

# Informe final publicable de proyecto

## Herramientas numéricas de apoyo a la gestión de calidad de agua en embalses para generación hidroeléctrica

Código de proyecto ANII: FMV\_1\_2019\_1\_156173

29/12/2022

**SANTORO RODRIGUEZ, Pablo Esteban** (Responsable Técnico - Científico)

**RODRÍGUEZ NUÑEZ, Rafael** (Investigador)

**RIOS, Agustín** (Investigador)

**RODRIGUEZ CONDE, Gonzalo** (Investigador)

**MACIEL, Fernanda** (Investigador)

**DELGADO TORRES, Santiago Matías** (Investigador)

**FOSSATI PIÑEYRUA, Mónica** (Co-Responsable Técnico-Científico)

---

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA. FACULTAD DE INGENIERÍA (Institución Proponente) \\  
ORGANISMOS INTERNACIONALES. COMISIÓN TÉCNICA MIXTA DE SALTO GRANDE

## **Resumen del proyecto**

Uruguay cuenta con cuatro embalses para generación hidroeléctrica, uno en el Río Uruguay y tres en el Río Negro. Estos cuerpos de agua semilénticos se encuentran entre los más grandes del país, y además de la generación de energía, tienen otros usos como por ejemplo potabilización, pesca y recreación. El incremento del tiempo de residencia del agua y el creciente proceso de eutrofización favorecen la ocurrencia de floraciones fitoplanctónicas en estos cuerpos de agua. Estos eventos tienen consecuencias negativas sobre el ecosistema (afectando las propiedades fisicoquímicas y la biota), e interfieren con las actividades antrópicas.

El objetivo de este proyecto es contribuir a una mejor gestión de la calidad de agua de los embalses de generación hidroeléctrica, proponiendo metodologías para profundizar el conocimiento de su dinámica y generando herramientas tecnológicas (modelos numéricos) que ayuden a comprender el sistema y permitan predecir su comportamiento futuro. Se aborda esta problemática tomando como caso de estudio el embalse de Salto Grande.

El proyecto desarrollado permitió avanzar en la implementación de un modelo numérico capaz de simular la hidrodinámica del embalse de Salto Grande. A partir de sus resultados, se realizó una caracterización de la circulación y de las escalas temporales de transporte en el cuerpo de agua. A su vez, se realizaron recomendaciones sobre posibles actividades de medición en campo para mejorar la herramienta numérica y aportar a la comprensión de la dinámica del cuerpo de agua.

**Ingeniería y Tecnología / Ingeniería Civil / Ingeniería Civil / Hidráulica-Ambiental**

**Palabras clave: Modelación numérica / Hidrodinámica y calidad de agua / Dinámica de sedimentos /**

## **Introducción**

La temática de investigación que da marco a este proyecto es el estudio numérico de la dinámica de embalses para generación hidroeléctrica con énfasis en las condiciones que propician la ocurrencia de floraciones fitoplanctónicas. La gran demanda de energía eléctrica ha llevado a explorar diversas tecnologías para su generación, entre ellas la hidroeléctrica mediante la generación de embalses artificiales. Estas intervenciones antrópicas transforman parte de los ríos (cuerpos de agua lóticos) en embalses (cuerpos de aguas lénticos - semilénticos), modificando significativamente su comportamiento hidrodinámico, su estructura térmica, el clima lumínico y el transporte de sustancias en los mismos. Particularmente, el incremento del tiempo de residencia del agua combinado con el creciente proceso de eutrofización antrópica (Smith and Schindler, 2009), favorece la ocurrencia de floraciones fitoplanctónicas en los embalses, en muchos casos productoras de toxinas. La ocurrencia de estos eventos tiene diversas consecuencias sobre el ecosistema pues inhiben el crecimiento de otros productores primarios, interfieren con el zooplancton, afectan el pH y el contenido de oxígeno disuelto del agua y la carga orgánica de los sedimentos, todo lo que eventualmente puede causar mortalidad en peces y aves. Asimismo, se afectan usos antrópicos como por ejemplo la recreación, la pesca y la fuente de agua para potabilización. Por estas razones, se trata de un problema que tiene un claro impacto sobre el ambiente, la sociedad y diversos sectores productivos, y que a su vez podría afectar las políticas de operación de las represas de generación hidroeléctrica.

Actualmente, la gestión de cuerpos de agua incorpora cada vez más el uso de herramientas de modelación numérica como soporte para la toma de decisiones y la definición de políticas para la conservación de ecosistemas, operación de infraestructuras, así como para la restauración ambiental para un desarrollo social y ecológico sustentable bajo condiciones ambientales variables (Robson et al., 2014; Hipsey et al., 2015; Franks, 2018; Jeznach et al., 2016; Weber et al., 2017; Schuwirth et al., 2019; Tranmer et al., 2020). Desde hace años se tiende al desarrollo de sistemas de información de gestión ambiental que tengan en cuenta diversos aspectos tanto sociales, ecológicos, como económicos (Vinçon-Leite & Casenave, 2019). Estos sistemas integran modelos numéricos en cascada (meteorológico - cuenca - reservorios - ríos - aguas costeras), y múltiples datos de campo, con el objetivo común de apoyar procesos de toma de decisiones, medidas de control y mitigación de emergencias. Esto permite realizar una evaluación ecológica más completa y la optimización de la gestión de los ecosistemas acuáticos en una variedad de escalas espaciales y temporales (Torres-Bejarano et al., 2013; Tranmer et al., 2020). La utilización de modelos ha permitido evaluar estrategias de restauración ecológica, como

reducción de aporte de nutrientes desde las cuencas, dragado de sedimentos, adición de macrofitas, oxigenación del hipolimnio, diseño de políticas de operación considerando aspectos ambientales, entre otras (Merritt et al., 2017; Weber et al., 2017; Vinçon-Leite & Casenave, 2019).

