

MÉTODOS NUMÉRICOS APLICADOS A LA GESTIÓN DE GRANDES CUERPOS DE AGUA A SUPERFICIE LIBRE

NUMERICAL METHODS EMPLOYED IN THE MANAGEMENT OF LARGE FREE SURFACE WATER BODIES

Santiago Delgado, Mónica Fossati y Pablo Santoro

*Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Julio Herrera y Reissig 565, Montevideo, Uruguay, sdelgado@fing.edu.uy,
<https://www.fing.edu.uy/imfia/>*

Palabras clave: TELEMAC, Hidrodinámica, Transporte de Sustancias, Métodos numéricos

Resumen. La adecuada toma de decisiones y definición de políticas asociadas a grandes cuerpos de agua requiere de información de calidad respecto a su dinámica para lo cual la modelación numérica cumple un papel clave. El sistema TELEMAC-MASCARET es un modelo de hidrodinámica a superficie libre que tiene las particularidades de ser un código abierto, bien documentado y con una activa comunidad de usuarios, haciendo que sea muy accesible adaptar su código a las necesidades particulares de las aplicaciones de interés. En este trabajo se presenta la utilización del sistema numérico en diversos problemas de interés en ambientes muy diferentes; junto con las modificaciones realizadas sobre el código base del sistema para ampliar su aplicabilidad. Se discuten aspectos de automatización del proceso de implementación del modelo y ejecución en arquitecturas de cómputo de alto desempeño. Los resultados muestran la versatilidad que presentan las mallas no estructuradas para una adecuada representación de dominios con geometrías complejas junto con el gran potencial que posee la herramienta para su uso y desarrollo.

Keywords: TELEMAC, Hydrodynamics, Substances Transport, Numerical Methods

Abstract. In order to make appropriate decision making and policies definition about big bodies of water, good quality information about its dynamics is required and therefore numerical modeling plays a pivotal role in this regard. The TELEMAC-MASCARET system is a hydrodynamic model of free surface flows that has the particularities of being open source, having good documentation and an active community of users which makes adapting the code for the particular necessities of certain problems quite accessible. On this present work the use of this numerical system on diverse applications in very different environments is presented; including also the modifications made to the system's base code to extend its applicability. Automation aspects on the model implementation and execution on high computing architectures are discussed. The results show the versatility that the use of non structured meshes present for an adequate representation of complex geometries of the domain combined with the great potential that the tool has for its use and development.

1. INTRODUCCIÓN

La adecuada toma de decisiones y definición de políticas asociada a grandes cuerpos de agua requiere de información de calidad respecto a su dinámica donde las herramientas de modelación numérica cumplen cada vez más un rol importante (N. Schuwirth, et. al, 2019). Uno modelo numérico muy utilizado es el sistema TELEMAC-MASCARET (TM) (Hervouet, 2007) que tiene las particularidades ser un código abierto, bien documentado y con una activa comunidad de usuarios lo que lo hace muy accesible para ser adaptado a casos particulares. Este sistema ha sido utilizado mundialmente para evaluar riesgos de inundación (Li et al., 2022), analizar el transporte de sedimentos (Gourbesville et al., 2014), estudiar la dinámica térmica (Justin-Brochet et al., 2021), entre otros.

En el Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA) hace más de tres décadas se trabaja en la modelación numérica de cuerpos de agua a superficie libre. El principal objeto de estudio ha sido históricamente el Río de la Plata, donde se ha generado una vasta experiencia en simulaciones retrospectivas y de pronóstico empleando tanto el sistema TM (Santoro et al., 2017; Balparda et al., 2022) como otros códigos numéricos (Fossati y Piedra-Cueva, 2008). Recientemente la aplicación del sistema en el Instituto ha sido expandida a otros cuerpos de agua destacándose el Río Uruguay y algunos de sus afluentes (Junes et al., 2022; Sellanes et al., 2023), la Laguna de Rocha (Lambert García, 2022) y el Embalse Hidroeléctrico de Salto Grande (Rodríguez et al., 2022, 2023). En este trabajo se presentan dos casos de estudio realizados con el sistema TM: 1) el estudio del transporte de una sustancia adsorbida por los sedimentos, y 2) el estudio de la temperatura del agua en un embalse.

El empleo del sistema numérico con el objetivo de realizar simulaciones largas o de numerosos escenarios posibles en estos casos de estudio se ve muy apoyado por el uso de arquitecturas de cómputo de alto desempeño y la posibilidad de paralelización del problema. En la Sección 3 se presenta brevemente la implementación del modelo en el entorno Cluster.uy y los esquemas de automatización de tareas desarrollados.

