



ISSN: (Print) (Online) Journal homepage: www.tandfonline.com/journals/trib20

Desarrollo del sistema de pronóstico del Río de la Plata y su Frente Marítimo: PronUy_RPFM

Daniel Balparda, Lucas Sellanes, Diego Silva, Michelle Jackson, Pablo Ezzatti & Mónica Fossati

To cite this article: Daniel Balparda, Lucas Sellanes, Diego Silva, Michelle Jackson, Pablo Ezzatti & Mónica Fossati (2022) Desarrollo del sistema de pronóstico del Río de la Plata y su Frente Marítimo: PronUy_RPFM, Ribagua, 9:2, 25-40, DOI: <u>10.1080/23863781.2023.2210262</u>

To link to this article: <u>https://doi.org/10.1080/23863781.2023.2210262</u>

d © 2023 The Author(s). Published by Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group.



Published online: 15 May 2023.

Submit your article to this journal 🗹

Article views: 531



View related articles 🗹

Uiew Cross		View	Cross
------------	--	------	-------

smark data 🗹



OPEN ACCESS OPEN ACCESS

Desarrollo del sistema de pronóstico del Río de la Plata y su Frente Marítimo: PronUy_RPFM

Daniel Balparda^a, Lucas Sellanes^a, Diego Silva^b, Michelle Jackson^a, Pablo Ezzatti^b and Mónica Fossati D^a

^aUniversidad de la República Facultad de Ingeniería, IMFIA, Montevideo, Uruguay; ^bUniversidad de la República Facultad de Ingeniería, INCO, Montevideo, Uruguay

RESUMEN

En este trabajo se presentan las características del sistema global de pronóstico desarrollado para el Río de la Plata y Frente Marítimo, denominado PronUy_RPFM, y en particular la componente del pronóstico de nivel de mar disponible actualmente en tiempo real. El prototipo actual (proto-tipo_1) del sistema de pronóstico desarrollado está automatizado y en funcionamiento desde el año 2021, publicando resultados en tiempo real, y refiere al pronóstico de niveles de marea. El modelo numérico de base utilizado es el TELEMAC2D y es forzado con el pronóstico diario oceánico global RTOFS- HYCOM y el pronóstico meteorológico global del NCEP (NOAA), ambos con información horaria. El pronóstico de niveles es evaluado en tiempo real con datos medidos in-situ por 10 mareógrafos ubicados en al área de estudio cuyos datos están disponibles online publicados por Argentina y Uruguay y son descargados diariamente por el sistema. El modelo hidrodinámico fue calibrado en base a la modificación de los parámetros vinculados a fricción de fondo y tensión de corte superficial del viento. Como resultado el modelo ha sido ajustado y el pronóstico disponible permite predecir los niveles con buena calidad tanto en condiciones medias como en condiciones de niveles extremos altos y bajos.

Development of the forecasting system for the Río de la Plata and Maritime Front: PronUy_RPFM

ABSTRACT

This paper presents the characteristics of the global forecasting system developed for the Río de la Plata and Maritime Front, called PronUy_RPFM, and in particular the sea level forecast component currently available in real time. The current prototype (prototype_1) of the developed forecast system is operational since 2021, publishing results in real time, and refers to the tide level forecast. The base numerical model used is TELEMAC2D and it is forced with the global daily oceanic forecast RTOFS-HYCOM and the global weather forecast of NCEP (NOAA), both with hourly information. The water level forecast is evaluated in real time with data measured in-situ by 10 tide gauges located in the study area whose data are available online published by Argentina and Uruguay and are downloaded daily by the system. The hydrodynamic model was calibrated based on the modification of parameters related to bottom friction and surface wind shear stress. As a result, the model has been adjusted and the available forecast allows predicting the levels with good quality both in measured conditions and in extreme high and low level conditions.

1. Introducción

La oceanografía operacional se refiere a la previsión de las condiciones del estado de los océanos a nivel de gran escala [1]. A nivel internacional el desarrollo de la temática ha sido principalmente impulsado por el Global Ocean Data Assimilation Experiment (GODAE), creado en 1997 con el objetivo de coordinar e integrar la investigación asociada a sistemas globales y regionales de predicción y análisis de los océanos [2]. A partir de 2009 dos grupos emergieron del

original GODAE para continuar con el desarrollo de la oceanografía operacional a nivel internacional, el GOV – GODAE OceanView y el ET-OOFS – JCOMM Expert Team for Operational Ocean Forecasting (https://www. godae-oceanview.org/). A partir de pronósticos oceanográficos se han desarrollado pronósticos regionales en todo el mundo y a partir de estos últimos se desarrollan aplicaciones para usos específicos. Cuentan con pronósticos oceanográficos, entre otros, la Agencia Meteorológica Japonesa

CONTACT Mónica Fossati 🖾 mfossati@fing.edu.uy 🖃 Universidad de la República Facultad de Ingeniería, IMFIA, Montevideo, Uruguay

© 2023 The Author(s). Published by Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group.

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. The terms on which this article has been published allow the posting of the Accepted Manuscript in a repository by the author(s) or with their consent.

ARTICLE HISTORY

Received 2 February 2023 Revised 17 March 2023 Accepted 29 April 2023

PALABRAS CLAVE R'ío de la Plata; Modelaci'ón hidrodin'ámica; Pron'óstico; Nivel de mar; Operativo

(JMA), el Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Medio Plazo (ECMWF), el servicio meteorológico nacional del Reino Unido (Met Office), el Centro Nacional de Pronósticos del Ambiente Marino (NMEFC) de China, la Red brasileña de Modelación y Observación Oceanográfica (REMO), el centro CMCC italiano, el centro francés Mercator Ocean que involucra a los principales centros europeos de oceanografía operacional y gestiona el Servicio de la Unión Europea de Monitoreo del Ambiente Marino (COPERNICUS, CMEMS) y los Centros Nacionales de Predicción Ambiental (NCEP) de los Estados Unidos. En la región, se destacan esfuerzos que se están realizando en Chile y Argentina con el desarrollo del sistema operacional PORT21 [3]; en Brasil la Red brasileña de Modelación y Observación Oceanográfica (REMO) genera de manera diaria pronósticos regionales que se distribuyen por la web del Centro Hidrográfico de la Marina Brasileña (https:// www.marinha.mil.br); y en Argentina el Servicio de Hidrografía de la Armada (SHN) publica el pronóstico diario de oleaje y mareológico para el día actual en el Río de la Plata y el Instituto Nacional del Agua (INA) pronósticos de marea en el delta del Paraná.

El pronóstico oceánico se basa en la recolección en tiempo real de observaciones y su procesamiento, lo que implica la rápida transmisión de los datos observados hacia los centros de procesamiento de datos, los cuales llevan a cabo el control de calidad y proveen los datos a los centros de pronóstico [1]. Allí, en general centros de cómputo de gran porte [4], utilizando modelos numéricos que se valen de técnicas de asimilación de datos para mejorar y generar condiciones iniciales [5] generan el pronóstico de la dinámica de los océanos a, típicamente, un horizonte temporal de 10 días [6]. Como parte del control de calidad se establecen niveles de servicio hacia los usuarios y se vigila su cumplimiento. Con el propósito de facilitar el acceso a sus productos, los centros de pronóstico han desarrollado y mejorado las tecnologías de información y visualización para ofrecer accesos personalizados por usuario. Actualmente, los centros de pronóstico del océano cubren ambientes marinos desde escala global a costera incluyendo propiedades físicas y biogeoquímicas. El análisis y pronóstico de ecosistemas son áreas activas de investigación. Los pronósticos de los centros de pronóstico son utilizados para generar productos de valor añadido como pueden ser rutas de pesca optimizadas, alertas de inundaciones costeras, predicción de floraciones de algas nocivas, etc [7,8]. Debido a que las condiciones del océano están continuamente cambiando, el pronóstico final se debe distribuir de forma rápida a los usuarios interesados.