La modelación de procesos físicos como la circulación hidrodinámica, dinámica térmica y de sedimentos, son la base para poder abordar la modelación de aspectos biogeoquímicos y ecológicos de cuerpos de agua. La hidrodinámica tiene un rol fundamental en el transporte y la mezcla de las distintas sustancias y organismos planctónicos. Es bien descrita por las ecuaciones de balance de masa, de balance mecánico, de transporte de sustancias, y de estado; considerando los forzantes adecuados para el caso de estudio (Zhen-Gang Ji., 2008). La acción del viento en la superficie libre es uno de los forzantes principales de la hidrodinámica, condicionando la transferencia de cantidad de movimiento desde la atmósfera al cuerpo de agua, y establece una zona de mezcla que permite que el fitoplancton acceda a la zona eufótica para realizar la fotosíntesis (Huisman et al, 1999; Chung et al, 2014; Gray et al., 2020). La temperatura del agua es una variable muy relevante en tanto afecta la densidad, afectando la circulación y generando ciclos de estratificación y mezcla; además de influir en numerosos procesos bioquímicos. La dinámica de sedimentos está condicionada por la hidrodinámica, afecta el clima lumínico en el cuerpo de agua y condiciona el fenómeno de eutrofización ya que los sedimentos son capaces de adsorber fosfatos.

Los modelos biogeoquímicos y ecológicos agregan otra capa de complejidad sobre la hidrodinámica, la comprensión de los procesos involucrados es más acotada, lo que implica más suposiciones y simplificaciones. En general, cuando un modelo biogeoquímico o ecológico acuático predice con éxito un evento, ese evento está controlado principalmente por la física del sistema (Robson, 2014). Friedrichs et al. (2006) evaluaron el desempeño de varios modelos ecológicos marinos de diversa complejidad, y encontraron que el impacto de cambios en la dinámica física del modelo normalmente produce cambios mucho mayores en la respuesta biogeoquímica del modelo que un cambio en su complejidad. Hakanson (1999) encontró que la mejor forma de incrementar el poder predictivo de modelos de eutrofización en lagos es estructurarlos para que incluyan más procesos fundamentales (como carga interna, estratificación y variación estacional) y reducir la incertidumbre de los principales forzantes. A nivel nacional, si bien existen esfuerzos y avances claros en el desarrollo de sistemas de información ambiental por parte de distintos organismos del estado, aún hay un largo camino a recorrer para el desarrollo de sistemas integrados como los antes mencionados.

Uruguay cuenta con cuatro embalses para generación hidroeléctrica, uno en el Río Uruguay y tres en el Río Negro. Estos cuerpos de agua semilénticos se encuentran entre los más grandes del país, y además tienen otros usos como por ejemplo abastecimiento de agua para potabilización, pesca y recreación. Los mismos muestran problemas de calidad de agua, y en particular son frecuentes floraciones de cianobacterias (O'Farrell & Izaguirre, 1994; Vidal & Kruk, 2008; Chalar, 2006; Bonilla et al., 2015; González-Piana et al., 2017).

En el verano de 2019, se observaron floraciones del complejo *Mycrocystis Aeruginosa* (CMA) a lo largo de la costa del Río de la Plata y Atlántica, con una extensión de 500 km y una persistencia de 4 meses, afectando fuertemente el turismo. Kruk et al. (2019) señalan que las floraciones fueron generadas en los grandes embalses de la cuenca baja del Plata: Salto Grande y embalses del Río Negro, donde se han registrado frecuentemente floraciones del CMA. Estas floraciones habrían sido luego transportadas por las corrientes hasta el Río de la Plata y Océano Atlántico.

Dentro de las variables principales que controlan la ocurrencia de las floraciones se encuentra la disponibilidad de nutrientes (en particular nitrógeno y fósforo), la temperatura del agua, la penetración de la luz solar, el tiempo de residencia y las condiciones de mezcla. Asimismo, la hidrodinámica del cuerpo de agua condiciona todas las variables antes mencionadas. En cuerpos de agua en condición eutrófica, cuya causa principal son la agricultura y actividades industriales (Moss, 1998), la disponibilidad de nutrientes puede no ser limitante, volviéndose más importantes los otros factores ambientales.

Esta propuesta aborda dicha problemática tomando como caso de estudio el embalse del Complejo Hidroeléctrico Salto Grande. Éste fue llenado en la segunda mitad de 1979, tiene una superficie de 783 Km<sup>2</sup>, un volumen promedio de 5000 hm<sup>3</sup>, y una profundidad media y máxima de 6,4 m y 35 m respectivamente. Ya en febrero de 1978 hubo una floración de algas en el Río Uruguay, y luego de llenado el embalse dichos eventos se han vuelto frecuentes especialmente en los meses cálidos (Noviembre a Abril). La Comisión Técnico Mixta de Salto Grande (CTM-SG) y la Comisión Administradora del Río Uruguay (CARU) cuentan con una extensa red de puntos de monitoreo (cerca de 30) en donde se realizan medidas in situ de

parámetros fisicoquímicos, y muestreo de agua a diferentes profundidades para su posterior análisis en laboratorio de parámetros de calidad de agua. Dichas actividades de monitoreo se realizan desde hace más de 10 años, con una frecuencia semanal durante época estival a lo largo de más de 100 km de línea de costa del Río Uruguay en el embalse.

Existen varios trabajos científicos sobre el fenómeno de floraciones de fitoplancton en el embalse de Salto Grande (Quirós & Luchini, 1982; O'Farrell & Izaguirre, 1994; Conde et al., 1996; De León & Chalar, 2003; Chalar, 2006; O'Farrell et al., 2012; Bonilla et al., 2015; Bordet et al., 2017; Drozd et al., 2019). Estos trabajos se basan en datos de monitoreo y campañas específicas, así como en sensoramiento remoto (imágenes satelitales). La metodología llevada adelante en este proyecto se diferencia por abordar el problema mediante la implementación de modelos numéricos. Esto permite complementar los estudios previos en términos del diagnóstico del funcionamiento del sistema, generando además una herramienta de apoyo para la gestión del cuerpo de agua.

A partir de los antecedentes se desprende que la hidrodinámica (especialmente los tiempos de residencia y mezcla de la columna de agua), la penetración de luz, y la temperatura son las principales limitantes para el crecimiento de cianobacterias en el estado actual del embalse. Hasta ahora se ha realizado un extenso trabajo de monitoreo en base a campañas de muestreo periódicas en una red de estaciones. Considerando los principales factores que controlan las floraciones en el embalse, la implementación de un modelo numérico que permite describir la hidrodinámica, dinámica de sedimentos y temperatura en todo el embalse resulta un elemento clave. Los aspectos hidrodinámicos globales y locales no han sido estudiados previamente, por lo que su estudio en profundidad es relevante considerando que la circulación y el transporte de sustancias son determinantes para la evaluación de estrategias que contribuyan a la mitigación de floraciones. En particular durante eventos hídricos de estiaje, el viento es el principal agente de mezcla y transporte, por lo cual su estudio es muy relevante para la comprensión de los procesos involucrados en la circulación. El modelo numérico resulta ser una herramienta de diagnóstico para la comprensión de los procesos que gobiernan el sistema, y una herramienta para pronóstico y toma de decisiones.