El primero de los dos casos de estudio, el cual es desarrollado en la Sección 4, se encuentra en el marco del proyecto IMFIA (2020) donde el objetivo era identificar potenciales zonas de deposición de sedimentos contaminados por una sustancia adsorbida introducida por una descarga de efluentes. En función de lograr este objetivo se realizaron simulaciones de hidrodinámica bi-dimensional en el Río de la Plata incorporando la modelación de transporte de sedimentos finos y la interacción entre los contaminantes disueltos en el agua y los sedimentos en suspensión.

El segundo caso de estudio, presentado en detalle en la Sección 5, se asocia al modelado de la dinámica térmica en el embalse de generación hidroeléctrica de Salto Grande. Este trabajo surge en el marco del proyecto IMFIA (2022) y aquí se presentan las principales problemáticas de modelar temperatura en cuerpos de agua con secado y mojado y las soluciones adoptadas.

Finalmente en la Sección 6 se presentan las principales conclusiones de este trabajo, apreciando las capacidades de la herramienta computacional y el potencial de los desarrollos generados para futuros trabajos.

2. MODELO NUMÉRICO TELEMAC-MASCARET

El sistema TM (www.opentelemac.org), como fue presentado en la introducción, es un sistema de código abierto, que mediante el método de los elementos finitos resuelve problemas de hidrodinámica a superficie libre en mallas no estructuradas. La posibilidad del uso de mallas no estructuradas permite representar adecuadamente zonas con geometría compleja y variar sencillamente el tamaño de los elementos según el nivel de detalle que se requiera en distintas

zonas.

El sistema está compuesto por diversos módulos que resuelven distintos aspectos de interés. Los módulos centrales son los hidrodinámicos, los cuales resuelven el campo de velocidades y niveles en el dominio junto con las ecuaciones de transporte de sustancias.

El sistema incluye un módulo de calidad de agua denominado WAQTEL estando este dividido en distintos submódulos. En este trabajo se presentan MICROPOL y THERMIC para el modelado de sustancias con capacidad de adsorción a los sedimentos y la dinámica térmica; pero existen otros que se encargan de modelar fenómenos de eutrofización, nutrientes, entre otros. Existen también módulos capaces de estudiar la morfodinámica derivada del transporte de sedimentos (GAIA y SISYPHE) la propagación del oleaje y agitación (TOMAWAC y ARTEMIS), entre otros.

2.1. Módulos hidrodinámicos

Los módulos hidrodinámicos, TELEMAC2D y TELEMAC3D resuelven por el método de los elementos finitos en el espacio y en un esquema de diferencias finitas en el tiempo el sistema de ecuaciones de *aguas someras* (Hervouet, 2007). La diferencia esencial entre los dos módulos es que TELEMAC3D resuelve con variaciones en la vertical, considerando una malla horizontal fija y un número fijo de capas mientras que TELEMAC2D resuelve la versión integrada en vertical de las ecuaciones de aguas someras. Dentro de las ecuaciones que resuelve el módulo, una de particular interés es la ecuación de transporte de trazadores presentada en la ecuación (1).

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{U} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (\nu \nabla T) + Q, \quad (1)$$

donde T es un trazador, \mathbf{U} es el vector velocidades, ν es el coeficiente de difusión del trazador y Q es un término fuente. El cálculo de Q para los distintos trazadores de interés es el principal objetivo de los siguientes módulos que se presentan.

2.2. Módulo MICROPOL

Este modulo considera 5 trazadores, el sedimento en suspensión (masa por volumen de agua), el sedimento de fondo (masa por área de fondo), una sustancia disuelta en el agua (masa por volumen de agua), la sustancia adsorbida en el sedimento suspendido (masa de sustancia por masa de sedimento) y la sustancia adsorbida en el sedimento de fondo (masa de sustancia por masa de sedimento). Este módulo mantiene fija la morfología del dominio, ignorando cambios batimétricos por la erosión/deposición. Además, se considera que la sustancia adsorbida en las distintas fases de sedimento se encuentra bajo una mezcla perfecta. Las 3 variables en suspensión se ven sometidas a la ecuación (1) con términos fuente que las relaciona entre sí, mientras que las 2 variables depositadas, no consideran el término advectivo ni el difusivo de dicha ecuación, obteniendo que su variación se encuentra puramente asociada a los términos fuente.