El Río de la Plata es un cuerpo de agua con características fluvio-estuario-marinas [9,10], que se ubica en América del sur entre los 34° y 36° latitud sur y 54°50' y 58°30' de longitud oeste. Este cuerpo de agua tiene gran importancia para los países que comparten su jurisdicción, la República Oriental del Uruguay y la República Argentina, estando las dos capitales de ambos países en sus costas (Montevideo y Buenos Aires, respectivamente), incluyendo ambas dos grandes puertos relevantes para la región. La importancia de este cuerpo de agua motiva el desarrollo de herramientas que permitan mejorar su gestión. En este sentido, desde hace varias décadas en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República (Uruguay) se viene trabajando en el desarrollo de modelación numérica y monitoreo en el Río de la Plata, en el Frente Marítimo y en la costa uruguaya, con el objetivo de conocer el sistema y sus características principales, como base para la predicción de futuros estados del mismo en un sistema de pronóstico [11-15].

El objetivo de este artículo es presentar las características del sistema global de pronóstico desarrollado para el Río de la Plata y Frente Marítimo, denominado PronUy_RPFM, y en particular la componente del pronóstico de niveles de mar disponible actualmente en tiempo real. El desarrollo implicó una serie de etapas de trabajo: una etapa inicial de diseño del sistema, una etapa de puesta en marcha del sistema, una etapa de funcionamiento del sistema y una etapa de evaluación del pronóstico (etapa actual). Durante la etapa inicial se estableció un sistema automático de obtención, curaduría y almacenamiento de datos en la zona de estudio de modelos de pronóstico oceánicos y atmosféricos, así como también datos medidos de nivel de mar en mareógrafos. En la etapa de puesta en marcha del sistema se trabajó en la implementación de las condiciones de borde en modalidad pronóstico para forzar el hindcast de niveles disponible para el Río de la Plata [16] y en la automatización del sistema para obtener un pronóstico diario de niveles con un horizonte temporal de 72 horas para la zona. En la etapa de funcionamiento se estableció la automatización del sistema junto con el diseño de la visualización de resultados, la difusión del sistema (mediante un sitio web) y la definición de la estrategia de evaluación de los resultados del pronóstico. Recientemente se ha iniciado la etapa de evaluación del sistema y mejora continua, en la cual se han realizado una serie de ajustes en el modelo numérico con el objetivo de mejorar la calidad del pronóstico generado.

En lo que sigue el artículo se estructura de la siguiente manera. En la sección 2 se describen las principales características del área de estudio y los principales forzantes del sistema. En la sección 3 se describen las componentes del sistema de pronóstico generado: datos, modelos globales, modelo numérico, evaluación y difusión. En la sección 4 se presenta la metodología y los resultados obtenidos en la etapa de ajuste de los parámetros del modelo numérico hidrodinámico que utiliza actualmente el *prototipo_1* que pronostica niveles de marea. En la sección 5 se realiza una discusión y en la sección 6 se presentan las principales conclusiones y pasos futuros.

2. Descripción del área de estudio

El Río de la Plata es un cuerpo de agua estuarino que se extiende desde la desembocadura de los ríos Paraná y Uruguay y descarga en el Océano Atlántico Sur (Figura 1). El mismo presenta una dinámica muy compleja que viene dada por la interacción entre sus características geomorfológicas y los forzantes del sistema. El ancho varía considerablemente desde aproximadamente 32 km entre la línea Colonia-Buenos Aires aumentando aproximadamente a 100 km en la sección Montevideo-Punta Piedras hasta aproximadamente 220 km en el límite Punta del Este-Punta Rasa. Por otra parte, el estuario es mayormente somero, presentando profundidades que no superan los 10 m hasta la sección Montevideo-Punta Piedras, y superando los 20 m de profundidad hacia el Océano. En cuanto a la dinámica, hacia el interior de Montevideo-Punta Piedras, la misma se caracteriza por una dinámica fluvial cuasibidimensional con influencia de mareas, mientras que hacia el exterior existe una dinámica con flujo de características tridimensionales y gran influencia del campo salino en la hidrodinámica [9,11].

Los forzantes principales del sistema son los caudales erogados por los ríos Uruguay y Paraná; que recogen las aguas de la segunda cuenca más grande de América del Sur (con un caudal medio anual de 25.000 m^3/s) los vientos y presiones sobre la superficie y la onda de marea astronómica y meteorológica proveniente del océano abierto. En particular, la marea astronómica en el estuario tiene características micromareales y se encuentra dominada por la componente semi-diurna M2 y las diurnas K1 y O1 [17]. A su vez, la marea meteorológica en el estuario también presenta pequeñas amplitudes, presentando la marea astronómica y meteorológica una relevancia equivalente. Estudios previos muestran que la relevancia de la marea meteorológica es mayor en la costa uruguaya que sobre la costa Argentina y a su vez esta relevancia disminuye desde la zona interior del estuario hacia el exterior [10,11]. Por otra parte, la dinámica de propagación de los niveles en el Río de la Plata se caracteriza por el ingreso de la onda desde la plataforma argentina, la cual se detecta en Mar del Plata y luego se transforma a medida que se propaga tanto hacia el interior del estuario como hacia la costa norte [10]. La amplitud de los niveles de marea es decreciente desde la costa argentina hacia la costa uruguaya y creciente desde el exterior hacia el interior, observándose las mayores



Figura 1. Ubicación y batimetría (m) del Río de la Plata y Frente Marítimo. Se ubican las estaciones mareográficas de Argentina y Uruguay.

amplitudes en Buenos Aires (costa sur) y en Colonia (costa norte). Respecto a eventos de niveles máximos, previos estudios muestran que los mismos están asociados con la ocurrencia de vientos provenientes del sudeste sobre la región sur de la plataforma Argentina mientras que los eventos de niveles mínimos se dan luego de la ocurrencia de vientos del oeste-noroeste sobre la plataforma continental argentina [10, 11].

3. Descripción del sistema PronUy_RPFM

3.1. Diseño de la estructura del sistema

El sistema de pronóstico desarrollado tiene 5 componentes: 1) extracción de datos externos, 2) base de datos, 3) modelo numérico, 4) evaluación del sistema, y 5) difusión. Estas componentes se relacionan entre sí y son ejecutadas de manera secuencial. La primera componente (extracción de datos externos) se refiere a la descarga y curaduría diaria de datos que necesita el modelo numérico para realizar las simulaciones (como por ejemplo los forzantes externos provenientes de modelos globales) o para evaluar los resultados (mediciones de mareógrafos en el área de estudio). La segunda componente es el mantenimiento de la base de datos, donde se acumulan tanto los datos descargados como los resultados del pronóstico. La tercera componente (el modelo numérico hidrodinámico) es lo que define el prototipo específico del pronóstico y refiere a las características de implementación del modelo (modelo numérico, dominio, malla de cálculo, forzantes, parámetros, variables, entre otros). La cuarta componente (evaluación del sistema) incluye todos los aspectos de evaluación de la calidad del pronóstico para la que son utilizados datos medidos insitu (niveles de mareógrafos) en toda la zona de interés. La quinta componente incluye el diseño y ejecución de la interfaz del pronóstico de manera pública a todo usuario y en tiempo real.

El proceso de trabajo mantiene dos ambientes, desarrollo y producción. En la modalidad de desarrollo es donde se desarrollan y testean distintas variaciones de un prototipo (condición de borde, parámetros del modelo numérico, períodos históricos, etc) y una vez que los cambios son definitivos se pasan a la modalidad de producción que corresponde al prototipo ejecutado en tiempo real y difundido públicamente.

