



Asociación de Investigadores
GRUPO MONTEVIDEO

25 SET
al
27 2019
Montevideo



II CONGRESO DE AGUA
AMBIENTE Y ENERGÍA
AUGM



UNIVERSIDAD
DE LA REPUBLICA
1822

Prototipo de un Sistema Operacional de Pronóstico de Corrientes y Mareas para el Río de la Plata

Maria Ballesteros ^a, Mónica Fossati ^b, Pablo Santoro ^c, Pablo Ezzatti ^d

^a Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería Universidad de la República, Uruguay, mballesteros@fing.edu.uy.

^b Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería Universidad de la República, Uruguay, mfossati@fing.edu.uy.

^c Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería Universidad de la República, Uruguay, psantoro@fing.edu.uy.

^d Instituto de Computación, Facultad de Ingeniería Universidad de la República, Uruguay, pezzatti@fing.edu.uy.

RESUMEN: Este artículo presenta el avance alcanzado en el desarrollo de un prototipo de herramienta para el pronóstico (forecast) de las condiciones de flujo (niveles y corrientes) en las aguas territoriales del Río de la Plata y Frente Marítimo. Este sistema puede dar soporte en tiempo real para distintas aplicaciones que requieran de un pronóstico, como la búsqueda y rescate asociado a accidentes marítimos. Se utilizó el modelo numérico en elementos finitos TELEMAC2D implementado y calibrado para la zona con malla no-estructurada de resolución variable desde 3km hasta 100m en la zona interior. Las condiciones de borde oceánicas son los pronósticos del modelo global RTOFS-HYCOM (NOAA/NCEP de 1/12° de resolución) combinados con el atlas de marea astronómica FES2014. Como forzantes se imponen vientos y presión atmosférica del pronóstico GFS de la NOAA de 1/4° de resolución. El aporte de caudal fluvial de este primer prototipo se considera constante e igual a la media anual distribuida en 3 secciones. Para la evaluación de la calidad del modelo se utilizan datos de niveles disponibles en tiempo real. Con el prototipo desarrollado se puede saber cómo serán las corrientes y niveles en nuestras aguas para un horizonte temporal de 3 días, siendo actualizadas las condiciones cada 24 horas.

PALABRAS CLAVE: Modelación operacional, Pronóstico del nivel del mar, Río de la Plata, Dinámica de Estuarios.

1 INTRODUCCIÓN

El Río de la Plata (Figura 1) está ubicado sobre la costa este de América del Sur, aproximadamente entre los 34° y 36° latitud sur y 54°50' y 58°30' de longitud oeste. Recibe el caudal fluvial de los ríos Paraná y Uruguay, y vierte en el Océano Atlántico. Es un cuerpo de agua de gran importancia socio-ambiental para los dos países que comparten su jurisdicción, la República Argentina y la República Oriental del Uruguay.

La necesidad de contar con una herramienta operacional para las zonas costeras, que proporcione la predicción de corrientes y mareas en tiempo real, se vincula directamente a problemas asociados a la navegación y actividad portuaria, entre los cuales se destaca ayuda a la navegación, el apoyo a la toma de decisiones de gestión y control del tráfico marítimo, eventuales derrames producidos por embarcaciones o vertidos de sustancias contaminante, búsqueda y rescate de personas y/o materiales en accidentes marítimos, obras de ingeniería marítima en el sistema.

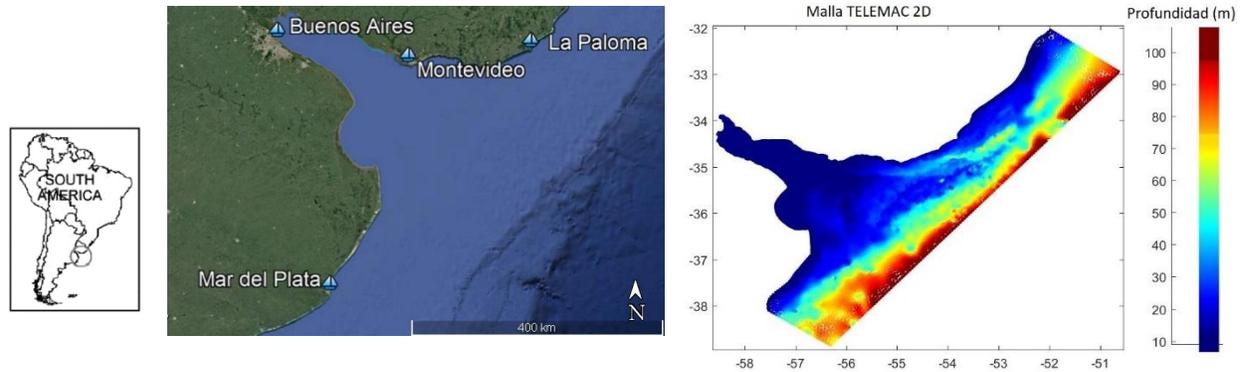


Figura 1. Localización del Río de la Plata y mareógrafos. Malla TELEMAC2D y batimetría en la zona de estudio.

