



**UNIVERSIDAD DE CHILE**

**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**

**EFECTO DE LA OPERACIÓN HYDROPEAKING EN LA HIDRODINÁMICA DE UN  
EMBALSE ESTRATIFICADO: EMBALSE RAPEL, CHILE CENTRAL**

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA,  
MENCIÓN RECURSOS Y MEDIO AMBIENTE HÍDRICO**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**GERMÁN ESTEBAN IBARRA SÁNCHEZ**

**PROFESOR GUIA**

**ALBERTO DE LA FUENTE STRANGER**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN**

**YARKO NIÑO CAMPOS**

**MANUEL CONTRERAS LEIVA**

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por CONICYT, a través de la beca del Programa de Formación de Capital Humano Avanzado

**SANTIAGO DE CHILE**

**MAYO 2013**

RESUMEN DE LA TESIS  
PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL Y MAG. CS.  
ING. MENC. REC. Y MED. AMB. HIDR.  
POR: GERMÁN IBARRA SÁNCHEZ  
FECHA: 08/05/2013  
PROF. GUÍA: SR. ALBERTO DE LA FUENTE

## **EFFECTO DE LA OPERACIÓN HYDROPEAKING EN LA HIDRODINÁMICA DE UN EMBALSE ESTRATIFICADO: EMBALSE RAPEL, CHILE CENTRAL**

El embalse Rapel fue construido en 1968 con el propósito de generación eléctrica, en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins. Originalmente poseía una profundidad máxima de 85 m, pero actualmente la depositación de sedimentos ha elevado el fondo hasta los 55 m de profundidad. El embalse se forma por la unión de los ríos Cachapoal y Tinguiririca, que aportan el 86% de los caudales afluentes, con el estero Alhue. El embalse inunda una superficie máxima de 95 km<sup>2</sup> y tiene una morfología dendrítica similar a una "Y". La operación de la central hidroeléctrica está definida económicamente por el Centro de Descarga Económico de Carga (CDEC-SIC). Esto induce una operación que concentra las extracciones en los horarios puntas (operación hydropeaking) cuando la demanda energética es máxima. La central hidroeléctrica tiene una potencia instalada de 360 MW a través de la operación de 5 turbinas con una capacidad máxima de 110 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> cada una. El objetivo de esta tesis es estudiar los efectos de la operación hydropeaking de la central hidroeléctrica Rapel sobre la hidrodinámica de su embalse, mediante la combinación de mediciones en terreno y simulaciones numéricas llevadas a cabo por el modelo tridimensional *Estuary, Lake and Coastal Ocean Model* (CWR-ELCOM).

La metodología llevada a cabo considera la toma de información en terreno a partir de una cadena de termistores ubicada en las cercanías del muro y el registro de información de velocidad y dirección del viento, temperatura ambiental y humedad relativa, entre otros, partir de una estación meteorológica. La serie asociada a las extracción de caudales para la generación eléctrica se obtiene con una discretización horaria a partir de los registros de energía producida registrados por el CDEC-SIC.

Estos datos medidos en terreno se usan en la construcción de un modelo tridimensional del embalse utilizando CWR-ELCOM. El modelo es capaz de recrear la hidrodinámica interna de lagos y embalse, sujeto a los distintos forzantes ambientales y antropogénicas. Dos escenarios de operación fueron analizados: La operación real de la central con hydropeaking y un escenario ficticio en que se suprimen los peaks de descarga. Dos periodos de tiempo distintos fueron analizados, primavera/verano y otoño, lo que permite incluir en el análisis distintas condiciones estacionales y de operación.

Se muestra que la ubicación de la termoclina esta determinado tanto por la profundidad de la toma de salida y de la magnitud de las descargas. Un análisis espectral muestra una fuerte correlación entre las extracciones y la excitación de las ondas internas, con un periodo preponderante de 24 h. Más aún, los efectos de la operación hydropeaking están restringidos a una región que se extiende hasta 5 km del muro, donde es posible observar una mayor capacidad de mezcla alrededor de la extracción y una dispersión horizontal menor. Se concluye que la operación hydropeaking tiene un impacto significativo en la hidrodinámica del embalse, lo que indica que la variabilidad de las extracciones durante el día debe ser considerada en los estudios de estos sistemas.

## **AGRADECIMIENTOS**

Me gustaría agradecer al profesor Alberto de la Fuente por su apoyo en los últimos años mis últimos años de carrera, participando en todo momento en el desarrollo de la tesis y brindándome la oportunidad de trabajar activamente en la docencia. Muchas gracias por la buena onda. Quiero agradecer al profesor Yarko Niño quien en gran medida incentivo y motivo mi gusto por la ingeniería hidráulica y todo el conocimiento entregado como uno de los mejores profesores que tuve en mi vida universitaria. Además, muchas gracias a Manuel Contreras por sus acertados comentarios en esta tesis y el ejemplo vida profesional.

Gracias al Centre for Water Research de la University of Western Australia por proporcionar el modelo ELCOM para el desarrollo de esta tesis. Gracias a la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica (CONICYT) por la beca que me otorgaron, gracias a la cual pude realizar este Magister y al Centro de Ecología Aplicada, por el apoyo económico y el apoyo en las campañas de terreno.

Por sobre todos quiero agradecer a mis padres, Germán y Any, por todo el apoyo y amor entregado durante toda mi vida. Sin ustedes nada de esto habría sido posible. Gracias por todo el esfuerzo que realizan día a día para que nosotros, sus hijos, salgamos adelante. Gracias a toda mi familia, el Fabi, la Paula y la Yeya por todos los momentos vividos, buenos y malos, que me han llevado hasta aca.

Finalmente, gracias a todos mis amigos de la universidad que hicieron de esta experiencia algo inolvidable. En especial a mis compañeros de magister Maxi y Edward que hicieron más grato la estadía en la oficina. Gracias por todos esos buenos momentos.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>1</b>
2.1	General .....	1
2.2	Específicos .....	2
<b>3</b>	<b>ORGANIZACIÓN DEL INFORME</b> .....	<b>2</b>
<b>4</b>	<b>ÁREA DE ESTUDIO</b> .....	<b>2</b>
<b>5</b>	<b>METODOLOGÍA</b> .....	<b>3</b>
5.1	Campaña de terreno .....	3
5.2	Modelo numérico .....	3
5.3	Análisis de ondas internas.....	3
5.4	Análisis del potencial de mezcla.....	4
5.5	Efecto del viento sobre las extracciones de agua.....	4
5.6	Transporte de un compuesto no conservativo.....	4
<b>6</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>5</b>
6.1	Análisis de la información medida .....	5
6.2	Simulaciones del perfil de temperaturas .....	5
6.3	Análisis de ondas internas.....	5
6.4	Mezcla potencial .....	6
6.5	Efecto del Viento .....	6
6.6	Distribución horizontal de un compuesto no-conservativo .....	6
<b>7</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>7</b>
<b>8</b>	<b>REFERENCIAS</b> .....	<b>8</b>

### ANEXOS

#### ANEXO A

Publicación enviado a revista internacional ISI

#### ANEXO B

Publicación presentada en congreso latinoamericano de hidráulica

#### ANEXO C

Publicación presentada en congreso nacional de hidráulica

#### ANEXO D

Poster presentado en congreso internacional de Manejo de Embalses

# 1 INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, se ha visto en Chile una gran proliferación de lagos artificiales producto de la construcción de diversas plantas hidroeléctricas. Por la geografía particular del país, esta constituye una muy buena opción para suplir la creciente demanda de energía. Sin embargo, y con el paso del tiempo, se han ido agotando los lugares idóneos para la construcción de este tipo de obras, ya sea porque las condiciones topográficas no son las ideales o por la lejanía de los centros de abastecimiento. Esto, unido a la actual legislación de impacto ambiental y la renovada conciencia medioambiental, hace necesario el desarrollo de modelos más detallados que permitan predecir con precisión el comportamiento hidrodinámico y ambiental del lago inducido por los distintos afluentes, los agentes meteorológicos y, en el caso de un embalse, las reglas de operación que definen su funcionamiento. Esta preocupación es extensible a cualquier proyecto localizado en estuarios o en la costa marina, ya sea por la mirada ambiental o por su carácter recreativo.

Desde este punto de vista, el desarrollo de esta tesis tiene la intención de aportar al colectivo nacional una herramienta de modelación tridimensional de lagos, estuarios y costas, lo que permite una simulación más detallada y la descripción de procesos que no son posibles de reproducir con las técnicas que se utilizan en la actualidad. La potencialidad de este instrumento de modelación se amplía cuando se considera su módulo complementario de calidad de aguas, que permite cuantificar diversos parámetros físico-químicos y biológicos, señalando el estado del ecosistema acuático del cuerpo de agua.

En particular, el embalse Rapel resulta un lugar de interés para este tipo de estudio. Este lago artificial fue construido por ENDESA en los años 60 para efectos de generación hidroeléctrica. Desde ese entonces a la fecha, numerosas casas se han construido en su ribera, convirtiéndolo en un lugar importante de turismo y recreación (Vila et al., 2000, DGA, 2004). Este embalse ha cambiado mucho desde la fecha de su construcción. Por una parte su batimetría ha variado radicalmente, donde producto del transporte de sedimentos su profundidad máxima se ha reducido en más de 30 metros. Además, numerosos problemas de calidad de aguas se han sucedido en la última década, llegando a ser necesario vaciar sus aguas con el objetivo de limpiarlas. Finalmente, y producto de la conexión de la central Rapel al Sistema Interconectado Central, la generación presenta una distribución que concentra las descargas en un periodo de pocas horas de alta demanda energética, lo que se denomina hydropeaking. Con este estudio se pretende analizar como la operación económica de la central hidroeléctrica Rapel influencia la hidrodinámica y los procesos de transporte en el embalse.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 *General*

Estudiar la hidrodinámica del embalse Rapel, acoplado una modelación tridimensional del mismo con información obtenida en terreno, considerando la operación hydropeaking de su central hidroeléctrica.

## 2.2 Específicos

- Estudiar de manera conceptual y analítica, los procesos hidrodinámicos que pueden ocurrir en el Lago, considerando su forma particular.
- Generar un modelo tridimensional del lago Rapel que permita simular las distintas descargas al cuerpo de agua y las forzantes que inducen mezcla en él, acoplándolo con la información meteorológica disponible y con la estadística de generación que registra la central hidroeléctrica ubicada en el Lago.
- Analizar las ondas internas del embalse y su evolución temporal.
- Estudiar la capacidad de mezcla inducida por la operación de central.
- Evaluar la importancia del viento en la hidrodinámica del embalse por sobre la influencia de las extracciones
- Analizar el transporte de compuestos que se realiza en el embalse y las posibles zonas en las que se podría favorecer el crecimiento de algas

## 3 ORGANIZACIÓN DEL INFORME

Esta tesis se basa en un artículo titulado “Effects of the hydropeaking operation on the hydrodynamics of a stratified reservoir: Rapel reservoir, Central Chile” que se encuentra en revisión en una revista internacional indexada (ISI), y tres artículos presentados en conferencias científicas nacionales e internacionales. El manuscrito sometido a revisión en una revista ISI se encuentra en el Anexo A de esta tesis, mientras que los artículos de conferencia se encuentran en los Anexos B, C y D.

Los siguientes 4 capítulos de esta tesis sintetizan los principales resultados y conclusiones que se detallan en los anexos antes mencionados. En el capítulo 4 se describe el área de estudio, en el capítulo 5 se detalla la metodología usada, en el capítulo 6 se resumen los principales resultados obtenidos, y finalmente en el capítulo 7 se encuentran las principales conclusiones de este trabajo de tesis.

## 4 ÁREA DE ESTUDIO

El embalse Rapel (34°S, 71,6°O) es un lago artificial monomítico de agua dulce, ubicado en la IV región del Libertador Bernardo O’Higgins, a 200 km de Santiago aproximadamente. Se creó en 1968 a partir de la construcción de la construcción la central hidroeléctrica Rapel, con un profundidad máxima de 85 m en el sector del muro (Contreras et al., 1994). Con el tiempo, la sedimentación ha elevado la cota del fondo en más de 30 m, alcanzando una profundidad máxima en la actualidad de 55 m. El embalse presenta una forma dendrítica, y se compone por tres cubetas: cubeta Alhue hacia el Este, cubeta Cachapoal hacia el Sur y la cubeta Muro, hacia el Noroeste. La columna de agua se estratifica en los meses de verano, entre Diciembre y Abril, y se mezcla completamente desde Mayo a Noviembre (Contreras et al., 1994; de la Fuente y Niño, 2008).

La operación de la central Rapel esta económicamente definida por el Centro de Despacho Económico de Carga (SEFR, 2007), el cual induce una extracción centrada en los horarios puntas, durante las tardes, lo que es conocido como hydropeaking. De acuerdo a ubicación del

punto de extracción, a 30 m de profundidad, la estratificación termal se caracteriza por una termoclina profunda (de la Fuente y Niño, 2008) y un hipolimnio delgado. La central hidroeléctrica puede producir hasta 360 MW de electricidad a través de la operación de sus 5 generadores, con un flujo máximo de  $110 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  cada uno.

## **5 METODOLOGÍA**

Para las simulaciones se utilizó el software ELCOM, cuyas siglas representan Estuary, Lake and Coastal Ocean Model, el cual puede ser descrito como una herramienta de modelación numérica que permite realizar modelos con aplicaciones a la hidrodinámica y la termodinámica, con la finalidad de simular el comportamiento temporal de cuerpos de agua estratificados con forzantes ambientales (Hodges et al., 2000). Este software es distribuido por el Centre for Water Research, división de la University of Western Australia.

Para el desarrollo de la tesis se procedió conforme a la siguiente metodología:

### **5.1 Campaña de terreno**

Se midió el perfil de temperaturas de la columna de agua mediante una cadena de termistores instalada cerca del muro, registrando dos periodos: primavera /verano de 2009-2010 y otoño de 2011.

Estos registros se complementan con mediciones de velocidad y dirección del viento, humedad relativa, temperatura del aire, radiación solar y presión atmosférica son realizadas a partir de una estación meteorológica localizada en la ribera sur de la balsa Alhue.

Finalmente, se recolecta información horaria de la energía producida por la central, la cual se usa para obtener la serie del caudal descargado. Los caudales afluentes al embalse se determinan a partir de un balance de volumen, considerando el nivel medio diario del embalse.

### **5.2 Modelo numérico**

Se realizaron tres simulaciones para recrear la hidrodinámica del embalse. Dos de ellas se basaron en los periodos de registro del perfil de temperatura (Primavera/Verano de 2009-2010 y Otoño de 2011). La tercera considera una simulación del primer periodo, usando un régimen de extracciones distinto en que el caudal de extracción corresponde al promedio a nivel diario los caudales efluentes, suprimiendo así el hidropeaking.

Posteriormente, se analiza la representatividad de la simulación usando un parámetro de habilidad del modelo  $S$ , que compara las estimaciones del modelo con las mediciones y su promedio de estas últimas (Wilmott, 1981; Ng et al., 2011).

A partir de este modelo, el efecto del hidropeaking sobre la hidrodinámica del embalse se estudia analizando la generación de ondas internas, la mezcla vertical, la influencia del viento y transporte horizontal.

### **5.3 Análisis de ondas internas**

Para estudiar las ondas internas se analiza la energía potencial integrada (*IPE* por sus siglas en inglés), la cual se define como

$$IPE(t) = \int_0^H \rho(z, t) g z dz$$

Donde  $z$  representa la coordenada espacial vertical,  $t$  tiempo, densidad,  $g$  aceleración y  $H$  representa la elevación de la superficie libre con respecto al fondo del embalse. El *IPE* muestra de manera clara y concisa la distribución en cada frecuencia de las ondas internas y la distribución relativa de energía potencial en las frecuencias (Antenucci et al, 2000), así como una buena forma de visualizar ondas internas (Rueda et al., 2003).

A la serie resultante del *IPE* y las serie de caudales descargados, se les analiza el espectro de densidad de potencia (PSD por sus siglas en ingles; Bendat y Piersol, 1986), para identificar las frecuencias más importantes, y una transformación de wavelet para identificar la composición y la variabilidad temporal de las ondas internas y las extracciones (Torrence y compo, 1998; Antenucci et al., 2000).

#### **5.4 *Análisis del potencial de mezcla***

Los cambios en la capacidad de mezcla se analizan a través del número de Richardson ( $Ri$ ; Fischer et al., 1979; Ivey et al., 2008), que representa la relación entre la energía potencial requerida para la mezcla vertical y la energía cinética turbulenta necesaria para la mezcla.

#### **5.5 *Efecto del viento sobre las extracciones de agua***

Para aislar el efecto del viento, la profundidad hasta la cual se percibe su influencia se estima usan la longitud de Monin-Obukhov ( $l$ ; Monin and Obukhov, 1954). Esta longitud representa la escala de profundidad a la cual la turbulencia impuesta por el viento balancea la tasa de aumento de energía potencial debido al calentamiento de la superficie.

#### **5.6 *Transporte de un compuesto no conservativo***

Se simula el transporte de un compuesto no conservativo, con una tasa de crecimiento de primer orden, con un coeficiente asociado  $k$ . Inicialmente se considera una concentración unitaria en todo el embalse, y se analiza el efecto de limpieza que tienen los afluentes, el cual se considera tienen un concentración cero.

Se evalúan distintos escenarios considerando un coeficiente de crecimiento en función del valor esperado de la concentración, una vez transcurrido el tiempo de retención ( $\theta$ ). Al resolver la ecuación diferencial que define la concentración promedio del trazador, evaluando en el tiempo de retención, se obtiene el siguiente valor de la tasa de crecimiento

$$k = \frac{\ln \alpha + 1}{\theta}$$

Donde  $\alpha$  es la proporción entre la concentración en el tiempo de retención y la concentración inicial.

## **6 RESULTADOS**

Los principales resultados del estudio se detallan a continuación, separados por cada área de interés.

### **6.1 *Análisis de la información medida***

Las extracciones tienen un impacto directo en la estratificación del embalse, ubicando la termoclina entre 40 y 45 m de profundidad, produciendo un metalimnio mucho más grueso que un lago de esas latitudes (Meruane and Riestra, 2003; Rozas, 2011). Específicamente, para el periodo de otoño de 2011 la termoclina se ubico a 40 m de profundidad, 5 m más arriba que su equivalente en 2010. Esto se debe a que el periodo de primavera/verano de 2010-2011 registró descargas de una magnitud mucho mayores al otoño 2011.

Por otra parte, las mediciones indican que en algunos casos la acción de la central hidroeléctrica es capaz de reordenar el perfil de temperaturas cerca del muro, sin la presencia de vientos intensos. Más aun, en profundidad, no se observa influencia en el perfil de temperatura frente a los grandes eventos de viento.

### **6.2 *Simulaciones del perfil de temperaturas***

Para los dos periodos de tiempo registrados, en la mayor parte de la simulación, el parámetro de precisión S presenta valores entre 0,7 y 1, lo que es indicativo de un buen ajuste entre las simulaciones y las mediciones.

Para el primer periodo de simulación (primavera/verano de 2009-2010), los cambios significativos en el perfil de temperatura y la ubicación de la termoclina son bien representados por el modelo. Para el segundo periodo (otoño de 2009), el primer mes se obtienen buenos resultados, llegando incluso a captar el efecto de la mezcla inducida por la reactivación de la central. Sin embargo, el modelo no es capaz de representar bien el proceso de des-estratificación durante Mayo de 2011.

Los efectos de la operación hydropeaking son estudiados a través del escenario en que se suprime el efecto de los peaks de extracción. En este caso, se observa una estratificación más estable, con un metalimnio más grueso y un gradiente de densidad mayor en la termoclina.

### **6.3 *Análisis de ondas internas***

El PSD de la *IPE* de la temperatura medida y simulada muestra peaks importantes a 24 y 12 h de periodo, lo que coincide con las peaks que registra la extracción de la central. Sin embargo esto no representa la variabilidad temporal de las frecuencias.

Por otra parte, la descomposición de wavelet del IPE, que sí refleja las variaciones en el tiempo, muestra que el periodo de 24 h es dominante, tanto para los datos medidos como los simulados. Esto está correlacionado con la fuerte periodicidad diaria de las extracciones. En el caso del escenario con la operación hydropeaking suprimida, se destacan los mismos periodos (24 y 12 h), pero con una energía menor. Esto, a pesar de que el mismo análisis sobre las extracción usadas en este escenario, no presenta una tendencia para el periodo de 24 h. El mismo efecto se aprecia al inicio del periodo de otoño de 2011, donde la ausencia de descargas desde la central induce la eliminación del peak de 24 h en el análisis de wavelet de las descargas, pero sin embargo se

mantiene vigente en correspondiente análisis del IPE. Esta diferencia se podría justificar en que el periodo del seiche interno del embalse es cercano a 24 h.

#### **6.4 Mezcla potencial**

De acuerdo a los resultados de Casamitjana et al. (2003), las simulaciones con y sin hydropeaking localizan la termoclina en la parte profunda del embalse. Sin embargo, se observa que la operación hydropeaking mejora la mezcla vertical en el largo plazo, acumulando mezcla inducida a partir de la secuencia de pulsos de extracción.

Al estudiar el Richardson, se detectan zonas preferenciales de mezcla en ambos escenarios, como el sector cono que rodea el punto de extracción. Por otra parte, al comparar el  $Ri$  en la columna de agua, para un pulso de extracción bajo la operación hydropeaking y su equivalente en volumen para el escenario con los peaks suprimidos, se observa que un mayor porcentaje de la columna presenta menores valores de  $Ri$  en el primer caso. Esto es indicativo de una mayor capacidad de mezcla inducida por la operación hydropeaking, sin embargo hay que considerar también el tiempo necesario para que estas inestabilidades crezcan y generen la mezcla efectiva. La duración del pulso de extracción podría controlar este factor.

#### **6.5 Efecto del Viento**

Al calcular el largo de Monin-Obulhov es posible ver que, para la mayoría de los casos, la capacidad del viento de balancear la tasa a la que se gana la energía potencial a partir del calentamiento de la superficie, no excede los 5 m. De acuerdo a esto se puede concluir que la real influencia del viento sobre el metalimnio es reducida, al considerar que su espesor supera los 40 m. Más aun, se aprecia que incluso en los mayores largos determinados (que sugieren una influencia a mayor profundidad) no afectan sustancialmente el perfil de temperaturas.

#### **6.6 Distribución horizontal de un compuesto no-conservativo**

Se analiza la concentración promediada en la vertical en todo el embalse al tiempo de retención, después del efecto de limpieza de los afluentes. Con esto, se detectan zonas que son más propensas a la aparición de algas, como la cubeta Alhue y los pequeños brazos afluentes al embalse.

Al comparar el escenario con operación hydropeaking y su equivalente con los peaks suprimidos, se observa que la concentración promedio de la columna de agua es 30% menor en el primer escenario. Estas diferencias se concentran en los primeros 5 km en las cercanías del muro.

En la vertical, se observa que la zona superior de la columna de agua se ve más influencia que la del fondo del embalse. Las aguas profundas se encuentran controladas por la mezcla vertical a través de la termoclina, por lo que la zona más profunda percibe el efecto de la extracción cuando ocurren extracciones permanentes.

Finalmente, se observa que para distintas tasas de crecimiento  $k$ , determinado con un  $\alpha$  tal que la concentración esperada al tiempo de retención sea 2, 1 y 0,5 veces la inicial, se aprecia un comportamiento similar, intensificado proporcionalmente por el valor de  $k$ .

## 7 CONCLUSIONES

La operación de la central hidroeléctrica tiene directo impacto en la hidrodinámica del embalse, en la actividad de las ondas internas, la capacidad de mezcla y el transporte horizontal.

Primero que todo, se registraron diferentes profundidades de la termoclina durante ambos periodos de medición (2009-2010 y 2011), lo que se explica en las diferencias en la magnitud de las extracciones. Esto indica que la ubicación de la termoclina está definida tanto por la ubicación de la extracción (Casamitjana et al., 2003) como por las tasa de extracción. Segundo, se observó que la IPE contenida en las ondas internas fue mayor en los escenarios que registraban operación hydropeaking, concentrado la energía en el periodo de 24-h. Esto se relaciona directamente a la variabilidad diaria que presentan las extracciones. Tercero, la mezcla vertical en las cercanías del muro se ve favorecida por la operación hydropeaking, dado que un pulso de extracción aporta una mayor energía cinética a la columna de agua que su equivalente con una descarga promedio. Este aumento de la energía se concentra en las cercanías de la extracción.

En términos del transporte de un compuesto no-conservativo, se vio que los distintos tipos de operación no tienen una influencia significativa más allá de 5 km del muro. Sin embargo se observa que el hydropeaking mejor el efecto de limpieza de los afluentes en esa zona. También fue posible confirmar que la cubeta Alhue actúa prácticamente aislada del resto del embalse, convirtiéndola en un hábitat más propenso para la aparición de algas (Contreras et al., 1994; de la Fuente and Niño, 2008).

Finalmente, la variabilidad intradiaria de la operación debería ser considerada en los estudios asociados a la calidad de agua, la biota del embalse e incluso en aquellos relacionados con la construcción del embalse y su impacto ambiental.

