



15 al 17 de octubre 2024

Cámara Mercantil de productos del país

## INFLUENCIA DE PROCESOS FÍSICOS EN LA CALIDAD DE AGUA DE PASO SEVERINO

### Agustín Ríos (\*)

Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental. Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Uruguay. Ing. Civil perfil Hidráulico Ambiental. Magister en Ingeniería Ambiental.



### Pablo Santoro

Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental. Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Uruguay.

### Francisco Pedocchi

Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental. Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Uruguay.

### TEMA: 4 – GESTIÓN DE RECURSOS HIRICOS

Dirección del autor principal (\*): Montevideo – Uruguay – e-mail: [arios@fing.edu.uy](mailto:arios@fing.edu.uy)

### RESUMEN

Si bien la calidad del agua en Paso Severino es monitoreada regularmente, se conoce poco sobre la influencia de la hidrología e hidrodinámica en el embalse. Este trabajo, que forma parte de un proyecto de investigación CSIC I+D (UdelaR) y avances de mi tesis de Doctorado en Ingeniería Ambiental, examina cómo los procesos a escala de cuenca y en el cuerpo de agua afectan la turbidez y el color del embalse. Se utiliza una metodología que combina herramientas de modelación hidrodinámica y de temperatura con el análisis de datos existentes y mediciones realizadas en campo. El modelo numérico se está calibrando utilizando datos de temperatura de alta frecuencia, tomados en la superficie y el fondo mediante una boya instalada como parte del proyecto CSIC I+D. Esta calibración incluye modificaciones en el código del modelo, mejorando la representación de algunos procesos clave. El análisis conjunto de datos de turbidez y color, tanto a escala semanal como diaria y sub-diaria, junto con los resultados del modelo, ha permitido proponer hipótesis sobre el impacto de fuentes externas, especialmente durante tormentas. El efecto de estos eventos en la calidad del agua depende de la interacción entre procesos a escala de cuenca, particularmente loops de histéresis en las curvas concentración-caudal afluente, y la posible formación de corrientes de densidad en el embalse. Al finalizar la calibración y validación del modelo, se podrán simular periodos largos, permitiendo estudiar la estratificación y mezcla a distintas escalas temporales y la influencia de eventos extremos en las variables de calidad del agua.

**Palabras Clave:** Calidad de agua, Hidrodinámica, Hidrología, Paso Severino

### OBJETIVOS

El objetivo general de este trabajo es comprender la hidro-termodinámica del embalse de Paso Severino, y su influencia en el transporte de sustancias.

Los objetivos específicos comprenden:

- Caracterizar periodos de estratificación y mezcla vertical en base a mediciones de alta frecuencia y modelación numérica tridimensional;
- Evaluar la dinámica de turbidez y color en el embalse en distintas condiciones hidrológicas e hidrodinámicas del embalse.



15 al 17 de octubre 2024

Cámara Mercantil de productos del país

## MARCO CONCEPTUAL

Paso Severino constituye la principal reserva de agua dulce para potabilización del Sistema Metropolitano de Montevideo, que abastece a más de la mitad de la población de Uruguay. Tiene una cuenca de aporte de 2500 km<sup>2</sup>, una capacidad de almacenamiento de 65 Hm<sup>3</sup>, una superficie de 15 km<sup>2</sup> y una profundidad máxima de 18 m. Profundizar en el conocimiento de la calidad y cantidad de agua de este reservorio es fundamental para su gestión en el contexto de una cuenca con intensa actividad económica sometida a los efectos de la variabilidad y el cambio climático (Ministerio de Ambiente, 2023).

El estudio de la dinámica de las sustancias que generan turbidez y color en una reserva de agua estratégica para el país es de gran relevancia ya que son dos variables que inciden tanto la estética como la seguridad del agua potable (Arboleda, 1992). Adicionalmente, son variables relevantes para el estudio de otros aspectos como el clima lumínico, la estructura térmica vertical, el azolve y el transporte de contaminantes adsorbidos (Morris & Fan, 1998; Jones & Smol, 2023). El destino de una sustancia que llega a un embalse desde su cuenca en una tormenta es complejo, ya que depende de la histéresis en la curva concentración-caudal (C-Q) afluente (Liu et al, 2021) y de la formación de corrientes de densidad en el embalse (Ford, 1983; Ryu et al, 2020). Por otro lado, las condiciones de sequía que conducen al descenso sostenido en los niveles de los embalses dejan al descubierto sedimentos en las márgenes, cuya erosión es determinante para la calidad de agua en estas condiciones (Jones & Smol, 2023).

