

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXI CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

EFFECTO DE LA OPERACIÓN DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA RAPEL EN LA CALIDAD DEL AGUA DEL EMBALSE

VALERIA ROSSEL B.¹
ALBERTO DE LA FUENTE S.²

RESUMEN

Estudios previos han mostrado que la operación de la central Rapel afecta la hidrodinámica del embalse, aumentando la mezcla vertical y disminuyendo la dispersión horizontal. Además, la incorporación de restricciones en la operación de la central hidroeléctrica Rapel, como la definición de un caudal mínimo, altera la temperatura del efluente del embalse y el perfil de temperatura en las cercanías del muro. Frente a esta evidencia, se busca estudiar los efectos de la operación de la central en la calidad del agua del embalse, problema permanente en el cuerpo de agua pues ha presentado en años anteriores eventos de florecimiento de algas. Para ello, el embalse es simulado usando el modelo tridimensional de hidrodinámica y calidad del agua, ELCOM-CAEDYM. Los escenarios de operación de la central se obtienen usando un software que reproduce el funcionamiento de las centrales eléctricas de Chile central. El estudio contempla 3 escenarios de régimen hidrológico para el periodo (seco, húmedo y normal), y los casos con y sin caudal ecológico. Los resultados permiten definir algunas zonas que presentan una mayor concentración de algas y permiten también limitar el efecto inmediato de la variación intradiaria a la cubeta Muro. Variaciones importantes sobre el nivel de embalse afectan primeramente la calidad de la cubeta Alhué, desde donde el fitoplancton puede ser transportado hacia la zona cercana al Muro. El régimen húmedo permite una mayor generación hidroeléctrica y una mejor calidad del agua. La inclusión de un caudal ecológico tiene un impacto en la zona cercana a la presa, reduciendo la calidad del agua en esta zona.

¹Estudiante de Magíster, Departamento de Ingeniería Civil, División Recursos Hídricos y Medio Ambiente, Universidad de Chile - vrossel@ing.uchile.cl

²Profesor Asistente, Departamento de Ingeniería Civil, División Recursos Hídricos y Medio Ambiente, Universidad de Chile – aldefafu@ing.uchile.cl

1. INTRODUCCIÓN

La construcción y operación de centrales hidroeléctricas de embalse producen cambios ambientales importantes en la hidrología y calidad del agua del cauce original, como también impactos sociales en el entorno. Actualmente, los costos y beneficios de estos proyectos deben ser apropiadamente evaluados, de manera de poder prevenir, controlar y mitigar eventuales problemas medioambientales.

El embalse Rapel, construido en la década de los 60 para generar hidroelectricidad en Chile central, es una central hidroeléctrica cuya operación obedece a los intereses económicos del Sistema Interconectado Central (SIC), por lo que su funcionamiento no incluye consideraciones ambientales que permitan proteger al embalse de los impactos en las aguas al interior de este y aguas debajo de la presa, donde se ubica el río Rapel. Las fluctuaciones intradiarias en la extracción de agua desde el embalse alteran el régimen hidrológico natural e impiden la existencia de un caudal ecológico que alimente al río Rapel. Este cuerpo de agua se ha visto afectado frecuentemente por la eutroficación y eventos de florecimiento de algas, lo que perjudica el desarrollo turístico y recreativo que con los años se ha desarrollado en los alrededores de este sistema. Adicionalmente, la disminución de la cota de embalse en periodos de sequía dificulta la realización de deportes náuticos.

Durante su operación el embalse ha recibido las descargas de aguas servidas, desechos agroindustriales y desechos mineros, con alto contenido de sedimentos, nutrientes y presencia de metales (Vila et al., 2000). Durante los años 70, se tienen las primeras evidencias del proceso de eutroficación que empezaba a experimentar el sistema y con los años, eventos de mortandad de peces masiva y florecimiento de algas han confirmado la declinación en la calidad del agua del embalse (Cabrera et al., 1977; Vila et al., 1987; Vila et al., 1997).

Estudios anteriores a este trabajo han mostrado que la operación de la central tiene efectos sobre la hidrodinámica del embalse, provocando una estratificación a mayor profundidad (de la Fuente & Niño, 2008), aumentando la mezcla vertical y disminuyendo la dispersión horizontal (Ibarra, 2013). De acuerdo a Guzmán (2013), la incorporación de restricciones en la operación altera la temperatura del efluente del embalse. Esto a su vez, impacta en la temperatura del agua al interior del embalse, principalmente en las cercanías del muro.

Frente a esta evidencia, se busca estudiar los efectos de la operación de la central en la calidad del agua del embalse en la zona cercana a la presa mediante el uso de programas computacionales capaces de simular la hidrodinámica y calidad del agua del embalse, y las interacciones entre sedimentos, nutrientes y algas. Se busca aumentar la información disponible en el embalse, además de dar antecedentes en la búsqueda de una configuración más favorable para el sistema.

2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El embalse Rapel se ubica en Chile central, región del Libertador Bernardo O'Higgins (34°S, 71.6°W). Corresponde a un embalse dendrítico, monomítico, formado por 3 subcubetas con diferentes tiempos de retención. La cubeta Alhué en el este, es la zona más superficial y tiene como afluente al estero Alhué. En el sur, se encuentra la cubeta Cachapoal que tiene como

afluentes a la unión de los ríos Cachapoal y Tinguiririca. La cubeta Muro recibe los aportes de las dos otras cubetas y se encuentra en la zona noroeste del embalse.

El embalse y la central hidroeléctrica Rapel entran en funcionamiento en 1968, con el objetivo de satisfacer las demandas energéticas de la zona. En Chile central, el sistema eléctrico obedece a las exigencias del Centro de Despacho Económico de Carga (CDEC) del SIC, cuyo criterio de operación consiste en minimizar los costos económicos del sistema en su totalidad, es decir, contemplando centrales hidroeléctricas, térmicas y eólicas. La optimización del CDEC-SIC obliga a la central Rapel a tener una operación concentrada en horarios puntas, con valles prolongados durante las horas restantes del día, esquema de operación conocido como *hydropeaking*. El embalse fue construido previo a que restricciones ambientales fueran requeridas a las obras hidráulicas, de manera tal que el caudal del río Rapel es cero durante gran parte del día.