## 8 REFERENCIAS

- Antenucci, J., J. Imberger and A. Saggio. 2000. Seasonal evolution of the basin-scale internal wave field in a large stratified lake. *Limnol. Oceanogr.* 45: 1621-1638.
- Bendat, J. S., and A. G. Piersol. 1986. *Random Data: Analysis and measurement procedures*. Wiley.
- Bonnet, M., M. Poulin and J. Devaux. 2000. Numerical modeling of thermal stratification in a lake reservoir. *Methodology and case study. Aquat. Sci.* 62:105-124
- Casamitjana, X. T. Serra, J. Colomer, C. Baserba, and J. Perez-Lozada. 2003. Effects of the water withdrawal in the stratification patterns of a reservoir. *Hydrobiologia.* 504: 21-28.
- Contreras, M., H. Villagran, and C. Salazar. 1994. Hydrodynamic characteristics of Rapel reservoir. *Medio Ambiente.* 12: 41-49, In Spanish.
- de la Fuente, A., and Y. Niño. 2008. Pseudo 2D ecosystem model for a dendritic reservoir. *Ecol. Modell.* 213: 389-401.
- Dirección General de Aguas (DGA). 2004. *Diagnostico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad*. Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile.
- Fisher, H, J. List, Y. Koh, and J. Imberger. 1979. *Mixing in inland and coastal waters*. Academic Press.
- Hodges, B. R., J. Imberger, A. Saggio, and K. B. Winters. 2000. Modeling basin-scale internal waves in a stratified lake. *Limnol. Oceanogr.* 45: 1603-1620.
- Ivey, G., K. Winters and J. Koseff. 2008. Density stratification, turbulence, but how much mixing?. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 40:169-184.
- Meruane, C. and F. Riestra. 2003. *Caracterización de la estructura térmica de los lagos de la red mínima de control de la Dirección General de Aguas*. XII Taller Nacional de Limnología 2003, Concepción, Chile
- Monin, A. S., and A. M. Obukhov. 1954. Basic laws of turbulent mixing in the atmosphere near the ground. *J. Akad. Nauk SSSR Geofiz. Inst.* 24: 163-187.
- Ng, S. M. Y, J. Antenucci, M. R. Hipsey, G. Tibor and T. Zohary. 2011. Physical controls on the spatial evolution of a dinoflagellate bloom in a large lake. *Limnol. Oceanogr.* 56: 2265-2281. doi:10.431/lo.2011.56.6.2265.
- Rozas, C. 2011. *Análisis modal para el estudio de resonancia de ondas internas excitadas por el viento en el lago Villarrica*. MSc thesis. Universidad de Chile.
- Rueda F. J., S. G. Schladow, and S. Ó. Palmansson. 2003. Basin-scale internal wave dynamics during a winter cooling period in a large lake. *J. Geophys. Res.*, 108: 3097. doi:10.1029/2001JC000942
- Subsecretaría de Economía, Fomento y Reconstrucción (SEFR), Gobierno de Chile. 2007. D.F.L. N° 4, Ley N° 20.018. *Diario Oficial de la Republica*.

Torence, C., and G. P. Compo. 1998. A practical guide to wavelet analysis. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 79: 61-78

Vila, I., M. Contreras, V. Montecinos, J. Pizarro, and D. Adams. 2000. Rapel, 30 years temperature reservoir. Eutrophication or Contamination?. *Arch. Hydrobiol. Spec. Issues Advanc. Limnol.* 55: 31-44

Wilmott, C. 1981. On the validation of models. *Phys. Geogr.* 2:184-194.

## **ANEXOS**

### **ANEXO A: PUBLICACIÓN ENVIADA A REVISTA INTERNACIONAL ISI**

**EFFECT OF THE HYDROPEAKING OPERATION ON THE HYDRODYNAMICS OF A STRATIFIED  
RESERVOIR: RAPEL RESERVOIR, CENTRAL CHILE**

# Effect of the hydropeaking operation on the hydrodynamics of a stratified reservoir: Rapel reservoir, Central Chile.

Germán Ibarra<sup>1</sup>, Alberto de la Fuente<sup>1</sup>, Manuel Contreras<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile, Santiago, Chile.

<sup>2</sup>Centro de Ecología Aplicada Ltda., Santiago, Chile.

## Abstract

The effects of the Rapel hydropower plant hydropeaking operation on the hydrodynamics of the reservoir was investigated by combining field measurements and numerical simulations carried out by the three-dimensional Estuary, Lake and Coastal Ocean Model (CWR-ELCOM). Two operation scenarios were analyzed: Real hydropeaking operation of the hydropower plant, and a fictional scenario in which the hydropeaking operation was suppressed. Two different time periods were considered, which allow the inclusion of different seasonal and operating conditions. It is shown that the location of the thermocline is determined by both the depth of the outlet and the withdrawal rates. Spectral analysis showed a strong correlation between the water withdrawals and the excitation of the internal waves, with a preponderant period of 24-h. Furthermore, the effects of the hydropeaking operation is restricted to a region up to 5 km far from the dam, where one can observe a mayor mixing capability around the outlet, and less horizontal dispersion induced by the hydropeaking operation. Finally, it is shown that the hidropeaking operation has a mayor impact on the hydrodynamics of the reservoir, which indicates that variability of outflows within the day should be consider in the study of these systems.

## 1. Introduction

In the past few decades, a large number of reservoirs has been built in Chile for hydropower purposes, in order to supply the growing energy demand of the country. For the entire central part of Chile, the energy generated by large thermo- and hydro-power plants is distributed by the Central Interconnected System (SIC, for the initials in Spanish), which manage 71.5% of the total energy produced (McPhee et al., 2012). This system is administrated by the private agency Load Economic Dispatch Center (CDEC-SIC, for the initials in Spanish), whose operation plan is based on economic criteria, and has the function of designating which power plant operates for supplying the demand of energy (SEFR, 2007). Hydropower plants based on reservoirs, usually supplies the energy demand during peak hours in the evening, as they are able to accumulate water during the day. This operation presents hydropeaking on the outflows, characterized by small outflows during most part of the day, and passing to operate at maximum capacity in a few minutes.

Although previous studies analyzed the effects of the withdrawals in many aspects of the reservoir, none of them have studied the effect of the hydropeaking operation on the hydrodynamics of the reservoir. Flow dynamics driven by water withdrawals in a two layered

stratification were first studied by Craya (1949), which suggested the use of a Froude number to determine the critical discharge value at which a drawdown of water from the upper layer occurs (Anohim et al., 2006). Pao and Kao (1974) showed that shear induced waves formed by the outlet, are responsible for the flow concentration near the withdrawal point, and Imberger et al. (1976) expanded the results to the case in which the shear front is confined by vertical boundary conditions in the domain. To improve downstream water quality by controlling mixing processes in the reservoir, Imberger (1980) verified the usefulness of the concept of shear waves for reservoir management and selective withdrawal. In more recent studies, Casamitjana et al. (2003) used a 1-D lake model to show that the thermocline develops at the same depth where the outlet is located, highlighting the effects of the water withdrawal in the stratification patterns. Çaşşkan and Elçi (2009) analyzed the effect of selective withdrawal on the temperature distribution. In terms of water quality, Barbiero et al. (1997) employed selective withdrawal to reduce phytoplankton populations by strengthening the thermal stability and increasing the discharge of algae, whereas Anohin et al. (2006) showed that the combined effect of basin-scale internal waves and selective withdrawal was responsible for the water quality of the outflows.

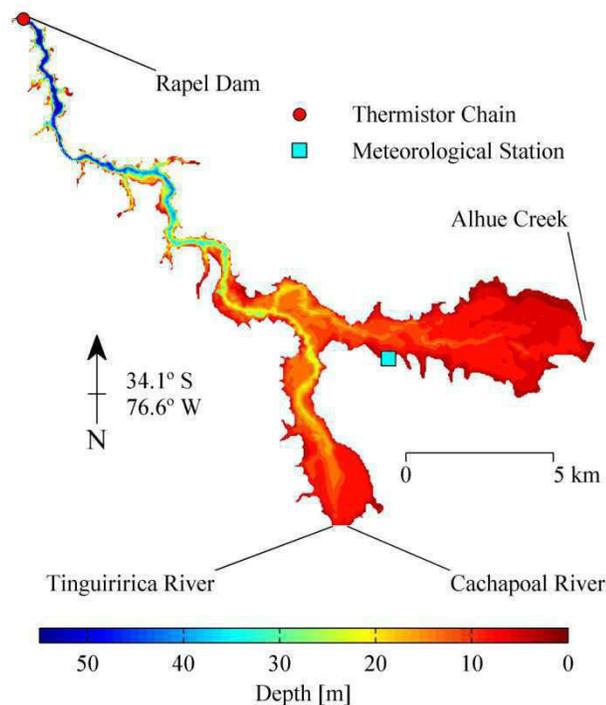
In relation to the hydropeaking operation of a reservoir, most of past studied cases were focused on the effects on the downstream flow, and how it affects different species. For example, Lauters et al. (1998) observed that the downstream invertebrate population shows significant peaks during the maximum pulse of the hydropeaking operation, while Saltveit et al. (2001) showed that sudden reductions in river flow may cause high mortality of juvenile salmonids, through stranding in dry areas. Finally, Bain (2007) reviewed 43 hydropeaking cases, analyzing the effects on the downstream flow on the aquatic ecosystem, and proposed to use the discharge ratio (maximum/minimum flows) to estimate the magnitude of the impact. The objective of this article is to investigate the relationship between hydropeaking operation and the hydrodynamics of Rapel reservoir (34°S, 71.6°W), which is very important in central Chile for both its recreational and power generation features (Vila et al., 2000; DGA, 2004). In terms of the hydrodynamics, most research conducted on Rapel reservoir has been associated with its dendritic shape that allows subdividing it into three separated sub-basins (Contreras et al. 1994, de la Fuente and Niño, 2008); however, these studies neglected the relationship that exists between the reservoir and the hydropower plant. In this paper, field data collected in the reservoir is analyzed in together with numerical simulations, in order to study how the economic operation of the Rapel hydropower plant influences the hydrodynamics and transport processes within the reservoir, with special emphasis on: i) the identification of internal waves, ii) vertical mixing events, and iii) horizontal transport. This analysis was done for two characteristic periods of time that characterize spring stratification in a wet year and the autumn destratification in a drought year, respectively. The spring period is characterized by an active variability in the outflows, which is called hydropeaking operation. The effect of this behavior is analyzed by considering two scenarios: i) a base scenario (B-scenario) that reflect the variability within the day of this operation, and ii) an hydropeaking-suppressed scenario (HS-scenario) where the peaks are eliminated by distributing the corresponding flow along the day.

## **2. Methods**

### ***2.1. Study site***

Rapel reservoir (34°S, 71.6°W) is a monomictic, temperate, freshwater artificial lake located near the coast in Central Chile. It was built in 1968 by the construction of the Rapel

hydropower plant, with a maximum water depth of 85 m near the dam (Contreras et al., 1994; Vila et al., 2000; de la Fuente and Niño, 2008); sediments deposition raised the bottom elevation in 30 m, so that the maximum depth is nowadays of 55 m (Fig. 1). Rapel reservoir was formed by the junction of the Cachapoal and Tinguiririca rivers that provide more than the 86% of the inflows, and the Alhué Creek (Antenucci, 1996). The reservoir floods a maximum area of 95 km<sup>2</sup> and has a Y-shaped dendritic morphology, formed by three main basins: Alhué basin on the east, Cachapoal basin on the south and Muro basin on the north-west (Fig. 1). The north-west basin presents the deepest areas of the reservoir, has an elongated shape of 20 km long, and width that varies in between 150 m near the dam, to 2 km in the confluence area. The water column in this basin is thermally stratified between December and April, and vertically mixed from April or May to November (de la Fuente and Niño 2008). The eastern basin is the shallowest and widest area of the reservoir with an average depth of 4 m. Finally, the southern basin shows an average depth of 5.6 m and carries the main inflows from the rivers to the dam.

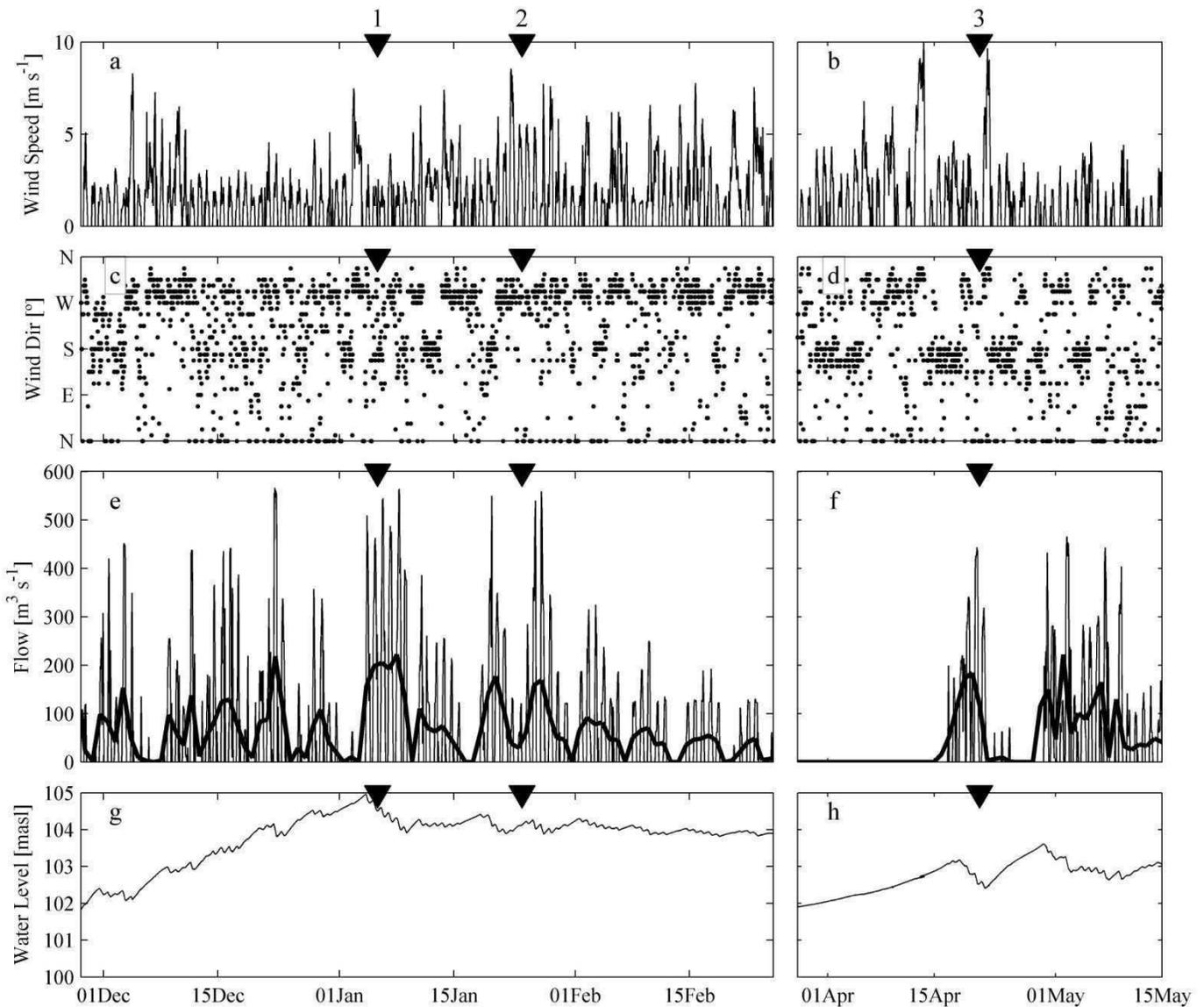


**Figure 1: Bathymetry of Rapel reservoir, and location of inflows and outflow, meteorological station and thermistor chain.**

The operation of the Rapel hydropower plant is economically defined by the private agency CDEC-SIC. This induces a hydropeaking behavior on the outflows (Fig. 2e and 2f). Due to the location of the water withdrawal for hydropower generation (at about 30 m depth), the thermal stratification is characterized by a deep thermocline (de la Fuente and Niño, 2008) and a thin hypolimnion (Fig. 3c and 3d). The hydropower plant can produce up to 360 MW of electricity through the operation of 5 engines, with maximum flow capacity of 110 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> each.

## 2.2. Field Data

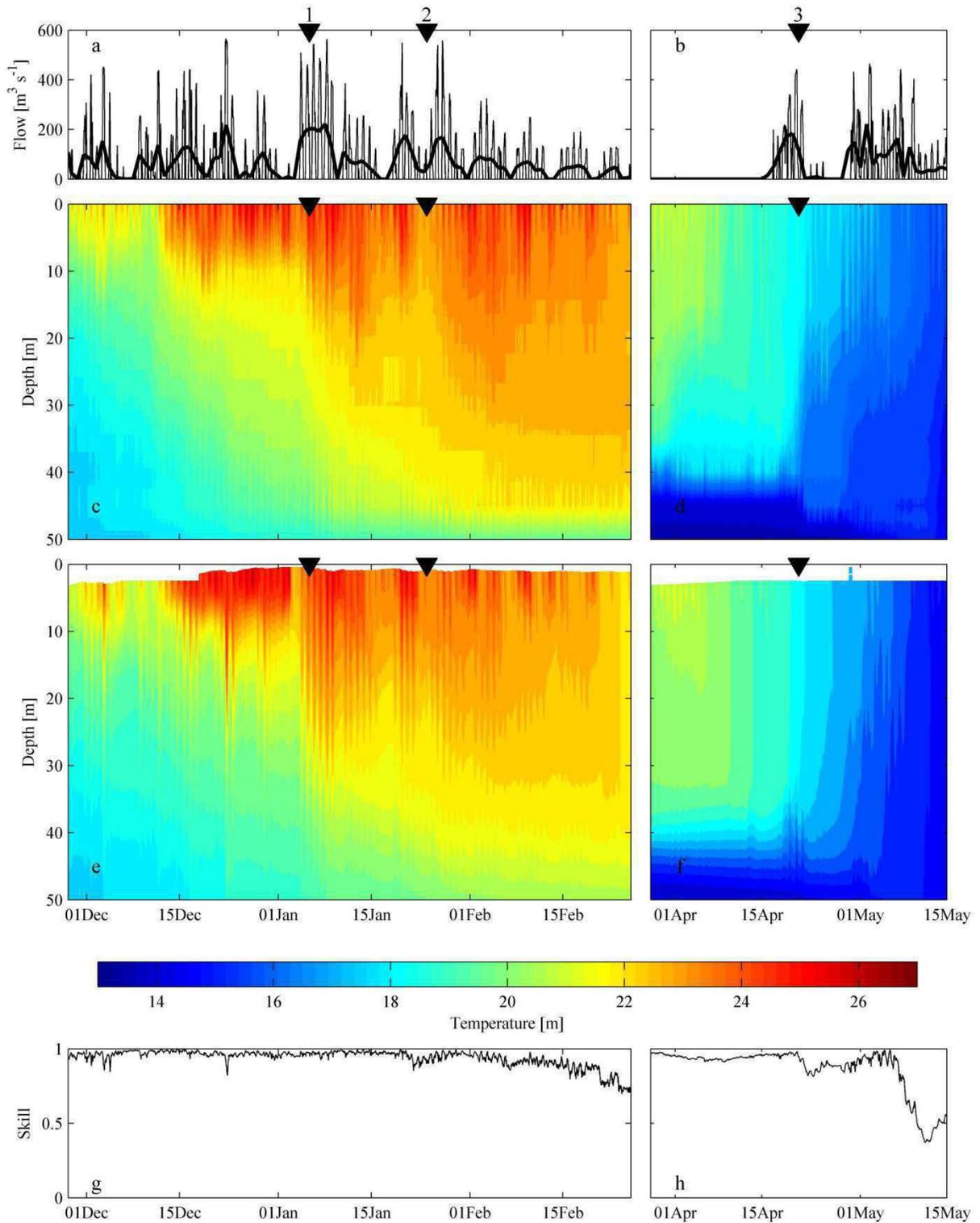
A thermistor chain was deployed near the dam (Fig. 1) to record the water column temperature for two characteristic periods: austral spring and summer of 2009-2010, and austral autumn of 2011. The thermistor chain of the first period was composed by 11 thermistors located



**Figure 2: Meteorological and water level data. (a) and (b) time series of the wind speed, (c) and (d) the wind direction. (f) and (g) real outflows of the reservoir (thin line), and daily-average withdrawals (thick line). (g) and (h) water level. (a), (c), (e) and (g) corresponds to period between November 2009 and February 2010, and (b),(d), (f) and (h) to period between March 2011 and May 2011. Black triangles identify events discussed in the article.**

equidistantly at 5 m (de la Fuente et al. 2010), while the thermistor chain of the second period concentrated the sensors near the bottom, with spacing between thermistors increasing from 1.5 m near the bottom to 10 m in the surface, with the intention of obtaining a better representation of the dynamics of the density interface. A regular interval of half an hour was used in both periods.

These two periods not only differ in the season, which defines the temperature profile, but also in the regime of operation of the hydropower plant. While the first period is characterized by constant daily average withdrawals, the second presented a long period of zero withdrawals (Fig. 2), where water accumulation was privileged due to the lack of rain that occurred in Chile during



**Figure 3: Measured and simulated water temperature. (a) and (b) real outflows of the reservoir (thin line), and daily-average withdrawals (thick line) (c) and (d) measured vertical profiles of water temperature. (e) and (f) the simulated vertical profiles of water temperature. (g) and (h) Skill parameter of Eq. 1. (a), (c), (e) and (g) corresponds to period between November 2009 and February 2010, and (b),(d), (f) and (h) to period between March 2011 and May 2011. Black triangles identify events discussed in the article.**

2010 and 2011, effect of the El Niño-Southern Oscillation phenomenon (Garreaud, 2009), resulting in an annual rain deficit of about 35% (DGA, 2011).

Wind speed and direction, relative humidity, air temperature, solar radiation and atmospheric pressure data were measured with a meteorological station located in the southern bank of the Alhue basin, recording at regular intervals of one hour (Fig. 1).

Hourly information of the energy produced by the hydropower plant ( $P_{ot}$ ) available at CDEC-SIC was transformed to flow values ( $Q$ ), according to  $P_{ot} = \eta \rho_o g Q (H - z_e)$ , where  $H$  denotes the reservoir level with respect to the sea, also available at CDEC-SIC,  $z_e$  is the engine elevation at 24 m above the sea level,  $\eta$  is the engine efficiency provided by ENDESA, the owner company of Rapel hydropower plant,  $\rho_o$  is a reference water density and  $g$  is the gravity acceleration. Unfortunately, the corresponding inflow data is not available, so the inflows to the reservoir were estimated by a simple volume balance considering the measured daily averaged reservoir level, and the daily averaged outflow. Most of this inflow was assigned to the Cachapoal and Tinguiririca rivers, while a constant flow of  $1.1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  was used in the Alhué creek, which corresponds to the average flow value obtained from historical hydrological information of the Chilean Water Agency (DGA).

### **2.3. Numerical Model**

The three-dimensional, finite difference model from the Centre for Water Research, Estuary, Lake and Coastal Ocean Model (CWR-ELCOM), was used to simulate the hydrodynamics of Rapel reservoir. CWR-ELCOM uses a z-coordinate rectangular grid and solves the unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes equations coupled to scalar-transport equations with the Boussinesq approximation, neglecting the non-hydrostatic pressure terms (Hodges et al., 2000). The model uses a semi-implicit method for determine the free-surface evolution, an Euler-Lagrange scheme for the momentum advection, and the ULTIMATE-QUICKEST scheme for the scalar transport with modifications for vertical turbulent transport (Laval et al., 2003). Heat exchange through the water surface is governed by standard bulk transfer models (Imberger and Patterson, 1990). Simulations were performed in a horizontal grid of  $50 \text{ m} \times 50 \text{ m}$ , with vertical spacing of  $\Delta z = 2 \text{ m}$ . The bathymetric information was interpolated from the bathymetric survey performed by the Hydrographic and Oceanographic service of the Navy (SHOA) in 2004. In order to satisfy the Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) stability condition, a time step of 1 min was used in the simulations.

Three simulations were performed to recreate the hydrodynamics of the Rapel reservoir, covering the two time periods analyzed. The first simulation studies the first period of time that recorded the process of stratification, starting on 28 November 2009 and finishing on 27 February 2010. This simulation will be called the base scenario (hereinafter called B-scenario) and its main feature is that it represent the characteristic daily variability of the hydropeaking operation. The ending date was imposed by the occurrence of the 8.8 magnitude Maule earthquake in central Chile, which completely changes stratification conditions and hydrodynamic of the reservoir (de la Fuente et al., 2010). The second simulation extends from 28 March to 15 May 2011. With the purpose of identify the real influence of the hydropeaking behavior on the reservoir hydrodynamics, a third simulation is performed for the first period (austral summer 2009-2010), using a different outflow series. In this case, the daily average outflow is distributed evenly along the entire day, thus canceling the hydropeaking operation effect. This simulation will be called the hydropeaking-suppress scenario (hereinafter called HS-scenario).

The direct comparison between measured and simulated vertical temperature profiles at each time can be performed using the model skill estimate  $S$  (Wilmott, 1981; Ng et al., 2011).

$$S = 1 - \frac{\sum |X_{model} - X_{obs}|^2}{\sum (|X_{model} - \bar{X}_{obs}| + |X_{obs} - \bar{X}_{obs}|)^2} \quad (1)$$

where  $X$  is the variable being compared with the mean  $\bar{X}$ , the subindex “model” refers to the model prediction and the subscript “obs” refers to the observation. The value of  $S$  is bounded between 0 and 1, being 1 indication of perfect model performance. The result it is obtained a time series of  $S$ .

#### 2.4. Analysis of internal waves

The effects of hydropeaking operation on the internal wave field were studied using both power spectra and wavelet transforms of the integrated potential energy (IPE), which is defined as:

$$IPE(t) = \int_0^H \rho(z, t) g z dz \quad (2)$$

Here,  $z$  represents the vertical spatial coordinate,  $t$  time,  $\rho$  density,  $g$  acceleration of gravity and  $H$  represents the free surface elevation with respect to the bottom. The  $IPE$  displays a clear and concise picture of the frequency content of the internal wave field and also of the relative distribution of potential energy among frequencies (Antenucci et al., 2000). It also provides a good way to visualize internal waves (Rueda et al. 2003). With the purpose of subtracting to the  $IPE$  signal long terms fluctuations due to changes in the water volume or seasonal heating/cooling, the weekly moving average of  $IPE$  was taken away, which focuses the analysis in frequencies equivalent to periods lower than seven days. This new filtered signal is herein after called  $IPE_w$ , was contrasted to corresponding time series of both wind speed and withdrawals and to the simulated results obtained for cases without hydropeaking operation of the hydropower plant. These comparisons were made in the frequencies space obtained with the power spectral density (PSD; Bendat and Piersol, 1986) that allowed for identifying the dominant frequencies (Antenucci et al., 2000; Rueda et al., 2003), and the wavelet transform (Kaiser, 1994) that was used to analyze the composition and variability in time of the internal wave and of the withdrawals. This last method is more suitable for analyze nonstationary time series with different frequencies (Torrence and Compo, 1998), like the  $IPE_w$ . In this article, the Morlet function was used as a wavelet mother following the methodology of Antenucci et al. (2000).