El desarrollo de este tipo de herramienta es una línea de trabajo del IMFIA desde el año 2006 (Piedra-Cueva et al., 2008). Los sistemas de pronóstico oceanográficos operacionales siguen una estructura similar: manejo de datos observacionales recientes, fusión modelo-datos (asimilación de datos; incorporación de mediciones para las condiciones iniciales), un modelo de pronóstico para generar los productos que incluyen la estimación del estado del océano, realización de un diagnóstico del mismo y estimación del error (Schiller y Brassington, 2011).

Para el desarrollo del prototipo del sistema de pronóstico se seleccionó como modelo numérico el sistema TELEMAC2D que ya había sido calibrado para la zona de estudio en trabajos previos del grupo de trabajo (Santoro et al., 2015). Se utiliza una malla no-estructurada de resolución variable desde 3km hasta 100m en la zona interior (Figura 1). Se debió hacer la selección de las condiciones de borde oceanográficas, de los forzantes atmosféricos y de los caudales de aportes fluviales.

La evaluación del pronóstico requiere de mediciones en tiempo real; los datos de niveles publicados en tiempo real para la zona de estudio incluyen mareógrafos de Uruguay y de Argentina.

El prototipo desarrollado incluye el preprocesamiento de los datos de condiciones de borde y forzantes y un postproceso que muestra el comportamiento de los pronósticos de los últimos días en comparación con los datos mareográficos.

A continuación, se presenta la metodología seguida para la selección de los insumos del prototipo de pronóstico desarrollado, así como el preproceso que se hace a estos datos. Se describe el filtrado de los mareógrafos uruguayos La Paloma, Isla de Flores y Montevideo y se presentan los resultados obtenidos.

2 METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN DE INSUMOS AL MODELO

2.1 Selección de las condiciones de borde oceanográficas

La primera implementación pre-operacional de modelos hidrodinámicos de pronóstico en la zona se basó en una estrategia de modelos encajados (Santoro et al, 2011). Se parte de un primer nivel a escala regional, con un modelo 2D, que abarca gran parte del Océano Atlántico Sur (modelo AStide), y un segundo nivel a escala local del Río de la Plata, 3D de mayor resolución (RPtide). El modelo regional proporciona las condiciones de contorno al modelo local (Martínez et al, 2015).

Para el desarrollo del nuevo prototipo se evalúa como alternativas de condiciones de borde oceánicas la generación de pronósticos con el modelo regional AStide y la utilización de pronósticos de modelos hidrodinámicos de modelos globales. Los modelos globales publican, a diario, el diagnóstico y las predicciones del estado del océano con resolución de malla similar a la que genera el modelo AStide. En la Tabla 1 se resumen los modelos globales.

Tabla 1. Resumen modelos globales

	Modelo Global RTOFS Hycom	Modelo Copernicus GLOBAL ANALYSIS FORECAST PHY 001 024
Desarrollador	Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de EEUU (NOAA)	Servicio de Monitoreo del Medio Ambiente Marino de la Comisión Europea
Referencia	http://polar.ncep.noaa.gov/global/about/	http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products/?option=com_csw&view=details&product_id=GLOBAL_ANALYSIS_FORECAST_PHY_001_024
Pronóstico con frecuencia 1dato/hora	3 días de pronóstico GMT0 2D, resolución horizontal 1/12°(~0.0833°)	10 días de pronóstico GMT0+30minutos 2D, resolución horizontal 1/12°(~0.0833°)
Variables	Salinidad, temperatura, velocidad este y norte y altura de la superficie del océano (a falta de marea astronómica)	Salinidad, temperatura, velocidad este y norte y altura de la superficie del océano (a falta de marea astronómica)
Forzante atmosférico	Campos de predicción meteorológica global del NCEP	Campos atmosféricos del Sistema de Pronóstico Integrado ECMWF
Batimetría	Mejora de los datos de NRL DBDB2	Combinación interpolada de las bases de datos ETOPO1 y GEBCO8
Asimilación	Perfiles de salinidad y temperatura in situ (variedad de fuentes) Datos de detección remota de temperatura, altura de la superficie del océano y concentración de hielo marino.	Datos del altímetro satelital Perfiles de temperatura y salinidad in situ Concentración de hielo marino satelital

La revisión bibliográfica y la verificación de la disponibilidad en tiempo real permitió la selección de los modelos globales que están siendo considerados durante el desarrollo de esta investigación: el modelo Hycom (Tabla 1 izquierda) y el modelo Copernicus (Tabla 1 derecha). Se consideraron los datos que se publican con frecuencia de un dato por hora para la variable altura de la superficie del océano.