## METODOLOGÍA

La metodología consiste en una combinación de herramientas de modelación numérica; análisis de datos meteorológicos, hidrológicos, batimétricos y de calidad de agua existentes (INUMET, ERA-5, OSE, DINAGUA, DINACEA); y nuestras propias campañas de medición.

Con respecto a las mediciones propias, se destacan: la medición de temperatura en alta frecuencia (10 minutos) de en superficie y fondo desde abril 2022 en un punto cerca de la represa; la realización de perfiles verticales de temperatura, conductividad, turbidez (OBS-3+, Campbell Scientific) y PAR (PAR-LOG ICSW, Sea-Bird Electronics) con un perfilador CTD SBE 19plus V2 Sea-Bird Electronics; perfiles verticales de pH, oxígeno disuelto y fDOM con una sonda EXO-2, YSI; la profundidad del disco Secchi; la recolección de muestras para analizar SST, SSV, SSF, distribución del tamaño de partículas (LISST-200x, Sequoia Inc.), carbono orgánico total, carbono orgánico disuelto, color, barrido de absorbancia de CDOM entre 250 nm y 800 nm. La recolección de muestras se realiza tanto en el afluente principal (río Santa Lucía Chico) como en un punto cercano a la represa.

La modelación numérica hidrodinámica (niveles, velocidades) y de temperatura se está realizando mediante la herramienta de código abierto Delft3D-FLOW (Deltares, 2017). El dominio es discretizado en una grilla ortogonal con resolución horizontal de 70 m x 70 m mientras que el espesor de las capas verticales en coordenadas Z es 1 m. La viscosidad y difusividad vertical turbulenta son computadas con un modelo de turbulencia k-ε. El intercambio de calor con la atmósfera es modelado a partir de datos meteorológicos horarios (radiación solar, nubosidad, temperatura del aire, humedad relativa). Las componentes incluyen radiación solar neta, radiación atmosférica, radiación emitida por el agua, calor latente y calor sensible. El caudal y la temperatura de los afluentes se computan a partir de mediciones subsidiarias de la estación 53.1 de DINAGUA. El modelo está siendo calibrado de forma manual para el período 1/4/2022 – 1/4/2023. La variable calibrada es la temperatura, que es contrastada con los datos de alta frecuencia y los perfiles verticales medidos.

15 al 17 de octubre 2024

Cámara Mercantil de productos del país

## RESULTADOS

Los datos de temperatura de alta frecuencia en superficie y fondo muestran un comportamiento polimítico. Los resultados del modelo mostraron un buen ajuste con los niveles medidos (RMSE de 0,2 m) y la temperatura media horaria del agua (RMSE de 0,74 °C en la superficie y de 0,67 °C en el fondo). En la Figura 1 se presentan las series temporales de temperatura medida y modelada en superficie y fondo, y en la Figura 2 se muestran los perfiles verticales de temperatura medidos y modelados.

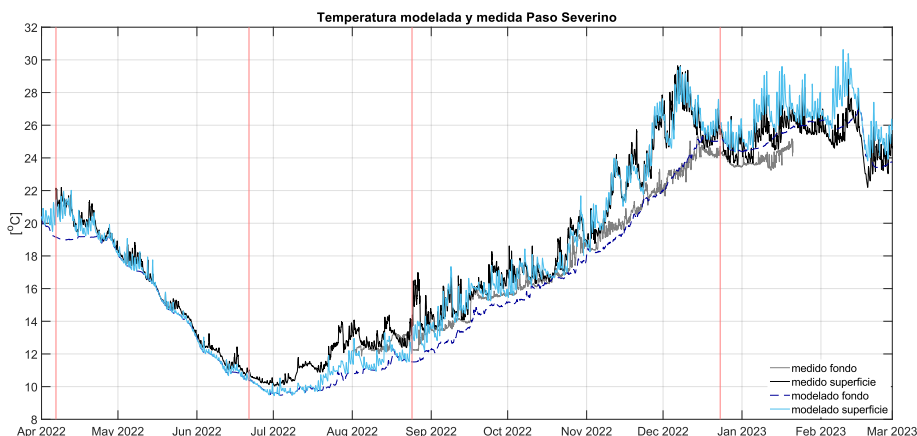


Figura 1: Temperatura horaria modelada y medida entre abril de 2022 y marzo de 2023. Las rectas verticales indican las fechas en que se realizaron los perfiles verticales (ver Figura XX).