El prototipo actual (*prototipo_1*) del sistema de pronóstico desarrollado está automatizado y en funcionamiento desde el año 2021, publicando resultados en tiempo real, y refiere al pronóstico de niveles de marea. El modelo numérico es forzado con pronósticos diarios de modelos globales (oceánico y atmosférico). El sistema se ejecuta una vez al día generando un pronóstico hidrodinámico con un horizonte temporal de 3 días. En la Figura 2 se resume en forma gráfica la arquitectura del sistema diseñado, con las principales interacciones entre las diferentes componentes y el orden cronológico de las tareas. A continuación, se describe en mayor detalle algunos aspectos del sistema y especificidades del *prototipo_1* del pronóstico.

3.2. Acceso a datos externos y base de datos

3.2.1. Datos medidos

El pronóstico de niveles es evaluado en tiempo real con datos medidos in-situ por mareógrafos ubicados en el



Figura 2. Diagrama general del sistema de pronóstico PronUy_RPFM donde se incluyen las componentes (acceso a datos externos en azul, base de datos en gris, modelo numérico en rojo, evaluación en amarillo y difusión en verde) y las interacciones entre las mismas.

área de estudio. Diariamente el sistema generado descarga los datos disponibles online publicados por Argentina y Uruguay. Los mareógrafos de Uruguay de los que se disponen datos en tiempo real desde hace varios años son los registrados por la Administración Nacional de Puertos (ANP) en Isla de Flores, Muelle Fluvial (Puerto de Montevideo), La Paloma y Colonia. A través de la web de ANP se puede acceder a los datos registrados hasta la fecha mediante usuario autorizado. Los datos proporcionados por la ANP se encuentran referidos al cero Wharton y tienen una frecuencia de medición de 5 minutos. La web del Servicio de Hidrografía Naval (SHN) de Argentina publica los valores registrados en las últimas horas, con frecuencia horaria, para las estaciones de Atalaya, Buenos Aires, La Plata, Mar del Plata, Torre Oyarvide, Pilote Norden, San Clemente, San Fernando y Santa Teresita. Estos datos son sobrescritos en cada actualización y no se mantienen disponibles. Cada estación tiene un plano de referencia local llamado plano de reducción por tanto se realiza la transformación al cero Wharton (cero del sistema de pronóstico). A su vez, aunque no están disponibles en tiempo real, se utiliza información histórica de niveles medidos en los mareógrafos de Punta del Este, La Paloma y Colonia por la Dirección Nacional de Aguas de Uruguay cuando se trabaja en modalidad de desarrollo (para la evaluación histórica) del pronóstico. En la Figura 1 se ubican los mareógrafos mencionados.

Los registros de los mareógrafos publicados por ANP y SHN presentan, ocasionalmente, diversos errores que deben evaluarse a la hora de utilizar esas mediciones. Por tanto, se definieron e implementaron una serie de controles de calidad a los mismos. Los errores típicos que se pueden encontrar en las series temporales de registros de mareógrafos incluyen errores aleatorios como los errores de tipeo cuando los registros se transcriben de manera manual (columna equivocada, intercambio de cifras consecutivas, fecha incorrecta), errores electrónicos por ruido en las medidas (picos), problemas durante la transmisión del dato (huecos o datos faltantes), datos fuera del rango de medida (outliers), calibración del sensor (modificación del cero de referencia), etc. Debido a esto, en el sistema de pronóstico se implementaron diversos filtros de control de calidad de datos que se ejecutan una vez descargados los datos y previo a su almacenamiento en la base de datos y uso en la comparación de resultados y cálculo de estadísticos de errores del pronóstico.

3.2.2. Modelos globales

El modelo numérico hidrodinámico es forzado por niveles de marea obtenidos del pronóstico del modelo global RTOFS-HYCOM [18] de NOAA-NCEP (https://polar. ncep.noaa.gov/global/) publicados con frecuencia horaria. Estos datos se descargan diariamente de manera automática una vez que son publicados. El modelo Global RTOFS se basa en una configuración global de HYCOM (HYbrid Coordinate Ocean Model, https://www.hycom. org/) desarrollado por el NOAA (Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de EEUU), el Servicio Meteorológico Nacional de EEUU en asociación con la Marina de EEUU como parte del GODAE. Es un sistema de pronóstico en tiempo real de circulación general oceánica que proporciona datos actualizados a diario del estado del océano (2 días de análisis) y pronóstico para los próximos 8 días. Se trata de un modelo 3D con una resolución horizontal de 1/12° (~0.0833°). En vertical tiene coordenada híbrida con 41 capas de modo de utilizar cada tipo de coordenada donde sus propiedades son más ventajosas. Se utiliza coordenada z para las zonas costeras, que incluyen profundidades desde los 5 m, pasando por coordenada sigma para profundidades medias y llegando a una coordenada isopicna (dependiente de la presión) para el océano abierto [19]. El modelo RTOFS-HYCOM incluye la asimilación de perfiles de salinidad y temperatura in situ procedentes de una variedad de fuentes, así como la asimilación de datos de detección remota de temperatura, altura de la superficie del océano y concentración de hielo marino. Los campos 3D se publican con resolución temporal de 1 dato cada 24 horas para los próximos 8 días para las variables de salinidad, temperatura, velocidad este y norte. Los resultados de las predicciones publicados con resolución temporal de 1 dato por hora son únicamente 2D y para los próximos 3 días e incluyen, a nivel global, variables de salinidad, temperatura, velocidad este y norte y altura de la superficie del océano sin incorporar la marea astronómica. Estos datos son publicados el día de la simulación y se encuentran disponibles en la web hasta el final del día siguiente. Una vez descargados para el PronUy, estos datos se guardan en la base de datos en un dominio correspondiente al Atlántico Sur.

Debido a que el modelo global no incorpora la marea astronómica es necesario añadirla y para eso se utiliza la información del atlas global de marea astronómica FES2014. El atlas FES2014 [20] es la última actualización del modelo oceánico global de cálculo de marea astronómica elaborado por LEGOS, Noveltis, CNES y CLS de Francia. El modelo hidrodinámico implementado incorpora la serie astronómica generada en el borde del modelo a partir de los 34 constituyentes de marea publicados (2N2, EPS2, J1, K1, K2, L2, La2, M2, M3, M4, M6, M8, Mf, MKS2, Mm, MN4, MS4, MSf, MSqm, Mtm, Mu2, N2, N4, Nu2, O1, P1, Q1, R2, S1, S2, S4, Sa, Ssa, T2).

En el modelo hidrodinámico como forzantes meteorológicos se impone velocidad de viento a 2 metros y presión atmosférica del pronóstico meteorológico global del NCEP (NOAA) que utiliza el HYCOM y que se basa en el modelo numérico GFS de 1/4° de resolución (https://www.nco.ncep.noaa.gov/pmb/products/gfs/). Cada 6 horas (cuatro veces al día) se actualizan los pronósticos con resolución espacial de 0,25° y para la resolución temporal de 1 dato por hora se pronostican 120 horas (5 días). En el sistema PronUy_RPFM actualmente se descarga de manera diaria el primer pronóstico del día publicado por la NOAA y se acumula la información en la base de datos.

3.3. Modelo numérico hidrodinámico

El pronóstico de niveles actual utiliza como herramienta numérica el modelo TELEMAC-MASCARET [21]. El modelo TELEMAC es una herramienta de código abierto, eficiente computacionalmente, en continuo desarrollo por grupos de reconocido prestigio internacional, y con una comunidad de usuarios extendida y con fluida comunicación. El modelo ha sido implementado en varias zonas fluviales y costeras en el mundo (ver por ejemplo [22] ó [23]), y también en el Río de la Plata y costa uruguaya para resolver la hidrodinámica y la dinámica de sedimentos finos tanto en su versión bidimensional integrada en vertical [,16, 24] como en su versión tridimensional [13]. El modelo TELEMAC utiliza funciones de interpolación lineales.