Se compararon los resultados de los modelos globales (series de niveles y corrientes) en el borde oceanográfico del dominio del RPtide (en los que recibe los valores del AStide) (Figura 2) y con datos medidos en mareógrafos de estaciones cercanas al borde (Mar del Plata y La Paloma), evaluando desviación estándar (1), Scatter, CRMSE (2) y correlación Pearson (3) (Figura 3).

Debido a que no se disponía de una base de datos de pronósticos se evalúan los datos de reanálisis disponibles con frecuencia de un dato por hora. Esta disponibilidad se limita a los reanálisis del modelo Copernicus que se compara con los resultados del modelo AStide para el año 2015.

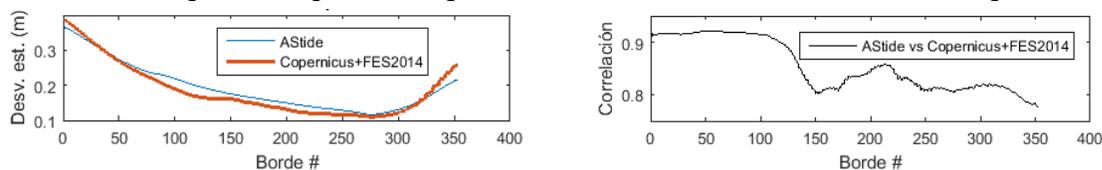


Figura 2. Desviación estándar y correlación Pearson en el borde del RPtide Año 2015.

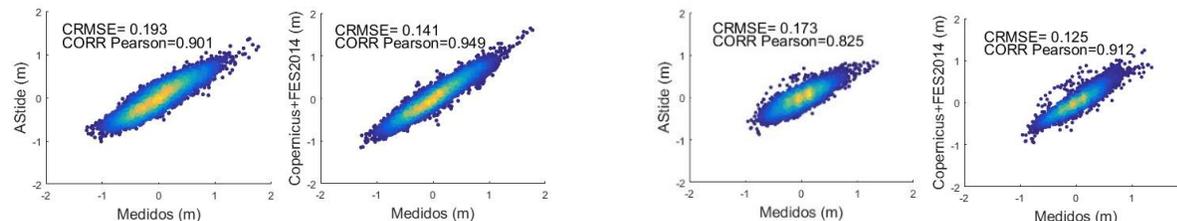


Figura 3. Comparaciones frente a las series medidas para 2015. Mar del Plata (izquierda). La Paloma (derecha).

$$\text{Desviación estándar} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2} \quad (1)$$

$$\text{CRMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\text{Modelo}_i - \overline{\text{Modelo}} - (\text{Observado}_i - \overline{\text{Observado}}))^2}{N}} \quad (2)$$

$$\text{Correlación Pearson} = \frac{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [(M_i - \bar{M}) \cdot (O_i - \bar{O})]}{\sqrt{\left[\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [M_i - \bar{M}]^2 \right]} \cdot \sqrt{\left[\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [O_i - \bar{O}]^2 \right]}} \quad (3)$$

En las comparaciones hechas a los puntos del borde del RPtide ambos modelos proporcionan resultados similares. Al comparar frente a las series medidas en los mareógrafos, el modelo Copernicus presenta menor error (CRMSE) y mayor correlación; en los gráficos de dispersión se puede ver que el modelo Copernicus simula mejor los datos que el modelo AS tide. Se realizó el Análisis de Componentes Principales para ver el comportamiento en toda el área de estudio. Se revela que partiendo de las predicciones operacionales del estado del océano de los modelos globales como el Hycom y el Copernicus y mediante un proceso de subescalado que mejore la resolución de estas predicciones, se puede generar una herramienta operacional para las zonas costeras.