Existen dos interacciones fundamentales en este módulo que generan los distintos términos fuente. La primera de estas es la erosión y deposición, calculadas según las ecuaciones de Krone (1962) y Partheniades (1965), que afectan a todos los términos menos el de la sustancia disuelta en el cuerpo de agua. La segunda de las interacciones es el equilibrio químico de la adsorción, modelada como una reacción reversible de primer orden cinético, la cual afecta solamente a la sustancia disuelta y a la concentración de sustancia adsorbida en el sedimento en suspensión.

Vale la pena comentar que además de estas dos interacciones fundamentales se permite considerar un decaimiento exponencial de la concentración de la sustancia, afectando esto a las tres variables asociadas.

2.3. Módulo THERMIC

En este módulo solamente se considera un trazador que es la temperatura, la cual es transportada mediante la ecuación (1) y tiene varias componentes en su término fuente.

La primera de las fuentes es la radiación solar de onda corta, que es el único término que es considerado en todas las capas de un modelo tridimensional y depende fundamentalmente de la fecha y hora junto con la nubosidad y la localización. El resto de las fuentes son consideradas puramente en la primer capa en un modelo tridimensional y son la radiación atmosférica de onda larga, la radiación del cuerpo de agua y los flujos de calor por convección y evaporación. Estas últimas dependen fundamentalmente de la temperatura del aire y del cuerpo de agua, de la nubosidad, de la velocidad del viento y de la humedad relativa.

3. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO EN UNA ARQUITECTURA DE ALTO CÓMPUTO

Las simulaciones a realizar con el modelo pueden implicar un elevado costo computacional, en particular en casos en los que la malla de cómputo es densa en zonas de interés, o en casos que requieren hacer múltiples simulaciones para evaluar distintos escenarios. Por este motivo, si bien el modelo es bastante eficiente, se implementa el mismo en una arquitectura de alto cómputo, permitiendo no solo mayor velocidad en las distintas simulaciones sino la posibilidad de ejecutar varias al mismo tiempo.

En este trabajo se hace uso de la infraestructura de cálculo de alto desempeño Cluster.uy (www.cluster.uy; Nesmachnow y Iturriaga, 2019), siendo este un Cluster de 28 servidores HPE DL380 Gen10 con 40 núcleos cada uno y una memoria RAM máxima de 128 GB. El mismo, utiliza SLURM para la ejecución de trabajos por lo que es fundamental que el modelo sea sencillo de mandar sin acción del usuario y también buscar automatizar tareas. Las capacidades del Cluster.uy permiten la ejecución de trabajos en paralelo, lo que implica que distintos núcleos resuelven distintas partes del dominio, haciendo más rápidos los cálculos. Como el sistema TM permite este tipo de cálculo, existe una buena sinergia entre el modelo y la arquitectura donde se implementa.

Para los ejemplos presentados en este trabajo, se considera como condición de borde el viento y la presión atmosférica interpoladas a la malla de cálculo y variables en el tiempo. Se modificaron subrutinas del modelo denominadas METEO.f y BORD.f para imponer estas y otras condiciones de borde; además se crearon códigos de MATLAB para generar los archivos asociados para las distintas simulaciones. Se presenta a continuación un breve pseudocódigo del esquema implementado:

- a) El usuario selecciona los distintos parámetros de la simulación y lanza el esquema de automatización.
- b) Se crea una carpeta de trabajo, se enlaza la malla, el archivo de definición de condiciones de borde y otros archivos independientes de la malla.
- c) Se chequea la existencia de los archivos dependientes de la malla y en caso de no existir se ejecutan los códigos de MATLAB que los generan. Se enlazan a la carpeta de trabajo.

- d) Se ejecuta el sistema TM.
- e) Se realizan los algoritmos de post-procesamiento que se consideren adecuados.

El desarrollo de esta implementación, y la automatización que la misma genera, permite al día de hoy la ejecución de distintos escenarios y problemas de forma significativamente más eficiente que previamente. Además, el esquema armado es muy fácilmente adaptable a futuras versiones del software y aplicaciones deseadas.

