura 3(b): La temperatura aumenta de manera constante y lineal durante todo el periodo con una tasa de cambio de $0.05^{\circ}\text{C}/\text{día}$, y una temperatura inicial de 14.26°C . Esta tendencia es similar en todos los puntos modelados a excepción del punto (89,200) el cual se encuentra a menor profundidad y es el más cercano a la orilla (línea color rojo). Este se muestra con una mayor temperatura durante todo el periodo modelado y con una tasa de cambio de $0.06^{\circ}\text{C}/\text{día}$, levemente mayor que el resto de los puntos.
- e. Figura 3(c): La temperatura sigue en aumento durante todo el periodo, con una tasa de cambio de $0.04^{\circ}\text{C}/\text{día}$. El punto (34,24), está levemente a una menor temperatura promedio que el resto de los puntos. Este es el nuevo punto con menor profundidad, ya que se superó la profundidad

máxima del punto (89,200).

- f. Figura 3(d): La variabilidad de las temperaturas es muy pequeña para el periodo analizado.
- g. Figura 4(a): La temperatura disminuye de manera constante y lineal durante todo el periodo con una tasa de cambio de $0.06^{\circ}\text{C}/\text{día}$, con una temperatura inicial de 17.45°C . Esta tendencia es similar en todos los puntos modelados.
- h. Figura 4(b): Se observa la misma tendencia que en los gráficos anteriores, en donde las temperaturas bajan de manera lineal, ambas con una misma tasa de cambio de $0.05^{\circ}\text{C}/\text{día}$. La temperatura inicial en ambos casos es de 17.38°C .
- i. Figura 4(c): Se observa que la tasa de cambio es en promedio pequeña, aunque se identifican ciertas oscilaciones. Para los 50.28 metros, la temperatura media es de aproximadamente 14.5°C .

5. CONCLUSIONES

El análisis de temperaturas en el lago Llanquihue fue dividido en dos etapas: la primera, realizada para 4 puntos dentro del lago, en 3 periodos que van desde el 18 de octubre de 2021 al 26 de enero de 2022; del 26 enero de 2022 al 11 de abril de 2022 y del 11 de abril de 2022 al 29 de mayo de 2022. En la segunda etapa se modelaron 10 puntos, entre los periodos del 01 de diciembre de 2021 al 01 de febrero de 2022 y entre el 01 de marzo de 2022 al 01 de mayo de 2022.

1. Durante los periodos estivales, la profundidad en que se encuentra el metalimnion experimenta variaciones. Esto implica que en el periodo en que la temperatura ambiente alcanza su nivel más alto (20/02/2022 – 05/03/2022), el inicio del epilimnion se sitúa en profundidades menores (35 metros) y que a medida que la temperatura desciende, desde el 14/03/2022, este aumenta su profundidad (hasta los 50 metros) y siempre con un límite inferior que no supera los 55 metros de profundidad.
2. Desde los 55 metros de profundidad, la temperatura del agua comienza a ser constante sin grandes variaciones, independiente de los cambios de temperatura que puedan producirse en capas superiores. Esto marca el inicio del hipolimnion.
3. Las capas superficiales del lago (hasta los 30 metros de profundidad) son las más afectadas por los cambios en las condiciones de borde producidos por los periodos estivales, teniendo a una profundidad de 0.5 metros tasas de cambio cercanas a los $0.06^{\circ}\text{C}/\text{día}$, tanto en los periodos de aumento de la temperatura ambiente (01/12/2021 al 01/02/2022) como en aquellos donde desciende (01/03/2022 al 01/05/2022).
4. En los puntos (89,200) y (34,24), que son los que tienen menor profundidad máxima (29 y 58 metros respectivamente), la temperatura a una profundidad de 0.5 metros fue levemente mayor que en el resto de los puntos modelados en la Etapa 2, con diferencias máximas de 0.5°C en el caso del punto (89,200).
5. En el periodo 01/12/2021 al 01/02/2022 se inicia con una temperatura de 14°C a 0.5 metros de profundidad y termina con 18°C , marcando 4°C de diferencia, la que va disminuyendo a medida que se va descendiendo en la columna de agua. Para el periodo 01/03/2022 al 01/05/2022 se inicia con una temperatura de 17.5°C a 0.5 metros de profundidad y termina con 13.5°C , lo que marca una diferencia de 4°C .