2.2 Selección de los forzantes atmosféricos

Se exploró la disponibilidad en tiempo real de las fuentes de pronóstico de viento y presión atmosférica. El modelo Copernicus utiliza como forzantes los campos atmosféricos del Sistema de Pronóstico Integrado ECMWF que no tienen libre disponibilidad. Los campos de predicción meteorológica global del NCEP, NOAA, que utiliza el Hycom, sí se encuentran con libre disponibilidad y su adecuada resolución y experiencia en la utilización de sus reanálisis en el grupo de trabajo hizo que fueran seleccionados para este primer prototipo.

Esta selección hizo que para las condiciones de borde oceanográficas de este primer prototipo se optara por el modelo Hycom para que coincida la fuente con la de los forzantes.

2.3 Selección de los caudales de aportes fluviales

Para el aporte de agua dulce se definieron caudales constantes con el tiempo en 3 secciones correspondientes al río Santa Lucía (180 m³/s); al ingreso de los ríos Uruguay y Paraná-Guazú (20547 m³/s), y la otra al ingreso del caudal del río Paraná Las Palmas (5825 m³/s). Esta selección de caudales constantes para el primer prototipo se podrá modificar en nuevas revisiones del sistema evaluando la disponibilidad de caudales medidos en días anteriores y en tiempo real.

2.4 Revisión de los datos medidos en tiempo real

Los mareógrafos de Uruguay de los que se dispone de datos en tiempo real son Isla de Flores, Muelle Fluvial (Puerto de Montevideo) y La Paloma (desde mitad de 2018). Se realizó la exploración de estos datos y se generó un filtro basado en las medidas de 2018 que elimine los datos erróneos para cada una de las estaciones.

Para las 3 estaciones se descargan los datos disponibles que tienen frecuencia de un dato cada 5 minutos y valores de nivel máximo, mínimo y medio. El primer filtro elimina los datos en los que la diferencia entre el nivel máximo y mínimo es muy grande. El segundo filtro elimina los datos cuando se da un salto en los valores registrados de nivel medio. El tercer filtro elimina los datos fuera del rango de medida y el cuarto filtro (que sólo fue necesario implementar para la estación de La Paloma) elimina los datos cuando coinciden los registros máximo y mínimo.

3 PREPROCESAMIENTO

Desde finales de 2017 se están recopilando diariamente datos de pronóstico de los niveles y corrientes de los modelos globales, así como pronósticos de los forzantes atmosféricos (vientos y presiones en superficie) y datos medidos por los mareógrafos. Esta base de datos permite disponer de los datos a los que se hubiese tenido acceso en tiempo real y de este modo poder evaluar un tiempo largo de simulaciones de pronóstico para cualquier modificación del modelo en las mismas condiciones en las que se hubiese hecho en tiempo real. Surgió la necesidad de generar esta base de datos debido a que, en general, las fuentes no mantienen los datos accesibles o quedan con una menor resolución.

4 RESULTADOS

4.1 Salida del modelo de pronóstico

El prototipo operacional obtiene el pronóstico de niveles y corrientes 2D para toda la malla de cálculo para los próximos 3 días. Se extraen series en 22 puntos. Como salida gráfica se comparan los datos de los mareógrafos disponibles con los pronósticos de los últimos días (Figura 4).

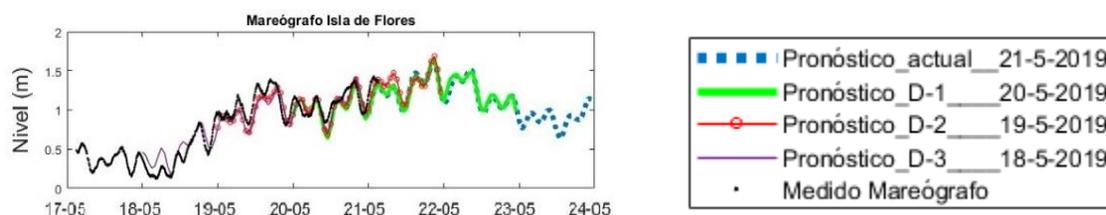


Figura 4. Salida gráfica. Ejemplo del mareógrafo de Isla de Flores para el pronóstico del 21-05-2019.

4.2 Evaluación para el año 2018

Se presentan estadísticos y gráficos de dispersión para los pronósticos del año 2018 frente a los datos medidos.

Tabla 2. Resumen de estadísticos para los pronósticos del año 2018.