4. TRANSPORTE DE SUSTANCIAS CON ADSORCIÓN EN SEDIMENTOS COHESIVOS

El primero de los dos casos de estudio se ubica en el Río de la Plata, específicamente en la Bahía de Montevideo. El Río de la Plata es un estuario de aproximadamente 35.000 km² de superficie y en general bajas profundidades. La Bahía de Montevideo por otra parte, alberga aproximadamente 12 km² de superficie y contiene, entre otras industrias, al Puerto de Montevideo. En particular, en este caso se estudió el alcance de una descarga de efluente vertido en la zona interior de la bahía. Con este fin, y buscando una adecuada representación de los efectos de la marea, se implementó un modelo del Río de la Plata en base al sistema TM que parte del modelo de [Santoro et al. \(2017\)](#) refinando la malla sobre la zona de la Bahía. En la [Figura 1](#) se presenta la malla de cálculo utilizada en este modelo, que posee 68 298 nodos y 134 226 elementos.

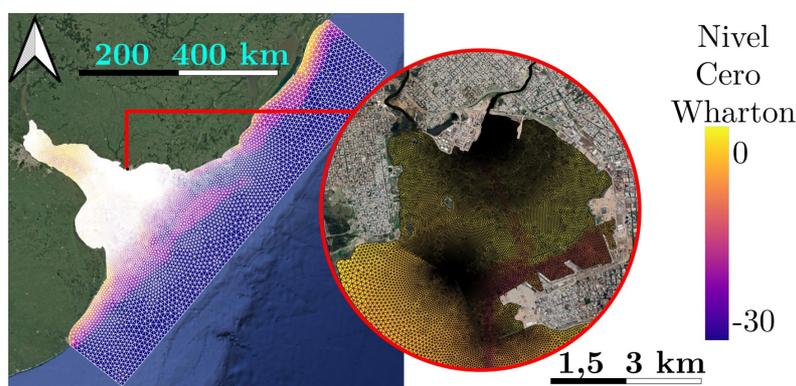


Figura 1: Malla de elementos finitos para el primer caso de estudio. Malla del dominio completo y detalle en la Bahía de Montevideo.

En este estudio se utilizó TELEMAC2D para analizar la hidrodinámica y el módulo MICROPOL para estudiar la interacción entre la sustancia vertida y los sedimentos cohesivos del Río de la Plata. Además de los trazadores de MICROPOL se consideró la salinidad para tener en cuenta sus efectos en la densidad del agua.

Como condiciones de borde en este trabajo se consideraron los caudales medidos con frecuencia horaria en los Ríos Uruguay y Paraná, un caudal medio en el Río Santa Lucía, caudales modelados en los arroyos Pantanoso y Miguelete (los dos que desembocan en la bahía) ([IMFIA, 2020](#)) y niveles en la frontera oceánica obtenidos de otro modelo ([Santoro et al., 2013](#)). En la descarga del efluente se consideró un caudal constante y una concentración del contaminante de valor normalizado 1. En todos los bordes se consideraron valores nulos para los trazadores, salvo la concentración de sedimentos en suspensión que se consideró un valor estimado para cada afluente y en el borde oceánico que se consideró una salinidad de 35 kg/m³.

Se colaboró con los desarrolladores del sistema para corregir algunos errores del módulo, en particular con cuestiones de secado y mojado y la advección de los trazadores de fondo (Delgado, 2020). Además, se trabajó en el código para incluir dependencia en la velocidad de caída de los sedimentos con la concentración de los mismos, incluir zonas “no erosionables” y que el cálculo de la tensión de fondo incluyera resultados del oleaje. Esto último implicó agregar en el código la lectura de datos de oleaje en todo el dominio, previamente simulados con el módulo TOMAWAC.

El principal objetivo fue evaluar las potenciales zonas de acumulación de los sedimentos contaminados con el efluente, tras varios años de vertido. Como la adsorción se considera que ocurre entre la sustancia disuelta y el sedimento en suspensión; tras la deposición, los sedimentos contaminados deberían ocupar únicamente las capas superiores del fondo. El modelo, por defecto, no considera un sistema de capas en el sedimento sino que lo considera perfectamente mezclado. Esto último es un inconveniente pues un contaminante depositado se diluiría significativamente y no podría ser devuelto a la columna de agua por erosión. Se modificó el concepto del trazador “sedimento de fondo” por el de “sedimento depositado” siendo esta la variable SD de la Figura 2. Este cambio implica dos consecuencias que se desarrollan a continuación.

