



## I CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA AMBIENTAL EN SISTEMAS ACUÁTICOS, CChIASA

### ONDAS INTERNAS EN EL LAGO LLANQUIHUE DURANTE EL PERIODO DE ESTRATIFICACIÓN

JAVIERA ABARCA<sup>1</sup>  
YARKO NIÑO<sup>2</sup>

#### RESUMEN EXTENDIDO

El Lago Llanquihue se encuentra en el sur de Chile y es el tercer lago más grande de Sudamérica, con una longitud de 42 km y una profundidad máxima de 300 m. El lago es monomítico y en verano la termoclina se encuentra a una profundidad de aproximadamente 40 m. La estratificación máxima es en los primeros días de Febrero, donde la diferencia de temperatura entre el epilimnion e hipolimnion llega a 6.5°C.

En verano el lago es forzado diariamente por una brisa de vientos norte, la cual se detiene en la madrugada y comienza nuevamente alrededor de las 8 am. Sin embargo, en ciertas ocasiones estos vientos pueden no detenerse por completo durante 6 días, alcanzado velocidades promediadas por hora de 16 m/s. Estos factores se combinan para convertir el lago en un lugar ideal para el estudio de ondas internas afectadas por Coriolis, dado que en verano se alcanza un número de Burger igual a 0,23.

La importancia de las ondas internas en los lagos radica en el transporte de masa y momentum, especialmente en lagos con gran tiempo de residencia (Imberger 1994), lo cual produce la distribución de nutrientes (especialmente en el epilimnion, donde se producen los procesos biológicos), contaminantes y sedimentos (Imberger 1988).

Las ondas internas producen una variedad de procesos físicos, químicos y biológicos, además de tener un importante rol en energizar la mezcla vertical y dispersión horizontal en el lago. Por un lado, la mezcla vertical en el metalimnion altera la interfaz natural de la estratificación y facilita la incorporación de nutrientes provenientes del hipolimnion a la capa superficial. Por otro lado, las ondas internas junto con la acción de las corrientes generadas por el viento, producen dispersión horizontal (Gómez-Giraldo et al. 2006). Por último, otra consecuencia es que se puede producir la resuspensión de sedimentos, nutrientes y contaminantes. (Gloor et al. 1994). Es por esto que entender las ondas internas conlleva al conocimiento de la calidad de las aguas en los lagos.

---

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile. Contacto: javiera.abarca.m@ug.uchile.cl

<sup>2</sup> Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile. Advanced Mining Technology Center. Contacto: ynino@ing.uchile.cl



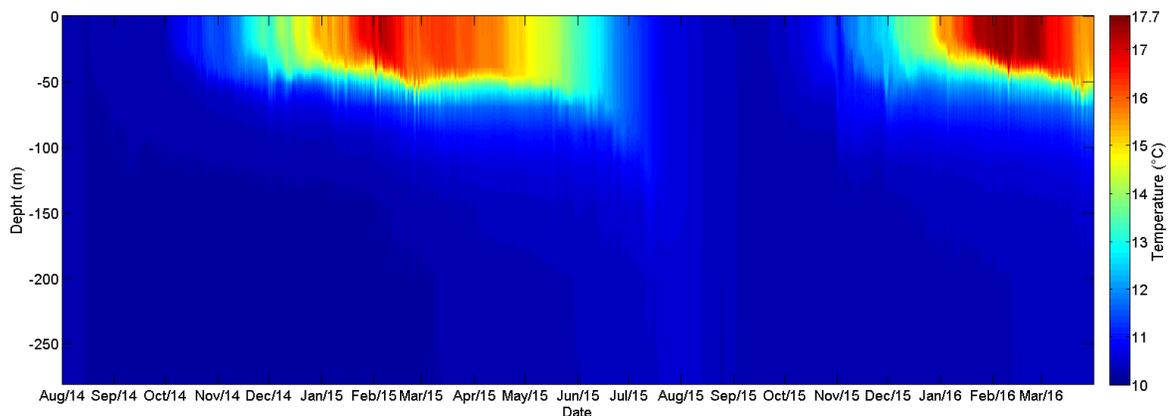
Se implementó un modelo hidrodinámico en tres dimensiones (Delft3d-Flow) para simular los flujos y la estratificación en el lago. Los datos de entrada al modelo se obtuvieron de una estación meteorológica ubicada en la costa norte del lago, la cual registra vientos, temperaturas, humedad y radiación solar. Para validar el modelo radiativo, se comparó el perfil de temperaturas obtenido del modelo con perfiles obtenidos de un estudio anterior realizado por Campos (1988). La razón por la cual se hizo esta comparación, se debe a que no existen mediciones posteriores a dicho estudio en el lago. El resultado obtenido de la evolución temporal del perfil de temperaturas en un punto ubicado en el centro del lago se muestra en la Figura 1.

Los resultados de la simulación mostraron que en los meses de verano, existen ondas internas Poincaré altamente energéticas con un periodo aproximado de 17.5 h en el metalimnion e hipolimnion (Figura 2). Por otro lado, se observaron también ondas Kelvin con propagación de forma ciclónica, y con velocidades paralelas a los bordes del lago, en las zonas cercanas a la costa. Estas ondas, a una profundidad de 20 m, tienen un periodo de 60 h, sin embargo a una profundidad de 60 m el periodo aumenta a 140 h, para un mismo evento de viento.

