

**XXV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
SAN JOSÉ, COSTA RICA, 9 AL 12 DE SETIEMBRE DE 2012**

**REVISIÓN Y MEJORA DE UN MODELO REGIONAL DE MAREA
ASTRONÓMICA IMPLEMENTADO SOBRE LA REGIÓN SW DEL
OCÉANO ATLÁNTICO**

Mariana Fernández, Pablo Santoro, Mónica Fossati y Ismael Piedra-Cueva

Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA), J. Herrera y Reissig 565, Montevideo, Uruguay
mfernand@fing.edu.uy, psantoro@fing.edu.uy, mfossati@fing.edu.uy, ismaelp@fing.edu.uy

RESUMEN:

En este trabajo se realiza la mejora del modelo pre-operacional (proyecto PDT) del flujo del Río de la Plata implementado hace varios años en el IMFIA. Se revisaron las principales características de implementación de la componente hidrodinámica del modelo pre-operacional PDT con el objetivo de mejorar la representación de la marea astronómica en el Río de la Plata. En este trabajo se presenta la metodología utilizada y los principales resultados obtenidos en dicho proceso de revisión. Como resultado del análisis de sensibilidad del modelo a la batimetría, el tiempo de relajación y el número de Manning, se observó que el mayor cambio en las estaciones del Río de la Plata y su frente marítimo se obtuvo al mejorar la batimetría local (el RMSE relativo promedio de la componente M2 bajó un 23%). Por otro lado, en las estaciones costeras ubicadas fuera del Río de la Plata, el parámetro que más influye en la representación de la componente M2 de la marea astronómica es el tiempo de relajación. Por último, se observó que la influencia del número de Manning en los resultados del modelo se ve reflejada únicamente en las zonas de baja profundidad. La nueva configuración obtenida luego del proceso mejora logra mejoras sustanciales en la representación de las principales componentes de la marea astronómica.

ABSTRACT:

A pre-operational tool has been developed for the Rio de la Plata River based on the application of last-generation hydrodynamic and atmospheric numerical models. The aim of this study is to improve the representation of tidal sea-surface height variations obtained with the hydrodynamic model (MOHID). To achieve this, the main implementation characteristics of the hydrodynamic model, such as model domain, bathymetry, bottom friction and open boundary condition, were reviewed. Sensitivity tests to these characteristics allow us to investigate their individual impact on the model's results and to obtain an optimal solution as determined by comparisons with several coastal tide gauges. When comparing the model results with the sea level series measured at coastal stations, particular attention was paid to the most energetic tidal component: the principal lunar semidiurnal M2. A significant improvement at the coastal stations of the Rio de la Plata was achieved by complementing the GEBCO bathymetric database with local data. Noticeable improvements over most of the coastal stations within the model domain were obtained by tuning the relaxation time (Blumberg and Kantha boundary condition) and the bottom friction coefficient. The new configuration improves the obtained results for the main tidal components in the Río de la Plata region.

PALABRAS CLAVES:

Modelo de marea astronómica, MOHID, Río de la Plata

INTRODUCCIÓN

Desde hace varios años en el IMFIA se vienen desarrollando tareas de investigación en el área de la modelación numérica del Río de la Plata (Fossati & Piedra-Cueva, 2007). Siguiendo esta línea de investigación y en el marco de un proyecto del Programa de Desarrollo Tecnológico (PDT), durante los años 2007 y 2008 se desarrolló en el IMFIA un sistema pre-operacional capaz de efectuar previsiones de niveles en la región del Río de la Plata (Santoro et al., 2011). Un sistema de este tipo tiene una gran cantidad de aplicaciones directas, como ser la gestión del transporte fluvio-marítimo, la planificación de estrategias de rescate frente a accidentes marítimos, tomar medidas de contingencia en caso de derrames de contaminantes, entre otras. Lo anterior hace que su desarrollo sea incuestionable.

Si bien durante el proyecto PDT se lograron grandes avances en el desarrollo de un modelo pre-operacional para el Río de la Plata, varias preguntas quedaron sin responder. Buscando responder algunos de estos interrogantes se comenzó por revisar las principales características de implementación de la componente hidrodinámica del modelo pre-operacional PDT con el objetivo de mejorar la representación de la marea astronómica en el Río de la Plata. En este trabajo se presenta la metodología utilizada y los principales resultados obtenidos en dicho proceso de revisión.

OBJETIVOS

La principal motivación de este trabajo es mejorar la representación de la marea astronómica del modelo pre-operacional PDT, con el objetivo de avanzar en el desarrollo de una herramienta de pronóstico de las condiciones del flujo en el Río de la Plata y su frente marítimo. Para ello se realizó una revisión de las principales características de implementación de la componente hidrodinámica del modelo implementado.