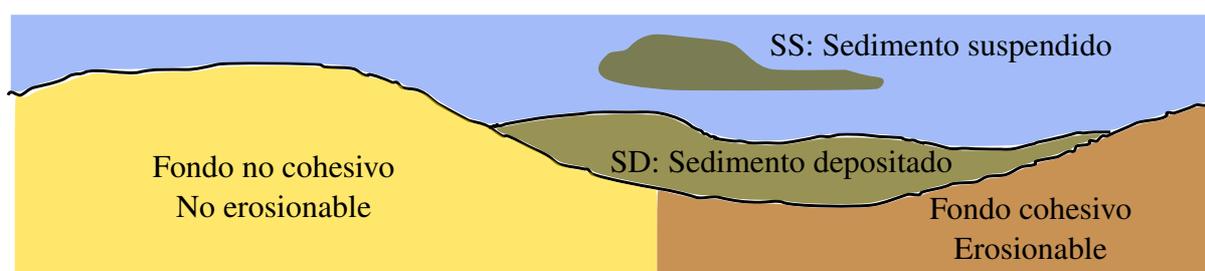


Figura 2: Esquema de las variables sedimentológicas en la modificación al módulo MICROPOL

La primera consecuencia del cambio en la definición de la variable es que el trazador SD parte de un valor nulo para las distintas simulaciones. Lo anterior se encuentra asociado a que este sedimento tuvo que haber estado en algún momento en suspensión pudiendo interactuar con el contaminante.

La segunda consecuencia de la modificación en la definición de la variable son cambios en los términos fuente de erosión/deposición. Para esto, en primer lugar se definen dos tipos de fondo, el primero no cohesivo (arenas fundamentalmente) el cual se considera *no erosionable*. El segundo tipo de fondo, el cual se considera de capacidad infinita, es el cohesivo el cual se considera *erosionable*. En este esquema se considera que, de haber disponibilidad de sedimento depositado, este es el primero que se erosione, pero en caso contrario, el fondo cohesivo pueda incorporar material a la columna de agua.

Se presenta en la Figura 3 un diagrama para explicar el algoritmo de los cambios en los términos fuente. En la misma se define e la erosión, d la deposición, ambas calculadas por unidad de área mediante las fórmulas de Krone (1962) y Partheniades (1965), h la profundidad de la columna de agua, SD la concentración de sedimento depositado en un punto y Δ_{SS} y Δ_{SD} las variaciones asociadas a los procesos de erosión/deposición en las concentraciones del sedimento suspendido y depositado respectivamente.

Para evaluar las posibles zonas de deposición del contaminante en el sedimento se realizó una simulación de diez años con forzantes realistas. Por lo extenso de la estabilización de la dinámica de sedimentos finos se hace un primer año con condición inicial nula para todas las

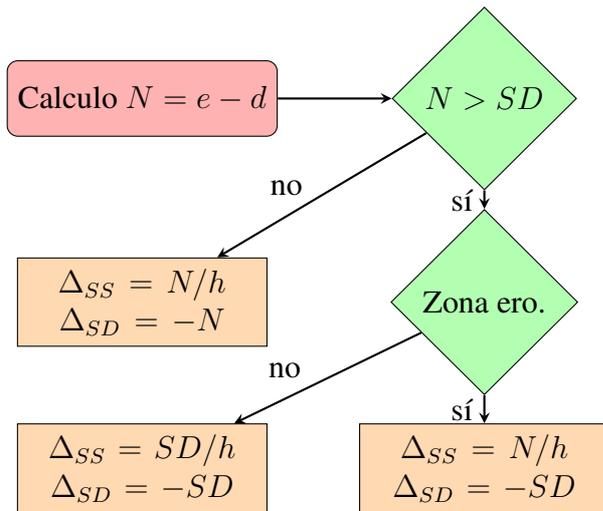


Figura 3: Algoritmo para el sedimento depositado

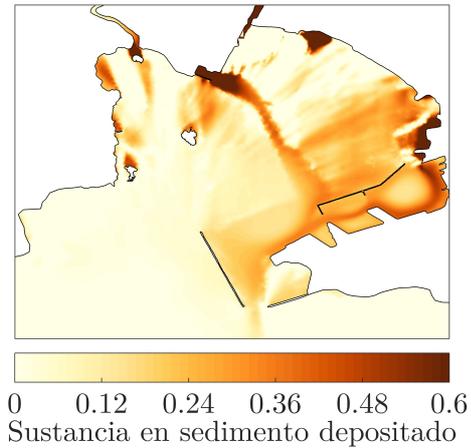


Figura 4: Resultados de la simulación de sedimentos

variables y una vez finalizada se comienza la simulación real, modificando el resultado de este primer año de la concentración de sedimentos depositados e iniciándola desde 0 por lo ya descrito. El resultado de este modelo es la cantidad de sustancia vertida adsorbida en el sedimento de fondo por unidad de área. Se normalizan dichos campos por la cantidad total de sustancia ingresada al dominio en los diez años de simulación, dividida por el área total de la bahía de Montevideo. En la [Figura 4](#) se presenta este resultado permitiendo identificar las potenciales zonas de deposición del contaminante.

