



**AIDIS URUGUAY**  
ASOCIACIÓN INTERAMERICANA DE  
INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL

# Modelación hidrodinámica y de calidad de agua del Embalse de Rincón del Bonete

## TEMA: 4 – GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS



Autores

**Dr. Ing. Civil Pablo Santoro**

Perfil Hidráulico Ambiental.  
Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA)  
Facultad de Ingeniería, Udelar

**Carolina Paz, Santiago Delgado, Facundo Galletta,  
Fernanda Maciel, Eliana Morquio, Rodrigo Mosquera,  
Lucía Ponce de León, Agustín Ríos, Francisco Pedocchi**

Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA)  
Facultad de Ingeniería, Udelar

### Resumen

Uruguay cuenta con cuatro embalses para generación hidroeléctrica. Estos cuerpos de agua semilénticos se encuentran entre los más grandes del país y, además, tienen otros usos relevantes como el riego, la potabilización, la pesca artesanal y deportiva, la piscicultura, el abrevadero de ganado y la recreación. El aumento en el tiempo de residencia del agua, combinado con el creciente proceso de eutrofización antropogénica en los embalses hidroeléctricos, favorece la aparición de floraciones fitoplanctónicas. Estos eventos tienen consecuencias negativas para el ecosistema e interfieren con las actividades humanas. El embalse hidroeléctrico más grande de Uruguay, Rincón del Bonete, ha mostrado floraciones fitoplanctónicas

frecuentes durante las últimas décadas. Este trabajo tiene como objetivo contribuir a una mejor gestión de la calidad del agua en el embalse Rincón del Bonete mediante el desarrollo de herramientas numéricas que ayuden a comprender la dinámica del sistema y a predecir su comportamiento futuro.

### Introducción

La Central Hidroeléctrica de Rincón del Bonete se ubica sobre el cauce del Río Negro, en el límite entre los departamentos de Durazno y Tacuarembó. Fue la primera de las tres centrales en cadena construidas sobre el Río Negro durante el siglo XX y su embalse se ubica aguas arriba de los otros dos, condicionando su hidrodinámica y calidad de agua.

La cuenca de Rincón del Bonete tiene una extensión de 39.541 km<sup>2</sup> (Figuras 1 y 2), de los cuales 3.000 km<sup>2</sup> se encuentran en territorio brasileño. El canal principal recorre aproximadamente 150 km dentro del embalse, y se extiende desde aguas arriba de la localidad de San Gregorio del Polanco hasta la represa. A cota 78,5 m, el embalse cuenta con un volumen de 7.260 hm<sup>3</sup>, cubre una superficie de 998 km<sup>2</sup> y alcanza una profundidad máxima de 30 m, siendo el embalse de mayor capacidad de almacenamiento del país.

Se trata de un embalse que experimenta recurrentes floraciones de cianobacterias tóxicas (Bonilla et al, 2021, Chalar, 2015, Chalar, 2014, Chalar, 2012). La morfología, el régimen hidrológico, la operación de la represa y los factores meteorológicos complejizan el análisis del funcionamiento limnológico del embalse. No se han identificado trabajos previos que reporten información sobre la circulación y el transporte de sustancias. Por su parte, la morfología del embalse sugiere que el tiempo de residencia puede

presentar variaciones espaciales significativas, así como estar fuertemente influenciado por factores meteorológicos, aspectos sobre los cuales tampoco se tienen antecedentes de estudio.

En el marco de la Iniciativa del Río Negro (IRN), el proyecto "Modelación hidro-sedimentológica y de calidad de agua del embalse de Rincón del Bonete" (2021-2022) buscó avanzar en la comprensión del embalse generando herramientas que permiten representarlo adecuadamente, reproduciendo su comportamiento actual y permitiendo explorar su comportamiento a futuro. Actualmente en el marco del proyecto de investigación ANII-FMV "Estudio de procesos físicos relevantes para la calidad de agua en el embalse de Rincón del Bonete" (2024-2026) se continúa trabajando en profundizar el conocimiento de la mezcla vertical y el clima lumínico en el embalse, por ser fenómenos relevantes para la calidad de agua. En este sentido es necesario caracterizar cuantitativamente la hidrodinámica, la dinámica de sedimentos y la dinámica térmica.



Figura 1: Mapa general de ubicación.