Para el pronóstico se parte de la configuración definida para el hindcast de niveles desarrollado en el IMFIA [16] que utiliza el modelo TELEMAC2D. Se utiliza una malla bidimensional en elementos finitos (Figura 3) no-estructurada de resolución variable desde 3 km hasta 100 m en la zona interior. Se definen en la malla dos secciones que representan los aportes fluviales más relevantes, una que corresponde al río Uruguay y al Paraná-Guazú, y la otra sección que corresponde al Paraná Las Palmas.

El modelo resuelve la variación de la superficie libre, la velocidad promedio en vertical y se incluye como trazador activo la salinidad. Como condición de borde de niveles en la frontera oceánica se utilizan los pronósticos del modelo global RTOFS-HYCOM de NOAA-NCEP, de 1/12° de resolución disponibles en tiempo real (https://polar.ncep.noaa.gov/global/) combinados con el atlas de marea astronómica FES2014. Para esto, se interpolan los datos del modelo global a los nodos de la frontera oceánica del modelo TELEMAC2D (ver Figura 3). Como forzantes meteorológicos se impone velocidad de viento a 2 metros y presión atmosférica del pronóstico GFS de la NOAA de 1/4° de resolución (https://www.nco.ncep.noaa.gov/pmb/products/gfs/). El aporte de caudal fluvial de este primer prototipo se considera constante e igual a la media anual histórica, 20,547 m³/s para el Paraná Guazú y el río Uruguay, y 5,825 m³/s para el Paraná Las Palmas. Las condiciones de borde para la salinidad son un valor fijo constante igual a 35 psu en la frontera oceánica y un valor de salinidad cero en los aportes fluviales.

El modelo en modalidad hindcast fue calibrado y validado mediante una metodología de ajuste del coeficiente de rugosidad de fondo y del coeficiente asociado al arrastre del viento [16]. En el modo hindcast el modelo es forzado con otros datos de niveles en la frontera oceánica y otros datos atmosféricos en la superficie libre (datos de un hindcast de marea del Atlántico Sur desarrollado en el IMFIA y datos de reanálisis del National Center for Environmental Predictions NCEP, respectivamente). Por lo tanto, aunque en la implementación en modalidad pronóstico se parte de los parámetros de la configuración hindcast, al modificarse los forzantes del modelo se realiza un nuevo ajuste de los parámetros del modelo (ver sección 4).

Como condición inicial del modelo se parte del reposo, un valor de nivel medio igual a 0,91 m en todo el dominio y un valor de salinidad oceánica de 35 psu. A partir de esta condición inicial se deben simular varios meses para generar el gradiente salino en la zona estuarina del Río de la Plata y así independizarse de la condición inicial ficticia. Se toma por tanto un período de calentamiento de un año. Una vez iniciado el pronóstico el modelo se ejecuta diariamente tomando como condición inicial de cada simulación el instante de 24 horas de simulación del pronóstico del día anterior.

3.4. Evaluación y difusión del pronóstico

La calidad del pronóstico generado se evalúa en tiempo real utilizando los datos de nivel de mar medidos in-situ y publicados online en tiempo real en 10 mareógrafos ubicados en el Río de la Plata y el Frente Marítimo: Mar del Plata, La Paloma, San Clemente, Isla de Flores, Montevideo, Torre Oyarvide, Atalaya, Pilote Norden, Colonia y Buenos Aires (ver ubicación en Figura 1). La evaluación del pronóstico se realiza por un lado gráficamente y por otro lado mediante el cálculo de estadísticos. Se generan gráficas de evolución temporal de nivel de mar en cada estación de medición en la que se presenta el pronóstico de cada día, en conjunto con el pronóstico de los tres días anteriores y con los datos medidos los últimos tres días. De esta manera cada gráfico muestra visualmente el pronóstico en esa ubicación y cómo fue la representación de los datos del pronóstico los días pasados.

La evaluación también se realiza mediante el cálculo de estadísticos en base diaria. Se calculan



Figura 3. Malla de cálculo del modelo TELEMAC2D utilizada en el sistema de pronóstico. En el panel inferior derecho se marcan las zonas interior (azul), intermedia (verde) y exterior (rojo) en las cuales se define distinta rugosidad de fondo, y los nodos del borde oceánico donde se imponen los niveles del pronóstico global RTOFS-HYCOM.

y publican, evaluando los últimos tres días del pronóstico, el sesgo (BIAS), la raíz del error cuadrático medio (RMSE) y la correlación (R), cuyas formulaciones se presentan en la Tabla 1. Una medida de la habilidad del modelo para representar el estado medio observado lo da el BIAS o error medio. La precisión del pronóstico se evalúa con la raíz del error medio cuadrático para que tengan más influencia los mayores errores. Por último, se calcula la correlación R para evaluar la habilidad del modelo en reproducir el patrón de las mediciones.

El pronóstico de niveles generado se publica online en la web https://www.fing.edu.uy/imfia/pro nostico-marea/. Actualmente se presentan dos tipos de productos, el nivel pronosticado en ubicaciones específicas (pestaña 'series temporales' en la web) y los mapas de niveles en todo el dominio de cálculo (pestaña 'campos' en la web). Las ubicaciones específicas disponibles actualmente son las de los Tabla 1. Definición de parámetros estadísticos utilizados para la evaluación del pronóstico en tiempo real y para la evaluación de diversas configuraciones del pronóstico evaluadas durante la recalibración del modelo numérico.

$$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (x_i - y_i)$$
(1)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}} \sum_{i=1}^{N} (x_i - \bar{y}_i)^{-1}$$

$$P = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (x_i - \bar{x}) (x_i - \bar{y})$$
(2)

$$R = \frac{N \sum_{i=1}^{N} (V_{i} + V_{i})}{\sigma_{X} \sigma_{y}}$$
(3)

Siendo x_i el dato medido, y_i el dato pronosticado para el mismo instante, <u>x</u> e <u>y</u> la media de los datos medidos y datos pronosticados, N la cantidad de datos, σ_x y σ_y la desviación estándar de los datos medidos y datos pronosticados.

mareógrafos que miden en tiempo real y que se describieron en la sección 3.1. Ambos productos presentan el pronóstico de nivel en los próximos tres días con frecuencia horaria. A modo de ejemplo,



Figura 4. Ejemplo de difusión en tiempo real del pronóstico diario en las estaciones mareográficas donde se cuenta con datos medidos de nivel: pronóstico del día 12/7/2022 en Montevideo.

la Figura 4 presenta la difusión realizada el día 12 de julio del 2022 para el pronóstico calculado en Montevideo donde se observa el pronóstico a tres días pero también los pronósticos de los últimos tres días anteriores en conjunto con las mediciones esos días y los estadísticos calculados para su evaluación.

4. Ajuste del modelo hidrodinámico del prototipo 1

4.1. Metodología

Una vez implementado el prototipo se realiza la recalibración del modelo hidrodinámico siguiendo la metodología definida durante la calibración del modelo en modalidad hindcast [16]. El ajuste se realiza en función de dos parámetros del modelo, el número de Manning (n) que interviene en la formulación de la tensión de corte en el fondo y un coeficiente de arrastre del viento (Cd) que interviene en la formulación de tensión de corte superficial [21]. Para el coeficiente n se evalúan casos con valor uniforme en todo el dominio y valor variable en el dominio según tres zonas: la zona interior, la zona intermedia y la zona exterior; definidas en la Figura 3. Para el coeficiente de arrastre de viento se evaluaron las alternativas de Cd constante, caso en el cual se calibra directamente el valor del parámetro, y Cd variable (función de la velocidad de viento), caso en el cual se calibra un parámetro de escala (C_{FLA}) que mayora (o menora) el valor de Cd no uniforme obtenido a partir de la formulación de Flather.