5. MODELADO DE LA TEMPERATURA EN UN EMBALSE DE GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA

El siguiente caso de estudio presentado es en el embalse de generación hidroeléctrica de Salto Grande, ubicado en el noroeste de Uruguay, siendo limítrofe entre éste y Argentina. El embalse tiene una estructura dendrítica, con un muy pequeño ancho relativo a su longitud y numerosas entradas laterales. El modelo utilizado fue previamente empleado en formato bidimensional para analizar la hidrodinámica del mismo ([Rodríguez et al., 2023](#)), caracterizar los patrones de flujo y realizar evaluación de tiempos de residencia ([Rodríguez et al., 2022](#)). En la [Figura 5](#) se presenta la malla de cálculo considerada, que posee 28 013 nodos y 49 594 elementos con un tamaño medio de 200 m de lado.

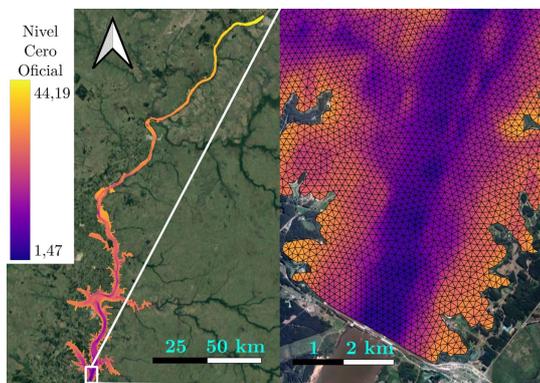


Figura 5: Malla para el segundo caso

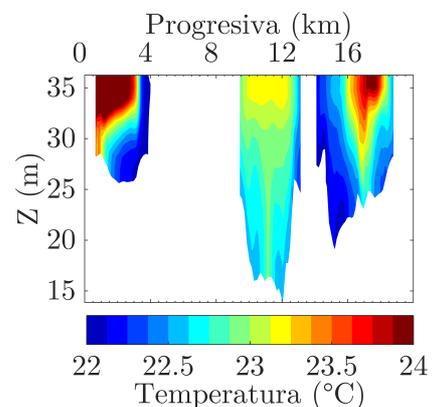


Figura 6: Transecta de temperaturas

En este estudio se consideró TELEMAC3D para la hidrodinámica y el módulo THERMIC para estudiar la dinámica térmica. Se consideraron 10 capas uniformemente distribuidas en la profundidad de agua, es decir coordenadas verticales tipo sigma (Hervouet, 2007).

Como condiciones de borde se consideraron los caudales de entrada en los distintos brazos y el caudal de salida en la represa. Además, se consideró en los afluentes una temperatura de ingreso del agua estimada con la temperatura del aire. Los forzantes atmosféricos para el modelo de temperatura fueron obtenidos del reanálisis de ERA-5 (H. Hersbach, et. al, 2020).

En la Figura 6 se presenta una transecta, que corta el embalse superior y dos brazos del mismo, con las temperaturas a distintas profundidades en un instante. Se aprecia en ésta una gran diferencia entre los brazos, menos profundos y más independientes, y el embalse medio con su mayor inercia.

Existe un inconveniente con las simulaciones de temperatura en zonas donde hay “secado-mojado” en las cuales los términos fuente tienden a dar valores muy grandes haciendo que la temperatura diverja y perdiendo por tanto la capacidad de calcular la dinámica térmica. Aún no se ha encontrado una solución a estos problemas, sobre los que se intercambié con los desarrolladores del modelo y se encuentra en la agenda de temas a trabajar. Como solución *ad hoc*, se avanzó en las simulaciones con el algoritmo de secado y mojado desactivado, y tras modificar la malla y remover artificialmente aquellas áreas someras que estuvieran expuestas a dichos procesos.