La determinación de los tiempos de residencia en el embalse de Salto Grande no es trivial por ser un embalse con forma dendrítica, lo que puede inducir a una distribución espacial heterogénea del tiempo de residencia. Existen varias medidas y metodologías de cálculo para estimar el tiempo de residencia, o en forma más general, parámetros hidrodinámicos de tiempo (Jouon et al. 2006). El estudio de estos parámetros en base a la utilización de modelos numéricos es sumamente extendido (Choi & Lee, 2004; Rueda et al., 2006; Shan & Sheng, 2012) y es un aspecto abordado en el marco de este proyecto.

Como fue mencionado, otra de las variables relevantes para la ocurrencia de floraciones es la temperatura del agua, que en un embalse profundo puede presentar condiciones de estratificación vertical. En este último sentido los forzantes principales son el caudal (considerando que la circulación puede tener una distribución espacial compleja), la radiación, y la mezcla vertical inducida por el viento. El modelo numérico, combinado con datos históricos y eventualmente información satelital, es una excelente herramienta para analizar la sensibilidad a los distintos forzantes y ayudar a comprender cómo es la dinámica térmica en el embalse.

En el caso particular de los embalses para generación hidroeléctrica surge además como variable relevante la política de operación de la represa. Diferentes operativas pueden disminuir o incrementar las corrientes y los niveles, lo que incide en el tiempo de residencia, la temperatura y el transporte de sustancias. Actualmente no se tiene una idea de cuán significativo es dicho impacto, lo que puede ser explorado simulando numéricamente escenarios idealizados de circulación.

### **Metodología/diseño del estudio**

El trabajo realizado parte de la hipótesis de que, ante la abundancia de nutrientes, la hidrodinámica (especialmente los tiempos de residencia y mezcla de la columna de agua), la penetración de luz, y la temperatura son factores determinantes para la ocurrencia de floraciones en el embalse. En este sentido se busca avanzar en caracterizar cómo es el funcionamiento hidrodinámico del embalse; cómo es la distribución espacial de los tiempos de residencia del agua en el embalse; cuál es influencia del viento en la elevación de la superficie libre y circulación en el embalse; y cuál es la influencia de la operación de la represa hidroeléctrica sobre estos aspectos.

La metodología se centra en simular numéricamente las variables que se entienden claves para la ocurrencia de floraciones mediante la implementación de un modelo hidrodinámico para el embalse de Salto Grande. Los resultados de

dicho modelo permiten complementar los estudios previos en términos del diagnóstico del funcionamiento del sistema generando además una herramienta de apoyo para la gestión del cuerpo de agua.

A continuación se describen las principales actividades del estudio:

#### 1 - Sistematización de información existente

Se refiere a la sistematización de la información existente para implementar el modelo numérico. En este sentido se utilizó: información batimétrica, información de caudales que ingresan al embalse y son erogados por la represa, así como niveles en el embalse, información de viento, presión atmosférica en superficie, temperatura del aire, radiación solar, humedad relativa y nubosidad.

Además, se exploraron distintas fuentes de uso libre de imágenes satelitales disponibles (ej. Landsat, Modis, Sentinel) y algoritmos para la estimación de temperatura del agua.

Lamentablemente no fue posible acceder a la información de monitoreo de calidad de agua en el embalse llevada adelante por la CTM-SG. Esto limitó la posibilidad de contrastar las estimaciones a partir de teledetección con la información de muestreos, así como avanzar en la implementación del módulo térmico del modelo numérico.

#### 2 - Implementación del modelo numérico

Se refiere a la implementación del modelo hidrodinámico y de transporte de sustancias, considerando a la temperatura como variable a modelar. Este es un paso fundamental hacia la modelación de calidad de agua.

La primera etapa comprende la selección del modelo numérico a utilizar, considerando que existen varias alternativas (por ej. Delft3D, SCHISM, TELEMAC, entre otros). En este caso se trabajó en la implementación del modelo hidrodinámico TELEMAC tanto en su versión bidimensional (integrado en la vertical) como tridimensional.

Las condiciones de borde necesarias para la implementación del modelo son: los caudales fluviales afluentes en las fronteras abiertas y el caudal erogado por la represa de Salto Grande; la rugosidad en el fondo; y en la superficie la tensión inducida por el viento, la presión atmosférica en la superficie libre, radiación solar y temperatura del aire.

Se debe realizar la simulación de períodos de tiempo suficientemente extensos como para considerar diversas condiciones hídricas (crecidas y estiajes), así como la variación estacional de la temperatura.

El correcto proceso de calibración y especialmente validación del modelo numérico es fundamental para poder confiar en sus resultados. La rugosidad de fondo y coeficiente de arrastre por el viento son los parámetros hidrodinámicos de calibración del modelo, los cuales fueron ajustados para representar los niveles medidos en el embalse. La calibración y validación del modelo numérico están directamente condicionadas por la información de campo disponible. En este sentido el presente proyecto se acotó a componente hidrodinámica en base a la información batimétrica e histórica de variables hidrológicas proporcionada por la CTM-SG. Otra fuente de información de uso más incipiente es la teledetección, a partir de la cual se puede estimar la temperatura del agua, concentración de clorofila *a* y concentración de sedimento en suspensión en embalses artificiales (Gholizadeh et al., 2016; Watanabe et al., 2017; Drodz et al., 2019). Una de sus principales ventajas es que aporta información de alta resolución espacial en la totalidad del embalse, en contraste con la información puntual que se genera en las campañas de muestreo, lo que es muy atractivo en el caso de un embalse de gran extensión superficial como el de Salto Grande. Lamentablemente no fue posible acceder a la información de monitoreo de calidad de agua en el embalse llevada adelante por la CTM-SG.

#### 3 - Caracterización de la dinámica del embalse

##### 3.1 Caracterización de la circulación

Se realizaron simulaciones de varios años con forzantes realistas a los efectos de caracterizar la circulación en el embalse. Se compararon los niveles simulados y observados en la represa para todo el período simulado. A partir de los campos de corrientes horarios obtenidos con el modelo se calcularon mapas de corriente residual (promedio durante el período simulado), intensidades máximas, mínimas y percentiles 10 y 90.