3. METODOLOGÍA

3.1. Mediciones en terreno

Se dispone de datos medidos en terreno en el embalse Rapel, entre noviembre de 2009 y marzo 2010. Específicamente, se cuenta con información meteorológica horaria de una estación ubicada en la capitanía de puerto del embalse Rapel ($34^{\circ} 8' 58.94''$ latitud Sur y $71^{\circ} 27' 16.14''$ longitud Oeste). Además, una cadena de termistores del Centro de Ecología Aplicada se ubicó en las cercanías del muro, registrando información cada 5 [m]. Respecto a la calidad del agua, se dispone de muestreos puntuales en 6 puntos del embalse que incluyen concentración de nitrógeno, fósforo y clorofila-a, efectuadas por el centro EULA-Chile en el contexto del estudio “Diagnóstico y plan de gestión para la calidad del agua del embalse Rapel” (EULA-Chile, 2011). En la Figura 1, se muestra la ubicación del embalse Rapel y la de los diferentes puntos de monitoreo.

La información de la operación de la central se obtiene del CDEC-SIC, que mantiene un registro de la energía generada y del nivel del embalse en el sistema. Más información se encuentra disponible en Ibarra (2013) y Guzmán (2013). Por último, los datos de batimetría se obtienen a partir de un levantamiento batimétrico efectuado por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico (SHOA) (Ibarra, 2013).

3.2. Modelo hidrodinámico y de calidad del agua

El software *Estuary and Lake Computer Model* (ELCOM) es un modelo numérico tridimensional capaz de reproducir el comportamiento hidrodinámico temporal y espacial de cuerpos de agua sometidos a forzantes ambientales, tales como la radiación solar, velocidad del viento, caudales afluentes y efluentes, precipitaciones, entre otros (Hodges & Dallimore, 2010).

Por su parte, el complemento *Computational Aquatic Ecosystem Dynamic Model* (CAEDYM) es un modelo acuático ecológico diseñado para trabajar acoplado al modelo hidrodinámico ELCOM. CAEDYM es capaz de representar los ciclos de Si, C, N y P de manera integral y de

incluir la dinámica de fitoplancton, zooplancton, patógenos, sólidos suspendidos, parámetros geoquímicos, entre otros (Hipsey et al., 2010).

Para maximizar la rapidez y requerimientos computacionales, ELCOM y CAEDYM comparten una estructura interna de datos, formato de archivos de salida y rutinas de visualización de los resultados.

Usando el modelo hidrodinámico de Ibarra (2013), y los datos de calidad del agua, se trabaja en la incorporación del módulo de calidad del agua. Son incluidos en el modelo la concentración de nitrógeno, fósforo, sólidos suspendidos, oxígeno disuelto, y en cuanto a fitoplancton, las concentraciones de clorofila de los grupos diatomeas, cianobacterias y clorofíceas. Se escogieron las constantes cinéticas del fitoplancton de Jørgensen et al (1991) de manera tal de reproducir la dinámica de las especies (1.3, 0.55 y 0.45 (1/día) para diatomeas, clorofíceas y cianobacterias respectivamente). La abundancia de diversas especies de cianobacterias fue calculada en el embalse (EULA-Chile, 2011), encontrándose especies que se asocian con problemas de toxicidad del agua.

Los escenarios simulados con ELCOM-CAEDYM se realizan usando la misma configuración: condiciones iniciales, calidad de agua afluente y condiciones meteorológicas. La información de entrada que varía de una simulación a otra se centra en los caudales de entrada y caudales de salida al embalse, como se explica en el siguiente apartado.

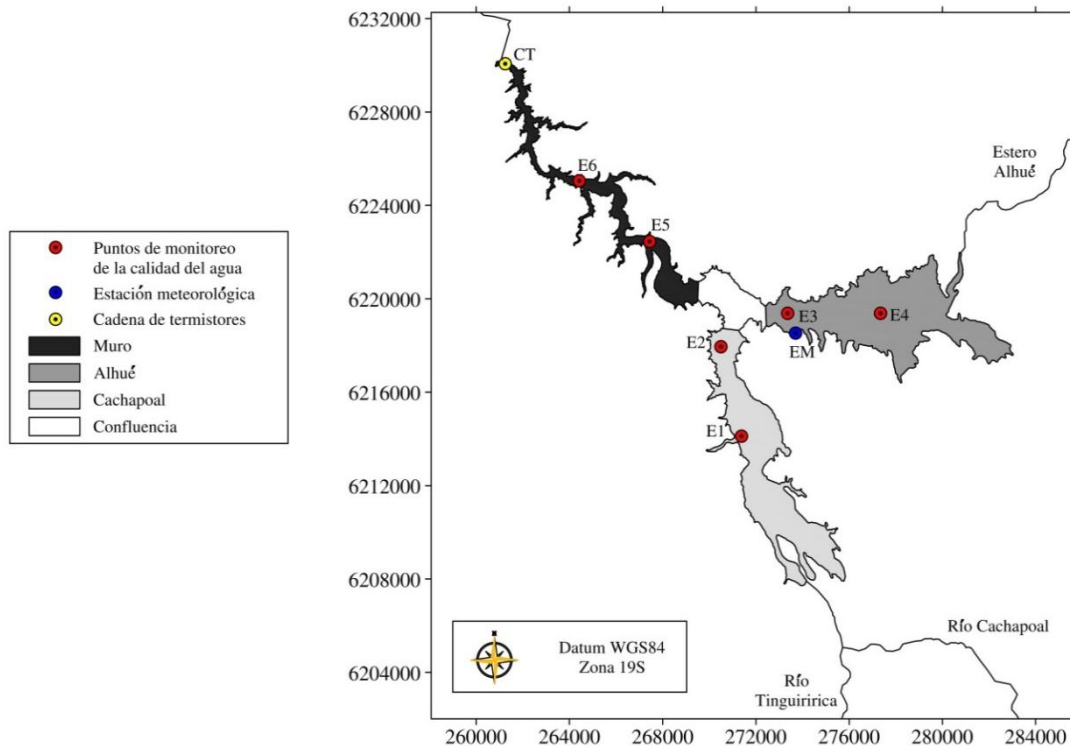


Figura 1: Cubetas del embalse Rapel y ubicación de los puntos de monitoreo, estación meteorológica y cadenas de termistores usados en el estudio

3.3. Modelo de operación de la central hidroeléctrica

El software Mixed Integer Programming Unit Commitment (MIPUC) corresponde a una herramienta educacional desarrollada por el Centro de Energía de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile. MIPUC reproduce las labores de despacho de corto plazo del SIC, satisfaciendo las demandas del sistema a la vez que minimiza los costos operaciones de este.