The characteristic period of the internal seiche in the reservoir ( $T$ ) was estimated by assuming that the dynamics of internal waves in the narrowest part of the reservoir is well represented by standing waves in a non-rotating channel (Fisher et al., 1979), so that

$$T = \frac{2L}{\sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho_2} \frac{h_1 h_2}{h_1 + h_2} g}} \quad (3)$$

where  $L$  is the distance along the Thalweg, a line that follow the deepest part of the reservoir, between the dam and the point in which the thermocline intersects the bathymetry,  $\Delta\rho = \rho_2 - \rho_1$ , where  $\rho_1$  and  $\rho_2$  are the vertically averaged density in the upper and lower layers, respectively, and  $h_1$  and  $h_2$  are the upper and lower layer average thickness, respectively.

## 2.5. Mixing potential analysis

Changes in the mixing capacity due to the hydropeaking operation were quantified with variations of the Richardson number ( $Ri$ ) as a function of time (Fischer et al. 1979; Ivey et al., 2008).

$$Ri = - \frac{\frac{g}{\rho} \frac{d\rho}{dz}}{\left(\frac{d\bar{u}}{dz}\right)^2 + \left(\frac{d\bar{v}}{dz}\right)^2} \quad (4)$$

Here,  $z$  represents the vertical spatial coordinate,  $\rho$  the simulated density, and  $u$  and  $v$  represents the simulated flow velocity in both horizontal directions. This dimensionless number represents the relationship between the potential energy required for the vertical mixing and the turbulent kinetic energy available for the mixing. High values in  $Ri$  are associated to weak mixing capacity and viceversa, being the critical value 0.25.

## 2.6. Wind effects over water withdrawal

To quantify the effect of the wind and meteorological factors in general, versus the effects of the hydropeaking operation, the second period of time, specifically between March and April of 2011, without extractions results essential because it allows differentiation with the withdrawal effects. To isolate the effect of the wind, the depth to which it influences was estimated using the Monin-Obukhov length,  $l$ , (Monin and Obukhov, 1954) defined by

$$l = \frac{u_*^3}{B} \quad (5)$$

where  $u_*$  represent the surface water shear velocity, and  $B$  is the buoyancy flux that can be estimated by

$$B = \frac{g \alpha_{ec} H^*}{C_p \rho_1} \quad (6)$$

where  $\alpha_{ec}$  is the expansion coefficient,  $C_p$  is the specific heat of water, and  $H^*$  is the daily average effective heat flux, which was directly obtained from the simulations. For a net surface heat input ( $H^* > 0$ ),  $l$  represents the depth scale over which wind stirring balances the rate of gain of potential energy from the surface heating (Imberger, 1985). These allow identifying what areas of the vertical profile are influenced by the wind.

## 2.7. Transport of a nonconservative compound

The effects of hydropeaking operation on horizontal transport processes were studied by simulating the transport of a nonconservative tracer, which growth accordingly to a first-order kinetic reaction, characterized by a bulk growth coefficient  $k$ , so that this nonconservative tracer can be associated to algae in the reservoir. The simulations initially considered a unitary concentration of the nonconservative trace in the entire reservoir, zero concentration in the inflows, and the value of  $k$  was taken such as the washing effects of the inflows become visible in the dam, after a time defined by the bulk retention time based on the inflows ( $\theta$ ). With this purpose in mind, it is possible to shown that the average concentration of the nonconservative tracer in the entire reservoir follows (see de la Fuente and Niño, 2008)

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \left(k - \frac{1}{\theta}\right)C \quad (7)$$

where  $\theta = \mathcal{V}/Q_{in}$ , with  $\mathcal{V}$  is the volume of the reservoir and  $Q_{in}$  the inflow. If  $\theta$  is assumed constant, Eq. 7 has an analytic solution, that is evaluated at  $t = \theta$ , thus obtaining

$$k = \frac{\ln \alpha + 1}{\theta} \quad (8)$$

Here  $\alpha$  represents the ratio between the concentration at the retention time and the initial concentration. In this way is possible to obtain characteristic values of the growth rate, accordingly to the expected relative concentration at the retention time. Three different values of  $k$  were used, associated to  $\alpha_1 = 1$ ,  $\alpha_2 = 0.5$  and  $\alpha_3 = 2$ , respectively.

These simulations were done for the first period analyzed, starting on day 28 November 2009, and finished 47 days later, which corresponds to the retention time computed with the average inflow and the average total volume of the reservoir of the corresponding period.

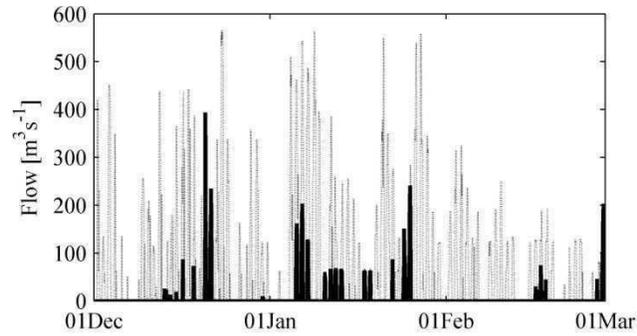
### 3. Results

#### 3.1. Analysis of measured data

In both analyzed periods of time, the maximum wind speed reached up to  $9 \text{ m s}^{-1}$ , which preferably has a west-northwest/south-southeast direction, depending on the season (Fig. 2a, 2b, 2c and 2d). These winds are likely to generate important effect on the reservoir because of both their magnitude and their direction along the Muro basin that is surrounded by hills.

As it is shown in Figs. 2e and 2f, there is a significant intraday variability in the hydropower plant operation, between zero productivity and peaks close to the maximum flow capacity of  $550 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . These withdrawals have direct impact on the vertical stratification: while a weak stratification was recorded at the end of December 2009 (Fig. 3e), by the end of February 2010 the top-bottom temperature difference was approximately  $6 \text{ }^\circ\text{C}$  and the thermocline was located at  $45 \text{ m}$  (Fig. 3c). For the 2011 period, the de-stratification process occurs (Fig. 3d): while at the late March 2011 the water column presented stratified conditions with a temperature difference between the bottom and the surface of about  $7^\circ\text{C}$ , by mid May 2011 the temperature difference between the top and the bottom was less than  $1^\circ\text{C}$ . It is important to mention that this reservoir was built more that 40 years ago, so it has no minimum environmental flow and the downstream river holds by the dam leakage when there are no discharges from the hydropower plant

The main difference between both analyzed periods is on the depth at which the thermocline is located. At the beginning of this second period (Fig. 3d), the thermocline was located about  $40 \text{ m}$  below the surface,  $5 \text{ m}$  higher than its equivalent depth in 2010 (Fig. 3c). This difference is because water withdrawals during spring-summer period when the stratification is created were much smaller in 2010-2011 than in 2009-2010 because of the drought (Fig. 4). As it was shown by Casamitjana et al. (2003), the development of thick metalimnetic layers occurs in reservoirs with deep outlets when outflows are large enough to affect the stratification, which indicates that the discharges during spring-summer of 2010-2011 were not enough energetic to mix down to the same depth reached in 2009-2010. In both cases, the metalimnion turns out to be much thicker than a non regulated lake for these latitudes (Meruane and Riestra, 2003; Rozas, 2011).



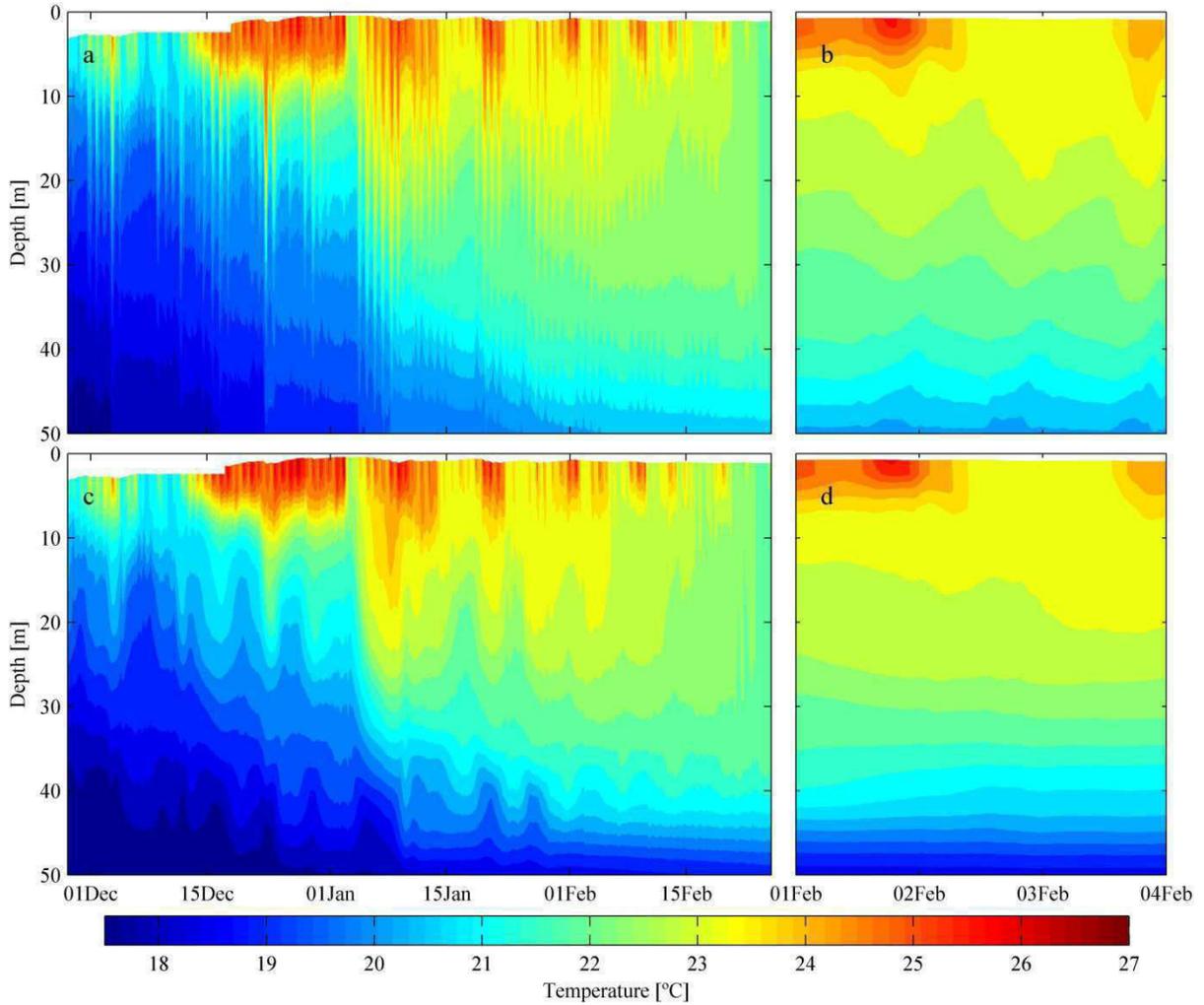
**Figure 4: Outflows for the period between December and March. Dotted line represent measurements during 2009-2010 and continuous line 2010-2011.**

With respect to the influence of the wind-induced mixing, measurements indicates that, in some cases, the action of the hydropower plant reorders the vertical distribution of the temperature close to the dam, without the presence of mayor variation in the wind intensity (see black triangles 1 and 3 in Fig. 2 and 3), while in others cases the changes in the stratification can be assumed as an effect of the changes in both the magnitude of the discharges and the wind (see black triangle 2 in Fig. 2 and 3). The induced mixing is accentuated in the presence of a lower difference in the temperature along the profile and a lower temperature gradient. Vertical mixing at the bottom of the reservoir is predominantly regulated by the discharges, showing a low effect of the major wind events.

### ***3.2. Simulation of the temperature structure***

The model skill estimate ( $S$ , Eq. 1) took values in between 0.7 and 1 for most of the simulation (Figs. 3g and 3h), which shows the good matching between model simulations and field data. The best results were obtained in the first period of analysis (Figs. 3e), where all the observed changes in water temperature were well represented by the model. Particularly, the simulation captures the events marked by black triangles 1 and 2 in Fig. 3, and predicted the development and location of the thermocline. For the second period, the model performance was also good during the first month, including the mixing event driven by the hydropower plant reactivation (point 3 in Fig. 3f), though with less intensity. The results obtained after about 7th May were not good, which indicates that the model was not able to reproduce the destratification process driven by surface cooling in autumn. For this period the  $S$  estimate even reach values below 0.5.

The effects of the hydropeaking operation were analyzed by suppressing it by using instead of the measured outflows, the daily average outflows that were interpolated between the days, thus ensuring volume conservation (B-scenario). The comparison between the B-scenario and the HS-scenario is shown in Fig. 5, where it is observed the real influence of the hydropeaking on the hydrodynamics of the reservoir. First of all, a thicker and more stable stratification was developed without hydropeaking, showing larger density gradient in the thermocline (Fig. 5c). For example, the maximum vertical density gradients at 45m depth were 0.21 °C/m for the B-scenario, while vertical gradients simulated without hydropeaking (HS-scenario) at the same depth were 0.34 °C/m. Furthermore, water temperature at 50m depth by the end of February was 1.9 degrees higher in the simulation with hydropeaking, which means that vertical heat transports are promoted by hydropeaking.



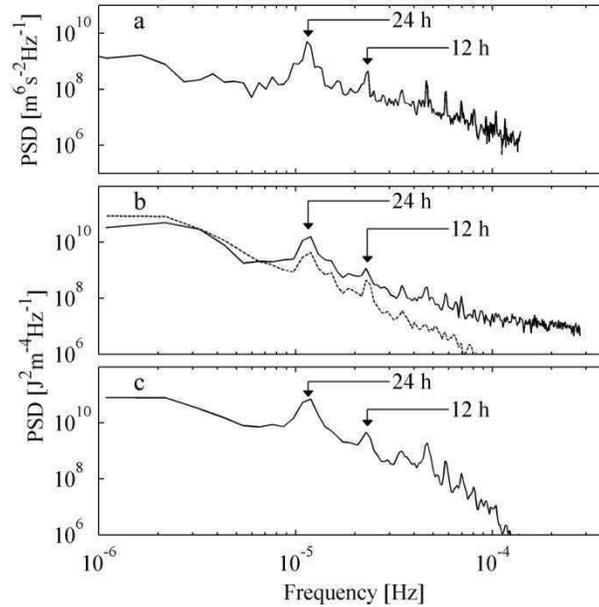
**Figure 5: Simulated vertical profiles of water temperature. (a) B-scenario, (c) HS-scenario. (b) and (d) shows a zoom for the first three days of February 2010.**

With respect to the dynamics response of the density interface, Figs. 5b and 5d show the detailed evolution of water temperature simulated for the first 3 days of February, where it is observed that the B-scenario (Fig. 5b) showed internal oscillations within the day, such that the 20°C isotherm located at 47 m depth displaced upward in about 4m, while the 23°C isotherm located at about 13m deep displaced downward in about 10m (Fig. 5b). In contrast, results without hydropeaking of the HS-scenario shown in Fig. 5d does not show the same diurnal variability of the isotherms displacements, which indicates that there is a direct relationship between the hydropeaking and the production of internal waves in the reservoir. Both aspects identified here (vertical transport and internal wave excitation) are analyzed in detail in the following sections.

### ***3.3. Analysis of internal waves***

For the B-scenario, the PSD of  $IPE_w$  of the measured and simulated temperature profile showed significant peaks at 24 and 12 h (Fig. 6b and 6c), which are also the dominant frequencies in the PSD of the withdrawals shown in Fig. 6a. In contrast, the HS-scenario, shown in dashed line of Fig. 6b, showed that the same peaks highlights, but with a much lower energy

and that in general the energy in the range of frequencies smaller than a day is always below the B-scenario. Once again, these results based on the PSD indicate that there is a direct relationship between the outflow discharges and the production of internal waves, but it does not provide any information in terms of the temporal evolution of this coupling, which is better studied by the wavelet transform.

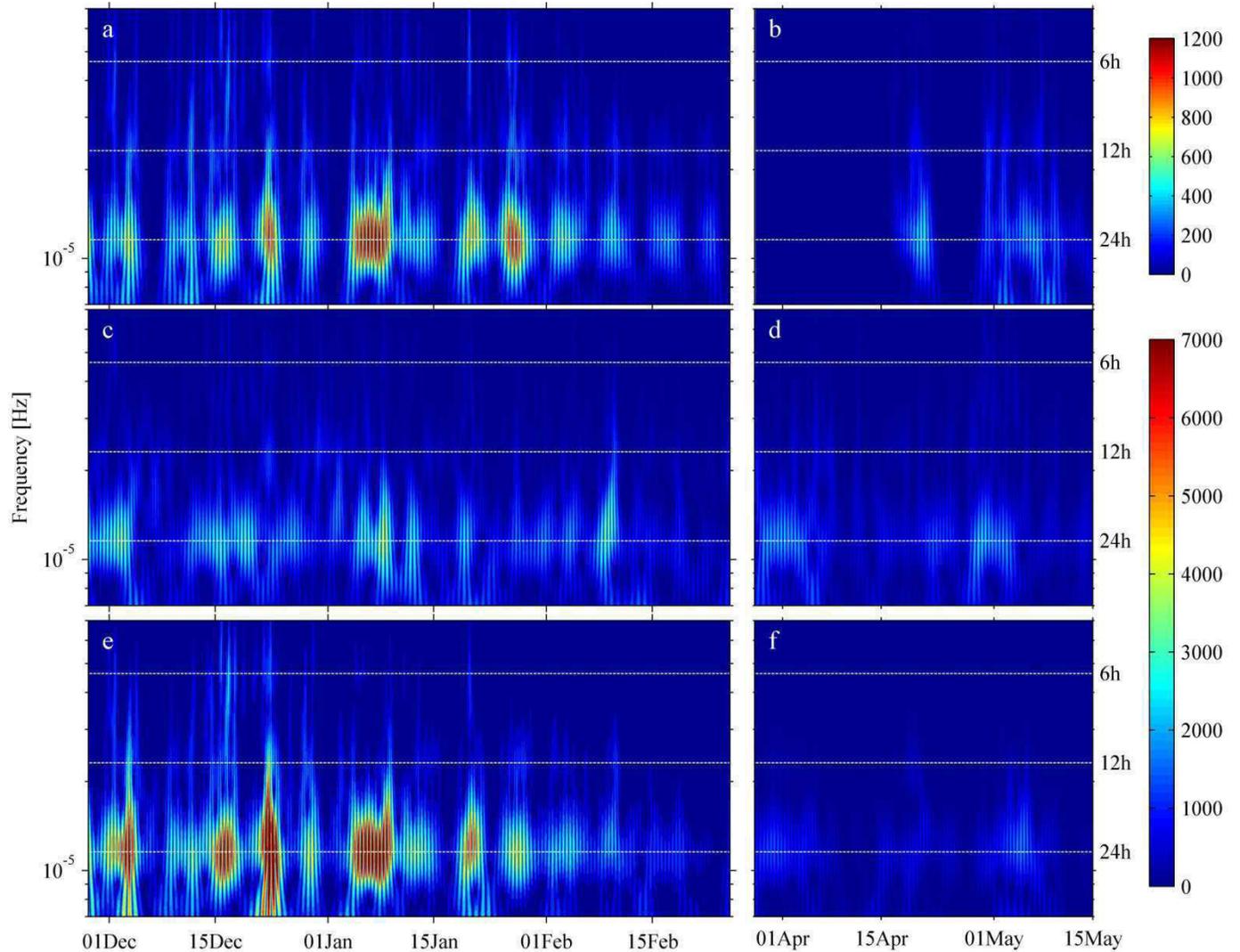


**Figure 6: Power spectra density (PSD) for the spring period (Nov 2009 – Feb 2010) of: (a) outflows, (b) measured  $IPE_w$  (c) simulated  $IPE_w$ .**

The wavelet decomposition of the  $IPE_w$  shown in Fig. 7 shows that the 24-h period is the dominant period in both measured  $IPE_w$  (Figs. 7c and 7d) and simulated  $IPE_w$  (Figs. 7e and 7f), and it is strongly correlated to the strong diurnal periodicity that characterizes the withdrawals (Fig. 7a and Fig. 7b): when the 24-h period is highlighted in the discharge because of the hydropower plant started operation, the same corresponding frequencies stand out in the  $IPE_w$ , which can be seen, for example, in middle December or at the beginning of January (Fig. 7). This link also stands in the 12-h period, but with less intensity, and this coupling between hydropeaking and internal waves is observed in both simulated and measured  $IPE_w$ , although the simulations were more energetic than the measurements.

When the withdrawals forcing is suppressed by the daily average outflow (HS-scenario), the simulated integrated potential energy spectrum continues presenting a 24-h period, but with much less energy (Fig. 8). This background energy in the 24-h period is also evidenced at the beginning of the second period of analysis (Figs. 7d and 7f), when the hydropower plant did not produced energy (Fig. 2f), so withdrawals forcing disappears. The nature of this background energy in the 24-h period can be related to basin-scale waves energized by the wind, and this is because the internal seiche period, estimated with Eq. 3, is  $T_{2010} = 23.8$  h and  $T_{2011} = 20.7$  h, for monthly averaged measurements in February of 2010 and April of 2011, respectively. The value of the different parameters considered in the computation of the period of the internal seiche is resumed in the Table 1. Although this 24-h period can also be attributed to the daily heating and cooling of the surface, it is also observed by repeating this spectrum analysis with the

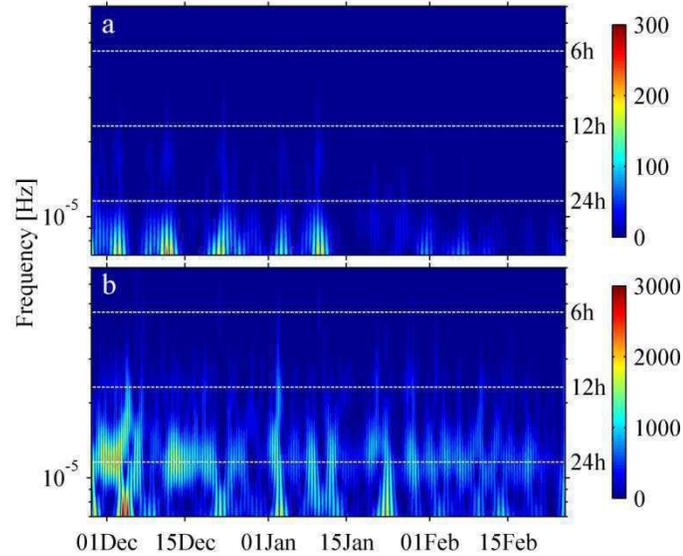
deepest part of the temperature profile, considering the zone below 25 m to avoid the wind effect (not shown here), so that this 24-h signal actually evidences the presence of internal waves.



**Figure 7: Wavelet spectral analysis for: (a) and (b) outflows under the hydropeaking operation, (c) and (d) measured  $E_w$ , (f) and (g) simulated  $IPE_w$  for B-scenario. (a), (c), and (e) correspond to period between November 2009 and February 2010, and (b), (d) and (f) to the period between March 2011 and May 2011.**

### ***3.4. Potential mixing under different operation conditions***

In concordance to the results of Casamitjana et al. (2003), simulations with and without hydropeaking located the density interface in deep areas of the reservoir, which is related with the turbulent kinetic energy in deep areas of the reservoir that is provided by the currents driven by withdrawals. Consequently, a fraction of this turbulent kinetic energy is used in mixing the stratified water column. However, our results show that hydropeaking operation enhances long term vertical mixing, by accumulating mixing induced by a sequence of single pulse of discharges (see between points 1 and 2 in Fig. 3). According to this, the potential mixing produced by a single pulse of discharge in the B-scenario is compared to the corresponding day in the HS-scenario by analyzing the value of the Richardson number (Eq. 4) along a 2.5 km section along the Thalweg, starting at the dam located in the left-end each panel of Fig. 9. The



**Figure 8: Wavelet spectral analysis for the period between December 2009 and February 2010 for: (a) outflows of HS-scenario, (b)  $IPE_w$  for HS-scenario.**

**Table 1. Parameters used to calculate the period of oscillation of the internal seiche.**

Variable	Unit	February 2010	April 2011
Upper layer density ( $\rho_1$ )	$kg \cdot m^{-3}$	997.53	998.26
Lower layer density ( $\rho_2$ )	$kg \cdot m^{-3}$	998.05	999.17
Upper layer height ( $h_1$ )	$m$	45	40
Lower layer height ( $h_2$ )	$m$	5	10
Lenght ( $L$ )	$km$	6.5	10
Period ( $T$ )	$h$	23.81	20.74

results corresponding to 23 December 2009 are shown in Fig. 9, and similar behavior is observed for every pulse of great magnitude (B-scenario). It is shown that for a hydropeaking scenario (left-hand side column of Fig. 9), various areas present potential mixing as a consequence of the current induced by the extraction pulse, and some of them were also identified in the HS-scenario (right-hand side column of Fig. 9). Although some areas, like the cone formed surrounding the outlet (see segmented line in Fig. 9), present a similar behavior in both scenarios, the percentage of the area of the longitudinal section where  $Ri < 1$  was up to 14.2% in the B-scenario (obtained for panel 5b of Fig. 9), while the corresponding percentage was up to 6.1% in the HS-scenario (obtained for 5c of Fig. 9). Furthermore, the minimum simulated values of  $Ri$  were 0.03 and 0.1 for B and HS scenarios, respectively. These results reinforce the idea that extreme events are more capable of inducing mixing in the water column (Spigel and Imberger, 1980). Finally, it is worth noticing that a small Richardson number is not enough to ensure the mixing, as the instabilities that trigger the mixing needs a time to growth (Turner, 1973), so that the duration of the hydropeaking pulse may also control this hydropeaking induced mixing.