Se definieron 19 configuraciones del modelo con distintas combinaciones de los parámetros de calibración, las cuales se presentan en la Tabla 2, y se simula un período de tiempo de dos años (2019 y 2020). La configuración 4 corresponde a la seleccionada para el hindcast. Los resultados del modelo se evalúan comparando con los niveles medidos en las 10 estaciones mareográficas del dominio en las cuales se cuenta con niveles medidos (ver ubicación en la Figura 3) durante el período de tiempo simulado. Las estaciones de La Paloma, San Clemente y Punta del Este se utilizan para caracterizar la zona exterior; las estaciones de Isla de Flores, Montevideo y Torre Oyarvide para caracterizar la zona intermedia, y las estaciones de Atalaya, Pilote Norden, Colonia y Buenos Aires para caracterizar la zona interior. Además, se utiliza la estación de Mar del Plata, ubicada en la frontera del dominio de cálculo, para evaluar el error de base que presenta el modelo asociado a la condición de borde. Aunque la información medida es extensa y en general de buena calidad, hay algunos períodos donde no hay mediciones por algún desperfecto de la estación de medición o hay medidas erróneas. Luego de un control de calidad se

Tabla 2. Parámetros de calibración del modelo hidrodinámico (rugosidad de Manning y coeficiente de arrastre del viento) correspondientes a las 19 configuraciones estudiadas. La zonificación del coeficiente de rugosidad corresponde a las zonas marcadas en la Figura 3: n_int (zona interior), n_med (zona intermedia), n_ext (zona exterior).

n_int						0,007	0,007	0,007	0,007		0,009	0,009
n_med					0,01	0,01	0,0125		0,0175	0,009	0,01	
n_ext		0,01	0,0125	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015
Cd constante	1,5x10 ⁻⁰⁶ 2x10 ⁻⁰⁶	8 11	9 12	10 13	18 19							
Cd variable	$C_{FLA} = 1$	14		15		7	5	4	6	2	1	3
	C _{FLA} = 1,15	16		17								

Tabla 3. Información sobre los datos de niveles medidos utilizados para la recalibración del modelo hidrodinámico: porcentaje de datos válidos para los años 2019 y 2020, umbrales superior e inferior definidos a partir de los percentiles 99% y 1% utilizados para la evaluación de extremos altos y bajos, respectivamente.

tación Medición	Datos 2019-2020 (%)	Umbral Superior (m)	Umbral Inferior (m)
ar del Plata	97,91	2,12	0,13
Paloma	99,99	1,87	0,33
ınta del Este	75,98	1,96	0,27
n Clemente	63,80	2,04	0,24
a de Flores	84,94	1,86	0,17
ontevideo	92,40	2,23	0,25
orre Oyarvide	96,25	2,29	-0,01
alaya	61,19	2,19	0,06
lote Norden	87,91	2,57	0,21
olonia	50,63	2,63	0,24
uenos Aires	98,93	2,64	-0,02
n Clemente a de Flores ontevideo orre Oyarvide alaya lote Norden olonia uenos Aires	63,80 84,94 92,40 96,25 61,19 87,91 50,63 98,93	2,04 1,86 2,23 2,29 2,19 2,57 2,63 2,64	0,24 0,17 0,25 -0,01 0,06 0,21 0,24 -0,02

obtiene un porcentaje razonable de disponibilidad de datos en la mayoría de las estaciones siendo el menor el de Colonia, de 50%, que equivale a un año de datos (Tabla 3).

La evaluación de las configuraciones del pronóstico se realiza mediante el cálculo de estadísticos recomendados en la bibliografía [1, 25] tanto para series continuas como para eventos aislados. Para evaluar el comportamiento medio de las series obtenidas con el modelo, para cada estación se calculan el nivel medio y la varianza de la serie medida y la serie modelada, el sesgo (BIAS), el error cuadrático medio (RMSE)y la correlación (R) para los dos años simulados; según las formulaciones presentadas en la Tabla 1. Además, se realizan análisis de sensibilidad para determinar tendencias en los resultados obtenidos en cada estación y por zonas (interior, intermedia y exterior) a partir de la variación de los parámetros de ajuste.

Para los niveles de mar interesa también evaluar cómo representa el pronóstico los eventos de niveles extremos altos y bajos en todo el dominio. Para esto, se identifican y se evalúan los eventos que quedan por fuera de un rango de niveles específico para cada estación, definido por un umbral superior y un umbral inferior. Estos umbrales se determinan considerando los percentiles 1% (inferior) y 99% (superior) de las series medidas de niveles en el periodo evaluado 2019-2020 (Tabla 3). A partir de los umbrales se realiza una evaluación de los eventos discretos en base a la matriz de contingencia 2×2 [25] presentada en la Tabla 4. En un cuadro sencillo se plantean todas las posibilidades: que el evento se de en la realidad y haya sido pronosticado (sí medido y sí pronóstico, representado por la letra a), que el evento sea pronosticado pero no haya ocurrido (no medido y sí pronóstico, representado por la letra b), que el evento haya ocurrido pero no hava sido pronosticado (sí medido y no pronóstico, representado por letra c), y que el evento no haya ocurrido en la realidad y no hava sido pronosticado (no medido y no pronóstico, representado por la letra d). Como en este caso la situación de no evento medido ni modelado ocurre la mayor parte del tiempo (pues los eventos de interés son los de nivel extremo alto o bajo definidos por los percentiles 99% y 1% de los niveles medidos) pierde sentido evaluar el valor d y se trabaja con los valores de a, b y c solamente. Para sintetizar la información se trabaja con tres índices [25] definidos en la Tabla 4: el 'threat score' (TS) que evalúa el número de eventos

Tabla 4. Definición de la matriz de contingencia 2 × 2 utilizada para evaluar eventos de niveles extremos altos y bajos; y parámetros estadísticos definidos a partir de los elementos de la matriz: threat score (TS), hit rate (HR) y false alarm rate (FAR).

	Observado		rvado	Matriz de Contingencia 2 $ imes$ 2 para evaluar eventos discretos:						
		Si	No	a: número de veces que se observó evento y se pronósticó,						
sticado	Si	а	b	b: número de veces que se pronosticó evento pero no se observó, c: número de veces que se observó evento pero no se pronosticó,						
Pronos	No	с	d	d: número de veces que no se observó ni pronosticó evento.						
TS = a/(a + b + c)			Threat Score (TS) definido como el número de pronósticos correctos sobre el total de ocasiones en que el evento se pronosticó u ocurrió. El TS es mejor cuanto más cercano a 1 (b = c = 0), y peor cuanto más cercano a 0.							
HR = a/(a + c)*100			Hit rate (HR) mide la tasa de éxito en el pronóstico de eventos comparando el número de pronósticos correctos er relación a la cantidad de eventos ocurridos en la realidad. Es deseable un valor alto de HR.							
FAR = b/(a + b)*100		/(a + b)*100 False alarm rate (FAR) mide cuántos eventos fueron pronosticados pero no ocurrieron en la realidad en rela cantidad de eventos pronosticados. Es deseable un valor bajo de FAR.								

pronosticados correctamente respecto al total de ocasiones en las cuales un evento se observó o pronosticó; la 'hit rate' (HR) que toma el éxito del pronóstico comparando los eventos pronosticados correctamente respecto al total de eventos observados; y la 'false alarm rate' (FAR) que evalúa el número de eventos pronosticados que no ocurrieron en relación al total de eventos pronosticados.