Usando el modelo MIPUC, se fijan las variables asociadas a las otras centrales pertenecientes al SIC (precio combustible y nivel de embalses, entre otros), y se trabaja solo bajo consideraciones sobre la central Rapel. De esta forma, se tienen series de caudales turbinados diferentes de la operación realizada durante el periodo de estudio, pero que responden al esquema hydropeaking usual del sistema. Se usó como referencia el año verano 2010-2011, que hidrológicamente corresponde a un año seco.

Se analizan los casos base esquema hydropeaking medido durante el periodo en estudio y una operación igual al promedio diario de los caudales turbinados. Esto permite estudiar el efecto de la variabilidad intradiaria de los caudales efluentes, sin que el nivel del embalse se vea afectado.

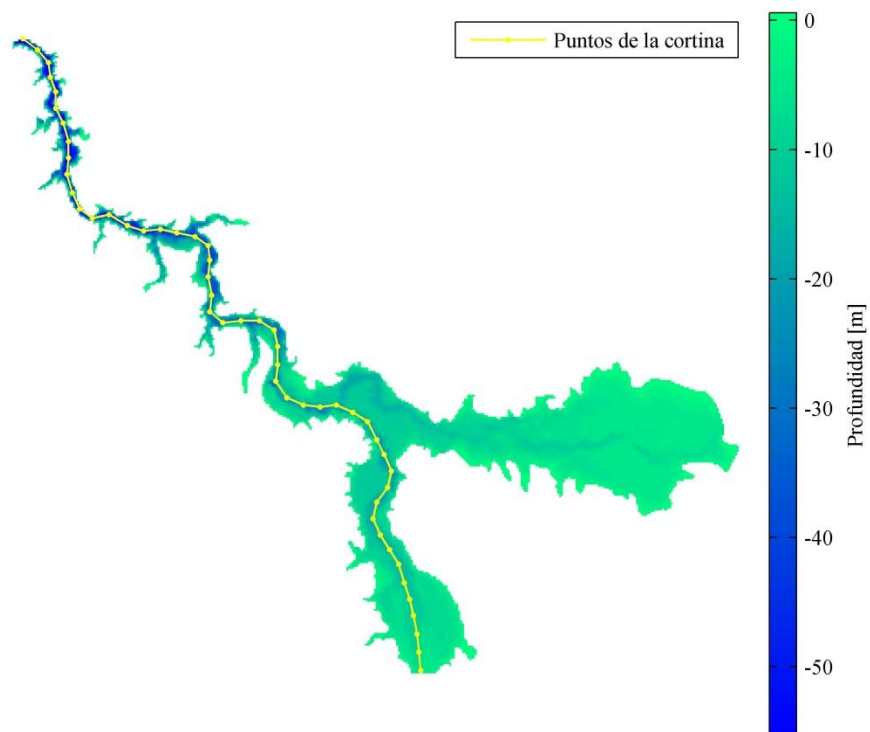


Figura 2: Batimetría del embalse y ubicación de los puntos pertenecientes a una cortina que recorre el eje central de las cubetas Cachapoal y Muro

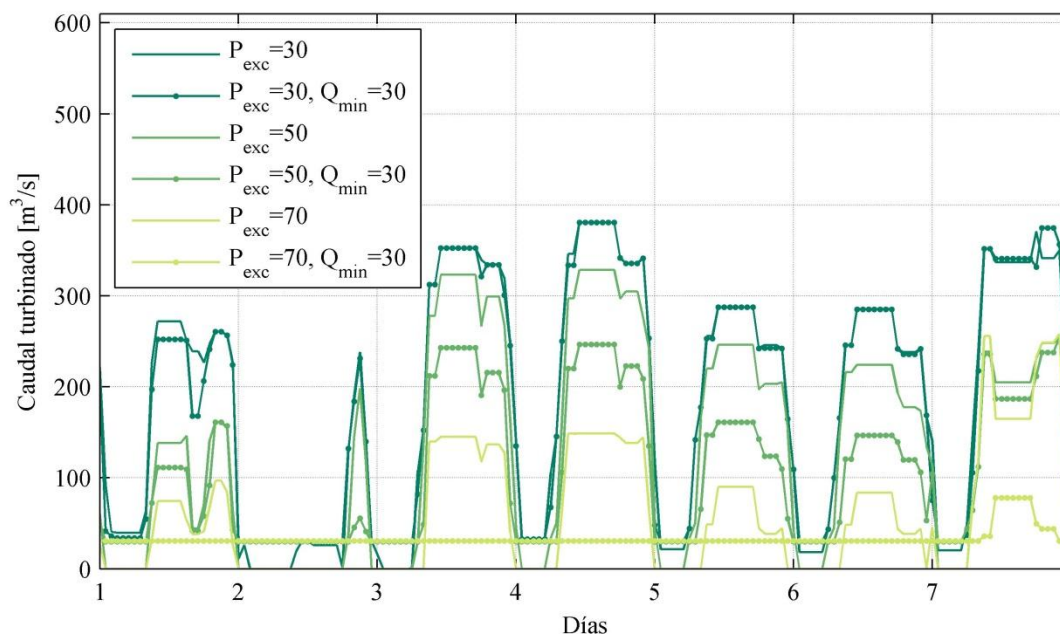


Figura 3: Caudal turbinado de acuerdo a resultados de MIPUC, para los casos bajo diferente régimen hidrológico y presencia de caudal ecológico.

El estudio se efectúa bajo 3 regímenes hidrológicos de los caudales de entrada durante el periodo de estudio, correspondientes a las probabilidades de excedencia 30, 50 y 70%. Además, se contempla el caso sin restricciones sobre la central y el caso con inclusión de un caudal ecológico igual a 30 [m³/s] (equivalente al 16.85% del caudal medio anual afluente). La Figura 3, muestra la forma que adquiere el caudal turbinado en una semana al hacer los supuestos de régimen hidrológico y de caudal ecológico. En periodos secos, el embalse dispone de menos agua, por lo tanto se turbinan menos en comparación a los periodos húmedos. La presencia de un caudal ecológico obliga a que el valor del caudal peak disminuya respecto al caso en ausencia de esta consideración ambiental.