Se presenta en la Figura 7 los resultados de temperatura para el año 2016 en un punto cercano a la represa, tanto en la superficie como el promedio en la vertical. Además, se incluyen los datos obtenidos de temperatura mediante dos metodologías de detección satelital (IMFIA, 2022). Los resultados muestran que el modelo es capaz de reproducir razonablemente el ciclo anual de temperaturas observado en los datos de teledetección. La presente implementación fue exploratoria y para su mejora lo ideal sería contar con mediciones de temperatura con alta frecuencia, a los efectos de evaluar la variabilidad horaria, y en distintas profundidades para evaluar posibles condiciones de estratificación vertical

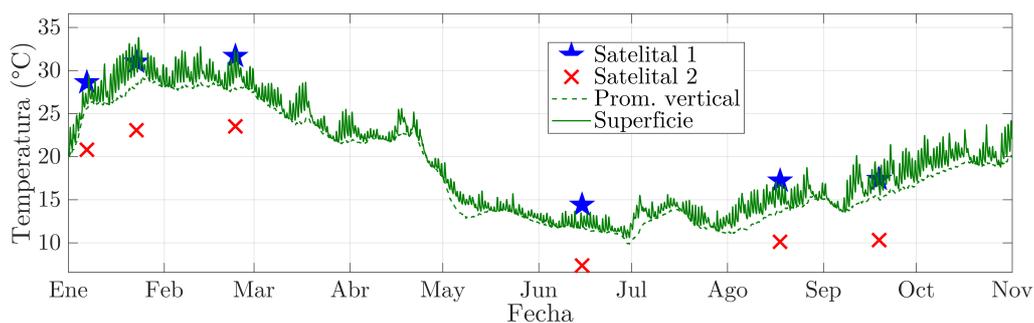


Figura 7: Serie de temperaturas en el embalse comparando con metodologías de detección satelital

6. CONCLUSIONES

En primer lugar es destacable la capacidad de la herramienta computacional para el análisis de diversos problemas de grandes cuerpos de agua a superficie libre, apreciándose en general gran robustez. La capacidad del programa de poder considerar mallas no estructuradas permite una mejor representación de las geometrías, en general complejas, de los dominios de cálculo.

En el caso de la Bahía de Montevideo, el modelo permitió identificar potenciales zonas de deposición de una sustancia introducida por una descarga de efluentes, teniendo en cuenta

la capacidad de la misma de ser adsorbida por los sedimentos cohesivos que caracterizan al estuario. Por otra parte, en el embalse de Salto Grande, los primeros resultados exploratorios en cuanto a modelación de la dinámica térmica del embalse fueron promisorios, siendo estos un gran insumo para el abordaje de problemas de calidad de agua.

Otro punto a destacar del sistema TELEMAC-MASCARET es el hecho de ser un software de código abierto, con gran interacción entre los usuarios y los desarrolladores, lo que permite, no solo la modificación del código para los intereses de cada proyecto, sino colaborar en la elaboración de mejoras en el código básico.

Como trabajo a futuro se plantea seguir estudiando el problema de la interacción entre el módulo de temperatura y las zonas de “secado-mojado”, buscando si se puede lograr resolver el mismo para permitir el estudio de la dinámica térmica en un mayor espectro de cuerpos de agua.

Además, actualmente en el equipo de trabajo del IMFIA se está trabajando en el estudio de la dinámica de sedimentos en el Río de la Plata, buscando incorporar al modelo la posibilidad de tener capas de barro fluido, cerca del fondo. Este barro, que ocurre en importantes eventos de erosión, es una parte de la columna de agua con gran concentración de sedimentos y se comporta como un fluido denso no Newtoniano (Mosquera, 2021).

AGRADECIMIENTOS

Los experimentos presentados en este artículo fueron realizados utilizando ClusterUY (sitio: <https://cluster.uy>).

Los trabajos presentados en la Sección 4 fueron realizados en el marco de un convenio entre la Universidad de la República y la Administración Nacional de Combustibles, Alcohol y Portland.

Los trabajos presentados en la Sección 5 fueron realizados en el marco del proyecto de investigación ANII-FMV 2019 titulado “Herramientas numéricas de apoyo a la gestión de calidad de agua en embalses para generación hidroeléctrica”.