A los efectos de evaluar la influencia del forzante viento en la hidrodinámica del cuerpo de agua, se realizó el experimento numérico de simular el mismo período con forzantes realistas (niveles y caudales) pero desactivando la influencia del viento. Luego se compararon los distintos mapas de corrientes entre ambos escenarios.

##### 3.2 Estimación de parámetros hidrodinámicos de tiempo

Por otra parte, el transporte de sustancias en embalses es forzado por procesos con alta variabilidad en el espacio y el

tiempo de allí que los campos de concentración y propiedades del cuerpo de agua sean heterogéneos en el embalse. Se aprovechó así el modelo numérico para estimar la distribución espacial de las escalas temporales de transporte.

Para estimar las escalas temporales de transporte en este trabajo se adaptaron dos parámetros locales: el tiempo de lavado (tFT, e-flushing time en inglés) y el tiempo de retraso del lavado (tFL, flushing lag en inglés). Proviene de una metodología Euleriana cuyo método de cálculo se adopta de (Jouone et al., 2006). Inicialmente, se impone una concentración  $C_0 = 1$  de un trazador pasivo dentro del dominio y se asigna un valor de concentración nulo al flujo de agua que ingresa a través de límites abiertos. El tiempo que tarda la concentración en alcanzar un valor umbral  $C_1$  (establecido arbitrariamente como el 95 % de  $C_0$ ) se denomina tiempo de retraso del lavado y se considera que es el comienzo de una disminución exponencial de la concentración en el punto de dominio observado. El tFT se define como el tiempo de lavado local y corresponde al tiempo transcurrido desde tFL para que la concentración del trazador pasivo alcance un valor de  $1/e^{C_0}$ . Ambos parámetros son locales ya que se calculan para cada nodo de la malla.

Teniendo en cuenta la hipótesis subyacente de esta metodología, es más adecuada para analizar escenarios estables. Se simuló escenarios sin viento, combinando diferentes elevaciones superficiales y caudales entrantes (altos, medios y bajos). Para definir dichos valores se consideraron los valores de percentil 90, 50 y 10 de las respectivas series históricas de cada variable.

Luego, la influencia del viento se evaluó mediante la simulación de ocho escenarios con una elevación de la superficie libre y caudales entrantes medios, y un viento constante de 10 m/s que sopla desde ocho direcciones cardinales diferentes.

Para cada uno de estos escenarios se construyeron mapas de los dos parámetros locales de escala temporal de transporte.

#### 4 – Pautas para una futura campaña de medición en campo.

En base a la revisión de antecedentes y los resultados obtenidos en el proyecto, se elaboraron pautas para el diseño de una campaña de medición en campo con el objetivo de mejorar la comprensión de la dinámica del embalse y las herramientas numéricas a desarrollar.

### Resultados, análisis y discusión

A continuación, se detallan las principales actividades que fueron desarrolladas durante la ejecución del proyecto y sus resultados.

#### \*\* Revisión de antecedentes del caso de estudio \*\*

Existen diversos antecedentes tanto en lo que refiere a publicaciones científicas como informes técnicos que abordan el caso de estudio de la calidad de agua en el embalse de Salto Grande. Se elaboró un documento de síntesis que presenta las características del caso de estudio y establece el punto de partida en lo que refiere a conocimiento previo del embalse en distintos aspectos. Gran parte de los antecedentes se centran en aspectos de calidad de agua y señalan algunos de los aspectos hidrodinámicos y físicos del sistema como posibles forzantes de los comportamientos observados por ejemplo en la dinámica de poblaciones fitoplanctónicas. El presente proyecto apunta justamente a contribuir en la comprensión y caracterización de los procesos hidrodinámicos y físicos en el embalse.

#### \*\* Relevamiento de herramientas numéricas y selección del modelo a utilizar \*\*

Se llevó a cabo una amplia revisión sobre modelos hidrodinámicos actualmente utilizados a nivel internacional para este tipo de aplicaciones (DELFT3D, TELEMAC-MASCARET, SCHISM, MOHID, EFDC+, entre otros). Para la elección de la herramienta a utilizar se consideraron aspectos técnicos vinculados a los procesos a modelar, pero también otros como tratarse de modelos de código abierto, la posibilidad de ejecutarlos en arquitecturas de cómputo de alto desempeño y la experiencia previa del grupo de investigación en el manejo de la herramienta. Resultado de dicho proceso de evaluación se escogió trabajar con el modelo TELEMAC-MASCARET.

#### \*\* Sistematización de información disponible \*\*

Información topo-batimétrica: Se sistematizó en un sistema de información geográfico la información batimétrica del embalse proporcionada por la CTM-SG. Dicha información fue complementada con información topográfica de ambas márgenes (Uruguay y Argentina). Se evaluaron distintos métodos de interpolación y finalmente se generó un modelo topo-batimétrico del embalse que será insumo para la generación de la malla del modelo numérico.

Información hidro-meteorológica: Se sistematizó la información de caudales, niveles en el embalse y variables meteorológicas proporcionados por CTM-SG. En el caso de los caudales se trata de información de caudales erogados por

la represa, caudales medidos en cuatro afluentes y una estimación global de caudal que ingresa al embalse mediante modelación hidrológica. Para los niveles se tienen datos en cinco estaciones en distintas ubicaciones a lo largo del embalse. En lo que refiere a variables meteorológicas se utilizaron series con frecuencia horaria de datos de reanalysis (ERA5). La información de caudales y variables meteorológicas son condiciones de borde para el modelo numérico a implementar, mientras que los datos de niveles en el embalse se utilizaron para su calibración y validación.

Información de temperatura del agua: Lamentablemente no se pudo acceder de la información de temperatura del agua medida in-situ en el marco del monitoreo que CTM-SG realiza con CARU. Se avanzó en el uso de información de temperatura superficial del agua estimada mediante teledetección. Se exploró como fuente de información para obtener mapas retrospectivos de temperatura superficial del agua la información de Landsat 8 (L8). La misión satelital L8 cuenta con dos bandas en el infrarrojo térmico, con resolución espacial de 100 m, que permiten estimar temperatura superficial del agua. Se analizaron tres algoritmos para la estimación de la temperatura superficial del agua (Coll & Caselles, 1997; Choung & Kim, 2019; Jang & Park, 2019). Se generaron herramientas (en lenguaje Python) para el adecuado manejo y procesamiento de las imágenes.