3.4. Indicadores

Para el análisis de los parámetros de calidad del agua al interior del embalse se utiliza la concentración de clorofila-a, indicador de la biomasa total de fitoplancton, de manera de abarcar las variaciones temporales y espaciales de la concentración de clorofila.

De esta forma, se trabaja con los resultados en perfiles verticales (ubicados en el mismo punto de la cadena de termistores y en los puntos de monitoreo de calidad del agua, Figura 1) y en la cortina que recorre el eje central de la cubeta Muro y Cachapoal (Figura 2), y mediante el análisis de capas a diferentes profundidades.

En la cortina, y para cada tiempo, se usa como indicador el promedio de los máximos valores modelados verticalmente (usualmente ubicados cerca de la superficie), en la zona perteneciente a la cubeta Muro:

$$Ind_1(t) = \frac{\sum_{n=1}^{n_t} \max_z C(z, S_n)}{n_t}$$

Donde,

S_n : distancia del perfil i de la cortina, respecto al muro

n_t : número de celdas que conforman el eje de la cortina

$C(z, S_n)$: concentración de clorofila a una distancia S_i de la cortina, a la profundidad z [$\mu\text{g/L}$]

El agua que es usada para usos recreativos debe también cumplir con ciertos estándares de calidad. En particular, para el caso de cuerpos de agua que se ven afectados por episodios de bloom de algas, la Organización Mundial de la Salud (OMS) señala que para evitar irritaciones y alergias dérmicas se tiene un nivel de referencia de $10[\mu\text{g chl-a/L}]$, bajo dominancia de cianobacterias (OMS, 2003). Un nivel de $50 [\mu\text{g/L}]$ representa una referencia para una alerta de salud moderada en aguas recreacionales.

Basado en esto último, se determina cuántos días del periodo de simulación y en qué zonas del embalse se supera una concentración límite de $10 [\mu\text{g/L}]$:

$$Ind_2(i, j) = \# \text{ días } (C_{sup}(i, j) > C_{lim})$$

$C_{sup}(i, j)$: concentración superficial de cianobacterias en la celda (i, j) [$\mu\text{g/L}$]

C_{lim} : concentración de cianobacteria límite

4. RESULTADOS

4.1. Descripción preliminar de la calidad del agua al interior del embalse

Usando los casos bases (hydropeaking y promedio diario), se vislumbran algunas características del funcionamiento de la central y de la variación de clorofila en el embalse. Las mayores concentraciones se ubican gran parte del periodo en la cubeta Alhué. Esto debido a que es una cubeta que posee un mayor tiempo de retención y aguas poco profundas, lo que favorece el crecimiento del fitoplancton (de la Fuente y Niño, 2008).

Al analizar la variación espacial de la clorofila en la superficie para el caso hydropeaking (Figura 4), se tiene un primer aumento de clorofila en el periodo principalmente en la zona de Alhué. Si bien la concentración de clorofila para t_2 es menor, para los tiempos t_3 y t_4 , se nota el aumento considerable de Alhué, en comparación a las otras cubetas. En la cubeta Muro, las concentraciones mayores se desarrollan en las cercanías de la confluencia, influenciada por el crecimiento de algas de las otras dos cubetas.

Debido a la forma y tamaño del embalse, la variación intradiaria que pueda presentar la operación de la central afecta principalmente en las cercanías del muro, como se puede apreciar en la Figura 5. En ella, se muestran los resultados de 3 perfiles de clorofila en tres puntos de la cubeta Muro (E5, E6 y CT, desde el más lejano al más cercano al muro, Figura 5), bajo dos casos de

operación: hydropeaking y promedio diario. Lejos del muro (punto E5, Fig. 5a y 5b), los perfiles son muy parecidos, tanto la variación en la profundidad como en el tiempo. En cambio, al acercarse al muro, la operación hydropeaking fuerza variaciones intradiarias capaces de afectar el perfil con mayor profundidad, en comparación al caso de operación diario promedio.

En la Figura 4, se muestra que la cubeta Alhué presenta concentraciones de clorofila elevadas y muy difíciles de llevar a estándares seguros, y que junto con esto, se encuentra muy alejada de la zona del muro por lo que no se espera que tengan mayores variaciones bajo otros escenarios de operación de la central. El mismo argumento de la distancia, también desestima la consideración de la cubeta Cachapoal en algunos de los análisis posteriores.