REFERENCIAS

- Balparda D., Sellanes L., Silva D., Jackson M., Ezzatti P., y Fossati M. Desarrollo del sistema de pronóstico del río de la plata y su frente marítimo: PronUy_RPFM. *Ribagua*, 9(2):25–40, 2022. doi:10.1080/23863781.2023.2210262.
- Delgado S. Bed sediment advected/diffused in micropol v8p1r0. open TELEMAC-MASCARET forum, 2020. [Foro Online:] <http://www.opentelemac.org/index.php/kunena/waqtel-ade2/13738-bed-sediment-advected-diffused-in-micropol-v8p1r0>.
- Fossati M. y Piedra-Cueva I. Numerical modelling of residual flow and salinity in the Río de la Plata. *Applied Mathematical Modelling*, 32:1066–1086, 2008. doi:10.1016/j.apm.2007.02.034.
- Gourbesville P., Delestre O., y Dumasdelage R. Numerical modelling of the erosion phenomena on Nice shoreface using TELEMAC system. En *3rd IAHR Europe Congress, Book of Proceedings*. 2014.
- H. Hersbach, et. al. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146:1999–2049, 2020. doi:10.1002/qj.3803.
- Hervouet J.M. *Hydrodynamics of Free Surface Flows: Modelling with the finite element method*. 2007.
- IMFIA. Evaluación de la pluma de descarga del efluente de la planta la teja en la bahía de

- montevideo. Informe Técnico, Convenio entre la Universidad de la República - Facultad de Ingeniería - Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA) y la Administración Nacional de Combustibles, Alcohol y Portland (ANCAP), 2020.
- IMFIA. 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. Informe Técnico, Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, 2022.
- Junes R., Solari S., y Fossati M. Characterization of flow reversals in the Uruguay river and its relation to forcings. páginas 5485–5494. 2022. doi:10.3850/IAHR-39WC252171192022212.
- Justin-Brochet E., Pham C.T., y Vidal-Hurtado J. Recent improvements for the Berre lagoon modelling with TELEMAC-3D. En *Proceedings of the papers submitted to the 2020 TELEMAC-MASCARET User Conference*, páginas 26–33. 2021.
- Krone R. Flume studies of the transport of sediment in estuarial shoaling processes: final report. Informe Técnico, Hydr. Engr. and San. Engr., Res. Lab., Univ. Calif. Berkeley, 1962.
- Lambert García M. *Variabilidad espacial y temporal de variables físico-químicas en la Laguna de Rocha*. Maestría en ingeniería, Universidad de la República (Uruguay). Facultad de Ingeniería, 2022.
- Li G., Lui J., y Shao W. Flood risk assessment using TELEMAC-2D models integrated with multi-index analysis in Shenzhen river basin, China. *Water*, 14, 2022. doi: 10.3390/w14162513.
- Mosquera R.L. *Cohesive sediment dynamics in the Río de la Plata*. Doctorado en ingeniería, Universidad de la República (Uruguay). Facultad de Ingeniería, 2021.
- N. Schuwirth, et. al. How to make ecological models useful for environmental management. *Ecological Modelling*, 411, 2019. doi:10.1016/j.ecolmodel.2019.108784.
- Nesmachnow S. y Iturriaga S. Cluster-uy: Collaborative scientific high performance computing in Uruguay. En M. Torres y J. Klapp, editores, *Supercomputing*, páginas 188–202. Springer International Publishing, Cham, 2019. ISBN 978-3-030-38043-4.
- Partheniades E. Erosion and deposition of cohesive soils. *Journal of the Hydraulics Division*, 91:105–139, 1965.
- Rodríguez R., Delgado S., Fossati M., y Santoro P. Development of a hydrodynamic model for a subtropical reservoir: Salto Grande, Uruguay. En *Proceedings of the XXVIIIrd TELEMAC-MASCARET User Conference*, páginas 65–72. 2022.
- Rodríguez R., Delgado S., y Santoro P. Modelación hidrodinámica del embalse de Salto Grande. En *Anales del XXX Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, volumen 6A - Agua, Ambiente y Sociedad del Conocimiento, páginas 230–231. IAHR Publishing, 2023. ISBN 978-90-832612-7.
- Santoro P., Fossati M., y Piedra-Cueva I. Study of the meteorological tide in the Río de la Plata. *Continental Shelf Research*, 60:51–63, 2013. ISSN 02784343. doi:10.1016/j.csr.2013.04.018.
- Santoro P., Fossati M., Tassi P., Huybrechts N., Pham Van Bang D., y Piedra-Cueva J.I. A coupled wave–current–sediment transport model for an estuarine system: Application to the Río de la Plata and Montevideo Bay. *Applied Mathematical Modelling*, 52:107–130, 2017. doi:10.1016/j.apm.2017.07.004.
- Sellanes L., Balparda D., Silva D., Jackson M., Ezzatti P., y Fossati M. Estudio de sensibilidad del pronóstico de niveles del Río de la Plata y frente marítimo a la condición de borde fluvial. En *Anales del XXX Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, volumen 4 - Hidráulica Marítima y de Estuarios, páginas 97–98. IAHR Publishing, 2023. ISBN 978-90-832612-5-6.