4.2. Resultados

4.2.1. Series continuas

A modo de ejemplo, en la Figura 5 se presenta la serie temporal de nivel de mar medido y obtenido con las 19 configuraciones evaluadas del modelo para el mes de setiembre 2020 en La Paloma, Montevideo y Colonia, con el objetivo de mostrar cualitativamente la variabilidad de los niveles obtenidos con las distintas configuraciones. Se observan, globalmente, leves variaciones de nivel según las distintas configuraciones del modelo, las cuales se incrementan en los casos de niveles extremos (altos y bajos). Más allá de las diferencias entre las configuraciones, se observa además que el modelo representa las variaciones observadas en los datos correspondiente a la marea diaria, así como también el evento de nivel alto ocurrido en ese mes. No obstante, se observan diferencias entre el modelo y los datos tanto en sesgo como en los niveles horarios.

En términos globales las configuraciones analizadas generan variaciones relevantes en las series de nivel que se traducen en cambios importantes en estadísticos

globales como el nivel medio y la varianza, lo que a su vez se traduce en cambios importantes en los estadísticos de comparación (BIAS, RMSE y R). Los estadísticos de comparación (BIAS, RMSE, y R) obtenidos en las 10 estaciones de control para las 19 configuraciones analizadas se presentan en la Figura 6. Por otra parte, calculando los estadísticos promedio (BIAS y RMSE) por región (interior, intermedia y exterior), y global (todas las estaciones) se obtienen los valores presentados en la Figura 7. Mar del Plata es una estación que responde principalmente a la condición de borde y por tanto se obtiene que los niveles modelados casi no varían con las distintas configuraciones. Para dicha estación, los resultados muestran que no se representa ni el nivel medio ni la varianza; el modelo tiene un nivel medio mayor y una varianza menor. El BIAS (RMSE) promedio de todas las configuraciones en Mar del Plata es igual a 0,11 m (0.18 m).

Analizando la sensibilidad de los resultados obtenidos para todas las estaciones en conjunto entre las configuraciones 8 y 10, 11 y 13, 14 y 15 ó 16 y 17, las cuales mantienen el coeficiente de fricción de viento, pero aumentan el valor de rugosidad de fondo, se obtiene que en términos globales los niveles aumentan en todo el dominio. Analizando los estadísticos según cada zona y estación en particular, se observa que el sesgo disminuye en las estaciones de la zona interior e intermedia y en algunas estaciones de la zona exterior (Punta del Este y San Clemente), siendo la configuración 8 la que menor sesgo presenta tomando el promedio general de todas las estaciones. Respecto al error



Figura 5. Variación temporal del nivel de mar medido (puntos negros) y obtenido con el modelo en las 19 configuraciones evaluadas (lineas continuas) durante el mes de setiembre de 2020 en a) La Paloma, b) Montevideo y c) Colonia.



Figura 6. Estadísticos de comparación entre las series de niveles obtenidas con el modelo en las 19 configuraciones y las series medidas en las 10 estaciones de control: BIAS (panel superior), RMSE (panel intermedio) y R (panel inferior). Periodo de tiempo 2019-2020.

global, el comportamiento no es tan claro, siendo la configuración 13 la que presenta menor error global.

La variación del coeficiente de Manning de la zona intermedia genera efectos en los niveles en todo el dominio y los estadísticos no presentan una tendencia clara. La variación del coeficiente de Manning de la zona interior genera variaciones de nivel principalmente en la zona interior, siendo muy leve el efecto en la zona intermedia y exterior. En relación a los estadísticos se observan mejoras en los resultados para n_int = 0,009 en



Figura 7. Bias (panel superior) y RMSE (panel superior) promedio tomando las estaciones por zonas: interior, intermedia, exterior y todas las estaciones (global) para las 19 configuraciones del modelo consideradas. Periodo de tiempo 2019-2020.

relación a n_int = 0,007. Esto condice con los resultados obtenidos en las configuraciones con coeficiente uniforme, para las cuales los mejores estadísticos se obtienen para valores de n_int iguales a 0,01 (BIAS global) y 0,0125 (RMSE global). En relación al efecto de la variación del coeficiente del viento, la correlación global aumenta para mayores coeficientes de fricción de viento, aunque los estadísticos globales sesgo y error también aumentan para las configuraciones con Cd fijo (comparar configuraciones 8 y 11 ó 10 y 13) mientras que el sesgo aumenta pero el error disminuye en las configuraciones con Cd variable (comparar configuraciones 14 y 16 ó 15 y 17).

Agrupando las estaciones de control por zonas (interior, intermedia y exterior) y analizando los resultados en cada una se observa una gran variabilidad en función de los distintos parámetros del modelo. Para las estaciones de la zona interior (Buenos Aires, Pilote Norden, Colonia y Atalaya) se observa que los mayores errores se obtienen cuando se usa el coeficiente de viento variable con la formulación de Flather, y los menores errores con coeficiente fijo y rugosidades uniformes entre 0.01 y 0.0125 (configuraciones 9, 12 y 18). En las estaciones de la zona intermedia (Torre Oyarvide, Montevideo e Isla de Flores) las configuraciones 11 y 8 generan el menor sesgo y también errores bajos, obteniéndose los peores resultados (tanto en sesgo como en error) en las configuraciones con rugosidad variable con valores bajos en la zona interior y altos en la zona intermedia (configuración 6). Los resultados obtenidos en la zona exterior (Punta del Este, San Clemente y La Paloma) muestran una gran variabilidad en los resultados, aunque es posible identificar que los mejores resultados se obtienen con valores de rugosidad altos en la zona exterior ($n_{ext} = 0.015$), aunque con comportamientos diferentes según las estaciones. Por ejemplo, los menores sesgos en San Clemente y Punta del Este se obtienen para las configuraciones 18 y 9, y en La Paloma con la configuración 2, mientras que los errores son bajos en Punta del Este para las configuraciones 10 y 13 mientras que en San Clemente y La Paloma para esas configuraciones los errores son intermedios.

4.2.2. Eventos Extremos

Del análisis de la variación de los eventos extremos (altos y bajos) con las configuraciones se observa que hay una importante influencia en la representación de extremos. Analizando particularmente las configuraciones con número de Manning *n* uniforme y *Cd* constante (Tabla 2), se comparan por un lado las pruebas con $Cd = 1.5 \times 10^{-6}$ (conf. 8, 9, 10) y por otro lado las pruebas con Cd = 2.0×10^{-6} (conf. 11, 12, 13). Se observa que a medida que el coeficiente

disminuye, el modelo pronostica una mayor cantidad de eventos extremos altos en todas las estaciones. Para el caso del Cd sucede lo contrario, a medida que el Cd aumenta, el modelo pronostica una mayor cantidad de eventos extremos altos. Lo mismo se observa en los resultados obtenidos con n uniforme y Cd variable (configuraciones 14,15,16,17). A su vez, observa que las configuraciones se que pronostican más eventos (se incrementa a) también incrementan el valor de b, osea que por un lado se pronostican eventos que no estaban pronosticados en configuraciones, pero también las otras se pronostican más eventos que no ocurren en la realidad. Las configuraciones que representan las mayores proporciones de eventos de niveles extremos altos son la 11 y la 16. Analizando detalladamente cómo las distintas configuraciones representan los niveles extremos bajos se observan tendencias similares a la representación de niveles extremos altos. Es decir, a medida que el n (uniforme) disminuye, el modelo pronostica una mayor cantidad de eventos extremos bajos para la totalidad de las estaciones, mientras que para el caso del Cd sucede lo opuesto. Se destacan las configuraciones 8 y 11 en la representación de niveles extremos bajos.

Los estadísticos calculados a partir de la matriz de contingencia 2×2 para eventos extremos altos y bajos se presentan para todas las estaciones mareográficas y para todas las configuraciones en la Figura 8 y Figura 9, respectivamente. En las estaciones que mejor se representan con el modelo los extremos altos son La Paloma, Punta del Este, Pilote Norden y Colonia, en las cuales con alguna configuración se supera el valor de TS = 0,6; HR altos mayores a 70% y FAR bajos menores a 40%. En las restantes estaciones se logran valores de HR altos pero con pronósticos erróneos también elevados (FAR altos) lo que se traduce en valores de TS menores a 0,5. En cuanto a los eventos extremos bajos se obtienen valores de TS cercanos a 0,6 con alguna configuración para La Paloma, Punta del Este, Montevideo, Atalaya, Pilote Norden y Colonia. Es importante recordar que el sesgo (diferencia de nivel medio) tiene gran influencia en la representación de eventos extremos.