## Metodología

La metodología se centró en la implementación de un modelo numérico del embalse de Rincón del Bonete que integra aspectos hidrodinámicos, y temperatura del agua; con procesos bio-químicos, vinculados a los ciclos de nitrógeno y fósforo; y procesos biológicos,

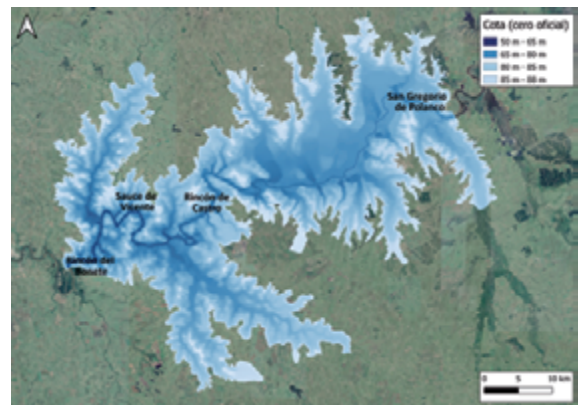


Figura 2: Modelo Digital de Terreno (MDT) generado para el embalse de Rincón del Bonete. Cotitas del fondo referidas al Cero Oficial.

relacionados al crecimiento neto de distintos grupos de fitoplancton. La implementación del modelo se llevó a cabo en forma integrada con actividades de medición en campo. Se realizó también una extensa recopilación de información, que por ejemplo produjo un modelo digital de la batimetría del embalse, que no existía hasta el momento.

La herramienta numérica utilizada en este trabajo es el modelo Delft3D 4.04.01 (Deltares, 2018a, Deltares 2018b). Para representar los procesos hidrodinámicos se utilizó el módulo Delft3D-FLOW y para la representación de los procesos de calidad de agua el módulo

Delft3D-ECO, acoplado off-line con el Delft3D-FLOW. La implementación del modelo se llevó a cabo en forma integrada con actividades de medición en campo. En primera instancia, el modelo se implementó de forma bidimensional, fue calibrado y validado en base a una combinación de mediciones continuas recolectadas durante salidas de campo, estimaciones satelitales e información histórica de monitoreo.

El modelo se utilizó para caracterizar la circulación en el embalse y evaluar la influencia de

diferentes forzantes (hidrometeorológicos y operación de la presa). Se analizaron las escalas de tiempo de transporte en el embalse mediante experimentos numéricos con un trazador pasivo conservativo (Jouon et al., 2006, Drouzy et al., 2019). Se calcularon mapas de tiempo de lavado basados en simulaciones con forzantes realistas. También se analizó la sensibilidad de los resultados del modelo de calidad del agua a varios parámetros, así como diferentes escenarios de condiciones de borde de nutrientes.