		Montevideo	Isla de Flores	La Paloma
BIAS [m]	Pronóstico 1 día	0.1363	0.0147	0.0996
	Pronóstico 2 días	0.1437	0.0210	0.1019
	Pronóstico 3 días	0.1584	0.0334	0.1136
RMSE [m]	Pronóstico 1 día	0.2404	0.1765	0.1765
	Pronóstico 2 días	0.2483	0.1795	0.1795
	Pronóstico 3 días	0.2569	0.1810	0.1810
CORR_Pearson [-]	Pronóstico 1 día	0.8835	0.8721	0.8756
	Pronóstico 2 días	0.8772	0.8684	0.8757
	Pronóstico 3 días	0.8776	0.8690	0.8676

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^N (\bar{M} - o_i)}{N} \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Modelo_i - Observado_i)^2}{N}} \quad (5)$$

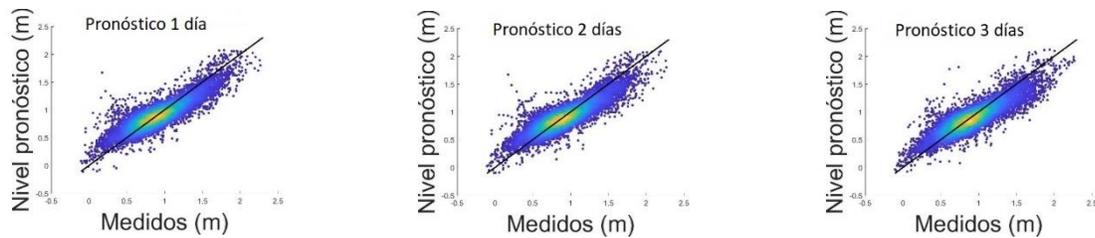


Figura 5. Gráficos de dispersión, scatter, para los pronósticos del año 2018. Ejemplo del mareógrafo de Isla de Flo-

5 CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

La principal conclusión tras la generación del prototipo de modelo de pronóstico es que es posible generar un pronóstico de calidad aceptable del nivel de marea global en el mar territorial uruguayo utilizando como condición de borde de niveles los resultados del modelo de pronóstico global de circulación HYCOM (superponiendo las condiciones de marea astronómica), como condición de borde en la superficie libre los vientos y presiones del pronóstico atmosférico de la NOAA y una condición estacionaria de caudal fluvial.

Se sigue trabajando en la mejora del sistema de pronóstico para que pueda representar en mayor medida los eventos registrados en el estuario. Los escenarios futuros incluyen, entre otros, mejorar la eficiencia computacional, técnicas de calibración automática de parámetros, inclusión de la asimilación de las medidas disponibles para la generación de las condiciones iniciales y mejorar la evaluación de la calidad del sistema.

6 AGRADECIMIENTOS

La investigación que da origen a los resultados presentados en la presente publicación recibió fondos de los siguientes proyectos:

Agencia Nacional de Investigación e Innovación. Proyecto: Sistema de pronóstico en tiempo real de corrientes y mareas en el Río de la Plata. Código POS_NAC_2018_1_152257.

Comisión Sectorial de Investigación Científica. Proyecto: Sistema de pronóstico en tiempo real de corrientes y mareas en el Río de la Plata. 2017-2019.

Comisión Sectorial de Investigación Científica. Proyecto: Sistema de pronóstico operacional del flujo en el Río de la Plata. 2019-2024.

7 REFERENCIAS

[1] Piedra-Cueva, I.; Terra, R.; Cazes, G.; Fossati, M.; Fernández, M.; Santoro, P. (2008). *Modelo Pre-operacional del Río de la Plata. Informe Final* - Proyecto PDT S/C/OP/70/01.

[2] Schiller, A. and Brassington, G. B. (2011). *Operational Oceanography in the 21st Century*, doi 10.1007/978-94-007-0332-2_18, Springer Science+Business Media B. V. 2011, pp3-26.

[3] Santoro, P.; Fossati, M.; Tassi, P.; Huybrechts, N.; Pham Van Bang, D.; Benoite, M.; Piedra-Cueva, I. (2015). *Hydrodynamic and fine sediment transport numerical modelling, application to the Río de la Plata and Montevideo Bay*. XXIIInd TELEMAC-MASCARET conference, Liverpool, England, 2015.

[4] Santoro, P.; Fernández, M.; Fossati, M.; Cazes, G.; Terra, R.; Piedra-Cueva, I. (2011). *Pre-operational forecasting of sea level height for the Río de la Plata*. Applied Mathematical Modelling 35, 2462–2478.

[5] Martínez, C.; Silva, J. P.; Dufrechou, E.; Santoro, P.; Fossati, M.; Ezzatti, P.; Piedra-Cueva, I. (2015). *Towards a 3D Hydrodynamic numerical modeling system for long term simulations of the Río de la Plata dynamic*, E-proceedings of the 36th IAHR World Congress, The Hague, the Netherlands.