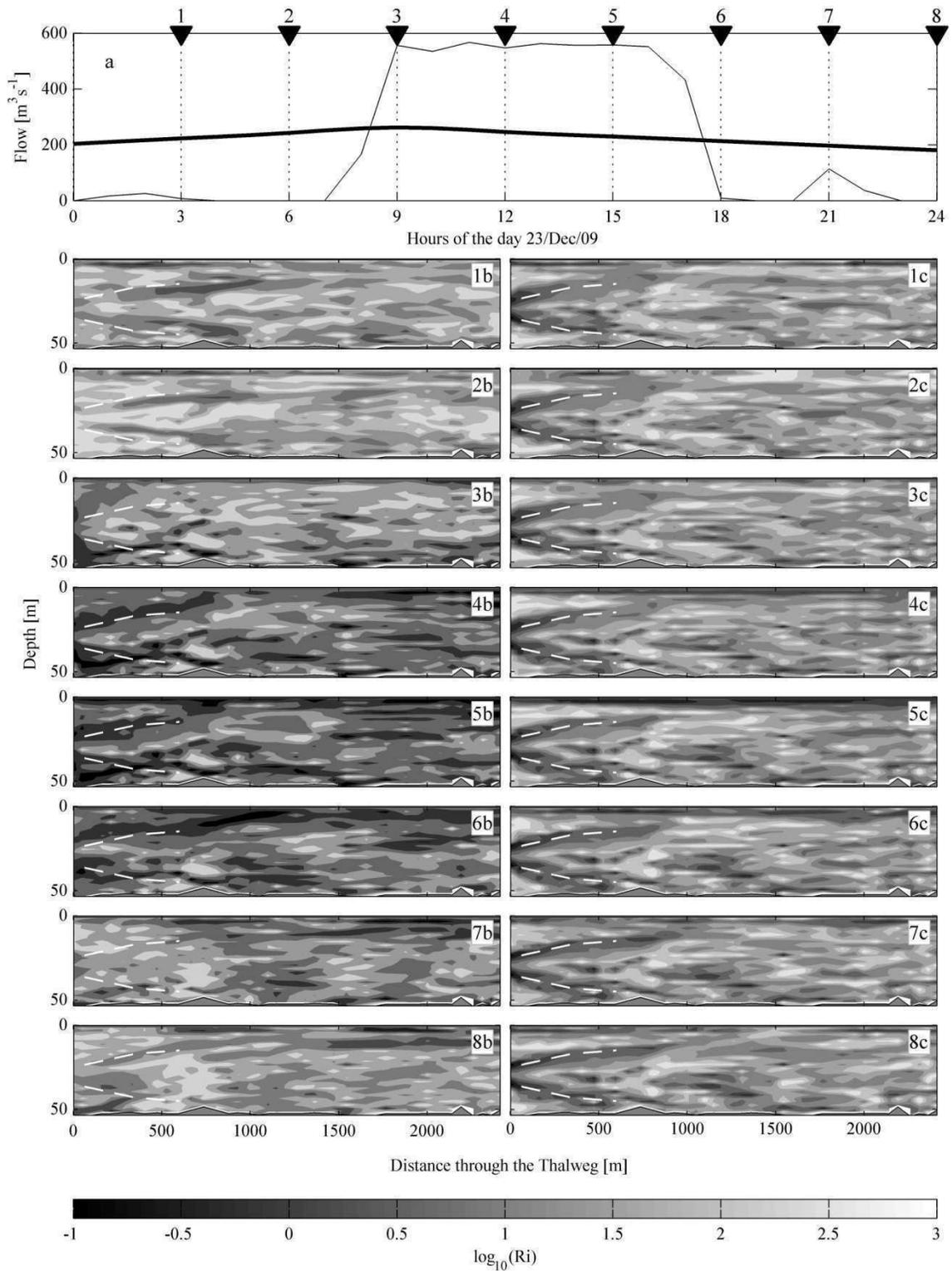
### 3.5. Wind Effect

By considering the heat fluxes that affect the reservoir near the dam, obtain directly from CWR-ELCOM outcomes, it is possible to obtain the buoyancy flux by following the Eq. 6. Standard values for the coefficient of expansion and the specific heat of the water at 15°C was used ( $\alpha = 1.508 \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{K}^{-1}$  and  $C_p = 4.186 \text{ KJ } (^\circ\text{K kg})^{-1}$ ) allowing the calculation of the Monin-Obukhov length through the Eq. 5. Fig. 10 shows the evolution of the  $l$  variable through time, showing that for most of the time, the capability of the wind to balance the rate of gain of potential energy from the surface heating does not extend beyond 5 meters. This not only suggest that the surface portion of the water column of the Muro basin is being influenced by the wind, but it also shows that the effective influence of the wind on metalimnetic waters is reduced, considering that the thickness of the metalimnion exceed 40 meters. Moreover, it can be seen that the peaks that  $l$  present (e.g on January of 2010, Fig. 10e), does not substantially affect the thermal profile, showing that the main driver of change in the reservoir, close to the dam, is the outlet and its withdrawals.

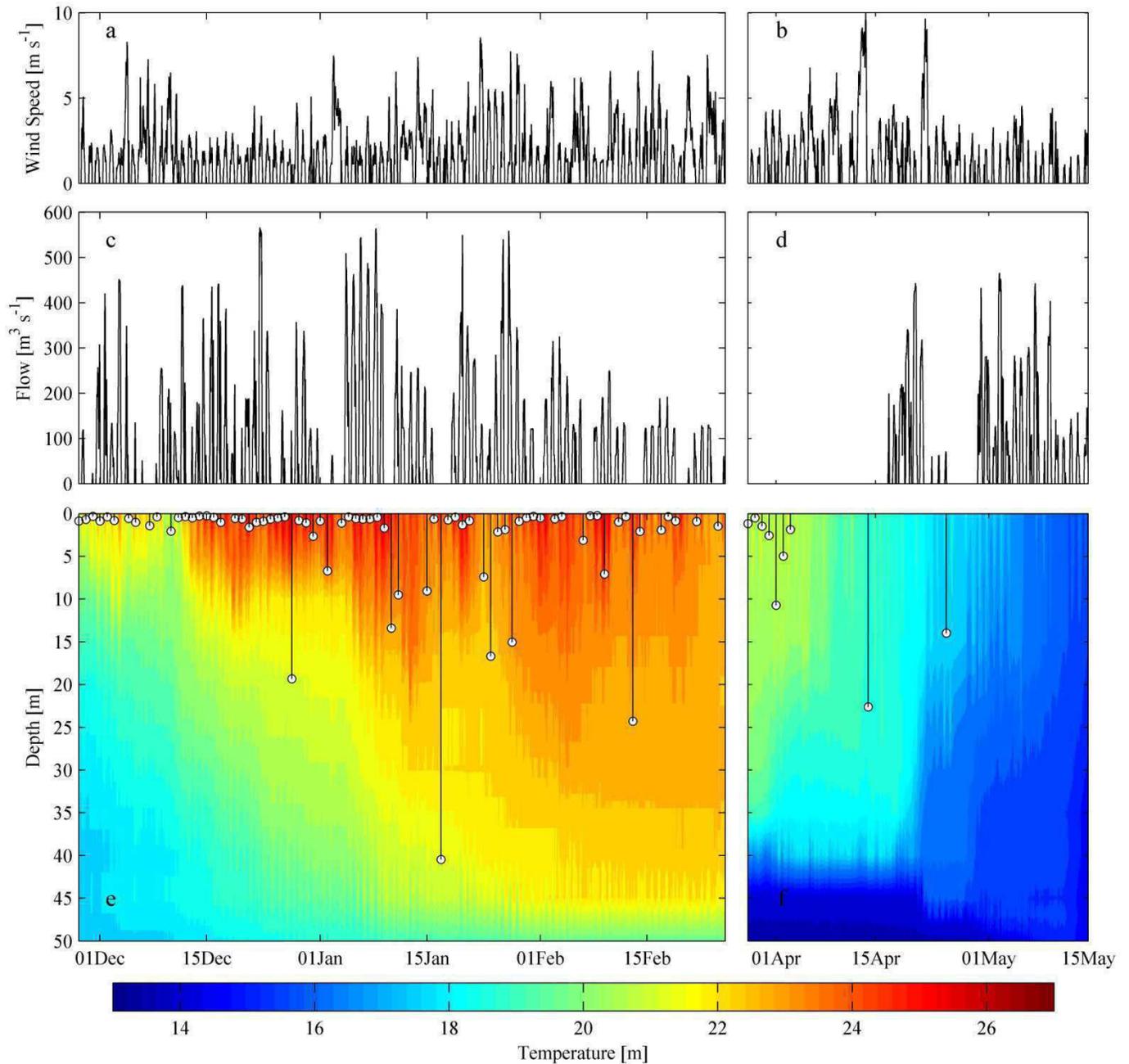
### 3.6. Horizontal distribution of non conservative compound

Fig. 11a shows the vertically averaged concentration at the retention time ( $\theta = 47$  days) for the B-scenario, with  $\alpha = 1$ . The value of  $\alpha = 1$  means that the lake average concentration is expected to be equal to the initial value, and this was possible to be confirmed as the simulated lake average concentration, at the retention time, was  $1.043 \text{ [mg m}^{-3}\text{]}$  (the initial value was  $1 \text{ [mg m}^{-3}\text{]}$ ). However, Fig. 11a shows that there are areas more prone to growth of the tracer, which can be associated with the appearance of algae. These habitat are located in the Alhue basin, which is due to a partial isolation of the basin influenced by the reservoir shape and the small inflows to that basin (de la Fuente and Niño, 2008), and in small branches of the Muro basin. The effect of the hydropeaking on this horizontal transport is shown in Fig. 11b, that the plots absolute difference between vertically averaged concentration for B- and the HS-scenarios, at the retention time with  $\alpha = 1$ . It is observed that the main difference occurs in a region of about 5 km closer to the dam, where the simulated concentrations for the HS-scenario were about 30% bigger than those simulated with the B-scenario. This effect is also observed in the time series of vertically averaged concentration of a profile located at the position of the thermistor chain normalized by the growth rate. They are compared for both operation conditions of Fig. 12a (B-scenario and HS-scenario), where it is shown that the washing effect of the clean inflow, with zero concentration, is reflected near the dam after the day 15. After that time, the concentration of the B-scenario with the hydropeaking operation was always smaller than the simulated concentration in the HS-scenario. This variability is intensified proportionally to the growth rate ( $k$ ), which is represented with a greater values of  $\alpha$ , although the same progression structure is maintained (Fig 12b).

Finally, Fig. 13 shows time series of the simulated concentration in the upper layer at  $z=48.5$  m from the bottom (Fig. 13b) and in the lower layer at  $z=2.43$  m from the bottom (Fig. 13c), for the B- and HS-scenario with  $\alpha = 1$ . It is observed that the upper layer was most influenced by hydropeaking as the normalized concentration for the HS-scenario was double than the B-scenario at the retention time. Furthermore, it was observed that a single pulse of extraction, occurred at  $t=27$  days on Fig. 13a, were able to reduce the concentration in about 40%.

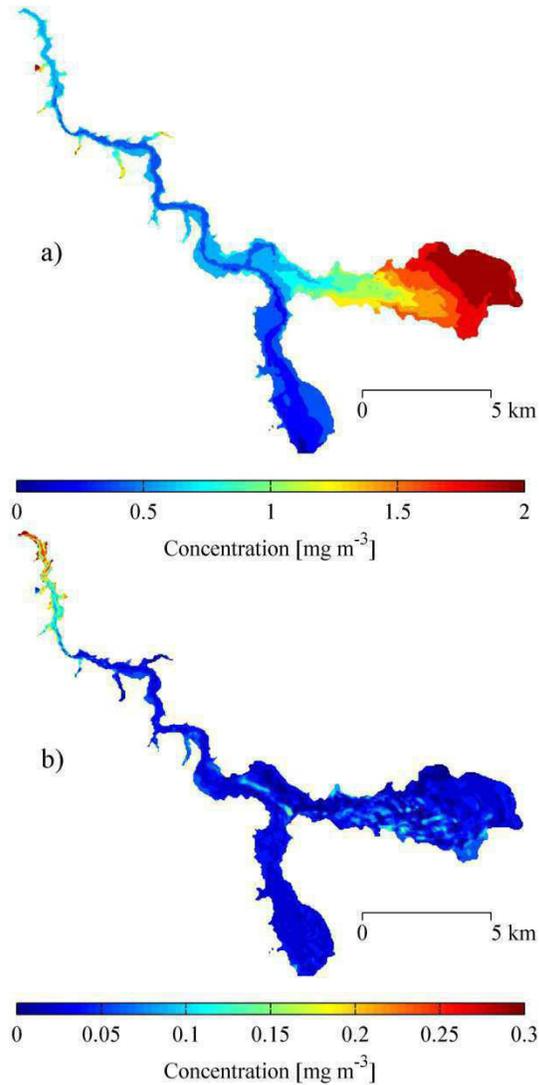


**Figure 9: (a) Time serie of outflows during the 23/December/2009. Contour map of the logarithm Richardson number for a longitudinal section along the Thalweg for different times identified on upper axis of (a). Left hand column corresponds to B-scenario and right-hand columns to HS-scenario.  $Ri < 0.25$  is plotted by  $\log_{10}(Ri) < -0.6$ . The white discontinuous lines represent the cone surrounding the outlet with a major withdrawal influence.**



**Figure 10:** As in Fig (2), including Monin-Obukhov length (when it is positive) as vertical lines and white circles in (e) and (f).

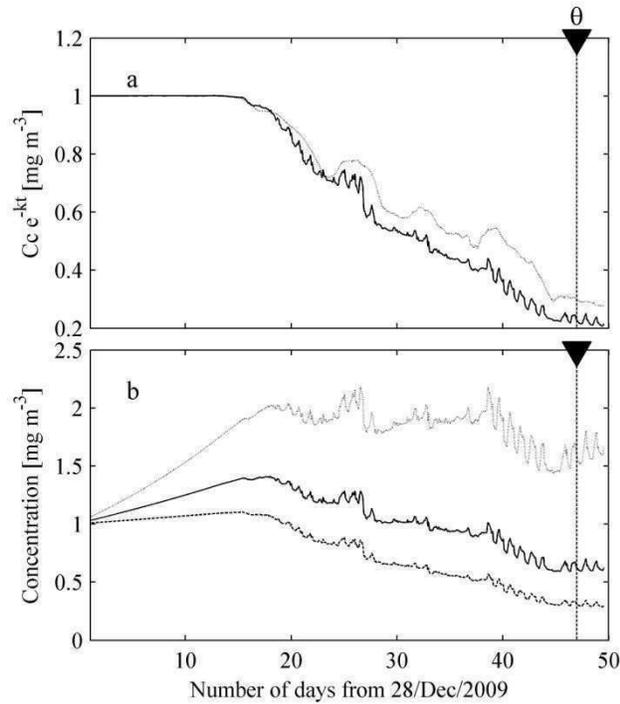
On the opposite, as renewal in deep waters are controlled by vertical mixing across the thermocline, the bottom layer, below the thermocline, perceives the effect of extraction when a permanent operation occurs. This can be confirmed by observing that the pulse at  $t=27$  days produces a decrease in the normalized concentration below the 10% and a significant decrease only occurs after  $t=39$  days, when a series of discharges happens (Fig. 13b). It can be shown that at the bottom of the reservoir, at the retention time, the normalized concentration for the HS-scenario was only 42% greater than the B-scenario.



**Figure 11: (a) Horizontal distribution of vertically averaged concentration for the B-scenario and with  $\alpha = 1$ . (b) Absolute value of the difference between HS- and B-scenarios with  $\alpha = 1$ .**

#### 4. Discussion and Conclusion

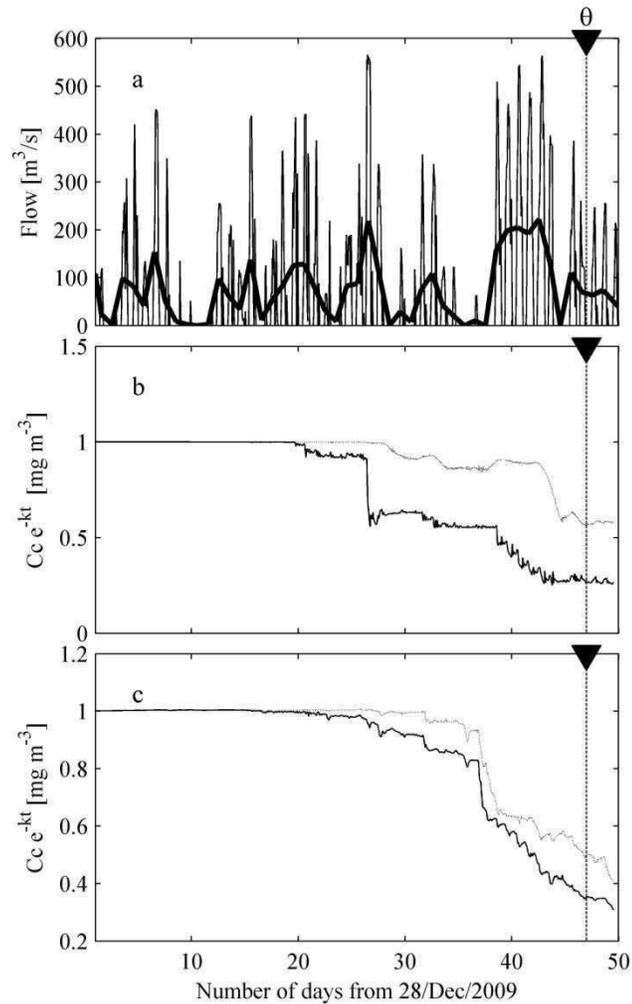
It was shown that the operation of the hydropower plant has a direct impact on the reservoir hydrodynamics in different ways. First of all, different thermocline depths were measured in 2010 and 2011, which is explained on significant differences in the magnitude of discharged waters (Fig. 4). This indicates that thermocline location near the dam is determined together by the outlet elevation (Casamitjana et al., 2003; Bonnet et al., 2008) and the withdrawals rates. Second, the total IPE contained on the internal wave was higher in the B-scenario than in the HS-scenario, by concentrating energy on the 24-h period signal, which is directly influenced by the dial variability induced by hydropeaking operation. Third, vertical



**Figure 12: Time series of vertically averaged concentration at the thermistor chain location. (a) Comparison of the concentration between the B-scenario (continuous line) and HS-scenario (dotted line), normalized by the temporal growth rate ( $k$ ). (b) Comparison of the concentration obtained for  $\alpha_1 = 1$  (continuous line),  $\alpha_2 = 0.5$  (dashed line) and  $\alpha_3 = 2$  (dotted line).  $\theta$  represents the retention time and  $C_c$  represents concentration.**

mixing near the dam is enhanced by hydropeaking, and this is explained in the fact that available turbulent kinetic energy is proportional to the velocity squared (Turner, 1973; Fisher et al. 1979), according to which the daily average kinetic energy on a single withdrawal pulse is higher than the kinetic energy contained on the flow driven by the corresponding daily average outflow. This would constitute the main factor to explain the observed differences in the stratification process for both time periods, and between the B- and HS-scenarios, where a lower mixing capability is induced for the low withdrawal rates. This is reflected in a ticker hypolimnion and a major density gradient in the thermocline. This augmented energy is focused in the outlet, generating a cone with a higher mixing capability.

Horizontal transport of a nonconservative tracer showed that different operations have no important effect beyond 5 km of the dam, and particularly in the more distant basins originated by the shape of the reservoir. However, near the dam it was observed that concentration of the tracer was about 35% higher in the HS-scenario. This indicates that hydropeaking enhances washing effects of the inflows, and it is postulated that because shear dispersion is reduced by hydropeaking throughout the enhanced vertical mixing (Fischer et al., 1979), this reduction in shear dispersion avoids spreading of the tracer near the dam. This analysis also confirmed that the Alhue basin acts practically isolated from the rest of the system, it is a habitat more prone to the appearance of algae (Contreras et al., 1994; de la Fuente and Niño, 2008).



**Figure 13: Time series of (a) Water withdrawals for B-scenario (thin line) and HS-scenario (thick line). (b) and (c) simulated concentration at 1 m depth and 48 m depth respectively, normalized by the temporal growth rate, for B-scenario (continuous line) and HS-scenario (dotted line).  $\theta$  represents the retention time and  $C_c$  represents concentration.**

According to what has been shown in this analysis and the impact of the water withdrawal in the water column, it could be possible to use the power plant operation to improve the reservoir water quality close to the dam, although this possibility should be consider taking into account the temporal scale associated with the retention time of the reservoir, which is related with the expected response time of the washing effect of the inflows, and the shape thereof, which is related with the zones that could be affected by the cleaning effect of the inflows.

Finally, it has been shown that the hidropeaking operation has a mayor impact in the hydrodynamics of a reservoir, in the internal wave activity, the mixing capability and the horizontal transport. This result indicates that intraday variability of outflows should be consider in these systems when making studies associates with water quality, reservoir biota and even with those related with the reservoir construction and its environmental impact, considering that a change in the temperature profile could vary the extension of both the hypolimnion and the epilimnion and that a major mixing capability could induce the mix of this two zones, usually with different water quality.

## 5. References

- Anohim V., J. Imberger, J. Romero, G. Ivey. 2006. Effect of long waves on the quality of water withdrawn from a stratified reservoir. *J. Hydraul. Eng.* 132(11): 1134. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2006)132:11(1134)
- Antenucci, J. 1996. Hydrobiological modeling of Rapel reservoir, Central Chile. Honours Thesis. Department of Environmental Engineering, University of Western Australia.
- Antenucci, J., J. Imberger and A. Saggio. 2000. Seasonal evolution of the basin-scale internal wave field in a large stratified lake. *Limnol. Oceanogr.* 45: 1621-1638.
- Bain, M. 2007. Hydropower operations and environmental conservation: St. Marys River, Ontario and Michigan. International lake superior board of control.
- Barbiero, R., W. James and J. Barko. 1997. The effects of a change in withdrawal operations on phytoplankton and nutrient dynamics in Eau Gaulle reservoir, Wisconsin (U.S.A.). *Int. Revue ges. Hydrobiol. Hydrogr.*, 82: 531–543.
- Bendat, J. S., and A. G. Piersol. 1986. *Random Data: Analysis and measurement procedures.* Wiley.
- Bonnet, M., M. Poulin and J. Devaux. 2000. Numerical modeling of thermal stratification in a lake reservoir. *Methodology and case study.* *Aquat. Sci.* 62:105-124
- Çahşkan, A. and Ş. Elçi. 2009. Effects of selective withdrawal on hydrodynamics of a stratified reservoir. *Water Resour. Manage.* 23:1257-1273
- Casamitjana, X. T. Serra, J. Colomer, C. Baserba, and J. Perez-Lozada. 2003. Effects of the water withdrawal in the stratificacion patterns of a reservoir. *Hydrobiologia.* 504: 21-28.
- Contreras, M., H. Villagran, and C. Salazar. 1994. Hydrodynamic characteristics of Rapel reservoir. *Medio Ambiente.* 12: 41-49, In Spanish.
- Craya, A. 1949. Recherches theoriques sur l' ecoulement de couches superposes de fluids de densites diferentes. *Houille Blanche.* 4: 44-55.
- de la Fuente, A., and Y. Niño. 2008. Pseudo 2D ecosystem model for a dendritic reservoir. *Ecol. Modell.* 213: 389-401.
- de la Fuente, A., C. Meruane, M. Contreras, H. Ulloa and Y. Niño. 2010. Strong vertical mixing of deep water of a stratified reservoir during Maule earthquake, central Chile (Mw 8.8). *Geophys. Res. Lett.* 37, L24608. doi:10.1029/2010GL045798.
- Dirección General de Aguas (DGA). 2004. Diagnostico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile.
- Dirección General de Aguas (DGA). 2011. Pronóstico de disponibilidad de agua temporada de riego 2011-2012. Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile.

Fisher, H, J. List, Y. Koh, and J. Imberger. 1979. Mixing in inland and coastal waters. Academic Press.

Garreaud, R. 2009. The Andes climate and weather. *Adv. Geosci.*, 22:3–11

Hodges, B. R., J. Imberger, A. Saggio, and K. B. Winters. 2000. Modeling basin-scale internal waves in a stratified lake. *Limnol. Oceanogr.* 45: 1603-1620.

Imberger, J., R. Thompson and C. Fandry. 1976. Selective withdrawal from a finite rectangular tank. *J. Fluid Mech.* 78(3):489-512.

Imberger, J. 1980. Selective withdrawal: a review. *Second Int Symp. Stratified Flows.* The Norwegian Institute of Technology Trondheim. Norway. 1:381-400.

Imberger, J. 1985. The Diurnal Mixed Layer. *Limnol. Oceanogr.*, 30(4): 737-770

Imberger, J., and J. C. Patterson. 1990. Physical limnology. *Adv. Appl. Mech.* 27: 303-473, doi:10.1016/S0065-2156(08)70199-6.

Ivey, G., K. Winters and J. Koseff. 2008. Density stratification, turbulence, but how much mixing?. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 40:169-184.

Kaiser, G. 1994. A friendly guide to wavelets. Birkhauser.

Laval, B., J. Imberger, B. R. Hodges, and R. Stocker. 2003. Modeling circulation in lakes: Spatial and temporal variations. *Limnol. Oceanogr.*, 48: 983–994.

Lauters, F., P. Lavandier, P. Lim, C. Sabaton and A. Belaud. Influence of hydropeaking on invertebrates and their relationship with feeding habits in a Pyrenean river. *Regul. Rivers: Res. Mgmt.*, 12: 563–573.

McPhee, J., A. de la Fuente, P. Herrera, Y. Niño, M. Olivares, A. M. Sancha, A. Tamburrino and X. Vargas. El sector del agua en Chile. Su estado y retos. 169-186 *In.* Jiménez, B. and J. Galizia [Ed.] *Diagnóstico* Diagnóstico del agua en las Americas. Interamerican network of academies of science.

Meruane, C. and F. Riestra. 2003. Caracterización de la estructura térmica de los lagos de la red mínima de control de la Dirección General de Aguas. XII Taller Nacional de Limnología 2003, Concepción, Chile

Monin, A. S., and A. M. Obukhov. 1954. Basic laws of turbulent mixing in the atmosphere near the ground. *J. Akad. Nauk SSSR Geofiz. Inst.* 24: 163-187.