4.3. Nueva configuración prototipo

Como se expuso en la sección anterior, hay una gran variabilidad de los resultados con las estaciones mareográficas analizadas, con algunas configuraciones que mejoran resultados en la zona interior pero no así en las otras zonas, y viceversa. No obstante, en relación a la configuración 4 seleccionada inicialmente para realizar el pronóstico, varias configuraciones analizadas generan



Figura 8. Parámetros estadísticos obtenidos a partir de la matriz de contingencia para eventos extremos altos para las 19 configuraciones analizadas en las 10 estaciones mareograficas; TS (panel superior), HR (panel intermedio) y FAR (panel inferior). Periodo de tiempo 2019-2020.



Figura 9. Parámetros estadísticos obtenidos a partir de la matriz de contingencia para eventos extremos bajos para las 19 configuraciones analizadas en las 10 estaciones mareograficas; TS (panel superior), HR (panel intermedio) y FAR (panel inferior). Periodo de tiempo 2019-2020.

mejores resultados globalmente, tanto en el análisis de series continuas como en el de eventos extremos (por ejemplo configuraciones 8, 9, 11, 12, 18 y 19). Como nueva configuración del prototipo se selecciona la configuración 19 y a partir de junio 2022 el pronóstico publicado es con esa configuración en el modelo numérico. No obstante, surge a partir de estos resultados la necesidad de contar con varias configuraciones del pronóstico según la estación (o región) en la cual se quiera obtener mejores resultados. Por ejemplo, si el objetivo fuera generar un pronóstico lo mejor posible para la zona de Colonia, se podría utilizar la configuración 12, mientras que si el foco está en La Paloma la configuración que produce un mejor pronóstico sería la configuración 17.

5. Discusión

La dinámica de niveles de marea en el Río de la Plata y el Frente Marítimo está fuertemente influenciada por la onda de marea meteorológica que ingresa por el sur proveniente de la plataforma argentina y por las transformaciones que sufre la misma durante su propagación en toda el área, principalmente la influencia de los vientos fuertes, la presión atmosférica, la fricción de fondo y los cambios de sección. En [10], se discuten los principales aspectos de la propagación de la onda de marea meteorológica en el área de estudio: los eventos de marea meteorológica alta se generan por vientos del sur-suroeste y los eventos de marea meteorológica baja se generan por vientos del noroeste-oeste. También en [10], se presenta un análisis de los tiempos de viaje promedio de la onda de marea meteorológica entre Mar del Plata y el resto de las estaciones, obteniendo valores promedio de 16 a 18 horas hasta Buenos Aires y Colonia, y del orden de 12 horas hasta la La Paloma.

Esto muestra la gran influencia que tiene la señal de marea en Mar del Plata en la marea de toda la zona de estudio, y por tanto el error que se tiene actualmente en la representación del nivel en Mar del Plata en el modelo de pronóstico (asociado a la condición de borde del modelo global) impone un error de base en los resultados que se obtienen con el modelo hidrodinámico. Este es uno de los aspectos que se espera abordar en una nueva etapa de ajuste del pronóstico, en la cual se trabajaría en el ajuste del nivel medio en la condición de borde de manera de representar la variabilidad del nivel medio observado en los datos medidos en Mar del Plata. Además, se analizará la posibilidad de utilizar el modelo del Atlántico Sur de modalidad hindcast implementado en el IMFIA en modalidad pronóstico para lo cual se deberá modificar el forzante atmosférico por el

pronóstico meteorológico global NCEP que utiliza actualmente el sistema PronUy_RPFM.

Otro aspecto relevante en relación a la propagación de mareas es la gran influencia del forzante atmosférico (principalmente vientos) en el dominio Río de la Plata y Frente Marítimo. El modelo de pronóstico forzado con NCEP reproduce los principales eventos máximos altos y bajos lo que indica que el forzante atmosférico es de buena calidad. No obstante, estudios de los reanálisis de vientos disponibles del NCEP (que son productos posteriores en base a pronósticos y la asimilación de datos) muestran, al comparar con datos altimétricos y medidos, que hacia el Río de la Plata los errores en la representación de los vientos medidos aumentan en relación a los que se obtienen en el Frente Marítimo [26]. Así, uno de los próximos pasos a seguir para mejorar el pronóstico de niveles es utilizar vientos locales en el dominio de estudio como forzante atmosférico. Actualmente en el IMFIA se está trabajando en la implementación de un pronóstico local en la región con el modelo numérico de atmósfera WRF, en base a la experiencia del pronóstico para energía eólica desarrollada en el IMFIA [27], que podrá incorporarse al pronóstico de niveles del PronUy_ RPFM.

Por otra parte, resulta de interés incorporar al pronóstico de niveles de mar disponible actualmente el efecto variable de los caudales fluviales (ríos Uruguay y Paraná) modificando la condición de borde actual. Para esto deberán analizarse diversas opciones, como considerar valores de caudales fluviales recientes o incluso incorporar pronósticos como los que desarrolla el Instituto Nacional del Agua (INA).

Luego del proceso de recalibración descripto en la sección 4, el prototipo_1 genera un pronóstico de los niveles de marea en todo el Río de la Plata de buena calidad, captando los aspectos principales de la dinámica de marea en todo el dominio, incluyendo los eventos de niveles extremos altos y bajos. No obstante, la configuración seleccionada es un compromiso analizando todas las estaciones, pero otras configuraciones analizadas reproducen mejores resultados en algunas estaciones (y peores resultados en otras). Esto se debe a que la complejidad de la dinámica del estuario dificulta tener un modelo que represente correctamente los niveles en todo el dominio y se hace necesario pasar a un esquema de un pronóstico basado en un conjunto de configuraciones del modelo de las cuales algunas representan mejor los niveles en una zona y otras en otra zona u estación.

Finalmente, es importante mencionar la necesidad de definir la problemática específica que debe atender un pronóstico de este tipo y a qué usuarios responde, pues en base a eso se generan productos específicos e indicadores de calidad específicos. Es de esperar que futuras mejoras del pronóstico generado se desarrollen en base a dicha lógica de interacción con los interesados directamente.

6. Conclusiones

Se ha generado un pronóstico de un horizonte temporal de tres días de los niveles de marea para el Río de la Plata, el Frente Marítimo y toda la costa uruguaya, que está disponible en tiempo real y publicado para todos los usuarios. Este pronóstico se basa en un modelo hidrodinámico bidimensional integrado en vertical que es forzado por pronósticos de marea proveniente del Atlántico Sur y pronósticos meteorológicos (vientos y presiones). El modelo ha sido ajustado para representar los niveles medidos en 10 mareógrafos distribuidos en todo el dominio de cálculo. El pronóstico disponible permite predecir con buena calidad los niveles tanto en condiciones medias como los niveles extremos altos y bajos.

El sistema PronUy_RPFM está diseñado para trabajar en modalidad desarrollo y modalidad producción. En la primera se realizan nuevos prototipos ya sea para mejorar el pronóstico (mediante modificación de condiciones de borde, o nuevas parametrizaciones del modelo) ó para generar nuevos pronósticos (incorporación de nuevos procesos en los modelos como ser corrientes tridimensionales o salinidad). Una vez que los cambios son satisfactorios se pasan a producción que refiere a un producto que ha sido evaluado y documentado y que por lo tanto puede difundirse. Esto permite una mejora continua del sistema de pronóstico.