Es importante resaltar que si bien el Río de la Plata es un ambiente micromareal, la correcta representación de la marea astronómica constituye una de las bases de un sistema de pronóstico. Esto se debe a la necesidad de considerar la interacción entre las ondas de marea astronómica con otros forzantes que gobiernan la hidrodinámica del Río de la Plata como ser las ondas generadas por efectos meteorológicos, el efecto del aporte fluvial de los Ríos Uruguay y Paraná y el viento local.

Estrategia de modelación

El modelo pre-operacional PDT (Santoro et al., 2011) parte de un modelo hidrodinámico regional que cubre la región SW del océano Atlántico de forma de simular la generación y propagación de los efectos meteorológicos. Este primer nivel es forzado con un modelo global de marea astronómica (FES2004) y un modelo atmosférico de mesoescala (WRF), el cual a su vez recibe las condiciones de contorno de un modelo atmosférico global de pronóstico (GFS).

ESTRATEGIA DE MODELACIÓN

El modelo pre-operacional desarrollado en el marco del proyecto PDT (en adelante modelo pre-operacional PDT) parte de un modelo hidrodinámico regional que cubre la región SW del océano Atlántico de forma de simular la generación y propagación de los efectos meteorológicos. Este primer nivel es forzado con un modelo global de marea astronómica (FES2004) y un modelo atmosférico de mesoescala (WRF), el cual a su vez recibe las condiciones de contorno de un modelo atmosférico global de pronóstico (GFS). El modelo pre-operacional PDT incluye un segundo nivel (submodelo) enfocado en la zona del Río de la Plata que recibe como condiciones de borde los resultados obtenidos con el modelo regional. Tanto en el caso del modelo regional como para el submodelo se utilizó el modelo hidrodinámico MOHID (Figura 1).

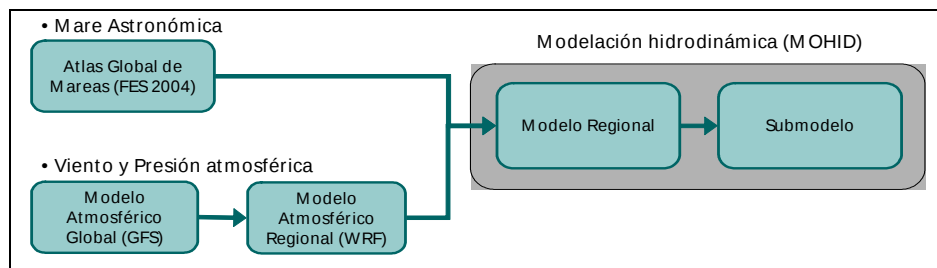


Figura 1.- Esquema del sistema de modelos que conforman el modelo pre-operacional PDT.

METODOLOGÍA

Las características de implementación del modelo hidrodinámico regional que fueron revisadas en este trabajo son: el dominio de cálculo, la batimetría, la rugosidad de fondo y la condición de borde en la frontera abierta. La revisión de cada una de estas características de implementación incluyó un análisis de sensibilidad del modelo a los distintos parámetros y la posterior selección de la mejor configuración en base a los resultados obtenidos.

Revisión de la extensión del dominio regional

Partiendo de la configuración utilizada para el modelo pre-operacional PDT y considerando los dominios utilizados en otros trabajos de modelación numérica a escala regional realizados en la región de interés, se realizó en primer lugar un análisis de sensibilidad a la extensión del dominio de cálculo. El mismo consistió en la realización de tres simulaciones con marea astronómica de 1 año de duración utilizando tres dominios de cálculo bien diferentes (Figura 2). Para comparar los resultados del modelo obtenidos con los dominios considerados, se diseñó una red de puntos de monitoreo en el área de intersección de los tres dominios y se analizaron las series de niveles horarios en dichos puntos. En primer lugar se realizó un análisis de componentes principales (ACP/EOF) y luego se realizó una comparación de los resultados obtenidos con los distintos dominios a través de varios indicadores del tipo RMSE (Root Mean Square Error). Concluido el análisis de sensibilidad del modelo a la extensión del dominio de cálculo se seleccionó un dominio de cálculo con el cual se realizaron el resto de las pruebas.