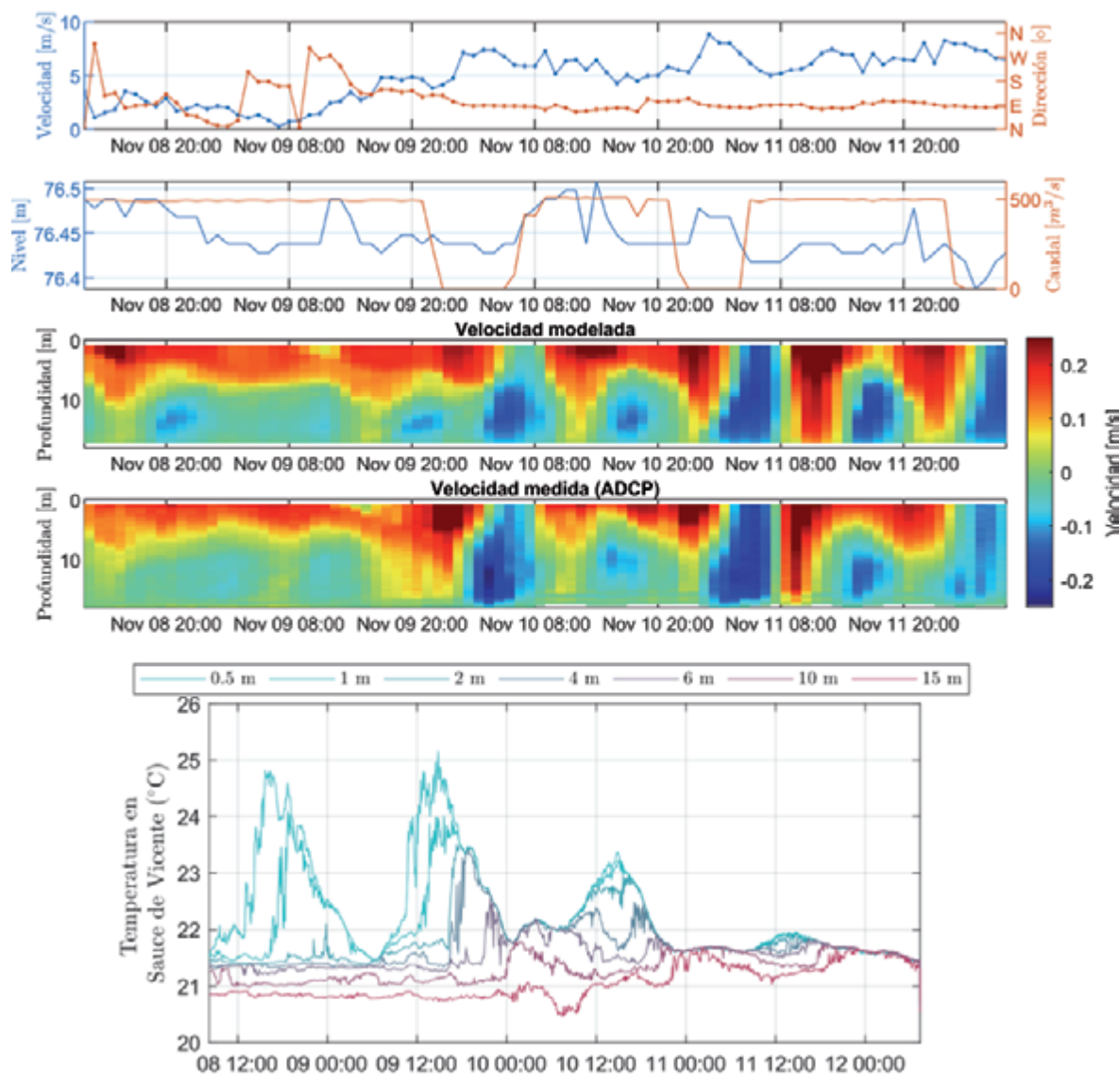


Figura 3: Intensidad y dirección del viento a 10 m de altura de reanálisis (primer panel). Caudal erogado y nivel en la represa provisto por UTE (segundo panel). Velocidad de la corriente modelada en Rincón de Castro (ver ubicación en Figura 2) proyectada en la dirección suroeste (tercer panel) y medida en campo (cuarto panel). Temperaturas medidas a distintas profundidades en Sauce de Vicente. Mediciones realizadas entre el 8 y 12 de noviembre del 2021 (quinto panel).

## Resultados

Los resultados del modelo numérico y las mediciones de campo muestran una hidrodinámica sumamente compleja, donde el viento tiene un rol dominante. El viento es capaz de inducir corrientes superficiales, las que provocan desniveles en el embalse que a su vez generan flujos de retorno y celdas de recirculación. Las mediciones realizadas permitieron cuantificar por primera vez inversiones de flujos de agua y ciclos de estratificación y mezcla en el embalse. En la Figura 3 se muestran las intensidades de corriente en Rincón de Castro (ver Figura 2) según la dirección principal de flujo (suroeste), medidas y simuladas con el modelo numérico; se incluyen además los principales forzantes (viento y caudal erogado por la represa). Experimentos numéricos idealizados mostraron que el viento tiene un rol determinante en la ocurrencia de estas inversiones del flujo.

El viento además promueve la mezcla vertical en la columna de agua, siendo capaz de romper la estratificación térmica, que puede ser

importante en las zonas más profundas del embalse. Dada la extensión del embalse, el viento genera oleaje que es capaz de resuspender los sedimentos en las zonas más someras y elevar la turbidez del agua, particularmente para niveles bajos del embalse.

En la Figura 3 se muestran a su vez series continuas de temperatura del agua a distintas profundidades en Sauce Vicente (ver Figura 2). Se puede apreciar en los datos que el embalse muestra estratificaciones térmicas, con diferencias entre fondo y superficie que pueden alcanzar varios grados. Dicha estratificación sin embargo se da durante las horas de sol y no es sostenida en el tiempo, en general el viento es capaz de mezclar toda la columna de agua frecuentemente.