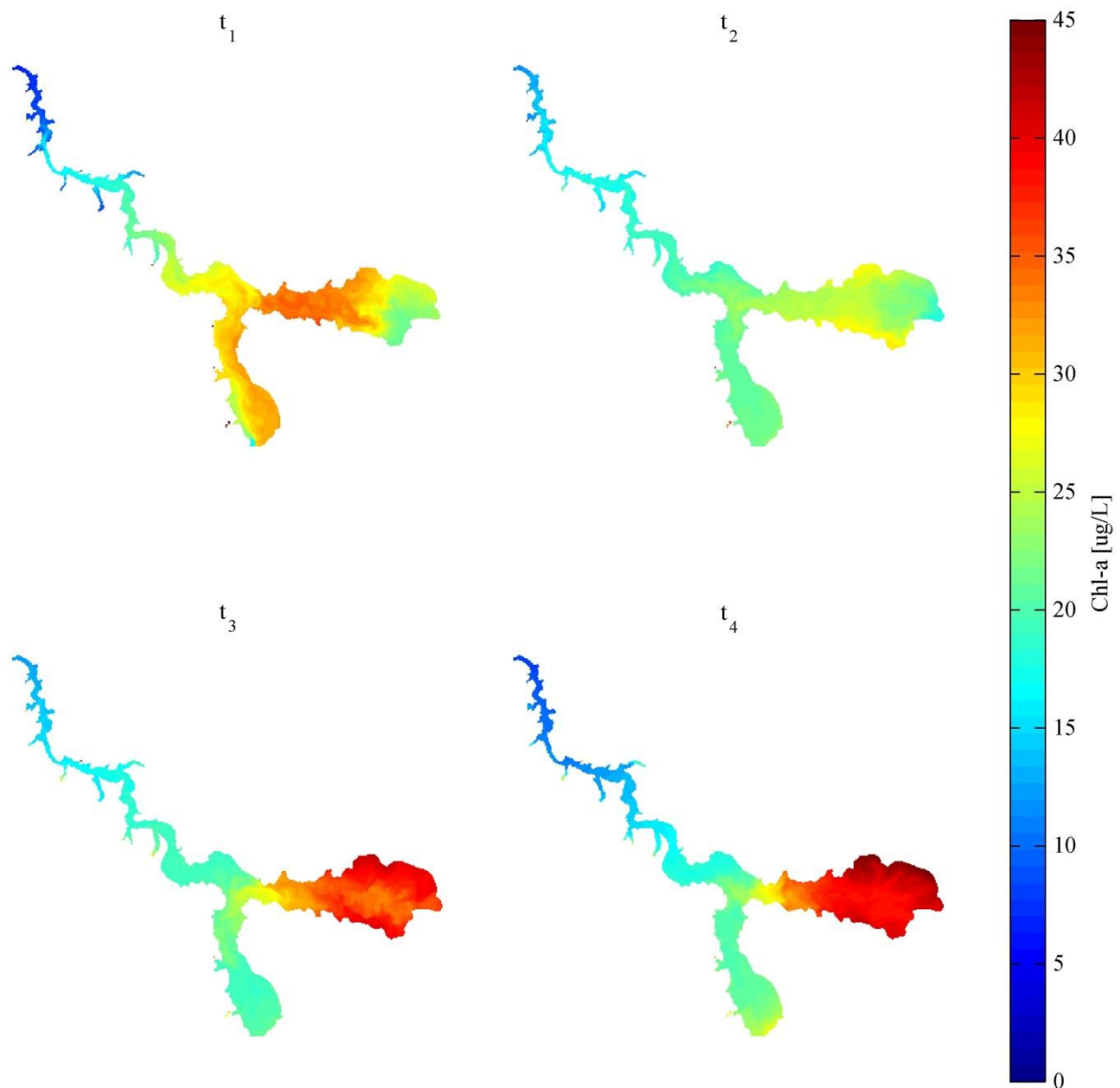


Figura 4: Evolución temporal de la concentración de clorofila en la superficie del embalse, escenario hydropeaking. $t_1=21$, $t_2=42$, $t_3= 63$, $t_4=84$ días respecto del inicio de la simulación

A la cubeta Alhué, hay que sumar las ramificaciones en todo el borde del embalse. Esto se debe a que estas zonas también son de menor profundidad y se ven menos afectadas por el flujo del eje principal, lo que produce que estas aguas presenten algún grado de estancamiento, lo que favorece el crecimiento de fitoplancton.

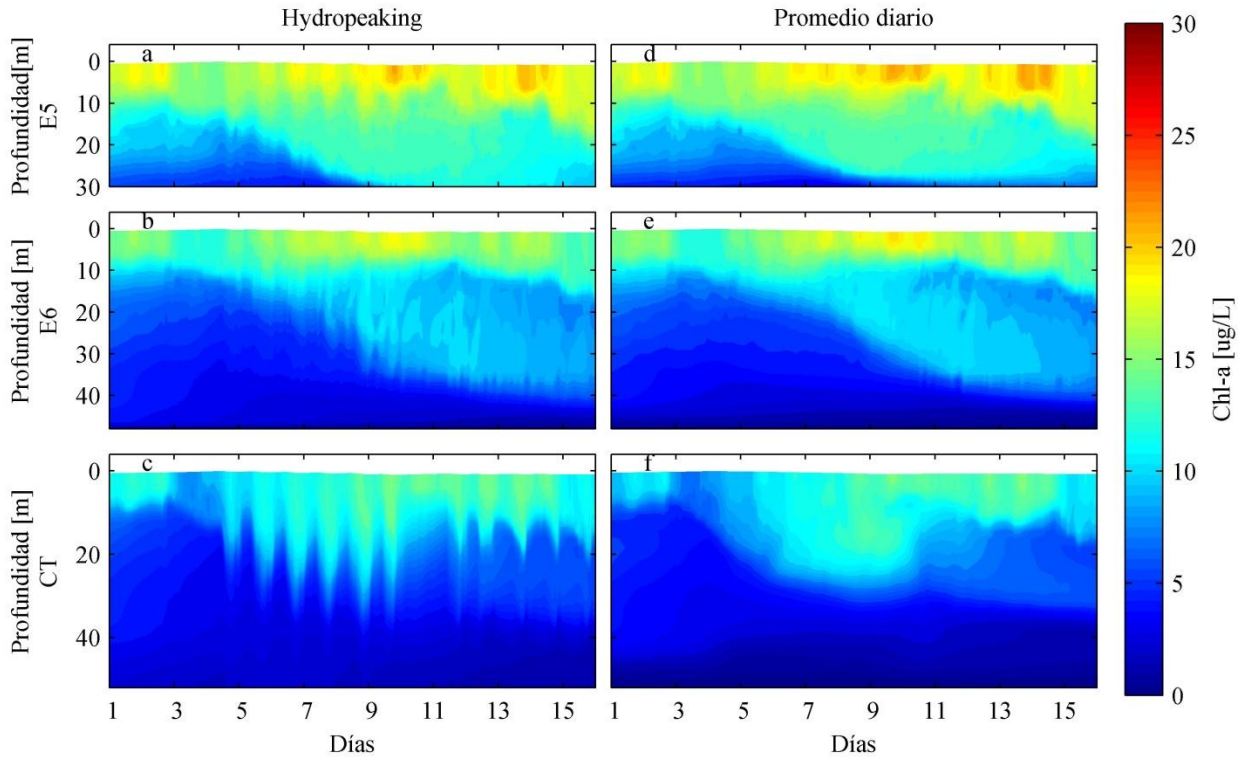


Figura 5: Perfil de clorofila de los puntos P5, P6 y PWT, para los escenarios hydropeaking y promedio diario. Primeras dos semanas de enero de 2010.

4.2. Nivel del embalse

Al comparar el efecto del caudal de entrada al embalse sobre la cota de embalse (Figura 6), se observa que en un año hidrológico húmedo es posible que el nivel presente variaciones importantes durante el periodo. En cambio, en un año seco, el nivel tiende a mantenerse bajo y con variaciones menores. En los tres escenarios hidrológicos, se observa que la inclusión de un caudal ecológico fuerza a mantener niveles de embalse menores a los que se tendrían sin esta restricción debido a que se obliga a turbinar agua desde Rapel durante todo el día y no solo en las horas de mayor demanda energética.