Al momento se está trabajando en varias mejoras del sistema. Por un lado, la necesidad de minimizar el error que se impone en la condición de borde de niveles a través del modelo global y del nivel medio impuesto. Por otra parte, la necesidad de considerar un pronóstico atmosférico local para lo cual se está incluyendo en el sistema PronUy_RPFM el desarrollo de un pronóstico de vientos y presiones desarrollado en el IMFIA. Por último, actualmente se está trabajando en la implementación del modelo numérico MOHID en su versión 3D para modelar la temperatura y salinidad en el estuario. Una vez finalizada dicha implementación la misma se incluirá en el sistema de pronóstico PronUy_RPFM. Este caso considera nuevas condiciones de borde, obtenidas de los mismos modelos globales utilizados en el caso del pronóstico de nivel de mar (RTOFS-HYCOM y GFS de NOAA) como son temperatura, radiación solar y humedad relativa en superficie, salinidad y temperatura del agua en la frontera oceánica. Por último, es importante mencionar que en base al pronóstico de niveles generado se incluirá en el sistema PronUy_RPFM un pronóstico local de oleaje en base a desarrollos realizados en modalidad hindcast en el IMFIA.

7. Agradecimientos

El trabajo presentado es fruto de varios años de trabajo durante los cuales el apoyo de varias instituciones ha sido fundamental. Se destacan en particular las becas de Maestría y Doctorado otorgadas por la Comisión Académica de Posgrado de la UdelaR (CAP-UdelaR), y los proyectos de investigación financiados por la Comisión Sectorial de Investigación Científica de la UdelaR (CSIC) (Programas I+ D 2004, 2008 y 2012), y en especial el Programa Grupos I+ D 2018; y las becas de maestrías otorgadas por la Agencia Nacional de Investigación e Innovación.

Disclosure statement

No potential conflict of interest was reported by the author(s).

ORCID

Mónica Fossati (D) http://orcid.org/0000-0003-4285-674X

References

- [1] Schiller A, Brassington GB. Operational Oceanography in the 21st Century. Springer; 2011.
- Tonani M et al. Status and future of global and regional ocean prediction systems. Journal of Operational Oceanography. 2015;8(sup2):s201-s220. DOI:10.1080/ 1755876X.2015.1049892
- [3] Collado Lizama F, Gyssels P, Mestres M et al. Desarrollo de un sistema de oceanografía operacional para zonas costeras: PORT21. Ribagua. 2020;7(1):28-42. DOI:10.1080/23863781.2020.1804812
- [4] Bayá R, Pedemonte M, Gutiérrez Arce A, et al. An asynchronous computation architecture for enhancing the performance of the weather research and forecasting model. Concurrency Computat Pract Exper. 2020;32:e5750.
- [5] Sampson C, Carrassi A, Aydogdu A, et al. Ensemble Kalman filter for non-conservative moving mesh solvers with a joint physics and mesh location update. Q J R Meteorol Soc. 2021;147:1539–1561. 0035-9009. https://doi.org/10.1002/qj.3980
- [6] Chassignet EP, Pascual A, Tintoré J, et al. New frontiers in operational oceanography. GODAE OceanView. 2018;815. https://doi.org/10.17125/gov2018
- [7] Aditya N D, Sandhya K G, Harikumar R et al. Development of small vessel advisory and forecast services system for safe navigation and operations at sea. Journal of Operational Oceanography. 2022;15(1):52–67. DOI:10.1080/1755876X.2020.1846267
- [8] Patti B et al. The Fishery and Oceanography Observing System (FOOS): a tool for oceanography and fisheries

science. Journal of Operational Oceanography. 2016; 9 (sup1):s99-s118. DOI:10.1080/1755876X.2015.1120961

- [9] Jackson M, Sienra G, Santoro P, et al. Temporal and spatial variability scales of salinity at a large microtidal estuary. J Mar Sci Eng. 2021;9:860.
- [10] Santoro P, Fossati M, Piedra-Cueva I. Study of the meterological tide in the Río de la Plata. Cont Shelf Res. 2013. DOI:10.1016/j.csr.2013.04.018
- [11] Fossati M, Santoro P, Mosquera R, et al. (2014). Dinámica de flujo, del campo salino y de los sedimentos finos en el Río de la Plata. RIBAGUA-Revista Iberoamericana del Agua,1, 48–63.
- [12] Jackson M, Fossati M and Solari S. Sea Levels Dynamical Downscaling and Climate Change Projections at the Uruguayan Coast. Front. Mar. Sci. 2022;9:846396. DOI:10.3389/fmars.2022.846396
- [13] Maciel F, Santoro P, Pedocchi F. Spatio-temporal dynamics of the Río de la Plata turbidity front; combining remote sensing with in-situ measurements and numerical modeling. Cont Shelf Res. 2021;213:104301.
- [14] Piedra-Cueva I, Fossati M. Residual currents and corridor of flow in the Río de la Plata. Appl Math Model. 2007;31:564–577.
- [15] Santoro P, Fernández M, Fossati M, et al. Preoperational forecasting of sea level height for the Río de la Plata. Appl Math Modell. 2011;35:2462–2478.
- [16] Jackson M, Santoro P, Solari S, et al. Pronóstico retrospectivo (hindcast) de nivel de mar en la Costa de Uruguay. XXVIII Cong. Lat. de Hidráulica. 2018.
- [17] Fernández M, Piedra-Cueva I. Revisión de un modelo regional de marea astronómica implementado sobre la región suroeste del Océano Atlántico. Tesis De Maestria En Mecánica de los fluidos aplicada. Montevideo Uruguay: Universidad de la República; 2011.
- [18] Mehra A, Rivin I, Tolman H et al. A real-time operational global ocean forecast system. Poster session presented at: American Geophysical Union Fall Meeting; 2010 Dec 13–17; San Francisco.

- [19] Garraffo ZD, Cummings JA, Paturi S, et al. RTOFS-DA: real time Ocean-Sea Ice coupled three dimensional variational global data assimilative ocean forecast system. In: E. Astakhova, editor. Research activities in earth system modelling. WMO, World Climate Research Program Report. 2020;6:8-05.
- [20] Lyard F, Allain D, Cancet M, et al. FES2014 global ocean tide atlas: design and performance. Ocean Sci Eur Geosci Union. 2021;17:615–649. 10.5194/os-17-615-2021. hal-03430617.
- [21] Hervouet JM. Hydrodynamics of free surface flows: modelling with the finite element method. Chichester UK: John Wiley & Sons Ltd; 2007.
- [22] Huybrechts N, Villaret C. Large scale morphodynamic modeling of the Gironde estuary. Proc Inst Civ Eng Marit Eng. 2013;166(2):51–62.
- [23] Langendoen EJ, Mendoza A, Abad JD, et al. Improved numerical modeling of morphodynamics of rivers with steep banks. Adv Water Resour. 2016;93(A):4–14.
- [24] Santoro P, Fossati M, Tassi T, et al. A coupled wavecurrent-sediment transport model for an estuarine system: application to the Río de la Plata and Montevideo Bay. Appl Math Model. 2017;52:107–130.
- [25] Wilks DS. Statistical methods in the atmospheric sciences (International geophysics series vol 59). 2nd ed. New York: Academic; 2006. p. 464.
- [26] Alonso R, Solari S. Improvement of the highresolution wave hindcast of the Uruguayan waters focusing on the Río de la Plata Estuary. Coastal Eng. 2020;161:103724.
- [27] Gutiérrez, A, de Almeida, E, Porrini, C, Romero, M, Cazes, G, Alisson Bandeira, A, Moreira, D, Cataldo, J. Pronósticos operativos de energía eólica, para la gestión de los sistemas eléctricos en la Región. ENERLAC. Revista de energía de Latinoamérica y el Caribe, [S.I.]. 2018;2(1):28–41. http://enerlac.olade.org/index.php/ ENERLAC/article/view/57