En la Figura 4 se presenta una comparación entre perfiles de temperatura del agua medidos y modelados en Sauce Vicente (ver Figura 2). Se puede ver que el modelo es capaz de reproducir satisfactoriamente los valores de temperatura del agua y su estructura vertical.



## STEP • Robotics



Manipulación de materiales, paletizado, mantenimiento de máquinas y plegado de series de robots.

# FIVISA

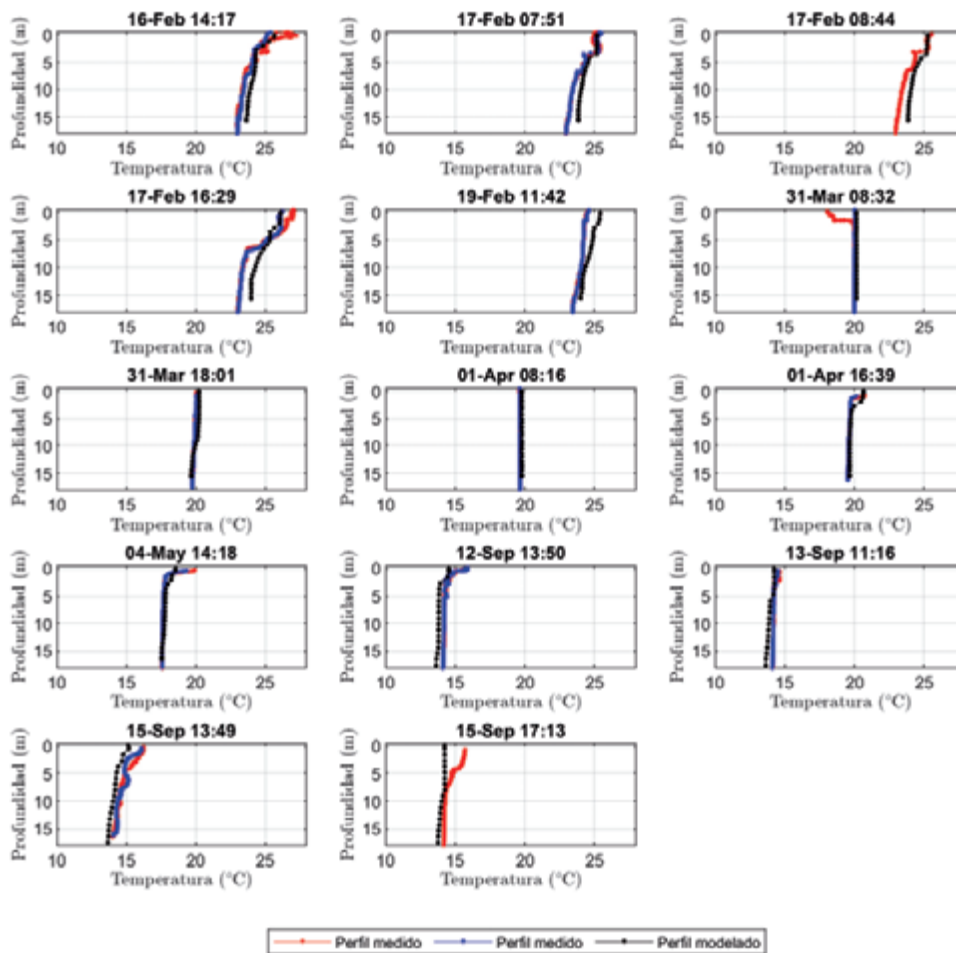


Figura 4: Perfiles de temperatura del agua medidos y modelados en Sauce Vicente (ver Figura 2).

Las lluvias y la hidrología de la cuenca de aporte condicionan los ingresos de agua y los cambios del nivel del embalse. La magnitud de los caudales de ingreso, y las condiciones de viento, determinan los procesos de lavado del embalse y los tiempos de residencia. La aplicación del modelo numérico permitió analizar una variedad de condiciones hidrológicas y cuantificar tiempos de lavado que

se encontraron entre valores menores al mes hasta varios meses. La modelación también mostró que los tiempos de lavado varían mucho espacialmente y permitió identificar zonas críticas donde son particularmente elevados (Figura 5). Estas zonas, con tiempos de residencia mayores, son particularmente propicias para el crecimiento y la acumulación del fitoplancton.