Esquemas de operación del embalse, mantenidos en el tiempo, pueden producir variaciones importantes en el nivel del embalse y por lo tanto, en las concentraciones de clorofila en la cubeta Alhué. En la medida que estas concentraciones aumenten desmedidamente, es esperable que mediante advección, se pueda ver afectada posteriormente la cubeta Muro. Es importante recordar que variaciones en el nivel del embalse están relacionadas con cambios en el tiempo de retención, y por lo tanto en el crecimiento efectivo de la concentración de algas en el sistema (de la Fuente y Niño, 2008).

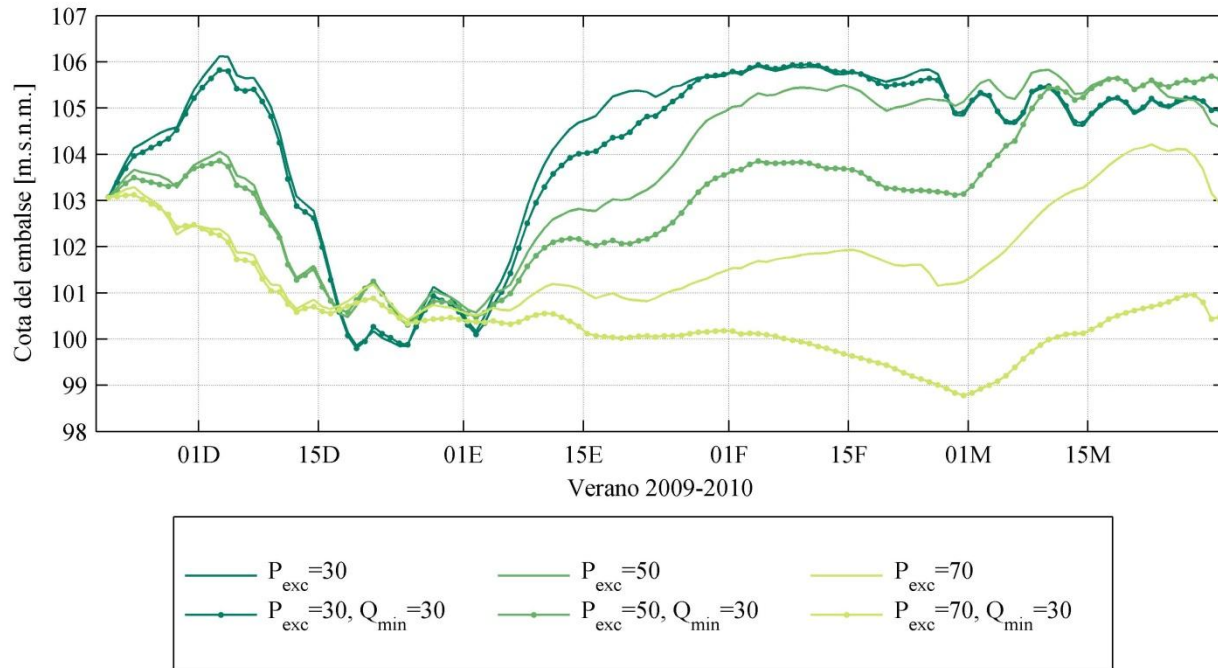


Figura 6: Nivel del embalse para el conjunto de simulaciones bajo 3 probabilidades de excedencia para el caudal entrante, y con 3 consideraciones respecto al caudal ecológico.

4.3. Análisis espacial de la calidad del agua

La Figura 7 muestra la ubicación de las máximas concentraciones de clorofila que se presentan en la superficie del embalse, en la zona de la cubeta Muro, para las simulaciones correspondientes a los casos seco, normal y húmedo, en ausencia de caudal ecológico. Se observa que en la cubeta muro, las mayores concentraciones se presentan cerca de la confluencia y en algunas de las ramificaciones. Lo primero se debe, en parte, a que las cubetas Cachapoal y Alhué producen una mayor concentración de clorofila, que luego es advectada produciendo concentraciones elevadas cerca de la confluencia. Lo segundo, se debe a que las variaciones del nivel del embalse producen estancamiento de agua en algunas de las ramificaciones, lo que fomenta el desarrollo del fitoplancton.

4.4 Análisis del eje central de la cubeta Muro

El análisis de esta cortina muestra que se produce un primer máximo de la concentración de algas a mediados de diciembre (15D, Figura 8), apreciable en los regímenes normal y húmedo. Este primer peak corresponde a algas del tipo diatomeas. Posteriormente, la concentración disminuye en estos casos y en cambio, va en aumento para el caso seco, donde la dominancia para ser de clorofíceas y cianobacterias.

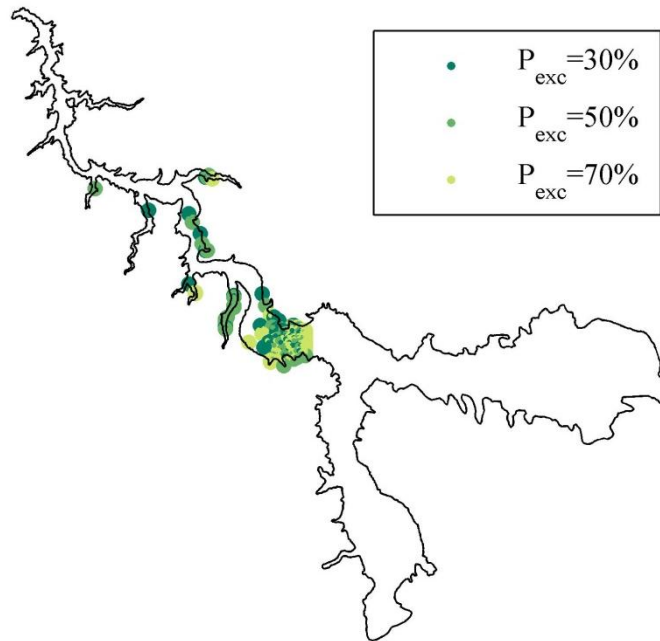


Figura 7: Ubicación de las zonas con concentraciones elevadas de clorofila dentro de la cubeta muro

Se cumple que la concentración de clorofila en la zona del Muro es mayor en la medida que aumenta la probabilidad de excedencia. De esta forma, el año seco corresponde al año más crítico en cuanto a calidad del agua, seguido del normal y luego el húmedo. Se observa que para estos tres casos, la inclusión de caudal ecológico implica una declinación de la calidad del agua, acentuada en el régimen seco.