Ng, S. M. Y, J. Antenucci, M. R. Hipsey, G. Tibor and T. Zohary. 2011. Physical controls on the spatial evolution of a dinoflagellate bloom in a large lake. *Limnol. Oceanogr.* 56: 2265-2281. doi:10.431/lo.2011.56.6.2265.

Pao, H. P. and T. W. Kao. 1974. Dynamics of establishment of selective withdrawal of a stratified fluid from a line sink. Part 1. Theory. *J. Fluid Mech.* 65(4): 657-688

- Rozas, C. 2011. Análisis modal para el estudio de resonancia de ondas internas excitadas por el viento en el lago Villarrica. MSc thesis. Universidad de Chile.
- Rueda F. J., S. G. Schladow, and S. Ó. Pálmarrsson. 2003. Basin-scale internal wave dynamics during a winter cooling period in a large lake. *J. Geophys. Res.*, 108: 3097. doi:10.1029/2001JC000942
- Saltveit, S., J. Halleraker, J. Arnekleiv and A. Harby. 2001. Field experiments on stranding in juvenile atlantic salmon (*Salmo salar*) and brown trout (*Salmo trutta*) during rapid flow decreases caused by hydropeaking. *Regul. Rivers: Res. Mgmt.*, 17:609–622.
- Spigel, R. H. and J. Imberger, 1980: The classification of mixed-layer dynamics of lakes of small to medium size. *J. Phys. Oceanogr.*, 10, 1104–1121.
- Subsecretaría de Economía, Fomento y Reconstrucción (SEFR), Gobierno de Chile. 2007. D.F.L. N° 4, Ley N° 20.018. Diario Oficial de la Republica.
- Torrence, C., and G. P. Compo. 1998. A practical guide to wavelet analysis. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 79: 61-78
- Turner, J. S. 1973. *Buoyancy Effects in Fluids*. Cambridge University Press.
- Vila, I., M. Contreras, V. Montecinos, J. Pizarro, and D. Adams. 2000. Rapel, 30 years temperature reservoir. Eutrophication or Contamination?. *Arch. Hydrobiol. Spec. Issues Advanc. Limnol.* 55: 31-44
- Wilmott, C. 1981. On the validation of models. *Phys. Geogr.* 2:184-194.

**ANEXO B: PUBLICACIÓN PRESENTADA EN CONGRESO LATINOAMERICANO DE  
HIDRÁULICA**

**EFFECTO DE LA MAGNITUD DE LAS DESCARGAS DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA RAPEL  
SOBRE SU EMBALSE**

**XXV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA  
SAN JOSÉ, COSTA RICA, 9 AL 12 DE SETIEMBRE DE 2012**

**EFFECTO DE LA MAGNITUD DE LAS DESCARGAS DE LA CENTRAL  
HIDROELÉCTRICA RAPEL SOBRE SU EMBALSE**

***Germán Ibarra<sup>1</sup>, Alberto de la Fuente<sup>2</sup> y Manuel Contreras<sup>3</sup>***

<sup>1</sup>*Departamento de Ingeniería Civil, FCFM, Universidad de Chile, Chile, geibarra@ing.uchile.cl*

<sup>2</sup>*Departamento de Ingeniería Civil, FCFM, Universidad de Chile, Chile, aldelaFu@ing.uchile.cl*

<sup>3</sup>*Centro de Ecología Aplicada, Chile*

**RESUMEN:**

Información de una cadena de termistores en el embalse Rapel (Chile Central) es utilizada para estudiar las ondas internas y la distribución de contaminantes o algas inducida por la operación de la central hidroeléctrica bajo una condición afluente de abundancia y otra de sequía. Simulaciones tridimensionales llevadas a cabo mediante CWR-ELCOM son utilizadas para identificar zonas más propensas a la aparición de algas y ver la capacidad de dilución del embalse, mientras que de la información de terreno se eligen ventanas de tiempo significativas para estudiar la evolución de las isotermas bajo distintas condiciones de extracción. Es posible establecer una relación directa entre los caudales extraídos y la amplitud de las ondas internas, identificando la zona profunda como la más afectada, en contraposición a la zona más somera, que tiene una fuerte influencia de los agentes meteorológicos.

**ABSTRACT:**

Information of a thermistor chain from the Rapel reservoir (Central Chile) is used to study internal waves and the distribution of contaminants or algae induced by the hydropower plant's operation under a condition of abundance and another of drought. Three-dimensional simulations run by CWR\_ELCOM are used to identify zones more prone to the appearance of algae and see the dilution capacity of the reservoir, while from the field information some relevant time windows are picked to study the isotherms evolution under different withdrawal conditions. It is possible to establish a direct relationship between the withdrawal and the amplitude of the internal waves, identifying the deepest zone as the most affected, as opposed to the shallower which has a strong influence of meteorological agents.

**PALABRAS CLAVES:** Embalse Rapel, *hydropeaking*, ondas internas, modelación numérica.

## INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, se ha visto en Chile una gran proliferación de lagos artificiales producto de la construcción de diversas plantas hidroeléctricas que vienen a suplir la creciente demanda de energía que presenta el país. Y si bien al momento de su construcción se exigen muchos estudios de impacto ambiental, no existe mucha preocupación respecto de la hidrodinámica propia del embalse. En particular para Chile, la diferencia que puede producir un año seco y otro húmedo es relevante, pues la intermitencia entre uno y otro se sucede cada 3 o 4 años.

El embalse Rapel constituye un lugar de interés para estudiar su hidrodinámica bajo distintos regímenes de caudal, no solo por su ubicación en Chile central, sino también por su conexión al Sistema Interconectado Central (SIC) según lo cual la generación de energía se concentra en los horarios punta y frente a eventos de sequía se puede optar por acumular agua en post de la seguridad energética. Un problema relevante de este embalse está asociado a la calidad de sus aguas, presentando numerosos problemas en los últimos años llegando incluso a ser necesario vaciar sus aguas con el objetivo de limpiar el embalse. Según esto, identificar zonas más propensas a la proliferación de algas podría ser muy interesante para el control de la calidad.

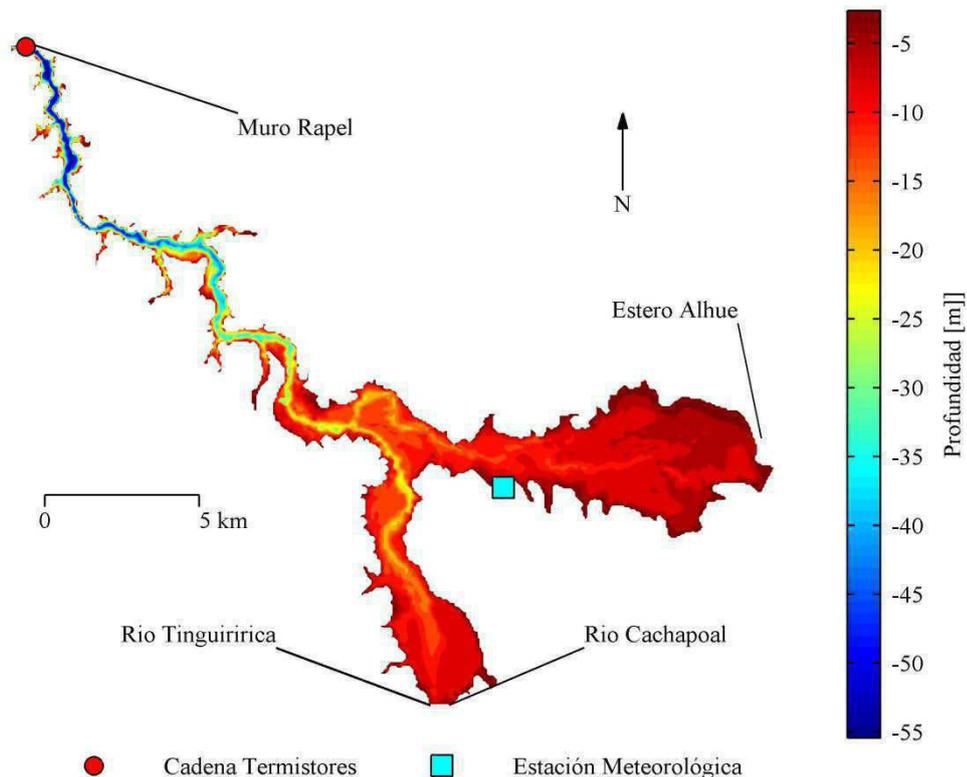
El objetivo de este estudio es analizar cómo influye la operación económica de la central y la variación en la operación dependiendo del tipo de año en los procesos de transporte hidrodinámico dentro del embalse, procurando estudiar las posibles ondas internas que se generen.

## EL EMBALSE RAPEL

El embalse Rapel se genera de manera artificial en el año 1968, por encargo de ENDESA, empresa propietaria de la central hidroeléctrica Rapel. Se encuentra ubicado en la Región del Libertador Bernardo O'Higgins, en Chile central (34°S, 71.6°O) y se forma por la junta del río Rapel y el estero Alhué. A su vez, el río Rapel nace en la unión de los ríos Tinguiririca y Cachapoal, lo cuales son los principales afluentes del embalse, aportando al menos el 86,6% del caudal total (Antenucci, 1996)

El embalse en si tiene una forma dendrítica muy particular, componiéndose por tres cubetas principales: Alhué, Cachapoal-Tinguiririca y Muro (Figura 1). Esta última cubeta es la más cercana a la central y la más angosta; tiene aproximadamente 30 km de largo y un ancho variable de entre 3 km y 150 m. Además, aquí se presentan las mayores profundidades, llegando en la actualidad a los 50 m en la zona del muro. Tanto el Cachapoal como el Tinguiririca tienen regímenes pluviales de crecidas y disponibilidad, concentrando los mayores caudales entre los meses de Abril y Octubre (Antenucci, 1996)

La central hidroeléctrica funciona regida por el Centro de Despacho Económico de Carga (CDEC-SIC), la cual controla todas las centrales integradas al SIC de manera económica, lo que induce una operación centrada en los horarios punta o *hydropeaking*. Producto de la profundidad de la descarga se genera una estratificación a una profundidad mucho mayor a la usual (Casamitjana et al, 2003; de la Fuente & Niño, 2008), caracterizada por un hipolimnion de reducido espesor (Figura 3)

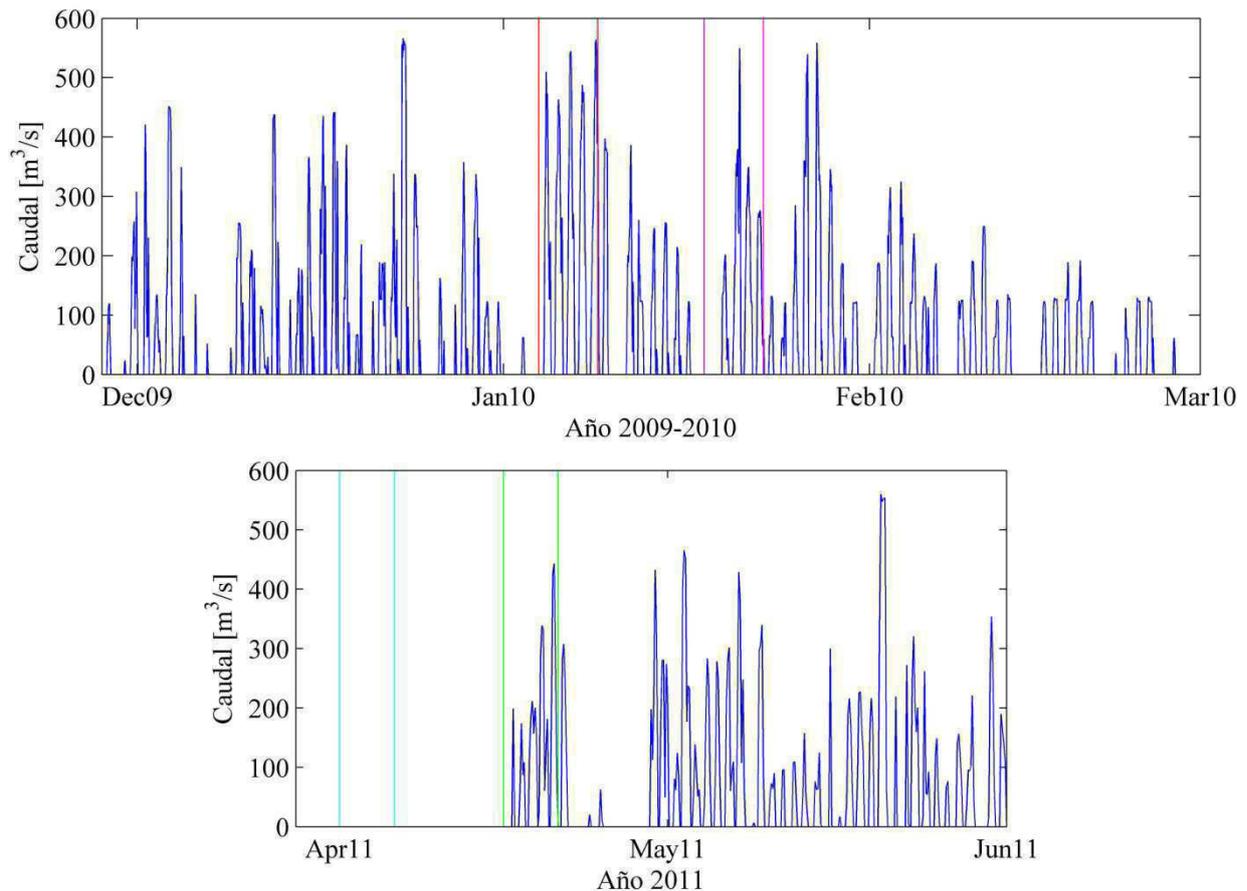


**Figura 1.-** Batimetría del embalse Rapel y ubicación de la cadena de termistores y estación meteorológica

## METODOLOGÍA

**Mediciones en Terreno** - Una cadena de termistores fue desplegada en las cercanías del muro (Figura 1) para registrar dos periodos representativos: la transición primavera-verano ocurrida durante los años 2009-2010 y la transición verano-otoño del año 2011. Dicha cadena está compuesta por 10 termistores ubicados cada 5 metros para el primer periodo de medición y reubicados a una menor distancia en el fondo para el segundo periodo con el objetivo de captar de mejor manera la dinámica de la interfaz de densidad. La primera serie de tiempo comienza en el día 331 2009 (28 de Noviembre) y se extiende más allá del 58 2010 (27 de Febrero), sin embargo se considera esta última como fecha límite del análisis debido a que la incidencia del terremoto del 27 de Febrero de 2010 hace variar las condiciones de la estratificación y la hidrodinámica (de la Fuente et al, 2010) mientras que la segunda serie se extiende desde el 88 2011 (28 de Marzo) al 136 2011 (15 de Mayo). Las mediciones del perfil de temperatura se realizan cada media hora.

Estos dos periodos no solo se diferencian en la estacionalidad, lo que repercute directamente en la estructura vertical de la temperatura del agua, sino también en la forma de operar la central. Mientras que el primero presenta una actividad tradicional o habitual con operación *hydropeaking* la mayoría de los días, el segundo presenta un periodo inmerso dentro de un año seco donde se privilegió acumular el agua en virtud de la seguridad eléctrica, generando muy poco caudal (Figura 2). Para obtener las distintas forzantes meteorológicas se cuenta con una estación meteorológica ubicada en la ribera sur de la cubeta de Alhue (Figura 1), en las cercanías de la confluencia de las cubetas, que registra a intervalos regulares de 1 hora.



**Figura 2.-** Caudales turbinados por la central Rapel para (a) Verano de 2009-2010 (b) Otoño de 2011. Se marcan con colores las ventanas de tiempo para las cuales se analizan las ondas internas.

Por otra parte, es necesario obtener la magnitud de los caudales efluentes con la mayor frecuencia posible. Para ello se utiliza la información horaria que maneja el CDEC-SIC sobre la producción de energía de cada central hidroeléctrica de Chile, y se realiza una transformación a caudales en función del nivel del embalse y una eficiencia sugerida. Para poder obtener los caudales afluentes al embalse se realiza un balance de masa en el embalse considerando la serie de caudales afluentes promedios diarios y el nivel del embalse, volumen que fue asignado completamente a los ríos Cachapoal y Tinguiririca, mientras que asigno un caudal constante igual a  $1.5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  en el estero Alhue, promediando información obtenida de la Dirección General de Aguas (DGA).

**Modelación Numérica** - Para poder simular la respuesta del embalse frente a los dos periodos de evaluación, se utiliza el modelo tridimensional *Centre for Water Research, Estuary, Lake and Coastal Ocean Model* (CWR-ELCOM). Este modelo resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes usando una aproximación hidrostática para la presión. Los procesos modelados incluyen respuestas barotrópicas y baroclínicas, meteorológicas, efectos de rotación, viento, evaporación, caudales afluentes y efluentes y distribución de contaminantes entre otros. El algoritmo numérico se basa en el método de Euler-Lagrange para la advección, con una solución del gradiente conjugado para la altura de la superficie libre (Casulli, 1992; Hodges & Dallimore, 2010).

El modelo numérico requiere información sobre los afluentes y efluentes, tales como caudales, temperatura y salinidad, además de la información meteorológica que define los flujos de calor y momentum que se intercambian entre el cuerpo lacustre y la atmósfera, vale decir, temperatura del aire, presión atmosférica, radiación solar incidente, cobertura de nubes, velocidad del viento y humedad relativa. Es necesario también, introducir una batimetría con una discretización tal que sea

posible realizar un análisis detallado de la dinámica del embalse, sin que el tiempo de ejecución se prolongue por mucho tiempo. Esta se interpola a partir del levantamiento batimétrico realizado por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA) en el año 2004, la cual fue digitalizada posteriormente por el Centro de Ecología Aplicada (CEA). La grilla utilizada considera una discretización de 50 m x 50 m en planta y de 2 metros en la vertical. Esto, sumado a una discretización temporal de un minuto, asegura la estabilidad numérica de la simulación.

Para validar los resultados del modelo numérico, se comparan los perfiles obtenidos con los medidos en terreno mediante un estimador de la precisión del modelo, Skill  $S$  (Willmot, 1981; Ng et al, 2011).

$$S = 1 - \frac{\sum |X_{model} - X_{obs}|^2}{\sum (|X_{model} - \bar{X}_{obs}| + |X_{obs} - \bar{X}_{obs}|)^2} \quad [1]$$

Donde  $X$  es la variable que va a ser comparada con el promedio  $\bar{X}$ . El subíndice “obs” se refiere a las observaciones y “model” a las predicciones del modelo. El valor de  $S$  está limitado entre 0 y 1, donde 1 indica que el modelo se desarrolló de manera perfecta.

Los resultados numéricos acompañados del análisis de las mediciones permiten estudiar la generación de ondas internas y el transporte de compuestos no conservativos que simulan la dinámica de algas.

**Transporte de compuesto no conservativo** - Se simulan dos escenarios para estudiar el efecto de la operación de la central sobre el transporte en el embalse. Estos escenarios se simulan por ventanas cortas de tiempo, escogidas para cubrir diferentes escenarios de operación, partiendo con un periodo caracterizado por una actividad continua con grandes descargas, del 4 2010 (4 de Enero) al 16 2010 (16 de Enero) y otro donde se evidencia la ausencia de caudales turbinados, del 92 2011 (1° de Abril) al 103 2011 (12 de Abril), actividad representativa de un año seco donde se intenta aumentar el nivel del embalse para favorecer la seguridad energética. En las simulaciones se considera que toda el agua del embalse tiene inicialmente una concentración unitaria de un trazador no conservativo que crece según una cinética de primer orden, caracterizado por una tasa de crecimiento  $k$ , la que permite identificarlo como un alga. Para esto se considera un valor de  $k$  igual a  $0.25 \text{ d}^{-1}$ , estimado a nivel mensual por de la Fuente & Niño (2008) para dos grupos de fitoplancton presentes en el embalse.

Estas simulaciones son analizadas a partir de las diferencias en la distribución de los trazadores en términos de concentración, destacando posibles zonas que se podrían ver influenciadas por el accionar de la central y posibles nichos donde se favorecería el crecimiento de algas. Para poder visualizar de mejor forma las zonas afectadas por la dilución, se presenta la concentración normalizada por la tasa de crecimiento del trazador

$$C_N(t) = \frac{C(t)}{e^{kt}} \quad [2]$$

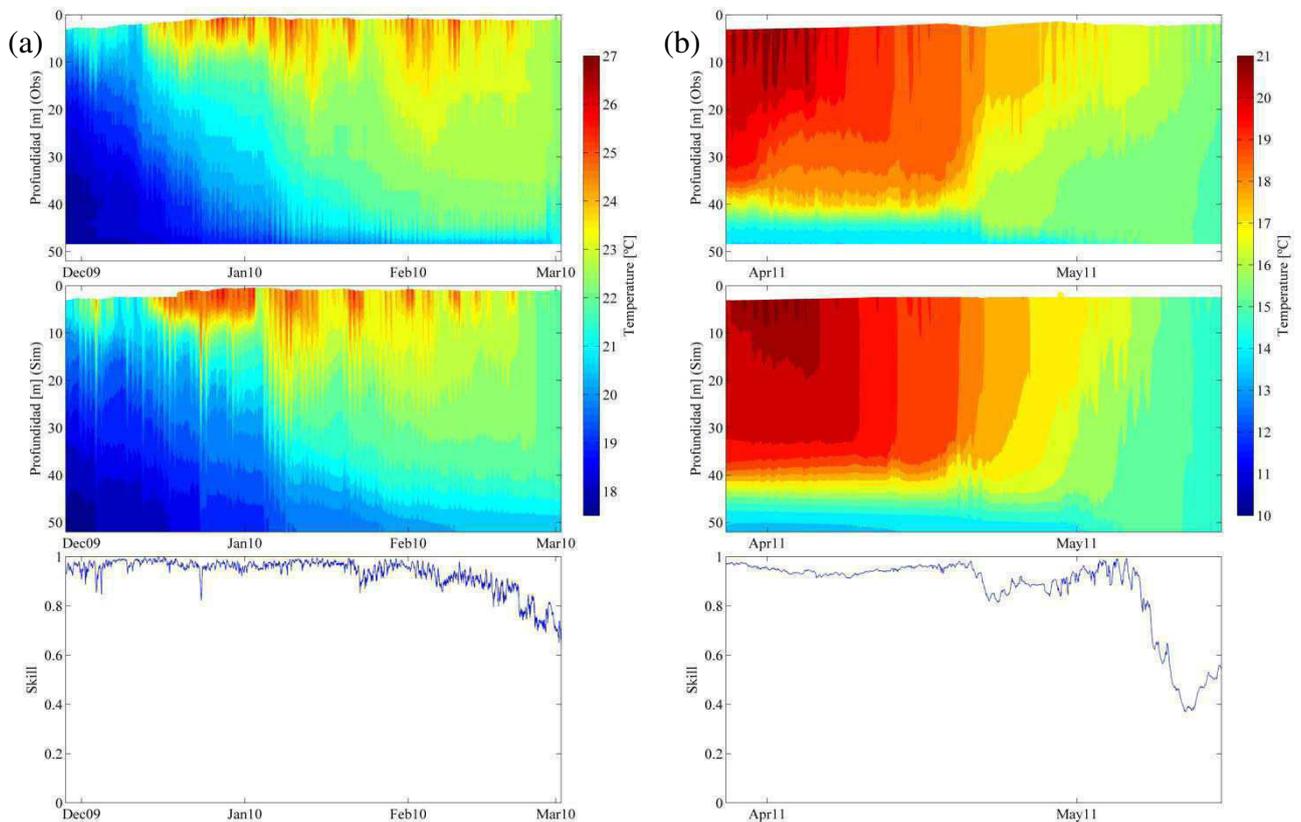
Según lo cual  $C_N$  queda limitado entre 0 y 1, tomando este último valor cuando no se ha visto afecto por la dilución del caudal afluente.

Además, y para poder determinar de mejor forma la influencia real de la extracción por sobre la variabilidad de los afluentes, para cada ventana de tiempo se simulan dos condiciones: La primera que refleja la descarga real, con el régimen *hydropedaking* característico de la operación económica de la central, y otro donde se promedian los caudales diarios de la extracción y se distribuyen de igual manera durante el día, a diferencia de la operación en horario punta.