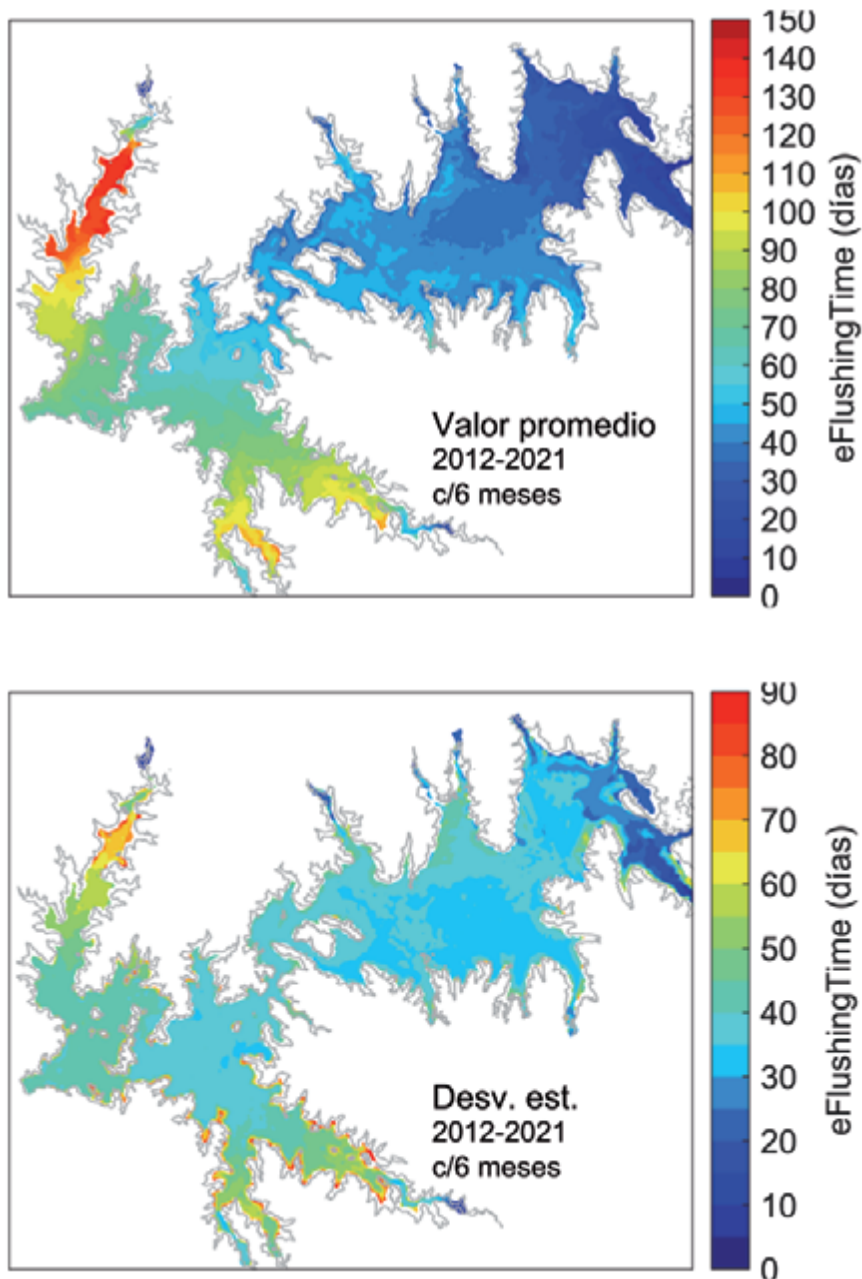


Figura 5: Valor promedio de tiempo de lavado (panel superior) y su desviación estándar (panel inferior) a partir de 19 realizaciones del modelo numérico.

Por otro lado, el modelo implementado logró representar de forma aceptable los datos disponibles de nutrientes en el embalse. Asimismo, el modelo captura la variabilidad temporal de los ciclos de nitrógeno y fósforo (mineralización de compuestos orgánicos, nitrificación, desnitrificación), la dinámica del fitoplancton (considerando la competencia por los recursos entre distintos grupos) y las variaciones del oxígeno disuelto (Figura 6).