4.5. Caudal turbinado respecto a calidad del agua

Usando el indicador Ind_1 , se calcula el promedio en el tiempo para el total de los 6 casos evaluados en este estudio. Del mismo modo, se calcula el caudal turbinado promedio durante todo el periodo (Figura 9).

La calidad del agua es favorable en la medida de que se disponga de un mayor caudal afluente al embalse y no se considere caudal ecológico. La generación hidroeléctrica del caso sin caudal ecológico es mayor que el caso en que se tiene esta consideración ambiental, cuando estamos en los casos húmedo y normal. En el régimen seco, esta generación hidroeléctrica total es mayor para el caso con caudal ecológico.

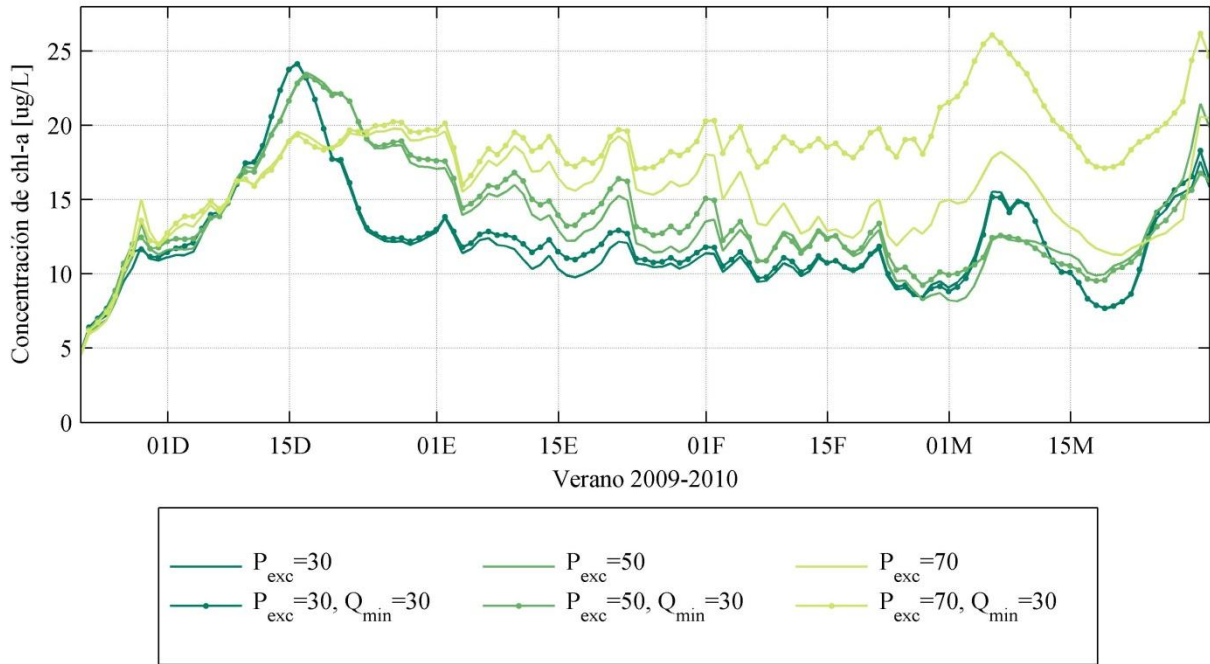


Figura 8: Promedio de los máximos valores medidos verticalmente en cada cortina

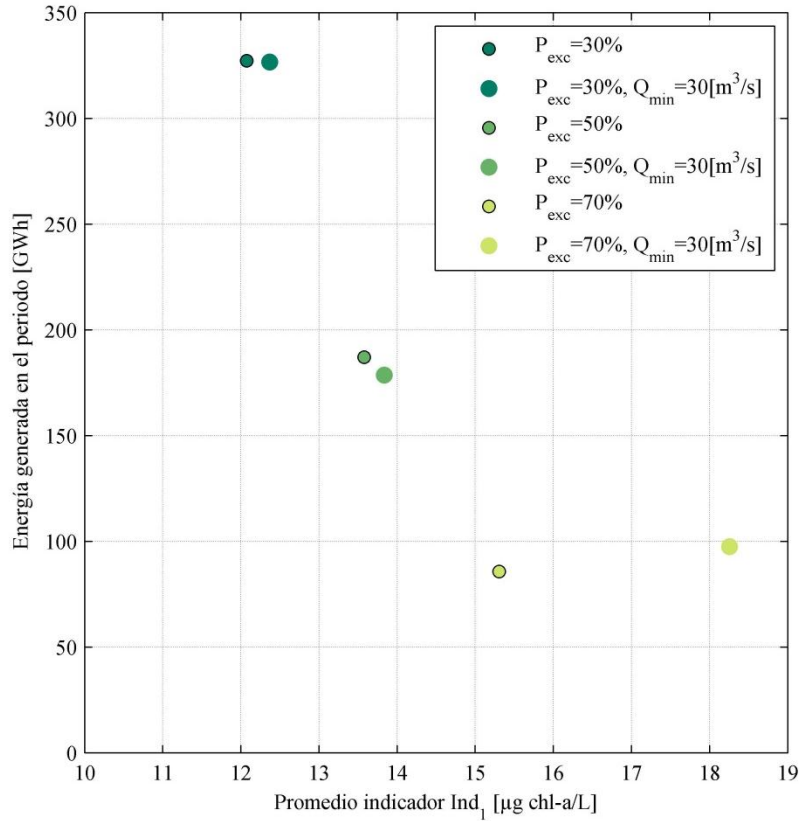


Figura 9: Energía total generada vs promedio indicador Ind_1

4.6. Concentración de cianobacterias

Se calcula el índice espacial Ind_2 para los tres escenarios de probabilidad de excedencia del caudal hidrológico. En la Figura 10 (a,b y c), se muestra que gran parte del periodo, la cubeta Alhué presenta concentraciones de cianobacterias inaceptables. Las cubetas Cachapoal y Muro, en los casos de probabilidad de excedencia 30 y 50% (Fig.10, a y b), presentan una concentración mayor a C_{lim} en una cantidad muy limitada de días. Sin embargo, en el caso de probabilidad de excedencia 70% (Fig.10, c), las cubetas Cachapoal y Muro muestran, en general, más de 40 días una concentración de cianobacterias mayor que C_{lim} .