**Generación de ondas internas** - Para estudiar el impacto de la magnitud de la operación de la central sobre la generación de ondas internas en el embalse, se utilizan directamente las mediciones de terreno. Se calculó la elevación de las isotermas, interpoladas a partir del perfil de temperaturas medido, y se analiza la amplitud de los desplazamientos bajo algunos escenarios característicos de cinco días de duración. Estas ventanas de tiempo son elegidas de modo que reflejen las diferencias en la operación de la central, donde se opta por un periodo de grandes descargas todos los días, otro caracterizado por la falta de producción, utilizando los cinco primeros días de las mismas ventanas de tiempo que las simulaciones de transporte, y dos periodos donde se presenta un cambio en producción de energía, pasando de un estado de actividad nula a uno con descargas periódicas, para las ventanas de tiempo comprendidas desde el 18 2010 (18 de Enero) hasta el 22 2010 (22 de Enero) y desde el 106 2011 (16 de Abril) hasta el 111 2011 (20 de Abril). (Figura 2)

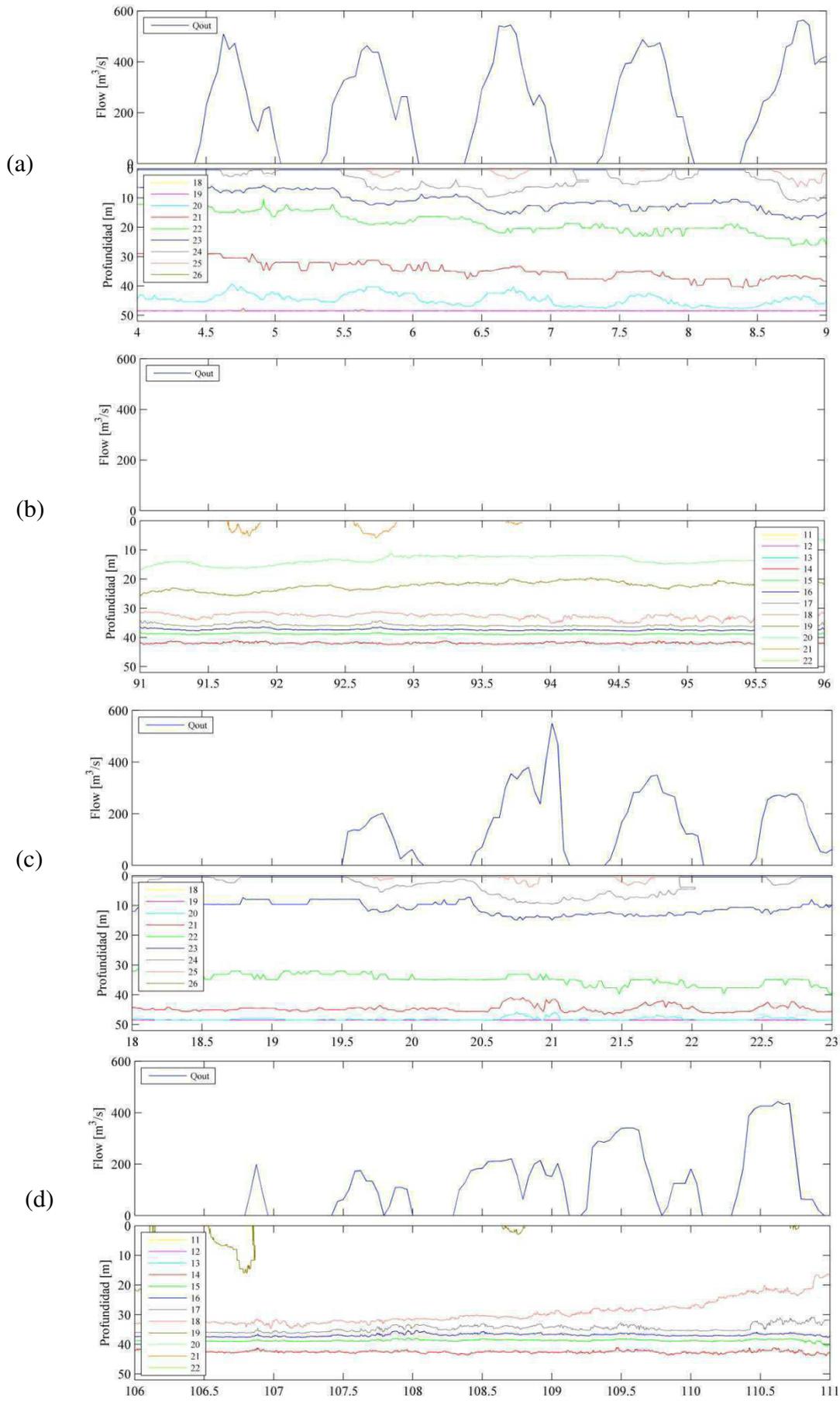
## RESULTADOS

Primero que todo, es posible ver que la buena calidad de las simulaciones, lo que queda bien reflejado a partir del análisis del parámetro  $S$ , donde los valores, mayormente entre 0.8 y 1, muestran un buen ajuste entre las mediciones y las simulaciones (Figura 3).



**Figura 3.-** Perfiles de temperatura, desde arriba hacia abajo, medidos y simulados además del valor del estimador  $S$  en el tiempo, al fondo para (a) Verano de 2009-2010 y (b) Otoño de 2010

Se puede ver que la modelación decae en precisión al final del periodo evaluado de otoño de 2011, lo que se puede explicar principalmente por la dificultad de representar el proceso de destratificación y la inestabilidad que presenta la termoclina y por las pequeñas diferencias de temperatura que hay en todo el perfil.



**Figura 4.-** Caudales turbinados y profundidad de las isotermas para las ventanas de tiempo comprendidas entre (a) 4 y 8 de Enero de 2010, extracción continua (b) 1 y 5 de Abril de 2011, extracción nula (c) 18 y 22 de Enero de 2010 y (d) 16 al 20 de Abril de 2011, ambos mostrando transición de puesta en marcha

Al estudiar las isotermas en el embalse, destaca de inmediato las diferencias en la magnitud que presentan las ondas internas frente a diferencias significativas en la extracción (Figura 4). Cuando hay un accionar continuo para los horarios punta (Fig. 4 (a)) se ven gran variación en las isotermas, llegando a alcanzar ondas de hasta 4 metros de amplitud, destacando la fuerte actividad presente cerca de 40 metros de profundidad, ubicación característica de la termoclina en este embalse (Figura 3). Esto contrasta completamente con la situación donde no hay caudales extraídos (Fig. 4 (b)) donde la amplitud de las isotermas ubicadas a mayor profundidad es prácticamente nula y solo es posible ver algo de actividad en las zonas más someras del embalse.

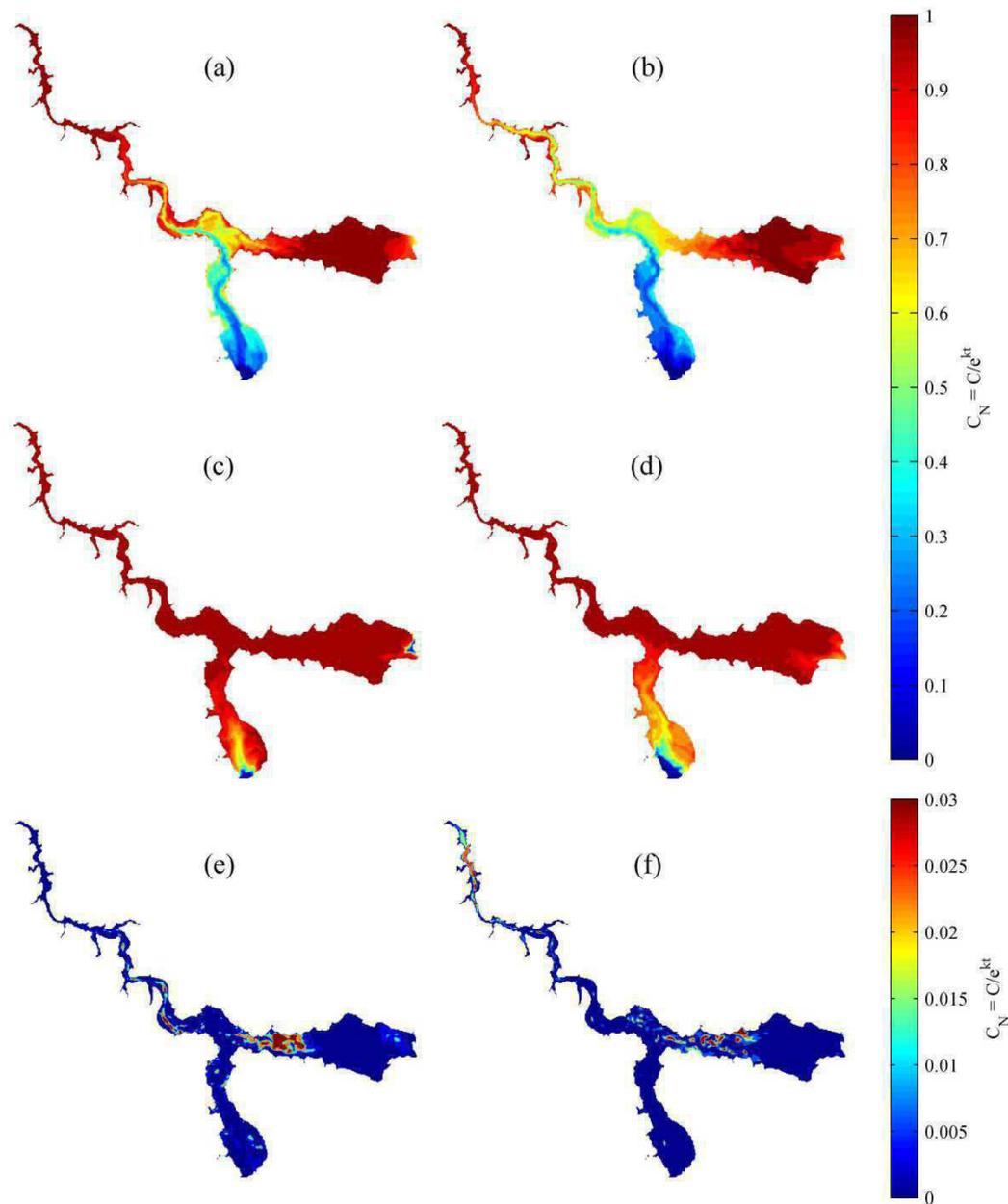
Para las dos ventanas de tiempo que representan la puesta en marcha de la central, pasando de un estado de reposo a la extracción de caudales cercanos a los  $400 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , se evidencia la importancia de la extracción sobre las ondas internas, aumentando notoriamente su amplitud en presencia de las descargas (Fig. 4 (c) y (d)). Sin embargo cabe recalcar que las dos situaciones de puesta en marcha presentadas aquí reflejan situaciones muy distintas, debido a la época del año en que ocurren. Por una parte la ventana del 2010 (Fig. 4 (c)) está inmersa en pleno verano, donde la termoclina presenta una diferencia de densidades importante, lo que le brinda cierta estabilidad a su constitución haciendo posible observar el desarrollo de ondas internas de amplitudes importantes. Por otro lado, la ventana de tiempo del 2011 (Fig. 4 (d)) fue registrada a mediados de Abril, en pleno proceso de destratificación, donde las diferencias de densidad en la vertical son mucho menos pronunciadas. Según esto, el accionar repentino de la central, no solo induce ondas internas, sino también aporta energía para mezclar la columna de agua.

En relación a la distribución del trazador es posible ver una gran diferencia en la dilución que genera el afluente para el caso en que hay gran actividad de extracción (Fig. 5 (a) y (b)) y en la situación donde no hay descargas presentes (Fig. 5 (c) y (d)), sin embargo estas diferencias no pueden ser atribuibles al caudal de extracción, sino más bien a las magnitudes asociadas al afluente. En este caso, un mayor caudal afluente trae asociado un menor tiempo de retención, según lo cual la tasa neta de crecimiento que viene dada por

$$k_{neto} = \left( k - \frac{1}{\theta} \right) \quad [3]$$

Se ve reducida, favoreciendo el lavado del embalse. A pesar de esto, es posible ver ciertas zonas que, independiente del tiempo transcurrido y el caudal afluente, presentan una mayor tendencia al crecimiento de algas, como son la cubeta del Alhué y los distintos brazos laterales que rodean la cubeta del muro.

Para poder ver el efecto real que tiene la extracción sobre la concentración en el muro hay que analizar un periodo de tiempo mayor, que permita ver la interacción entre la descarga y el agua limpia del afluente, bajo distintas condiciones de operación. Para esto se recurre a analizar la diferencia que existe en la concentración para la operación normal con hydropeaking y una operación ficticia donde el caudal extraído se distribuye de manera equitativa a lo largo del día. Esta comparación se realiza solo para el periodo de verano de 2010 ya que para la otra ventana de tiempo los caudales de extracción eran nulos (Fig. 4 (e) y (f)). Pasados 6 días de la simulación, la diferencia en las concentraciones solo se limita a la confluencia, ya que aun no hay una interacción directa entre el afluente y la descarga. Sin embargo, a los 12 días de simulación, es posible ver ciertas variaciones en la concentración cercana al muro, lo que se puede asociar al cambio en la concentración de la descarga producto de la dilución.



**Figura 5.-** Concentración normalizada en el embalse a 6 días de la simulación en (a),(c),(e) y 12 días para (b),(d),(f). El periodo de verano de 2010 se representa en (a) y (b), el periodo de otoño de 2011 en (c) y (d) y la diferencia de concentraciones entre la operación con *hydropeaking* y la operación promedio para el verano de 2010 en (e) y (f)

## CONCLUSIONES

A partir del análisis de las ondas internas es posible ver que hay una relación directa entre la extracción de caudales y su producción en profundidad. Sin embargo la magnitud de las ondas no va a estar influenciada únicamente por la magnitud de las descargas, sino también de otros factores como la estabilidad del perfil de densidades, la variabilidad de los caudales extraídos y hasta una posible resonancia entre la frecuencia de los caudales extraídos y la frecuencia propia del embalse (Ibarra et al, 2010), cosa que podría estar ocurriendo en la simulación del verano de 2010 dada la regularidad de los caudales y las altas amplitudes percibidas. Del caso donde hay ausencia de caudales es posible ver que los agentes meteorológicos, en el corto plazo, solo tienen una influencia en la zona superior del embalse, lo que permitiría definir ciertas zonas de influencia donde la zona superior estaría regida principalmente por agentes externos, siendo los más importantes el viento y

la variabilidad intradiaria de la temperatura producto del día y la noche, mientras que las zonas más profundas se ven afectadas principalmente por el accionar de la central. Avanzado el periodo de otoño, la temperatura se vuelve un factor más relevante, generando mezcla completa en el embalse y la destratificación del mismo. Este proceso se ve favorecido gracias a la energía cinética que aporta la extracción, como queda en evidencia en la Figura 4 (d).

Las modelaciones computacionales reflejan una buena representatividad, lo que queda reflejado en los altos valores que toma el parámetro  $S$ , lo que hace presumir el buen funcionamiento de las simulaciones de transporte de un compuesto no conservativo.

Al analizar las diferencias entre la ventana con caudal constante y sin extracción, las principales diferencias no se deben a la extracción misma, sino más bien a la diferencia en los afluentes. El mayor caudal de entrada presente en la primera simulación se expresa como una menor tasa de crecimiento neta, debido al efecto de lavado que tiene el agua limpia afluente, haciendo que una mayor zona se vea afectada por esto. Sin embargo, es posible evidenciar ciertas zonas más propensas al crecimiento de algas como la cubeta Alhué y los brazos laterales de la cubeta del muro. Esto se asocia principalmente a las diferencias batimétricas de estas zonas en relación al resto del embalse. Al comparar, para una misma situación de afluente, un régimen distinto de extracción, es posible ver que hay ciertas diferencias de concentración en la zona de la confluencia y en el muro. La primera se puede explicar porque la succión de la central puede alterar la circulación de aguas que se genera en confluencia y la segunda porque a tiempos más grandes se empieza relacionar directamente el caudal afluente con la extracción de la central

## REFERENCIAS

- **Antenucci, J** (1996) Hydrobiological modeling of Rapel reservoir, central Chile. Honors Thesis. Department of Environmental Engineering University of Western Australia
- **Casamitjana, X., Serra, T., Colomer, J. Baserba, C. & J. Perez-Losada.** (2003). Effects of the water withdrawal in the stratification patterns of a reservoir. *Hydrobiologia*, 504:21-28.
- **Casulli V. & R Cheng.** (1992) Semi-implicit finite difference method for three-dimensional shallow water flow. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 15:629-648
- **de la Fuente, A. and Y. Niño** (2008). "Pseudo 2D ecosystem model for a dendritic reservoir". *Ecol. Modell.*, 213, 389-401.
- **de la Fuente, A., Meruane, C., Contreras, M. and H. Ulloa** (2010). "Strong vertical mixing of deep water of a stratified reservoir during Maule earthquake, central Chile (Mw 8.8)". *Geophys. Res. Lett.*, 37, L24608.
- **Hodges, B & C. Dallimore.** (2010) Estuary, Lake and Coastal Ocean Model: ELCOM. User Manual. CWR, University of Western Australia.
- **Ibarra, G., de la Fuente, A. and M. Contreras** (2011). "Efecto de la operación intradiaria de la central hidroeléctrica Rapel en la hidrodinámica del embalse". *XX Congreso Chileno de Hidráulica, Santiago, Chile.*
- **Ng, S., Antenucci, J., Hipsey, M., Tibor, G. and T. Zohary** (2011). "Physical controls on the spatial evolution of a dinoflagellate bloom in a large lake". *Limnol. Oceanogr.*, 56(6), 2265-2281.
- **Wilmott, C** (1981). "On the validation of models". *Phys. Geogr.* 2:184-194.

**ANEXO C: PUBLICACIÓN PRESENTADA EN CONGRESO NACIONAL DE  
HIDRÁULICA**

**EFFECTO DE LA OPERACIÓN INTRADIARA DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA RAPEL EN LA  
HIDRODINÁMICA DEL EMBALSE**

**SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA**

**XX CONGRESO CHILENO DE HIDRAULICA**

**EFEECTO DE LA OPERACIÓN INTRADIARIA DE LA CENTRAL  
HIDROELÉCTRICA RAPEL EN LA HIDRODINÁMICA DEL EMBALSE.**

**GERMAN IBARRA<sup>1</sup>  
ALBERTO DE LA FUENTE<sup>2</sup>  
MANUEL CONTRERAS<sup>3</sup>**

**RESUMEN**

Información de una cadena de termistores en el embalse Rapel (Chile Central) durante un ciclo estival son utilizadas para estudiar las ondas internas y eventos de mezcla vertical que se inducen producto de la operación de la central hidroeléctrica. Simulaciones tridimensionales llevadas a cabo mediante CWR-ELCOM son utilizadas para comparar las diferencias en la formación de ondas internas y capacidad de mezcla en la columna de agua bajo dos condiciones de operación: una que reproduce la operación real rescatando la variabilidad intradiaria y otra que considera el promedio diario para la extracción, realizando un análisis espectral para observar sus diferencias. Mientras que en el escenario de caudales instantáneos se verifica una correlación directa entre la extracción y la excitación de las ondas, con un periodo preponderante de 24 horas, para la condición de operación promedio se pierde la relación directa, apareciendo otros periodos de importancia. Estas diferencias se ven acentuadas al analizar la zonas en las que se ve favorecida la mezcla producto de la intensidad de sus descargas.

---

<sup>1</sup>Estudiante de Magister, Departamento de Ingeniería Civil, División Recursos Hídricos y Medio Ambiente, Universidad de Chile - mail: geibarra@ing.uchile.cl

<sup>2</sup>Profesor Asistente, Departamento de Ingeniería Civil, División Recursos Hídricos y Medio Ambiente, Universidad de Chile

<sup>3</sup>Director, Centro de Ecología Aplicada.

## 1. INTRODUCCION

En las últimas décadas, se ha visto en Chile una gran proliferación de lagos artificiales producto de la construcción de diversas plantas hidroeléctricas, las que, dada la geografía particular del país, constituyen una muy buena opción para suplir la creciente demanda de energía. Sin embargo, con el paso del tiempo se han ido agotando los lugares idóneos para la construcción de este tipo de obras, ya sea porque las condiciones topográficas no son las ideales, como por la lejanía de los centros de abastecimiento. Esto unido a la actual legislación de impacto ambiental y la renovada conciencia medioambiental, hace necesario el desarrollo de modelos más detallados que permitan predecir con precisión el comportamiento hidrodinámico y ambiental del lago, producto de los distintos afluentes, los agentes meteorológicos, y en el caso de un embalse artificial, las reglas de operación que definen su funcionamiento. Esta preocupación es extensible a cualquier proyecto localizado en estuarios o en la costa marina, ya sea por la mirada ambiental o por su carácter recreativo.

El embalse Rapel resulta un lugar de interés para este tipo de estudio. Este lago artificial fue construido por ENDESA en los años 60 para efectos de generación hidroeléctrica. Desde ese entonces a la fecha, numerosas casas se han construido en su ribera, cosa que lo convierte en un lugar importante de turismo y recreación. Este embalse ha cambiado mucho desde la fecha de su construcción. Por una parte su batimetría ha variado radicalmente producto del transporte de sedimentos, que ha levantado su profundidad máxima en cerca de 30 metros (Contreras et al, 1994; SHOA, 2004). Además, numerosos problemas de calidad de aguas se han sucedido en la última década, llegando a ser necesario vaciar sus aguas con el objetivo de limpiarlas (M. Contreras, pers. comm.) . Finalmente, y producto de la conexión de la central Rapel al Sistema Interconectado Central, la generación presenta una distribución que concentra las descargas en un periodo de pocas horas del día, y el efecto de esta operación sobre los procesos de transporte hidrodinámico es desconocido.

El objetivo de este estudio es estudiar cómo influye la operación económica de la central Rapel en los procesos de transporte hidrodinámico dentro de embalse, con énfasis en identificar generación de ondas internas y episodios de mezcla vertical. Este artículo se divide en cinco secciones. En la segunda sección se presentan las principales características del embalse Rapel y la operación económica de la central hidroeléctrica. En la tercera sección se detalla la metodología de análisis basada en la modelación hidrodinámica tridimensional del embalse con el modelo numérico CWR-ELCOM (Hodges & Dallimore, 2004), y mediciones de perfiles de la temperatura con una cadena de termistores ubicada cerca de la presa. En la cuarta sección se presentan los principales resultados que evidencian la excitación de ondas internas producto de la operación de la central hidroeléctrica, y la generación de fenómenos localizados de mezcla vertical en el embalse. Finalmente en la última sección se discuten los resultados y se presentan las principales conclusiones de este trabajo.

## 2. EL EMBALSE RAPEL Y LA OPERACIÓN DE LA CENTRAL

El lago Rapel es un embalse artificial que se forma el año 1968 por la construcción de la central hidroeléctrica Rapel, propiedad de ENDESA. Se emplaza en el límite de las provincias de Cardenal Caro y Cachapoal, en la Región del Libertador Bernardo O'Higgins ( $34^{\circ}\text{S}$ ,  $71.6^{\circ}\text{O}$ ). Está formado por la junta del río Rapel y el estero Alhué. El río Rapel a su vez nace en la unión del río Tinguiririca y el río Cachapoal, los cuales aportan al menos el 86,8% del afluente total (Antenucci, 1996).

El embalse posee tres cubetas principales, Alhué, Cachapoal - Tinguiririca y Muro, esta última comienza a partir de la junta de las dos primeras. Posee aproximadamente 30 km de largo, 5 km de ancho en el sector de la cubeta Alhué y poco más de 150 m cerca del muro. Desde el punto de vista de la batimetría, como se puede ver en la Figura 1, la cubeta del muro es la que presenta las mayores profundidades, actualmente llegando a los 50 metros. Tanto el río Cachapoal como el Tinguiririca, los principales afluentes al lago, tienen un régimen pluvial de crecidas y disponibilidad, concentrando los caudales más grandes entre los meses Abril y Octubre (Antenucci, 1996).

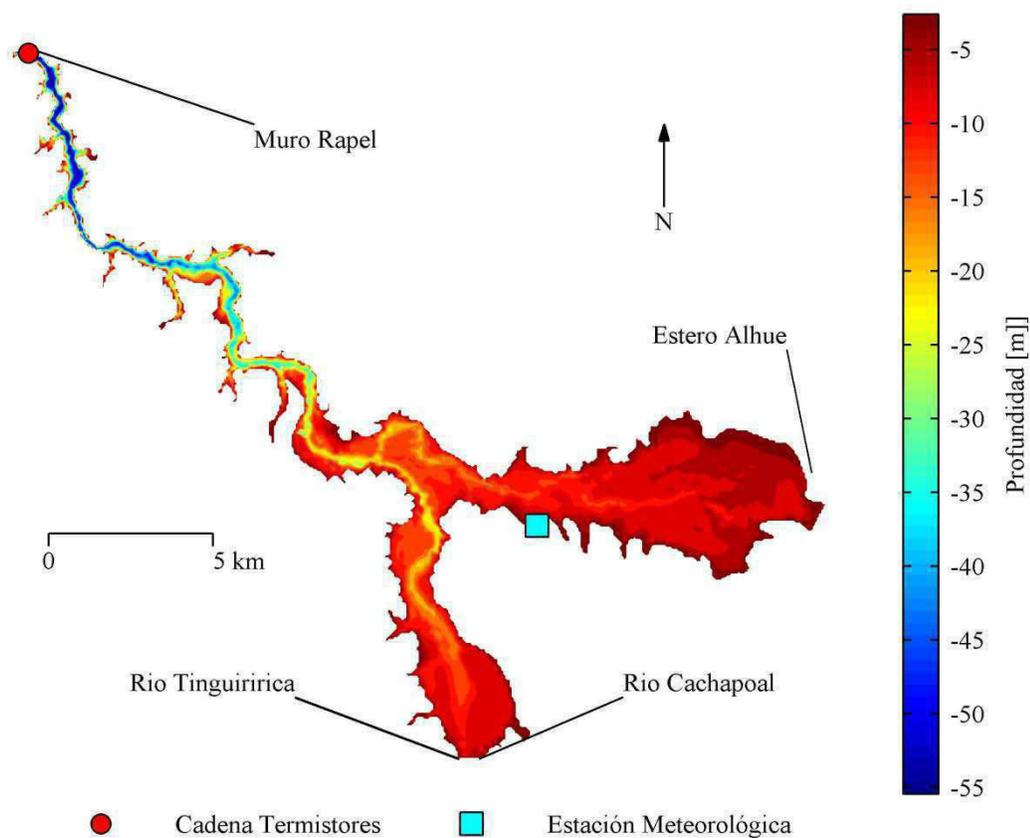
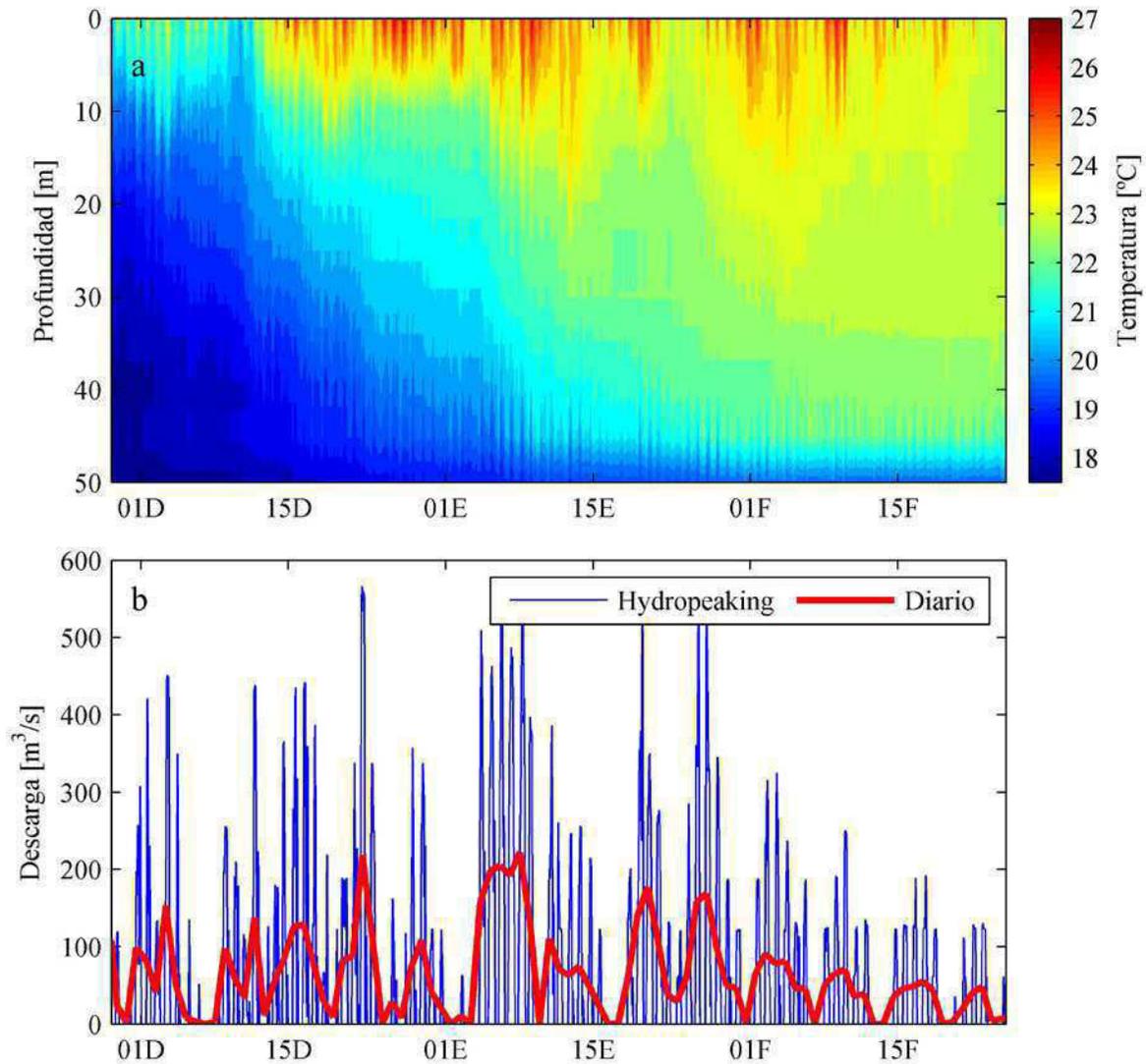


Figura 1. Batimetría del Embalse Rapel y locación de la cadena de termistores y estación meteorológica (Fuente: SHOA, 2004)

La central hidroeléctrica funciona comandada por el Centro de Despacho Económico de Carga, del Sistema Interconectado Central (CDEC-SIC), lo que induce una operación centrada en los horarios punta, o *hydropeaking*, tal como se presenta en la Figura 2. Entre otras cosas, se puede ver que este comportamiento motiva una estratificación a una profundidad mucho mayor a la usual (Casamitjama et al, 2003; de la Fuente & Niño, 2008), caracterizada por un hipolimnion de reducido espesor (Figura 2).