Tanto la mezcla vertical como la turbidez del agua mostraron ser variables críticas para explicar la dinámica del fitoplancton en el embalse. No solo por controlar directamente la disponibilidad de luz para el fitoplancton, sino también por su influencia en los ciclos de los nutrientes. Particularmente, se pudo observar que la mezcla vertical afecta los niveles de nitrógeno inorgánico en la columna de agua, y la resuspensión y deposición de sedimentos finos afecta la dinámica de los fosfatos en el sistema.

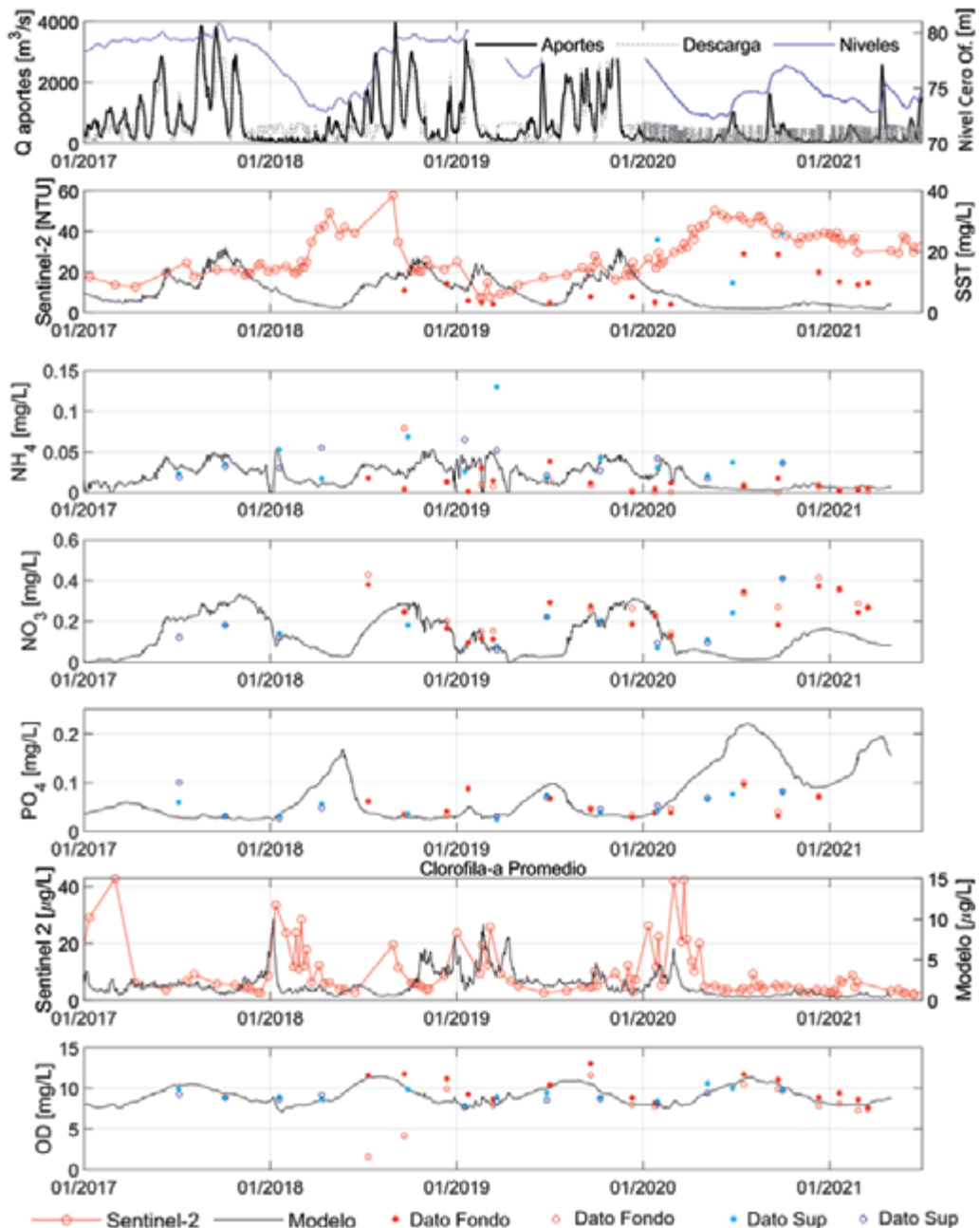


Figura 6: Caudales de aporte, descargas, y niveles; turbidez Sentinel-2 y SST modelados y medidos; amonio modelado y medido; nitrato modelado y medido; fosfato modelado y medido; clorofila-a modelada y satelital (promedio entre varios puntos del embalse); oxígeno disuelto modelado y medido.