#### **\*\* Implementación del modelo hidrodinámico \*\***

##### **\* Implementación bidimensional**

Se realizó una implementación bidimensional del modelo hidrodinámico, sin considerar la temperatura del agua. Se generó una malla de elementos finitos para el caso de estudio, considerando la existencia de zonas de flujo preferencialmente unidireccional (Río Uruguay aguas arriba del embalse y zona superior del embalse) y zonas de flujo bidireccional.

Esta implementación bidimensional (muy ventajosa desde el punto de vista del tiempo computacional) sirvió para dar una primera idea de aspectos generales de la implementación. Por ejemplo, mostró que incorporar la serie de caudales erogados con paso diario es insuficiente y es necesaria una frecuencia horaria para representar adecuadamente las series de niveles en embalse; y la necesidad establecer una metodología para incorporar la información de caudal total afluente estimada por CTM en base a modelación hidrológica en las condiciones de borde del modelo. La metodología desarrollada en forma resumida incluye una etapa de imputación de datos en los afluentes con datos medidos, y luego una redistribución del excedente del aporte teórico en los afluentes que no cuenta con información medida.

Habiendo incorporado estas consideraciones al modelo se realizó una calibración siendo el factor de fricción de fondo el principal parámetro de calibración y evaluando la calidad de los resultados del modelo comparando con las series de niveles medidos en distintas estaciones a lo largo del embalse. Se incorporó además el efecto del viento en las simulaciones. Lamentablemente no se dispuso de datos medidos de corrientes para incorporar a la calibración del modelo.

Como resultado se tiene una implementación bidimensional del modelo hidrodinámico con buenos resultados en términos de representación de niveles de la superficie libre en el embalse.

##### **\*\* Implementación tridimensional \*\***

Considerando que la estratificación vertical de la temperatura del cuerpo de agua puede ser significativa y condicionar procesos de mezcla relevantes tanto para la hidrodinámica como para la calidad de agua, se realizó una implementación tridimensional del modelo. La configuración horizontal de la malla es la misma que en el modelo bidimensional. El modelo hidrodinámico es funcional y simulaciones considerando como forzante únicamente los caudales afluentes y erogados (series históricas) generan resultados razonables al comparar con niveles medidos.

La implementación del módulo que permite simular la temperatura del agua (incorporando el forzante meteorológico) generó problemas de estabilidad en las zonas con mojado y secado. Se trabajó intensamente en alternativas para solucionar dichos inconvenientes, lo que implicó profundizar en el código del modelo y tener intercambios varios con sus desarrolladores (Laboratoire d'Hydraulique Saint-Venant, Francia). Lamentablemente, no fue posible resolver el problema subyacente en el código numérico y se optó por realizar una implementación del modelo tridimensional eliminando las zonas del dominio expuestas a condiciones de secado y mojado, para así poder explorar su dinámica térmica. Naturalmente esta es una solución parcial que permitió avanzar según los objetivos de este proyecto, pero se continuará trabajando en conjunto con los desarrolladores del modelo en buscar una solución al problema subyacente en el modelo numérico.

Como resultado se tiene una implementación funcional del modelo hidrodinámico tridimensional incluyendo la temperatura del agua, pero que no pudo ser calibrada por falta de información de campo y presenta simplificaciones en el dominio de cálculo por dificultades de resolución numérica en las zonas de secado y mojado. Se destaca de cualquier forma lo positivo en el marco de un proyecto de investigación de la interacción con los desarrolladores del modelo y el vínculo de

colaboración establecido para continuar buscando una solución al problema.

## **\*\* Caracterización de la hidrodinámica del embalse \*\***

### **\* Circulación**

Se realizaron simulaciones de varios años con forzantes reales a los efectos de caracterizar la circulación en el embalse. Se compararon los niveles simulados y observados en la represa para todo el período simulado. A partir de los campos de corrientes horarios obtenidos con el modelo, se calcularon mapas de corriente residual (promedio durante el período simulado), intensidades máximas, mínimas y percentiles 10 y 90.

El campo de corrientes residuales se calcula promediando el campo de velocidades instantáneo calculado por el modelo durante todo el período de tiempo simulado. Los resultados obtenidos muestran una clara heterogeneidad espacial, distinguiéndose claramente: la zona central del embalse (antiguo cauce principal) con velocidades de flujo residual del orden de 10 cm/s; y los brazos laterales (Guauguaycito, Arapey, Itapebí, Mocoretá, Mandisovi,) con velocidades de flujo un orden de magnitud inferiores. En los brazos los patrones de circulación muestran intensidades mayores en las zonas someras sobre la costa que resultan del efecto de arrastre del viento, hecho que ha sido reportado en otros casos de estudio (Boutron et al., 2015).

Los valores de intensidad máximas se tienen en la zona central durante los eventos de crecidas, alcanzando en el período simulado valores cercanos a 1 m/s, mientras que en los brazos las intensidades máximas apenas alcanzan los 0,1 m/s.

Un experimento numérico quitando el efecto del viento sobre la hidrodinámica mostró su relevancia para la circulación en los brazos del embalse y el intercambio de agua con la zona central.

### **\* Escalas temporales de transporte**

La metodología seguida se basa en la simulación del transporte de un trazador pasivo conservativo en distintos escenarios idealizados.

Se simularon nueve escenarios sin viento, combinando diferentes elevaciones superficiales y caudales entrantes (percentil 90, 50 y 10 de las respectivas series históricas de cada variable). Como era de esperar los resultados obtenidos muestran una significativa heterogeneidad en las escalas temporales de transporte, diferenciándose marcadamente la zona central de los brazos. Menores niveles del embalse y mayores caudales tienden a disminuir el tiempo de lavado, y viceversa. En la zona central el tiempo de lavado obtenido en estos escenarios idealizados es de pocos días, mientras que en los brazos como por ejemplo Guauguaycito se obtuvieron valores de varios meses. De cualquier forma, debe tenerse presente que estos son valores en escenarios sin viento.