**Figura 2.** (a) Perfil de temperaturas registrado con la cadena de termistores (b) Caudales de descarga para las dos condiciones de operación utilizadas en la modelación: Caudales reales horarios (*Hydropeaking*) y caudales medios diarios (*Diario*).

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1. Mediciones en terreno

Una cadena de termistores fue desplegada en las cercanías del muro durante el verano de la temporada 2009-2010 (Figura 1). Dicha cadena está compuesta por 10 termistores ubicados cada 5 metros hasta una profundidad de 50 metros, midiendo el perfil de temperaturas cada media hora. La serie de tiempo comienza en el día 331 2009 (28 de Noviembre) y extiende más allá del 58 2010 (27 de Febrero), sin embargo se considera esta última como fecha límite del análisis debido a que la incidencia del terremoto del 27 de Febrero de 2010 hace variar las condiciones de la estratificación y la hidrodinámica (de la Fuente et al, 2010). Para obtener las distintas forzantes meteorológicas se cuenta con una estación meteorológica en la ribera sur de la cubeta de Alhue (Figura 1), en las cercanías de la confluencia de las cubetas, registrada a intervalos regulares de 1 hora.

Adicionalmente, y dada la importancia que se le atribuye a priori a las descargas de la central, es necesario obtener la magnitud de los caudales con la mayor frecuencia posible. Para ello se utiliza la información horaria que maneja el CDEC-SIC sobre la producción de energía de cada central hidroeléctrica del país, y se realiza una transformación a caudales en función del nivel del embalse y una eficiencia sugerida. La serie de caudales se promedia a nivel diario para obtener la información de caudales promedios diarios que descarga la central (Figura 2). Estos caudales medios diarios, más el nivel medio diario del embalse, permitieron calcular la serie de tiempo de caudales afluentes al embalse, que se asignó enteramente a los ríos Cachapoal y Tinguiririca, mientras que se usó un caudal constante igual a  $1.5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  en el estero Alhué (promedio de dos años según información DGA).

#### 3.2. Modelación Tridimensional

Para poder simular la respuesta del embalse frente a los dos tipos de operación presentados en la Figura 2, se utiliza el modelo tridimensional del Centre for Water Research, *Estuary, Lake and Coastal Ocean Model* (CWR-ELCOM). Este modelo constituye una herramienta de simulación numérica aplicada a lagos, estuarios y represas, usado para simular la hidrodinámica de un volumen de agua. El modelo resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes usando la aproximación hidrostática para la presión. Los procesos modelados incluyen respuestas barotrópicas y baroclínicas, meteorológicas, efectos de rotación, viento, evaporación, caudales afluentes y efluentes. El algoritmo numérico se basa en el método de Euler-Lagrange para la advección, con una solución del gradiente conjugado para la altura de la superficie libre (Casulli, 1992; Hodges & Dallimore, 2010).

El modelo numérico requiere información intradiaria de caudales afluentes y efluentes, temperatura y salinidad afluente, y la información meteorológica necesaria para el cálculo de los flujos de calor y momentum intercambiados entre el cuerpo de agua y la atmósfera, vale decir, temperatura del aire, presión atmosférica, radiación solar incidente, cobertura de nubes, velocidad del viento y humedad relativa. Estas variables fueron medidas con la estación meteorológica ubicada cerca de la cubeta Alhué. También se hace necesaria

introducir la batimetría con una discretización espacial tal que permita un análisis detallado de la situación, sin que el tiempo de ejecución se haga muy largo. Esta se interpola a partir del levantamiento batimétrico realizado por el SHOA en 2004 y digitalizada posteriormente por el Centro de Ecología Aplicada. La grilla numérica usada en este estudio tuvo una discretización de 50 m x 50 m en planta y de 2 metros en la vertical. Finalmente se determina una discretización temporal de un minuto para cumplir con la condición de CFL de estabilidad numérica.

### 3.3. Análisis de series de tiempo

El campo de ondas internas medido es analizado utilizando espectro de potencia y transformaciones de wavelet sobre la energía potencial integrada (IPE por las siglas en inglés)

$$IPE(t) = \int_{z_0}^{z_1} \rho(z, t)gz dz \quad (1)$$

Donde  $\rho$  corresponde a la densidad,  $g$  se refiere a la aceleración de gravedad,  $z$  a la coordenada vertical y  $t$  al tiempo. El IPE da una visión clara y concisa del contenido de frecuencias en el campo de ondas internas y la distribución relativa de la energía potencial entre las distintas frecuencias (Antenucci et al, 2000), además constituye una buena forma de visualizar el movimiento de las ondas (Rueda et al, 2003). Con el objetivo de uniformizar la señal resultante del cálculo del IPE, se aplica un filtro que le resta a la serie de tiempo la media móvil de la semana en torno al dato particular, con lo que se enfoca el estudio en las frecuencias correspondientes a periodos menores a siete días. Estos espectros son comparados con los que resultan de un análisis análogo a las descargas, lo que permite correlacionar las frecuencias que podrían ser excitadas por la operación de la central. También se utiliza el IPE para estudiar el contenido de energía en cada frecuencia en los perfiles simulados, tanto en la condición de *hydropeaking* como en las descargas promedio diarias.

Finalmente, y para complementar el análisis anterior, se realiza una estimación teórica del periodo de los seiches propios del embalse con el fin de interpretar los máximos espectrales. Para esto se considera que la parte más angosta del embalse, donde se producen las ondas internas, es como un canal y se realiza un análisis considerando un estanque de largo  $L$ , donde se presenta una estratificación en dos fluidos de densidad  $\rho_1$  y  $\rho_2$ , para espesores de las capas correspondiente a  $h_1$  y  $h_2$ , tal como se presenta en la Figura 3.

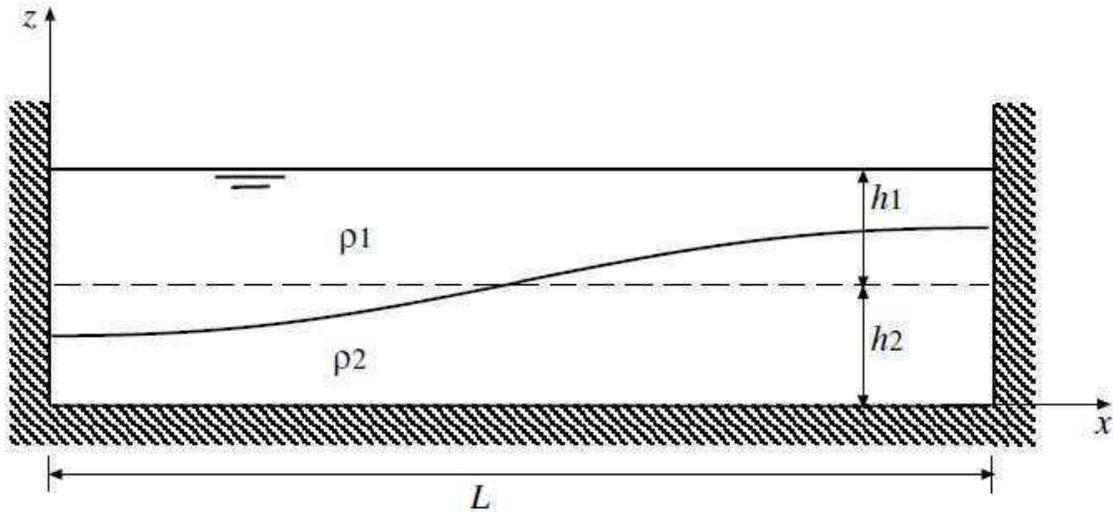


Figura 3. Esquema del estanque usado para determinar el periodo propio de oscilación del estanque (Fuente: Niño 2004)

El periodo asociado a este tipo de canal viene dado por la siguiente expresión (Fisher et al. 1979),

$$T = \frac{2L}{\sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho} \frac{h_1 h_2}{h_1 + h_2} g}} \quad (2)$$

Donde  $\Delta\rho$  se refiere a la diferencia entre las densidades,  $\Delta\rho = \rho_2 - \rho_1$  y  $\rho$  a una densidad de referencia, en este caso  $\rho_1$ .

### 3.4. Análisis potencialidades de mezcla

Mediante la obtención de cortes transversales se pretende estudiar el radio de influencia de la descarga, además de una cuantificación de la capacidad de mezcla, gracias a la variación del número de Richardson ( $Ri$ ) en función del tiempo.

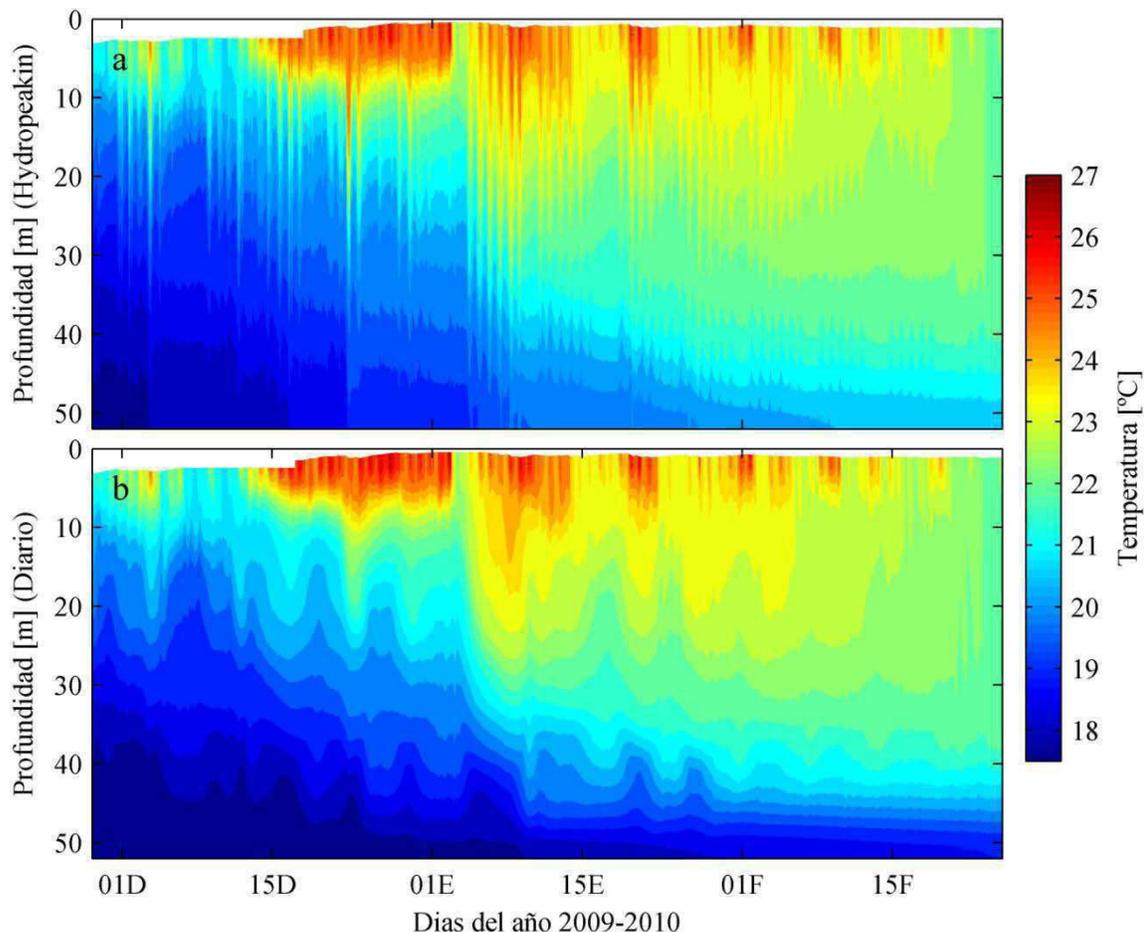
$$Ri = - \frac{\frac{g}{\rho} \frac{d\rho}{dz}}{\left(\frac{d\bar{u}}{dz}\right)^2 + \left(\frac{d\bar{v}}{dz}\right)^2} \quad (3)$$

Donde  $\bar{u}$  y  $\bar{v}$  corresponden a las velocidades medias en el eje OX y OY respectivamente. Este número adimensional representa la relación entre la energía potencial requerida para la mezcla vertical y la energía cinética turbulenta disponible para la mezcla en el flujo. Altos números de  $Ri$  están asociados a una baja capacidad de mezcla y viceversa. Usualmente un valor crítico de 0.25 es usado, de modo que flujos para valores mayores de  $Ri$  la turbulencia es suprimida por los altos gradientes de densidad y la mezcla ocurre (Niño, 2004).

#### 4. RESULTADOS

La Figura 4 muestra el perfil de temperaturas simulado en la misma ubicación de la cadena de termistores, donde se observa la similitud entre el registro obtenido en terreno y la simulación considerando la operación en horarios puntas, además de las diferencias entre ambas condiciones de operación.

La condición de caudales promedios diarios presenta una estratificación mucho más marcada, con una mayor diferencia de temperaturas entre el hipolimnion y la capa superficial, lo que sugiere la presencia de una menor energía cinética turbulenta bajo esta condición de operación. Por otra parte, la simulación bajo las condiciones de *hydropeaking* se ajusta de buena manera a las observaciones, donde se puede ver con claridad al estudiar la evolución en el tiempo que la profundidad de la estratificación está principalmente excitada por la profundidad de la descarga.



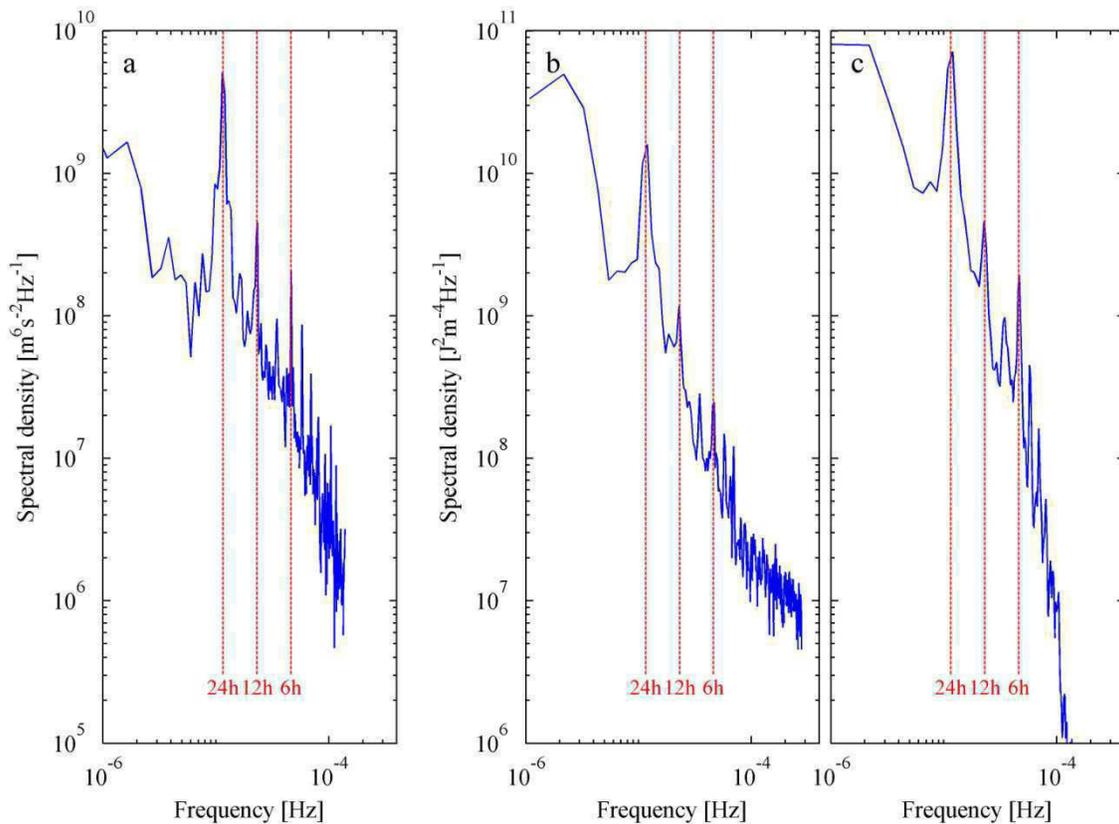
**Figura 4. Perfiles simulados para (a) la condición de operación en horario de punta o hydropeaking y (b) la condición de operación con promedio diario.**

El espectro de densidad de potencia del IPE de la serie de mediciones revela un peak de importancia una frecuencia de  $1,14 \cdot 10^{-5}$  Hz (24,3 horas), además de otras frecuencias importantes con frecuencias un poco mayores, como  $2,33 \cdot 10^{-5}$  Hz (11,9 horas),  $3,47 \cdot 10^{-5}$  Hz (8 horas) y  $4,61 \cdot 10^{-5}$  Hz (6 horas), las cuales también se ven reflejadas en el

análisis de los caudales de salida y la simulación bajo la condición de *hydropeaking*, tal y como se presenta en la Figura 5.

Sin embargo, este tipo de análisis no es del todo válido para el estudio de señales que no son estacionarias ni periódicas, como es el caso de la energía potencial integrada para una estratificación inducida por la extracción de la central. Este problema se intensifica al considerarse periodos de tiempo prolongados, como ocurre en este análisis. Según esto, el análisis de wavelet constituye una mejor herramienta de estudio, dado que permite el manejo de señales no estacionarias gracias a la uso de funciones no convencionales en su disgregación (Torrence & Compo, 1997).

Se utiliza una transformación continua de wavelet para el análisis tiempo-frecuencia, adoptando como base la función de Morlet, la cual se adecua bien para el análisis de la energía potencial integrada (Rueda et al, 2003; Vidal et al, 2007).

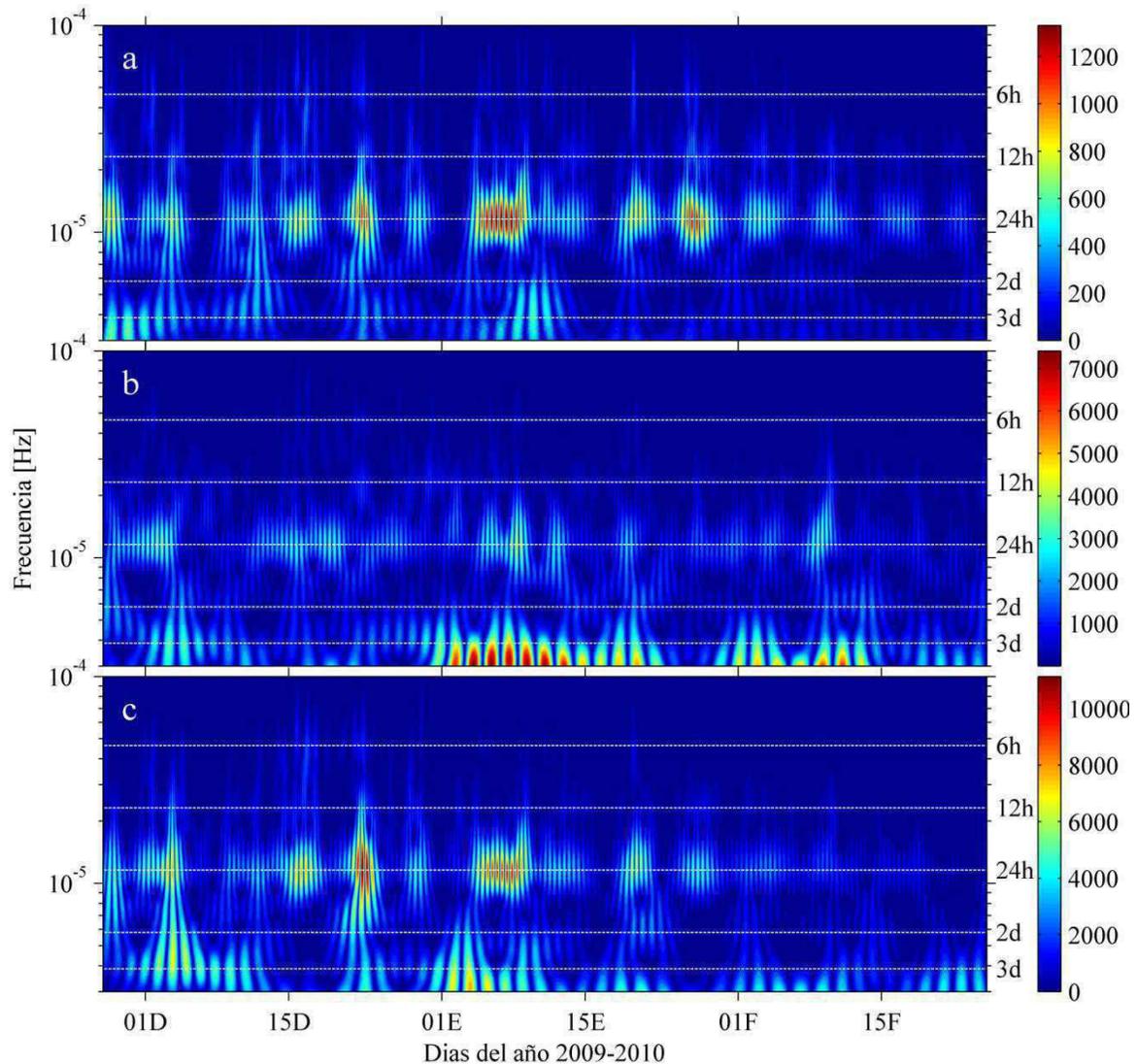


**Figura 5. Espectro de densidad de potencia para (a) extracción de operación bajo condición de *hydropeaking* (b) IPE del perfil de temperaturas medido (c) IPE del perfil de temperaturas simulado bajo la condición de (a). Tanto (b) y (c) han sido tratados por un filtro de media móvil de una semana.**

El análisis de wavelet presenta una distribución temporal de la excitación de las distintas frecuencias, lo que permite comparar que frecuencias se ven excitadas por una extracción de caudal (Figura 6)

Otra vez la frecuencia correspondiente a un periodo de aproximadamente 24 horas resalta como la más importante a lo largo del todo el tiempo de análisis. Más aun, es posible ver la correlación directa entre las extracciones diarias y su influencia en la energía potencial, destacando que en los periodos en que más se marca la periodicidad de 24 horas en las descargas, más se marca la misma periodicidad en las ondas internas. También destaca cierta influencia de la frecuencia correspondiente a los 3 días, la cual debe tratarse con cuidado ya que puede deberse tanto a la forma de operar que presenta la central o al margen de validez del análisis de wavelet.