6. La temperatura máxima fue de 18.00°C el día 25 de febrero de 2022 a una profundidad de 0.5 metros de profundidad y la temperatura mínima fue de 10.6°C a contar desde los 60 metros de profundidad el día 02 de marzo de 2022.

REFERENCIAS

- Abarca, J., Ulloa, H. N., y Niño, Y. (2023). Basin-scale hydrodynamics and physical connectivity in a great Patagonian Lake. *Journal of Great Lakes Research*, 49(1), 172-189.
- Ahmedov, B. (2012). Low-cost semi-implicit methods for the solution of three-dimensional transport models.
- Anguita, M., Acosta, M., Fernández-Baldomero, F. J., y Rueda, F. J. (2015). Scalable parallel implementation for 3D semi-implicit hydrodynamic models of shallow waters. *Environmental Modelling & Software*.
- Boehrer, B., y Schultze, M. (2008). Stratification of lakes. *Reviews of Geophysics*.
- Céspedes, C. A., y Flores, J. V. (2015). Calibración del Modelo Numérico Semi Implícito Tridimensional, SI3D, de Transporte y Flujo Hidrodinámico, para el estudio del lago Titicaca.
- Escobar, J., Buck, D. G., Brenner, M., Curtis, J. H., y Hoyos, N. (2009). Thermal stratification, mixing, and heat budgets of Florida lakes. *Fundamental and applied limnology*.
- Geller, W. (1992). The temperature stratification and related characteristics of Chilean lakes in midsummer. *Aquatic Sciences*.
- Halfman, J. D. (1993). Water column characteristics from modern CTD data, Lake Malawi, Africa. *Journal of Great Lakes Research*.
- Llebot, C. (2007). Hydrodynamic characterisation of a Mediterranean bay using Si3D, a three-dimensional model for estuarine circulation.
- Martínez Zaror, G. (2014). Evaluación de la condición trófica de la red de control de lagos de la DGA.
- O'Connor, M. I., Gilbert, B., y Brown, C. J. (2011). Theoretical predictions for how temperature affect the dynamics of interacting herbivores and plants. *The American Naturalist*.
- Ortiz Barría, Á. M. (2020). Análisis temporal del nivel del agua de los lagos: Todos los Santos, Llanquihue y Ranco, basado en datos satelitales.
- Rueda, F. J., Schladow, S. G., y Clark, J. F. (2008). Mechanisms of contaminant transport in a multi-basin lake. *Ecological Applications*.
- Rueda-Valdivia, F. J. (2001). A three-dimensional hydrodynamic and transport model for lake environments. University of California, Davis.
- Schmidt, S. R., Gerten, D., Hintze, T., Lischeid, G., Livingstone, D. M., y Adrian, R. (2018). Temporal and spatial scales of water temperature variability as an indicator for mixing in a polymictic lake. *Inland Waters*.
- Smith, P. E. (2006). A semi-implicit, three-dimensional model for estuarine circulation (No. 2006-1004).
- Smith, P. E., Donovan, J. M., y Wong, H. F. N. (2005). Applications of 3D hydrodynamic and particle tracking models in the San Francisco bay-delta estuary.
- Valbuena, S. A., Bombardelli, F. A., Cortés, A., Largier, J. L., Roberts, D. C., Forrest, A. L., y Schladow, S. G. (2022). 3D flow structures during upwelling events in lakes of moderate size. *Water Resources Research*.