La influencia del viento se evaluó en forma simplificada mediante la simulación de ocho escenarios con una elevación de la superficie libre y caudales entrantes promedio, y un viento constante de 10 m/s que sopla desde ocho direcciones cardinales diferentes. Los resultados obtenidos muestran tiempos de lavado menores a los obtenidos en condiciones sin viento. En particular en el brazo de Guauguaycito vientos alineados con el eje del brazo tendieron a incrementar el intercambio con la zona central disminuyendo así los tiempos de lavado, mientras que vientos en dirección transversal al brazo favorecen un bloqueo del flujo en la boca disminuyendo el intercambio con la zona central e incrementando los tiempos de lavado. Esto nuevamente enfatiza la importancia de este forzante en la dinámica de los brazos.

Si bien se trata de experimentos numéricos estacionarios idealizados, los resultados aportan una idea de las escalas temporales de transporte y su sensibilidad a otras variables como nivel del embalse, caudales erogados y vientos locales. Los resultados obtenidos muestran que en este caso de estudio dichas variables, asociadas a la operación de la represa, tienen un impacto significativo en las escalas de transporte. Las zonas donde las escalas temporales de transporte toman mayores valores coinciden con las zonas de mayores problemas de calidad de agua identificadas en la revisión de antecedentes.

## **\*\* Pautas para el diseño de una campaña de medición en campo \*\***

A los efectos de mejorar la implementación de las herramientas de modelación numérica, así como a la propia comprensión de la dinámica del sistema, resulta de interés realizar mediciones en campo que aporten a: a) caracterizar los flujos en las fronteras del embalse; b) lograr una mejor comprensión del flujo de agua en algunas secciones particulares del embalse (distribución del flujo entre el antiguo cauce y las márgenes inundadas; el intercambio de agua entre un brazo y el cuerpo central del embalse); c) caracterizar el efecto del arrastre del viento sobre el perfil de velocidades en la columna de agua, en particular en zonas someras como los brazos; d) caracterizar la mezcla vertical y



la posible estratificación por temperatura; y e) caracterizar los procesos de mezcla horizontal.

Para ello se sugieren actividades tanto bajo la estrategia de campañas de medición así como el establecimiento de mediciones continuas.

Las campañas de medición apuntarían a obtener información hidrodinámica mediante el uso de perfiladores de corrientes en distintas secciones del embalse, y perfiles verticales de diversas variables en las zonas más profundas del embalse.

Tal como se observó en los resultados del modelo numérico, el efecto del viento sobre la circulación del embalse puede ser dominante en zonas someras y en los brazos del embalse. Experimentos con flotadores con traqueo GPS podrían generar información que permita verificar la adecuada representación de la circulación en dichas zonas.

Uno de los procesos para el que no se cuenta con ninguna información previa en el embalse y que resulta relevante para el modelado de transporte de sustancias y por tanto calidad de agua son los procesos macro de mezcla horizontal. Estimaciones a partir de experimentos de lanzamiento de tinta fluorescente podrían ayudar a acotar el rango de valores de los coeficientes de dispersión horizontal y vertical de base que son utilizados en la implementación de las herramientas de modelación numérica.

En lo que refiere a mediciones continuas en las fronteras del embalse, se sugiere centrar el esfuerzo de medición de los aportes en la frontera norte del embalse. Dentro de los parámetros principales a registrar se encuentran: velocidad, nivel, temperatura y turbidez; pudiéndose prever la incorporación de parámetros químicos. A su vez es deseable tener registros continuos en puntos representativos del propio embalse. Al no existir estructuras donde colocar sensores en la mayoría de los puntos mencionados, debería considerarse la instalación de boyas. Estas podrían equipar perfiladores de corrientes en algunos puntos relevantes como el ingreso al embalse y la zona media, y sondas multi-paramétricas para registro de temperatura, conductividad, turbidez y fluorescencia (clorofila A, Ficocianina, Ficoeritrina, fDOM -materia orgánica disuelta fluorescente-), y eventualmente otros parámetros como amonio, oxígeno disuelto, nitrato, pH, ORP -potencial redox-, cloruros.

La implementación de este tipo de medición continua requiere de un esfuerzo y compromiso de largo plazo necesariamente a cargo de las instituciones vinculadas a la gestión del cuerpo de agua.

## **Conclusiones y recomendaciones**

Este proyecto permitió llevar a cabo la implementación de un modelo hidrodinámico bidimensional para el embalse de Salto Grande. Para su implementación fue necesario compilar y organizar un volumen importante de información. El modelo numérico implementado es capaz de reproducir satisfactoriamente la serie histórica de niveles en el embalse, en zonas con diferentes comportamientos (fluvial - lago). Sus resultados se utilizaron para obtener una primera caracterización de la hidrodinámica y escalas temporales de transporte en el embalse.

Por otra parte este proyecto permitió también la implementación de la versión tridimensional del modelo hidrodinámico incluyendo la temperatura del agua. En este proceso se identificaron problemas en el código del modelo a la hora de incluir zonas de secado y mojado, por lo que la versión implementada abraza un dominio más acotado que no considera las zonas inundables. Estas dificultades motivaron el intercambio con los desarrolladores del modelo con los cuales se continuará trabajando más allá del presente proyecto para poder dar solución al problema.

El análisis de los resultados del modelo permitió avanzar en la caracterización hidrodinámica del embalse, identificándose zonas de diferente comportamiento, así como la influencia de distintos forzantes en la dinámica del sistema. Existe una fuerte heterogeneidad espacial, distinguiéndose claramente: la zona central del embalse, antiguo cauce principal, con velocidades mayores; y los brazos laterales con velocidades de flujo al menos un orden de magnitud inferiores. En los brazos los patrones de circulación muestran una fuerte dependencia del viento con intensidades mayores en las zonas someras.

Experimentos numéricos idealizados aportaron una idea de las escalas temporales de transporte y su sensibilidad a otras variables como nivel del embalse, caudales erogados y vientos locales. Los resultados obtenidos muestran que en este caso de estudio dichas variables, asociadas a la operación de la represa, tienen un impacto significativo en las escalas de transporte. Las zonas donde las escalas temporales de transporte toman mayores valores coinciden con zonas que presentan problemas de calidad de agua.

El modelo numérico permitió avanzar en la implementación de metodologías para la caracterización hidrodinámica del embalse, sin embargo, su implementación se vería mejorada significativamente con más información de campo. En particular resulta evidente la necesidad de incorporar información continua de corrientes. En este sentido y siendo más amplios para abarcar otros procesos y variables de interés a los efectos de mejorar la herramienta, se realizaron varias sugerencias sobre posibles estrategias de medición tanto con campañas como monitoreo continuo.