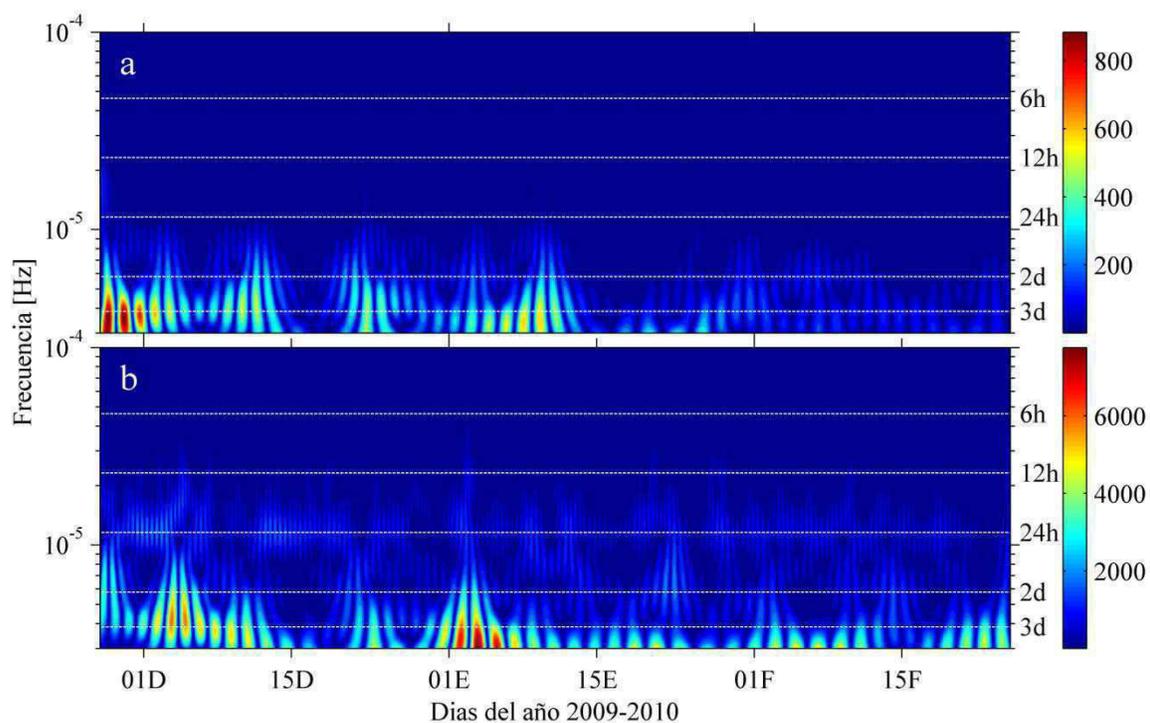
Además, el espectro que revelan las mediciones y la simulación son prácticamente idénticos, lo que presenta la eficiencia del modelo para representar el contenido energético de la columna de agua y da validez al estudio de las ondas internas mediante los resultados del modelo.



**Figura 6.** Análisis espectral de wavelet para (a) extracción de operación bajo condición de *hydropeking* (b) IPE del perfil de temperaturas medido (c) IPE del perfil de temperaturas simulado bajo la condición de (a). Tanto (b) y (c) han sido tratados por un filtro de media móvil de una semana.

Para poder comparar este análisis espectral con los modos normales de oscilación del embalse, se realiza una estimación del periodo característico del Rapel, asumiendo que la cubeta del muro actúa como un canal, según la Ecuación 2. Para diferenciar las dos capas de la esterificación, se define la termoclina en el punto en que el gradiente de densidad se hace mayor, lo que ocurre a 45 metros de profundidad ( $h_1 = 45$ ), de manera que el espesor del estrato profundo es de  $h_2 = 5$ m. Según esto, las densidades medias de los estratos superiores y profundos son  $\rho_1 = 997.98 \text{ kg m}^{-3}$  y  $\rho_2 = 997.47 \text{ kg m}^{-3}$ , que fueron calculadas por el promedio vertical de sus valores. El largo a considerar viene dado por el punto en que la termoclina intersecta el fondo de la batimetría, lo que ocurre a una distancia de 6,5 km del muro aproximadamente. De esta forma se obtiene que del periodo de las ondas internas también se encuentra en torno a las 24 horas.

Al realizar este mismo análisis de wavelet, para la simulación en condiciones de descarga promedio, es posible ver que si bien destaca la frecuencia correspondiente al periodo de 24 horas en el análisis de la energía, ya no aparece en el estudio de las extracciones. Mayor importancia cobra la frecuencia asociada al periodo de aproximadamente 3 días, donde se concentra la mayor cantidad de energía, tanto en las descargas como en la energía potencial, tal y como se puede ver en la Figura 7.

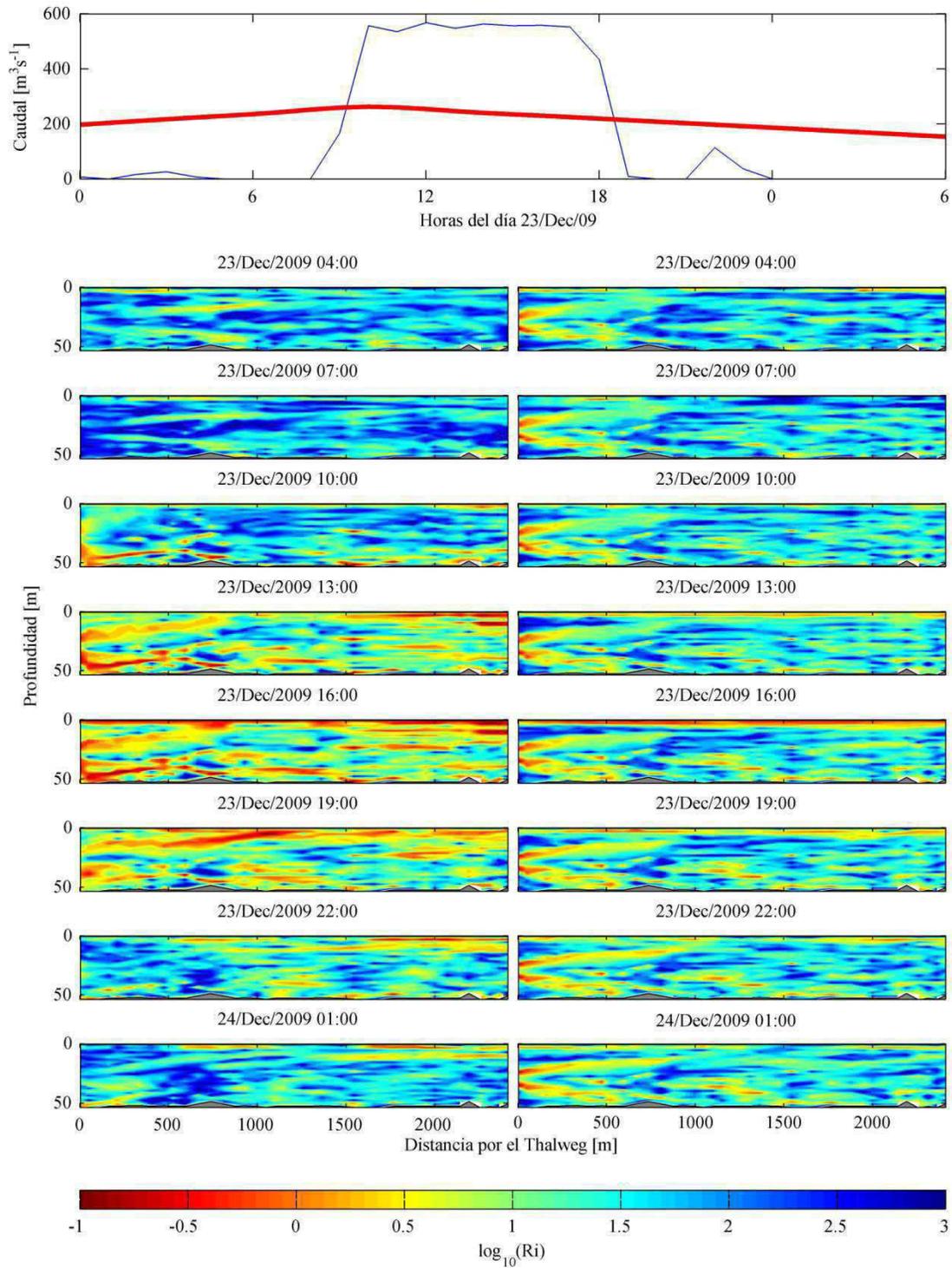


**Figura 7. Análisis espectral de wavelet para (a) extracción de operación bajo condición de caudal promedio diario (b) IPE del perfil de temperaturas simulado bajo la condición de (a) tratado por un filtro de media móvil de una semana.**

Se pierde la correlación observada en el caso de usar la serie real de caudales de extracción, ya que la mayor concentración de energía en ciertas frecuencias para los primeros meses del análisis, no se corresponden con los mayores máximos visualizados en el espectro de la extracción (comparar Figuras 6 y 7).

Esto ya marca una diferencia importante entre los dos escenarios analizados, la cual se ve acentuada al comparar la capacidad de mezcla. Para una descarga específica realizada en dos días consecutivos, se estudia la progresión que siente el número de Richardson a lo largo de las horas, inducida por la descarga, tal como se presenta en la Figura 8.

Si bien en un lago solo los eventos extremos son capaces de inducir mezcla en la columna de agua, aquí se muestra que para la descarga instantánea diversas zonas presentan mezcla como reacción al pulso de extracción, las cuales no son representadas cuando se considera la descarga promedio. Sin embargo, resta aún identificar si el tiempo que perdura el valor del número de Richardson bajo es lo suficientemente largo como para generar las inestabilidades que desencadenen la mezcla. Esto será analizado en un futuro trabajo.



**Figura 8.** Evolución temporal del número de Richardson para un corte transversal en un evento de extracción ocurrido el día 23 de Diciembre de 2009. Se visualiza en función del logaritmo en base 10 debido a la gran variabilidad que presenta el adimensional, según lo cual la condición  $\text{Ri} < 0.25$  queda graficada por  $\log_{10}(\text{Ri}) < -0.6$ .

## 5. DISCUSIÓN

El análisis espectral y de wavelet de la energía potencial integrada de la información recolectada por la cadena de termistores, en comparación a su símil de las extracciones, evidencia la correlación directa entre las descargas y las ondas internas presentes en el embalse. La frecuencia que más energía concentra es la que corresponde al periodo de 24 horas, influenciado por la marcada variabilidad intradiaria presente en las descargas, que concentra las extracciones en los horarios punta. Este peak espectral también puede ser interpretado como la resonancia del seiche interno característico de embalse, cuyo periodo aproximado es de 24 horas. Este periodo es particularmente grande para ondas internas, lo que es motivado por una celeridad marcadamente pequeña en relación lagos más tradicionales, alcanzando solamente los  $15 \text{ cms}^{-1}$  Producto del reducido espesor del hipolimnion inducido por el accionar de la central y la importante sedimentación presente en el embalse. Dadas estas magnitudes, y considerando la frecuencia inercial de 21,5 horas impuesta por la latitud, podrían aparecer ondas del tipo Kelvin o Poincare, sin embargo es necesario identificar si es posible que se generen este tipo de ondas dada la angosta geometría que tiene en embalse en la zona del muro. Posibles seiches cruzados podrían llegar a aparecer en estudios posteriores usando los resultados del modelo, sin embargo estos podrían ser difíciles de distinguir considerando la escala espacial utilizada en la discretización.

Las modelaciones computacionales reflejan una buena representación de la realidad para el caso de la operación con *hydropeaking*, lo que hace presumir un buen funcionamiento del modelo para el caso de operación promedio. En este último, si bien aparece el peak asociado al periodo de 24 horas en el análisis de la energía, este ya no es el más relevante. Esta presencia, dada la falta de un peak relevante en las descargas, puede estar netamente influenciada por el modo natural de oscilación del embalse. Tanto en las descargas como en la energía potencial integrada simulada, la mayor energía se concentra en el periodo de los 3 días, variando así la generación de las ondas internas.

En términos de mezcla, la energía cinética turbulenta disponible es proporcional a la velocidad al cuadrado, lo que ayuda a entender la mayor capacidad de mezcla presente en la operación en horario de punta, donde por cada descarga de caudal en un ciclo diario, más mezcla es inducida en la columna de agua. Esto corresponde al factor principal que explicaría las diferencias en la estratificación para las dos condiciones de operación, donde una menor capacidad de mezcla para la operación promedio se ve reflejada en un hipolimnion de mayor espesor y mayor gradiente de densidades en la zona de la termoclina. Otra forma de referirse a este fenómeno sería hablar de *radios de influencia*, donde la operación por *hydropeaking* es capaz inducir mezcla en un diámetro mucho más grande.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos al Centre for Water Research por la facilitar el modelo CWR-ELCOM, al Centro de Ecología Aplicada por las mediciones en terreno y el financiamiento otorgado para realizar distintas campañas a terreno y a CONICYT por la beca otorgada al primer autor del artículo.

## REFERENCIAS

Antenucci, J. 1996. Hydrobiological modeling of Rapel reservoir, central Chile. Honors Thesis. Department of Environmental Engineering University of Western Australia.

Antenucci, J., Imberger, J., & A. Saggio. 2000. –seasonal evolution of the basin-scale internal wave field in a large stratified lake, *Limnol. Oceanogra.*, 45, 1621-1638.

Casulli, V. & R Cheng. 1992. Semi-implicit finite difference method for three-dimensional shallow water flow. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 15:629-648.

Casamitjana, X., Serra, T., Colomer, J. Baserba, C. & J. Perez-Losada. 2003. Effects of the water withdrawal in the stratification patterns of a reservoir. *Hydrobiologia*, 504:21-28.

Contretas, M., Villagrán, H. & C. Salazar. 1994. Características hidrodinámicas del embalse Rapel. *Medio Ambiente (Chile)* 12:41-49

de la Fuente, A., & Y. Niño. 2008. Pseudo 2D ecosystem model for a dendritic reservoir, *Ecol. Modell.*, 213, 389-401

de la Fuente, A., Meruane, C., Contreras, M. & H. Ulloa. 2010. Strong vertical mixing of deep water of a stratified reservoir during the Maule earthquake, central Chile (Mw 8.8). *Geophysical Research*. 37.

Fisher, H, List, J., Koh, Y & J. Imberger. 1979. *Mixing in inland and coastal waters*. Academic Press.

Hodges, B & C. Dallimore. 2004. *Estuary, Lake and Coastal Ocean Model: ELCOM. User Manual*. CWR, University of Western Australia.

Niño, Y. 2004. *Surface and Internal Waves: Linear Theory for Long Waves of Small Amplitude*. Apuntes del curso Hidrodinámica Ambiental.

Rueda, F., Schladow, G. & S. Pálmarsson. 2003. Basin-scale internal wave dynamics during a winter cooling period in a large lake. *J. Geophys. Res.*, 108(C3), 3097.

Servicio Hidrográfico y Oceanográfico (SHOA), 2004. *Levantamiento batimétrico del embalse Rapel*.

Torrence, C. & G. Compo. 1997. A practical guide to wavelet analysis, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 79(1), 61-78.

Vidal, J., Rueda, F. & X. Casamitjana. 2007. The seasonal evolution of high vertical-mode internal waves in a deep reservoir. *Limnol. Oceanogr.*, 52, 2656-2667.

**ANEXO D: POSTER PRESENTADO EN CONGRESO INTERNACIONAL DE MANEJO DE  
EMBALSES**

TOWARD LINKING ALGAL BLOOM VULNERABILITY WITH THE HYDROPOWER PLANT  
OPERATION IN RAPEL RESERVOIR

Germán Ibarra <sup>1</sup>, Alberto de la Fuente <sup>1</sup> and Manuel Contreras <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile, Santiago, Chile

<sup>2</sup> Centro de Ecología Aplicada, Santiago, Chile

contact e-mail: geibarra@ing.uchile.cl

## 1. Introduction

In the past few decades, a large number of reservoir has been built in Chile for hydropower purposes, in which the hydropeaking operation of the hydropower plant define the hydrodynamics of the reservoir. In order to achieve a better understanding of these artificial systems, a three dimensional model is used to analyse the hydrodynamics of Rapel reservoir (34°S, 71.6°W), with special interest in defining the impacts that the hydropeaking operation has on its hydrodynamics, and the consequences on the water quality of the reservoir.

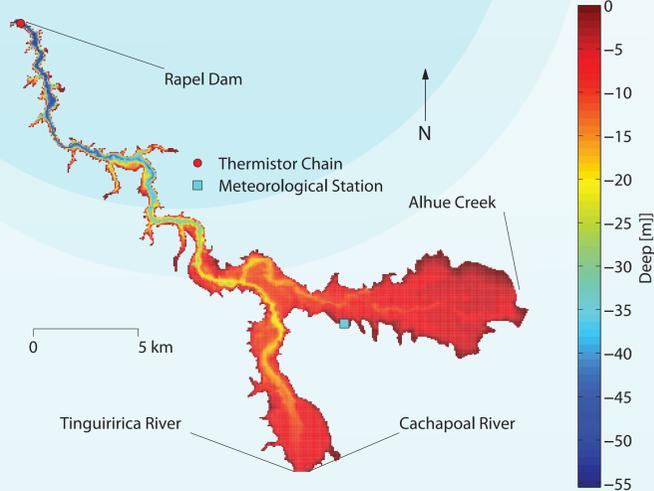


Figure 1. Rapel Reservoir and its principal tributaries

## 2. Study site and Methodology

- The Rapel reservoir (Fig 1) is located in central Chile and supplies the Rapel hydropower plant whose operation is economically-defined by the Load Economic Dispatch Center, which induces a hydro-peaking behaviour on the outflows (Fig 2). This is a 40 years old dendritic reservoir that nowadays is presenting several algal bloom events.

For studying this reservoir it was considered:

- Field measurement of a thermistor chain near the dam and a meteorological station (Fig 1).
- Three-dimensional simulations of the hydrodynamics using ELCOM for different case scenarios based on the location of the outflow and the operation of the hydropower plant (considering the instantaneous and the daily mean value of the outflows (Fig 2)).
- Algae were considered as a tracer that growth accordingly to a first-order kinetic reaction, characterized by a bulk growth coefficient,  $k$ , as follow:

$$k = \frac{\ln(\alpha) + 1}{\theta}, \quad \alpha = \frac{C(\theta)}{C_0}$$

Where  $\theta$  is the retention time, and  $\alpha = 0.5, 1$  and  $2$  were used.

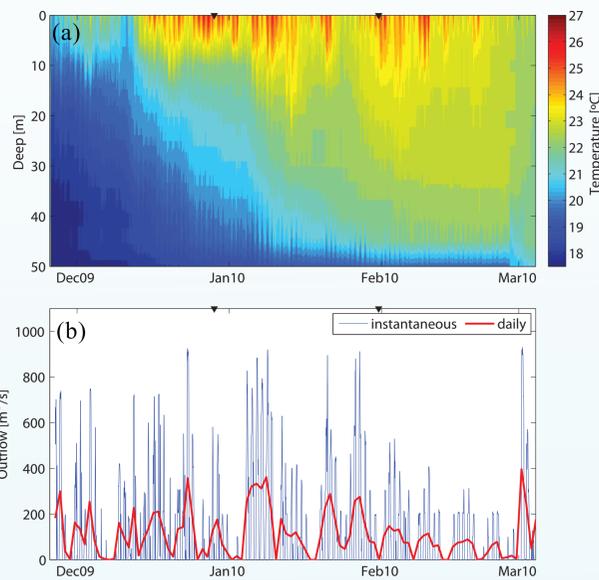


Figure 2. (a) Thermal Structure of the reservoir near the Dam (b) Comparison between hydro-peaking and daily operation

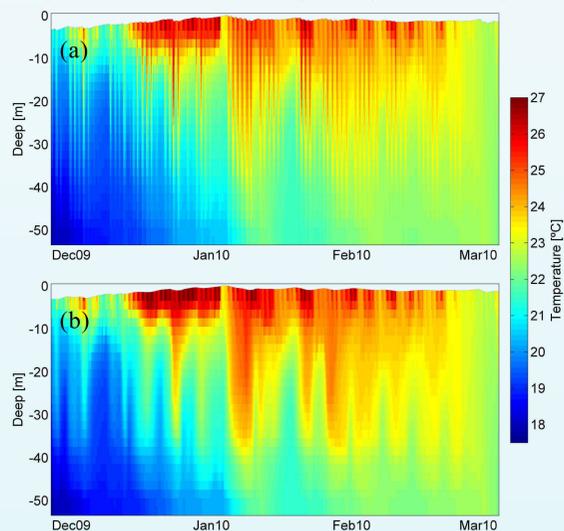


Figure 3. Simulated thermic structure for the thermistor chain location for (a) hydropeaking behaviour (b) daily operation

## 3. Results

- The hydrodynamics simulations recreated the seasonal and diurnal dynamics, nevertheless it not possible to reproduce the thermocline location (Fig 3).
- By changing the deep of the outflow, the influence of the elevation at which the water is withdrawal is evident (Fig 4).
- Different concentrations are simulated depending on the hydropower plant operation considered. (Fig 5 & 7).

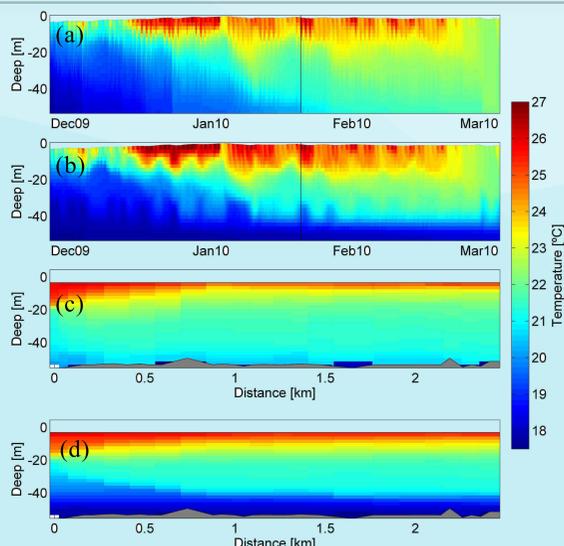


Figure 4. Simulated thermic structure with the water withdrawal at 20 m deep. (a,c) hydropeaking behaviour (b,d) daily operation. (b,d) represent a curtain through the thalweg at the time mark with a line in (a,c).

## 4. Discussions

By changing the elevation of water withdrawal to 30 m high, it was possible to define that the boundless influence of water withdrawal in as large as 15 m (Fig 4D). As water withdraw actually occurs at 5m high, it is hypothesized that the stratificated conditions shown in Fig. 2 may be induced by either groundwater discharges or the interaction with the sediments.

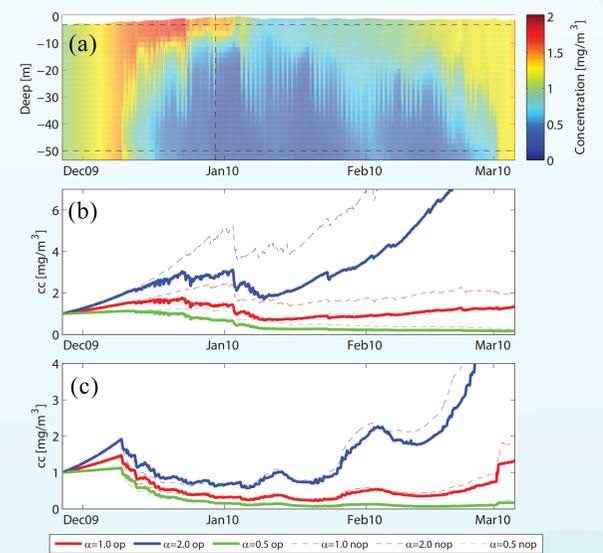


Figure 5. Concentration structure at the thermistor chain location for  $\alpha=1$  (a) and superficial and deep concentration series (marked with a line in (a)) for the all different scenarios (b,c)

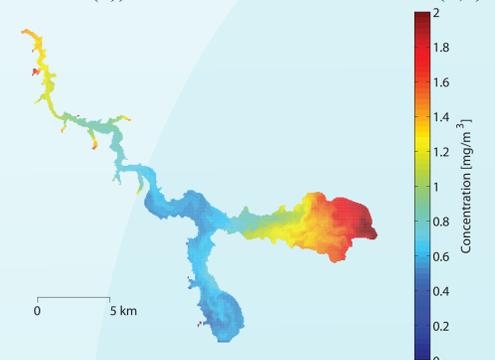


Figure 6. Concentration for hydro-peaking behaviour with  $\alpha=1$  at the retention time

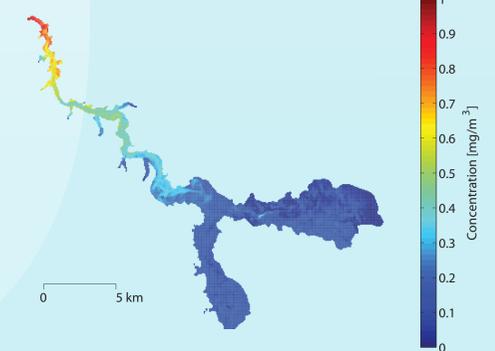


Figure 7. Absolute value of difference of concentration between both operation scenarios, with  $\alpha=1$  at the retention time

- Fig. 6 shows the existence of zones more prone to the appearance of algae. These niches are located in Alhue Basin at the east of reservoir, and small side-arms of the Dam Basin located at north.

- Fig 7 shows that the hydropeaking operation has a major impact on the Dam Basin, where simulation without it predicted larger concentrations in all the scenarios of  $\alpha$  (Fig 7). Water withdrawal induces a difference between the deep and surface concentration (Fig 5).

## References

- de la Fuente, A., and Y. Niño. 2008. Pseudo 2D ecosystem model for a dendritic reservoir, Ecol. Modell., 213, 389-401
- CWR Centre for Water Research. 2004. User Manual of ELCOM and ELCOM-CAEDYM.
- Casamitjana, X., T. Serra, C. Baserba, and J. Perez. 2003. Effects of the water withdrawal in the stratification patterns of a reservoir. Hydrobiologia 504: 21-28.

## Acknowledgments

- To the 'Centro de Ecología Aplicada' (CEA) for the field measurement and financial support.
- To the 'Centre for Water Research' (CWR) for the providing ELCOM model.
- To Conicyt scholarship of first author and Fondecyt project number 11100306