## Aplicaciones

Los resultados del modelo numérico permitieron realizar una caracterización de la hidrodinámica en el embalse, sintetizando información en rosas de corrientes y estadísticas de niveles en una red de puntos del embalse que se encuentran disponibles en el Observatorio Ambiental Nacional<sup>1</sup> (OAN). Así

mismo el modelo fue utilizado para la construcción de mapas de tiempo de lavado, lo que permitió identificar zonas críticas donde son particularmente elevados. Estas zonas, con tiempos de residencia mayores, son particularmente propicias para el crecimiento y la acumulación del fitoplancton.

<sup>1</sup> <https://www.ambiente.gub.uy/oan>

Adicionalmente, se analizó el impacto sobre la hidrodinámica del embalse de la imposición de un caudal mínimo de erogación. Un análisis comparativo de escenarios mostró que esta restricción no generaría un cambio significativo en la circulación en el embalse, que como se mencionó está fuertemente controlada por el viento y los eventos de crecida. Sin embargo, esta descarga es de relevancia para asegurar condiciones de dilución aguas abajo de la represa.

Por otro lado, los resultados, particularmente la dinámica del fitoplancton, mostraron ser sensibles a los aportes de nitrógeno y fósforo total en los afluentes al embalse; permitiendo en un futuro cuantificar el efecto de cambios en los aportes de nutrientes que llegan al embalse desde la cuenca.

## Conclusión

Las tareas desarrolladas permitieron un avance cualitativo en la comprensión del embalse generando herramientas que permiten representarlo adecuadamente, reproduciendo su comportamiento actual y permitiendo explorar su comportamiento a futuro. Los principales resultados obtenidos con el modelo, así como los informes técnicos de detalle se encuentran disponibles en el OAN (IMFIA, 2022a, 2022b, 2022c, 2022d).

La sistematización de la información existente, la generación de nuevos datos de campo y la implementación del modelo numérico resultaron en un salto significativo en la información disponible sobre el embalse y su dinámica. A su vez, permitieron la cuantificación y confirmación de diversas hipótesis previamente formuladas sobre la dinámica del fitoplancton en el embalse. En el futuro la herramienta numérica puede ser de utilidad para evaluar medidas de gestión tendientes a la mejora de la calidad de agua en el embalse, evaluar posibles descargas de efluentes o políticas de operación de la represa.

Actualmente se continúa trabajando en la caracterización y comprensión de la mezcla vertical y el clima lumínico del embalse, procesos relevantes para su calidad de agua. En este sentido se profundizará en la caracterización de la estructura térmica del embalse, su interacción con forzantes meteorológicos y condiciones de borde (hidrológicas y de operación de la represa). En lo que refiere al clima lumí-

nico del embalse, factor sumamente relevante para su dinámica fitoplanctónica, se analizará la relevancia de las sustancias disueltas y material en suspensión en la atenuación de la luz en la columna de agua. Se avanzará en la caracterización y capacidad de modelación numérica de los procesos relevantes en la dinámica de sedimentos del embalse (ingreso, circulación y sedimentación, resuspensión en las márgenes por oleaje).

Este trabajo se enmarcó en el convenio de cooperación "Modelación hidro-sedimentológica y de calidad de agua del embalse de Rincón del Bonete" suscrito entre el Ministerio de Ambiente (MA) - Dirección Nacional de Calidad y Evaluación Ambiental (DINACEA), Fideicomiso Fondo de Innovación Sectorial (FIS) y la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República (UdelaR) - Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA). El convenio se enmarca en la Iniciativa del Río Negro (IRN) y fue gestionado para la Facultad de Ingeniería por la Fundación Julio Ricaldoni (FJR). Actualmente tiene continuidad en el marco del proyecto ANII-FMV "Estudio de procesos físicos relevantes para la calidad de agua en el embalse de Rincón del Bonete". Finalmente, agradecemos al Ing. Pablo Thomasset por el aporte de mapas y cartas históricas del embalse.