A cuenta de incorporar más información de campo en su implementación, el modelo numérico implementado constituye una base para la incorporación de otros procesos más complejos, para su aplicación en el estudio de diferentes intervenciones antrópicas en el embalse, así como también una eventual implementación de pronóstico operativa. Se espera así poder continuar agregando capacidades sobre la herramienta en futuros proyectos de investigación y tesis de posgrado.

Finalmente, se destaca que la ejecución de este proyecto dio un impulso a la línea de trabajo de mejora y desarrollo de herramientas hidro-ambientales para aguas costeras e interiores del IMFIA. Esto se materializó en la formación de recursos humanos, establecimiento de vínculos con científicos del exterior, el avance en el conocimiento sobre un cuerpo de agua de relevancia para nuestro país, y el derrame hacia actividades de enseñanza de posgrado y actualización que en definitiva contribuyen al desarrollo de capacidades nacionales.

## Referencias bibliográficas

- Bonilla, S., Haakonsson, S., Somma, A., Gravier, A., Britos, A., Vidal, L., De León, L., Brena, B., Pérez, M., Piccini, C., Martínez de la Escalera, G., Chalar, G., González-Piana, M., Martigani, F., & Aubriot, L., 2015. Cianobacterias y cianotoxinas en ecosistemas límnicos de Uruguay. *INNOTEC*, 10, 9-22.
- Bordet, F., Fontanarrosa, M. S., and O'Farrell, I., 2017. Influence of light and mixing regime on bloom-forming phytoplankton in a subtropical reservoir. *River Research and Applications* 33, 1315–1326.
- Boutron, O. , Bertrand, O., Fiandrino, A., Höhener, P., Sandoz, A., Chérain, Y., Coulet, E. and Chauvelon, P. (2015). An unstructured numerical model to study wind-driven circulation patterns in a managed coastal mediterranean wetland: The Vaccarès lagoon system. *Water (Switzerland)*, 7 (11), 5986-6016. <https://doi.org/10.3390/w7115986>
- Chalar, G., 2003. The use of phytoplankton patterns of diversity for algal bloom management. *Limnologica - Ecology and Management of Inland Waters*, 39 (3), 200-208.
- Chalar, G., 2006. Dinámica de la eutrofización a diferentes escalas temporales: embalse Salto Grande (Argentina-Uruguay). *Eutrofização na América do Sul: Causas, conseqüências e tecnologias de gerenciamento e controle*, 87-101. Editado por José Galizia Tundisi, Takako Matsumura Tundisi, Corina Sidagis Galli.
- Choi, K.W., Lee, J.H.W., 2004. Numerical determination of flushing time for stratified water bodies, *Journal of Marine Systems*, 50 (3–4), 263-281.
- Chung et al., (2014). S.W. Chung, J. Imberger, M.R. Hipsey, H.S. Lee The influence of physical and physiological processes on the spatial heterogeneity of a *Microcystis* bloom in a stratified reservoir *Ecol. Modell.*, 289, pp. 133-149, 10.1016/j.ecolmodel.2014.07.010
- Cid, F., Antón, R., Pardo, R., Vega, M., Caviedes-Vidal, E., 2011. Modelling spatial and temporal variations in the water quality of an artificial water reservoir in the semiarid Midwest of Argentina, *Analytica Chimica Acta*, 705 (1–2), 243-252.
- Conde, D., Pintos, W., Gorga, J., de León, R., Chalar, G., Sommaruga, R., 1996. The main forces inducing chemical spatial heterogeneity in Salto Grande, a reservoir on the Uruguay River. *Arch. Hydrobiol.*, 1 (Suppl. on Large Rivers Krems), 571-578.
- De León, L., Chalar, G., 2003. Phytoplankton abundance and diversity at Salto Grande Reservoir (Uruguay – Argentina). Seasonal cycle and spatial distribution. *Limnetica*, 22, 103-113.
- Drozd A., de Tezanos Pinto P., Fernández V., Bazzalo M., Bordet F., Ibañez G., 2019. Hyperspectral remote sensing monitoring of cyanobacteria blooms in a large South American reservoir: high- and medium-spatial resolution satellite algorithm simulation. *Marine and Freshwater Research* , In press.
- Fossati, M., Santoro, P., Urrestarazu, S., and Piedra-Cueva, I., 2011. Numerical Study of the Effect of a Power Plant Cooling Water Discharge in the Montevideo Bay. *Journal of Applied Mathematics*, 2011, ID 970467, 1066-1086.
- Fossati, M., Fernandez, M., Piedra-Cueva, I., 2013. Determination of a submarine outfall discharge location based on a 3D hydrodynamic-lagrangian high resolution model implemented for the Río de la Plata in South America. *Capítulo del libro: Ocean modelling for coastal management - Case studies with MOHID*, Eds. Marcos Mateus, Ramiro Neves, 69-82.
- Franks, P.J.S. (2018). Recent Advances in Modelling of Harmful Algal Blooms. In: Glibert, P., Berdalet, E., Burford, M., Pitcher, G., Zhou, M. (eds) *Global Ecology and Oceanography of Harmful Algal Blooms*. *Ecological Studies*, vol 232. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-70069-4\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-319-70069-4_19)
- Friedrichs, M., et al. (2006). Ecosystem model complexity versus physical forcing: quantification of their relative impact with assimilated Arabian Sea data. *Deep-Sea Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.* 53, 576-600.
- Gholizadeh, M. H., Melesse, A. M., & Reddi, L., 2016. A Comprehensive Review on Water Quality Parameters Estimation Using Remote Sensing Techniques. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 16(8), 1298. <http://doi.org/10.3390/s16081298>
- González-Piana, M., Fabián, D., Piccardo, A., Chalar, G., 2017. Dynamics of Total Microcystin LR Concentration in Three Subtropical Hydroelectric Generation Reservoirs in Uruguay, South America. *Bull Environ Contam Toxicol*, 99, 488–492.
- Gray et al., 2020. E. Gray, E.B. Mackay, J.A. Elliott, A.M. Folkard, I.D. Jones, (2020). Wide-spread inconsistency in estimation of lake mixed depth impacts interpretation of limnological processes *Water Res.*, 168 (2020), p. 115136, 10.1016/j.watres.2019.115136
- Hakanson, L. (1999). On the principles and factors determining the predictive success of ecosystem models, with a focus on lake eutrophication models. *Ecol. Model.* 121 (2-3), 139-160.
- Hipsey, M. R. et al. (2015), Predicting the resilience and recovery of aquatic systems: A framework for model evolution within environmental observatories, *Water Resour. Res.*, 51, 7023-7043.
- Huisman, J. et al. (1999). Critical depth and critical turbulence: Two different mechanisms for the development of

phytoplankton blooms. *Limnology and Oceanography*, 44(7), 1781-1787.