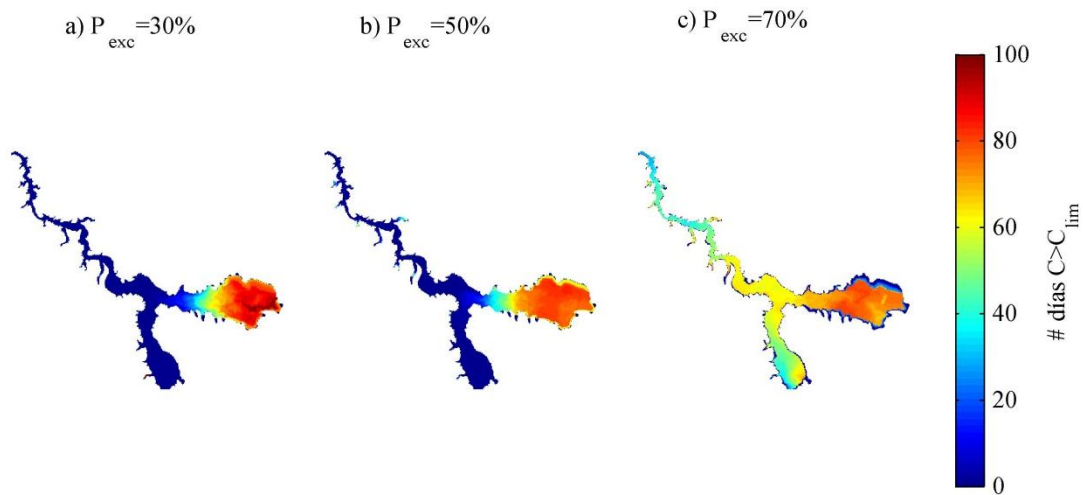


Figura 10: Indicador Ind_2 , evaluado para los casos de probabilidad de excedencia 30, 50 y 70%

5. DISCUSIÓN

En todos los casos analizados, se observó que la inclusión de un caudal ecológico, beneficioso para el sistema aguas abajo del embalse, implica concentraciones mayores de clorofila en las cercanías del muro. Los efectos en el resto del embalse por la inclusión del caudal ecológico no son apreciables. Los casos de régimen húmedo son favorables desde el punto de vista de una mayor generación y de mejores características de calidad del agua. En el caso seco, se tiene menor generación y condiciones desfavorables para la calidad del agua. En particular, el caudal ecológico en este caso obliga a la central a generar más energía respecto a lo que generaría sin esta restricción. Estos resultados en general, dejan en evidencia el conflicto entre los objetivos económicos, ambientales y de calidad del agua en el sistema.

En la medida que la operación fuerce variaciones importantes en el caudal turbinado respecto al caso normal de hydropеaking, y que estas variaciones sean mantenidas en el tiempo, se puede esperar cambios en el mediano plazo en una mayor área del embalse.

Si bien se ven escenarios en que se favorece la calidad del agua del embalse, los valores de chl-a todavía son elevados. Específicamente, la concentración de cianobacterias muestra que se supera la referencia internacional de calidad del agua para usos recreativos de la OMS, por lo que mejoras significativas sobre el embalse podrían requerir medidas adicionales.

Quedan pendientes estudios sobre una mayor cantidad de condiciones (hidrológicas, estacionales, económicas y ambientales), que permitan acercarse a un patrón de comportamiento del embalse y que permitan enfrentar diversas situaciones en el futuro.

REFERENCIAS

- Antenucci, J. 1996. Hydrobiological Modeling of Rapel Reservoir, Central Chile. Honors Thesis. Department of Environmental Engineering. University of Western Australia.
- Cabrera, S., Montecino, V., Vila, I., Bahamonde, N., Bahamondes, I., Barends, I., Rodríguez, R., Ruiz, R. & D. Soto. 1977. "Características limnológicas del embalse Rapel, Chile Central. Organización de Estados Americanos, Departamento de Asuntos Científicos y Tecnológicos, Monografía 1." 40–61.
- Contreras, M., Villagrán, H., & C. Salazar. 1994. "Aislamiento temporal del subsistema Alhué: Una Respuesta a La Hidrología Del Embalse Rapel." *Medio Ambiente* 12: 41–49.
- de la Fuente, A., & Y. Niño. 2008. "Pseudo 2D Ecosystem Model for a dendritic Reservoir." *Ecological Modelling* 213(3-4): 389–401.
- EULA-Chile. 2011. Diagnóstico y Plan de Gestión para la calidad del agua del embalse Rapel. Ministerio Medioambiente, región de O'Higgins.

- Guzmán, C. 2013. Incorporación de consideraciones ambientales en la operación horaria del embalse Rapel. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- Hipsey, M.R. 2010. Computational Aquatic Ecosystem Dynamics Model. User Guide. Centre for Water Research, University of Western Australia.
- Hipsey, M.R, J P Antenucci, & D Hamilton. 2010. Computational Aquatic Ecosystem Dynamics Model. Science Manual. Centre for Water Research, University of Western Australia.
- Hodges, B., & C .Dallimore. 2010a. Estuary, Lake and Coastal Ocean Model. User Manual. Centre for Water Research, University of Western Australia.
- Hodges, B., & C. Dallimore. 2010b. Estuary, Lake and Coastal Ocean Model: ELCOM. Science Manual. Centre for Water Research, University of Western Australia.
- Ibarra, G. 2013. 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. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- Jørgensen, S., Nielsen, S. & L. Jørgensen. 1991. Handbook of ecological parameters and ecotoxicology.
- Martínez, G., Contreras, M., & I. Vila. 2003. “Modelos conceptuales de abundancia de fitoplancton asociados a la heterogeneidad espacial en el embalse Rapel (Chile Central).” *Revista Chilena de Historia Natural* 76: 255–66.
- Vila, I., Barends, I., & V. Montecino. 1987. “Abundancia y distribución temporal del fitoplancton En El Embalse Rapel, Chile Central.” *Revista Chilena de Historia Natural* 60: 37–55.
- Vila, I., Contreras, M., & V. Montecino. 1997. “Eutrophication and phytoplankton selective responses in a temperature reservoir.” *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 26: 31–44.
- Vila, I., Contreras, M., Montecino, V., Pizarro, J., & D. Adams. 2000. “Rapel: A 30 years temperate reservoir. Eutrophication or contamination?” *Arch. Hydrobiol. Spec. Issued Advanc, Limnol.* 55, 31-44 .