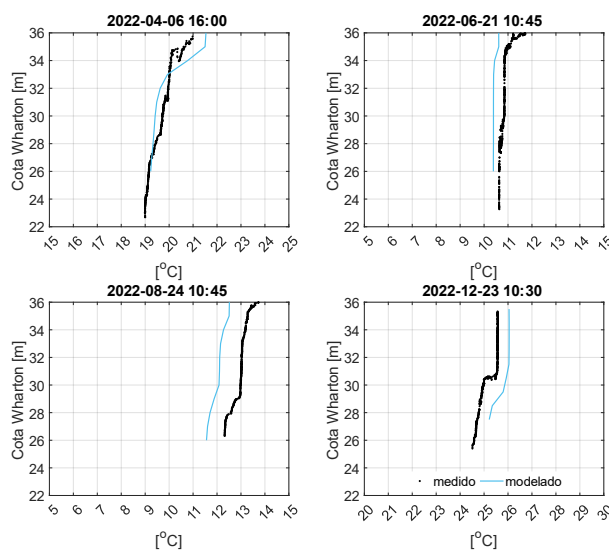


Figura 2: Perfiles verticales de temperatura modelados y medidos

El análisis conjunto de los datos sub-diarios de caudal (DINAGUA) y turbidez (OSE) en el río Santa Lucía Chico aguas arriba del embalse muestra que generalmente el pico de turbidez se produce en el tramo ascendente del hidrograma. Este desfase entre el pico de turbidez y el pico de caudal genera un loop de histéresis horario en la curva turbidez-caudal que ingresa al embalse en las tormentas. Por otro lado, los datos diarios de turbidez registrados a la salida del embalse (OSE) no siempre muestran una misma respuesta ante eventos de similares características, lo que sugiere la influencia de procesos dentro del embalse, como la formación de corrientes de densidad, que modifican el destino de las sustancias que llegan desde la cuenca. Con respecto al color, no se cuenta con datos suficientes aguas arriba para caracterizar el comportamiento durante tormentas. Sin embargo, el análisis de los datos semanales



15 al 17 de octubre 2024

### Cámara Mercantil de productos del país

medidos en el embalse (OSE), en conjunto con los datos hidrológicos, sugieren que puede existir un loop de histéresis antihorario en el aporte desde la cuenca. Los descensos sostenidos de niveles exponen los sedimentos en las márgenes. La erosión lenta de estos sedimentos incrementa la turbidez del embalse, pero esto no ocurre con el color.

## CONCLUSIONES

Si bien la calidad de agua de Paso Severino es monitoreada periódicamente, poco se sabe acerca de la influencia de la hidrología y la hidrodinámica en la calidad de agua del embalse. Este trabajo realiza aportes en ese sentido, mediante la integración de herramientas de modelación y datos de campo. Se pudieron identificar períodos de estratificación y mezcla temporal a distintas escalas temporales. El modelo numérico presenta una buena performance en términos de reproducción de niveles y temperatura, aunque se está trabajando en mejoras para la reproducción de esta última. Asimismo, se está trabajando en la vinculación de la turbidez y el color con las sustancias que las generan (sedimentos en suspensión, CDOM) de modo de poder incluirlas en un modelo de calidad de aguas que tome como insumo los campos de corrientes y temperatura del modelo hidrodinámico.

**Agradecimientos.** – Administración de las Obras Sanitarias del Estado (OSE)

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Arboleda Valencia, J. (1992). Teoría y práctica de la purificación del agua. Deltares, 2017. Hydro-morphodynamics: User Manual. Deltares, the Netherlands.
- Ford, Dennis E.; Johnson, Marc C. (1983) An assessment of reservoir density currents and inflow processes. Thornton Norton and Associates LTD Vicksburg MS.
- Ford, Dennis E.; Johnson, Marc C. (1983) An assessment of reservoir density currents and inflow processes. Thornton Norton and Associates LTD Vicksburg MS.
- Ministerio de Ambiente (2023). Plan de Cuenca del Río Santa Lucía.
- Jones, I. D., & Smol, J. P. (Eds.). (2023). Wetzel's Limnology: Lake and River Ecosystems. Elsevier.
- Morris, G. L., & Fan, J. (1998). Reservoir sedimentation handbook. McGraw-Hill Book Co.
- Ryu, I., Yu, S., & Chung, S. (2020). Characterizing density flow regimes of three rivers with different physicochemical properties in a run-of-the-river reservoir. *Water*, 12(3), 717.