Jeznach LC et al. (2016). A framework for modeling contaminant impacts on reservoir water quality. *J Hydrol* 537:322–333. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.03.041>

Jeznach, L., Jones, C., Matthews, T., Tobiasson, J., Ahlfeld, D., 2016. A framework for modeling contaminant impacts on reservoir water quality, *Journal of Hydrology*, 537, 322-333.

Jouan, A., Douillet, P., Ouillon, S., Fraunié, P., 2006. Calculations of hydrodynamic time parameters in a semi-opened coastal zone using a 3D hydrodynamic model, *Continental Shelf Research*, 26 (12–13), 1395-1415.

Kruk, C., Martínez, A., Martínez de la Escalera, G., Trinchín, R., Manta, G., Segura, A., Piccini, C., Brena, B., Fabiano, G., Pirez, M., Gabito, L., Alcántara, I., Yannicelli, B., 2019. Floración excepcional de cianobacterias tóxicas en la costa de Uruguay, verano 2019. *INNOTEC*, 18, 36-68.

Li, J., Yang, W., Li, W., Mu, L., Jin, Z., 2018. Coupled hydrodynamic and water quality simulation of algal bloom in the Three Gorges Reservoir, China. *Ecological Engineering*, 119, 97 -108.

Maciel, F., Santoro, P., Piedra-Cueva, I., Pedocchi, F., 2018. Validación sinóptica de un modelo hidrodinámico del Río de la Plata mediante teledetección del frente de turbidez. XXVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Buenos Aires, Argentina.

Moss, B., 1998. *Ecology of fresh waters: man and medium, past to the future*. 3. Oxford: Blackwell Science Oxford. ISBN: 0-632-03512-9.

O'Farrell, I., Izaguirre, I., 1994. Phytoplankton ecology and limnology of a River Uruguay Lower Basin (Argentina). *Arch. Hydrobiol.*, 99 (Suppl.), 155-179.

O'Farrell, I. O., Bordet, F. & Chaparro, G. 2012. Bloom forming cyanobacterial complexes co-occurring in a subtropical large reservoir: validation of dominant eco-strategies. *Hydrobiologia*, 698, 175-190.

Quiros, R., Luchini, L., 1982. Características limnológicas del embalse de Salto Grande III: fitoplancton y su relación con parámetros ambientales. *Rev. Asoc. Cienc. Nat. Litoral*, 13, 40–66.

Rios, A., 2018. Implementación de un modelo hidrodinámico tridimensional en el embalse de Paso Severino. Aportes para la modelación de calidad de agua. Tesis en el marco de la Maestría de Ingeniería Ambiental, FING, UdelaR. 212 pp.

Robson, B. J. (2014), When do aquatic systems models provide useful predictions, what is changing, and what is next? *Environ. Model. Softw.*, 61, 287–296, doi:10.1016/j.envsoft.2014.01.009.

Rueda, F., Moreno-Ostos, E., Armengol, J., 2006. The residence time of river water in reservoirs. *Ecological Modelling*, 191, 260 – 274.

Santoro, P.; Fossati, M.; and Piedra-Cueva, I., 2013a. Study of the meteorological tide in the Río de la Plata. *Continental Shelf Research*, Vol. 60, 51-63.

Santoro, P.; Fossati, M.; and Piedra-Cueva, I., 2013b. Characterization of Circulation Patterns in Montevideo Bay (Uruguay). *Journal of Coastal Research: Volume 29, Issue 4: 819 – 835*.

Santoro, P., Fossati, M., Tassi, P., Huybrechts, N., Pham Van Bang, D., Piedra-Cueva, I., 2017. A coupled wave–current–sediment transport model for an estuarine system: Application to the Río de la Plata and Montevideo Bay. *App. Math. Modell.* 52, 107–130.

Schuwirth, N, et al., 2019. How to make ecological models useful for environmental management. *Ecological Modelling*, 411, 108784.

Shan, S., Sheng, J., 2012. Examination of circulation, flushing time and dispersion in Halifax Harbour of Nova Scotia. *Water Quality Research Journal of Canada* 47(3-4), 353-374.

Smith V, Schindler D, 2009. Eutrophication science: where do we go from here? *Trends Ecol. Evol.* 24, 201–207.

Torres-Bejarano, F.; Ramirez, H.; Denzer, R.; Frysinger, S.; Hell, T. and Schlobinski, S., 2013. Linking Numerical Water Quality Models in an Environmental Information System for Integrated Environmental Assessments. *Journal of Environmental Protection*, 4 (7A), 126-137.

Tranmer, A.W. et al. (2020). Coupled reservoir–river systems: lessons from an integrated aquatic ecosystem assessment. *J. Environ. Manage.* 260, 1–14. doi:10.1016/j.jenvman.2020.110107.

Vidal, L. y Kruk, C., 2008. *Cylindrospermopsis raciborskii* (Cyanobacteria) extends its distribution to Latitude 34°53'S: taxonomical and ecological features in Uruguayan eutrophic lakes. En: *Panamerican Journal of Aquatic Sciences*, 3, pp.142-151.

Vinçon-leite, B., Casenave, C., 2019. Modelling eutrophication in lake ecosystems: A review. *Science of the Total Environment*, 651, 2985-3001.

Watanabe, F., Alcántara, E., Rodrigues, T., Rotta, L., Bernardo, N., Imai, Nilton, 2017. Remote sensing of the chlorophyll-a based on OLI/Landsat-8 and MSI/Sentinel-2A (Barra Bonita reservoir, Brazil). *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, Epub.

Weber et al., 2017. M. Weber, K. Rinke, M.R. Hipsey, B. Boehrer (2017). Optimizing withdrawal from drinking water reservoirs to reduce downstream temperature pollution and reservoir hypoxia J. Environ. Manage., 197, pp. 96-105.

### **Licenciamiento**

Reconocimiento-Compartir Igual 4.0 Internacional. (CC BY-SA)