## Referencias bibliográficas

- Bonilla, S., Aubriot, L., Haakonsson, S., Illarze, M., Isasa, I. D., & Brena, B. M. (2021). Las floraciones de cianobacterias tóxicas comprometen el uso del agua del Río Negro, Uruguay. *INNO-TEC*, (22 jul-dic), e577-e577.
- Chalar, G., Fabián, D., Gonzalez-Piana, M., y Piccardo, A. (2015). Estado y evolución de la calidad de agua de los tres embalses del Río Negro durante el período setiembre 2011 - marzo 2015. *Secc. Limnología, Fac. de Ciencias, UdelaR*.
- Chalar, G., Gerhard, M., González-Piana, M., y Fabián, D. (2014). Hidroquímica y eutrofización en tres embalses subtropicales en cadena. En: Marcovecchio JE, Botté SE, Freije RH (eds) *Procesos geoquímicos superficiales en Sudamérica*. Nueva Graficesa, Salamanca, pp 121-148
- Chalar, G., Fabián, D., Gonzalez-Piana, M., y Delbene, L. (2012). Caracterización limnológica de los embalses del Río Negro durante el período setiembre 2009 - junio 2011. *Sección Limnología, Facultad de Ciencias, UdelaR*

Deltares (2018). Delft3D-FLOW - Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments - User Manual. WL | Delft Hydraulics, Delft. 684p.

Deltares (2018b). D-Water Quality - Versatile water quality modelling in 1D, 2D or 3D systems including physical, (bio)chemical and biological processes - User Manual. WL | Delft Hydraulics, Delft. 477p.

Drouzy, M., Douillet, P., Fernandez, JM. (2019). Hydrodynamic time parameters response to meteorological and physical forcings: toward a stagnation risk assessment device in coastal areas. *Ocean Dynamics* 69, 967-987. <https://doi.org/10.1007/s10236-019-01283-1>

IMFIA, 2022a. Herramientas numéricas de apoyo a la gestión de calidad de agua en embalses para generación hidroeléctrica. Proyecto de Investigación Aplicada Fondo María Viñas 2019 FMV\_1\_2019\_1\_156173. Informe Técnico Final: <https://hdl.handle.net/20.500.12008/35425>

IMFIA,2022b. Modelación hidro-sedimentológica y de calidad de agua del embalse de Rincón del Bonete, Parte I: Información disponible

y medición en campo. Informe Técnico Final [https://www.ambiente.gub.uy/oan/documentos/IRN\\_IMFIA\\_Informe\\_Final\\_Parte1\\_ENVIADO\\_20221223.pdf](https://www.ambiente.gub.uy/oan/documentos/IRN_IMFIA_Informe_Final_Parte1_ENVIADO_20221223.pdf)

IMFIA,2022c. Modelación hidro-sedimentológica y de calidad de agua del embalse de Rincón del Bonete, Parte II: Modelación hidrodinámica. Informe Técnico Final: [https://www.ambiente.gub.uy/oan/documentos/IRN\\_IMFIA\\_Informe\\_Final\\_Parte2\\_ENVIADO\\_20221223.pdf](https://www.ambiente.gub.uy/oan/documentos/IRN_IMFIA_Informe_Final_Parte2_ENVIADO_20221223.pdf)

IMFIA,2022d. Modelación hidro-sedimentológica y de calidad de agua del embalse de Rincón del Bonete, Parte III: Modelación de calidad de agua. Informe Técnico Final [en línea]: [https://www.ambiente.gub.uy/oan/documentos/IRN\\_IMFIA\\_Informe\\_Final\\_Parte3\\_ENVIADO\\_20221223.pdf](https://www.ambiente.gub.uy/oan/documentos/IRN_IMFIA_Informe_Final_Parte3_ENVIADO_20221223.pdf)

Jouon, 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.

 **Plan Redondo**

**Ute reconoce a los mártires del ventilador. Los que lo apuntan hacia todos, menos hacia ellos.**

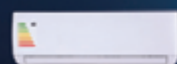
Comprando un aire acondicionado clase A Ute te devuelve

**\$2.500** en tu próxima factura

Tenés tiempo hasta el **31 de diciembre**

Registrá tu compra a través de WhatsApp UTE 098 1930 00 o en [ute.com.uy](http://ute.com.uy)

Plan vigente del 1º de julio al 31 de diciembre de 2025. Precio de devolución con IVA incluido. Ver términos y condiciones en [ute.com.uy](http://ute.com.uy)



Aires acondicionados clase A



Termotanques de 60 litros a más clase A



Secarropas a condensación



Lavavajillas



Hornos de empstrar con tecnología eléctrica y control de temperatura

**ute**  
Avanzamos con energía