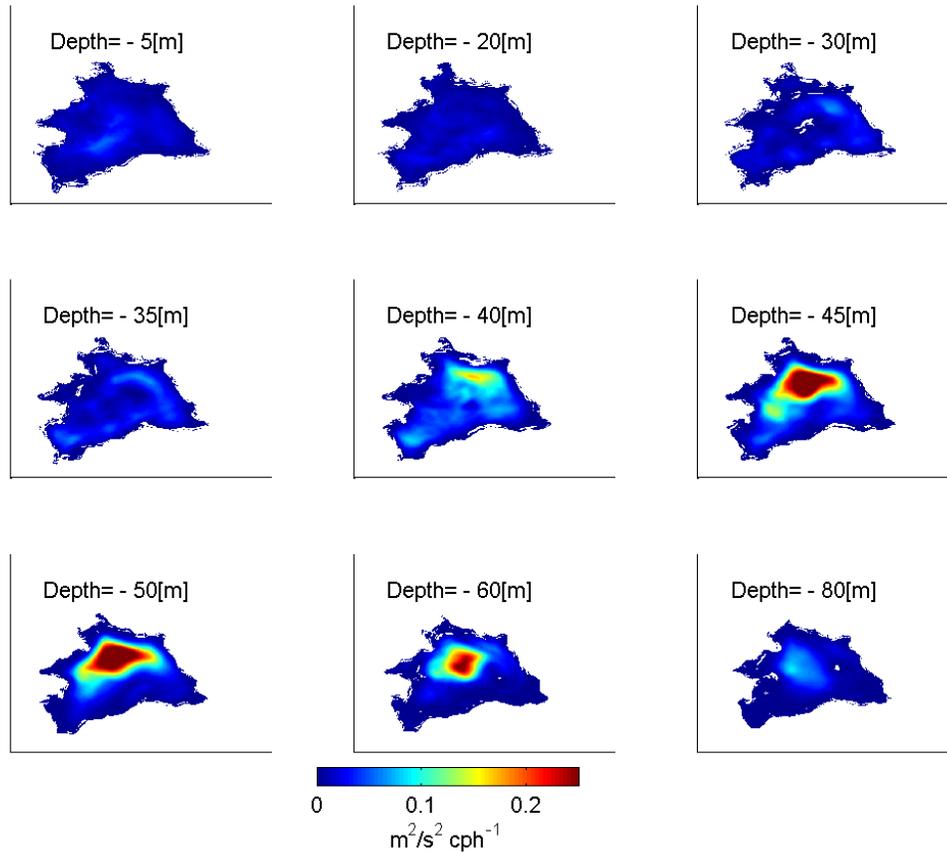
El periodo asociado a la frecuencia inercial en el lago es de 18.2 h, lo que nos dice que solo pueden existir ondas Poincaré con periodo menor al periodo inercial (o bien superinerciales). Es decir, las ondas de periodo 17,5 h caen en esta categoría. Además, se realizó un análisis modal que dio como resultado un modo normal con periodo 16.12 h, bastante cercano al periodo encontrado en el modelo.

Por otro lado, en el análisis modal realizado, también se observó un modo normal de periodo 56.4 h, cercano también a la onda Kelvin observada en el epilimnion.

Con el fin de estudiar ondas internas producidas por eventos de viento más largos, se realizarán simulaciones con vientos de duración de 3 a 6 días.



**Figura 1:** Evolución del perfil de temperaturas desde Agosto del 2015 a Marzo del 2016, para un punto en el centro del lago



**Figura 2.** Componente anticiclónica de la densidad espectral entre el 9 y 31 de Enero del 2015, para un periodo de onda de 17.6 horas a distintas profundidades.

## Referencias

- Campos, H., Stefen, W., Aguero, G., Parra, O., and Zúñiga, L. (1988). Limnological study of Lake Llanquihue (Chile). Morphometry, physics, chemistry, plankton and primary productivity. *Arch. Hydrobiol. Suppl.* 81:37–67.
- Gloor, M., Wüest, A., & Münnich, M. (1994). Benthic boundary mixing and resuspension induced by internal seiches. *Hydrobiologia*, 284(1), 59-68.
- Gómez-Giraldo, A., Imberger, J., & Antenucci, J. P. (2006). Spatial structure of the dominant basin-scale internal waves in Lake Kinneret. *Limnology and oceanography*, 51(1), 229.
- Imberger, J. 1994. Transport processes in lakes: A review, p. 99– 193. In R. Margalef [ed.], *Limnology now: A paradigm of planetary problems*. Elsevier.
- Imberger, J., 1998: Flux paths in a stratified lake: A review. *Physical Processes in Lakes and Oceans*, J. Imberger, Ed., Coastal and Estuarine Studies, Vol. 54, Amer. Geophys. Union, 1–17.



Stocker, R., & Imberger, J. (2003). Energy Partitioning and Horizontal Dispersion in a Stratified Rotating Lake\*. *Journal of Physical oceanography*, 33(3), 512-529.