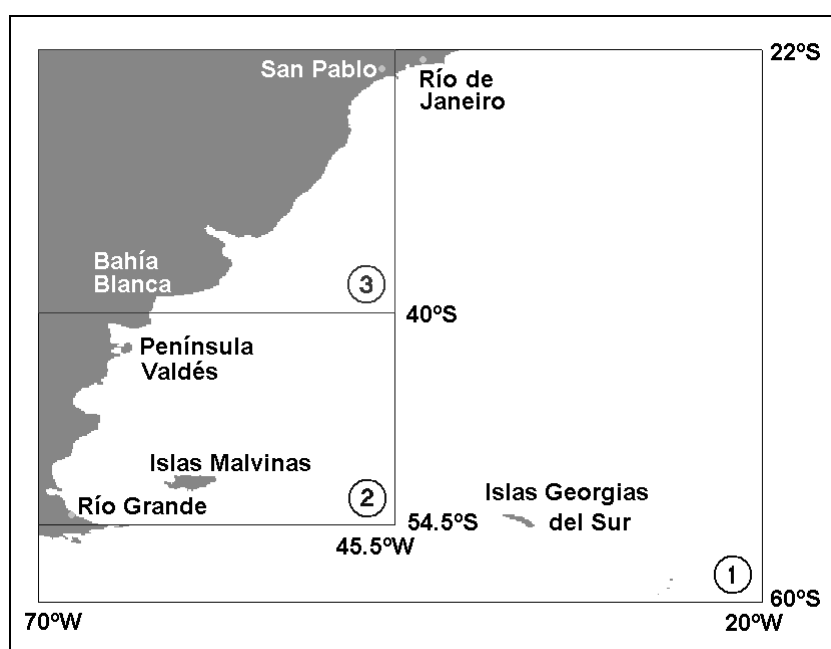


Figura 2.- Ubicación de los dominios de cálculo.

Revisión de la batimetría a utilizar

En esta etapa se comparó la batimetría utilizada en la configuración del modelo pre-operacional PDT con fuentes más recientes de datos batimétricos, prestando especial atención a la zona del Río de la Plata. Para evaluar la sensibilidad del modelo a la batimetría, se realizaron varias simulaciones con marea astronómica considerando distintas batimetrías. Las distintas batimetrías fueron generadas considerando distintas series de datos batimétricos y utilizando distintos métodos de filtrado o suavizado.

En la Tabla 1 se presentan las distintas fuentes de datos batimétricos considerados, incluyendo el área de extensión, la resolución o cantidad de datos y la fecha de la última actualización. La carta batimétrica del área del proyecto FREPLATA (Protección Ambiental del Río de la Plata y su Frente Marítimo: Prevención y Control de la Contaminación y Restauración de Hábitats¹²) fue realizada según levantamientos en el año 2002 y cuenta con 4052 puntos que van hasta los 5439 m de profundidad. Por otro lado, la información provista por el SNH (Servicio de Hidrografía Naval argentino) incluye 11594 datos batimétricos actualizados por última vez en el año 2003. La información batimétrica del GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans¹³) contiene datos de sondeos y datos satelitales de calidad controlada interpolados a una grilla global con una resolución de 1 minuto por 1 minuto (GEBCO One Minute Grid). Actualmente el GEBCO ofrece datos batimétricos interpolados a una grilla más fina de 30 segundos por 30 segundos (GEBCO_08 Grid) pero a efectos de generar una batimetría en una grilla de de 0.1° de resolución horizontal (resolución de la grilla de cálculo) y con el objetivo de evitar el manejo de un gran volumen de datos se consideró que la información disponible en la grilla global de 1 minuto por 1 minuto era suficiente.

Tabla 1.- Fuentes de datos batimétricos consideradas en el estudio.

Fuente	Cantidad datos	Límite Norte-Sur	Límite Este	Última actualización
FREPLATA	4052 puntos	-33°.00; -40.00°	-49.50°	2002
SNH	11594 puntos	-31.45°; -40.5°	-51.00°	2003
GEBCO	1' x 1'	Dominio global		2008

La batimetría del modelo pre-operacional se construyó utilizando los datos extraídos del GEBCO (correspondientes a una actualización anterior del año 2003) y los datos provistos por el SHN. Sin embargo, en el procedimiento de generación de la batimetría los datos del SHN fueron superpuestos a los del GEBCO sin considerar posibles discrepancias entre las dos fuentes de información. La información del GEBCO no tiene una buena precisión en las zonas de baja profundidad. En esta nueva etapa se corrigió el procedimiento de generación de la batimetría que será luego ingresada al modelo hidrodinámico sustituyendo los datos del GEBCO por datos locales en la región del Río de la Plata. Para acoplar los datos del GEBCO con los datos locales, se eliminaron aquellos datos del GEBCO con profundidades menores a 50 m ubicados dentro de la región comprendida entre -33.5° y -38.5° de latitud. De esta forma, se eliminan los datos del GEBCO con mayor incertidumbre en una región donde se dispone de datos de mejor calidad, conservando a la vez una zona de intersección entre las dos series de datos de forma de evitar una transición abrupta. A partir de la combinación de las distintas fuentes de información se definieron 4 batimetrías distintas, utilizando el procedimiento descrito para combinar distintas fuentes de información.

Por otro lado, en el procedimiento de generación de la batimetría del modelo pre-operacional PDT se aplicó un filtro utilizando una herramienta del MOHID (FilterBathymetry). Dicho filtro suaviza las diferencias de profundidad entre celdas adyacentes promediando el valor de la profundidad en cada celda con el promedio de los valores de profundidad de las celdas adyacentes:

$$p_{i,j}^* = 0.5 \cdot p_{i,j} + 0.5 \cdot \left(\frac{p_{i+1,j} + p_{i+1,j+1} + p_{i,j+1} + p_{i-1,j+1} + p_{i-1,j} + p_{i-1,j-1} + p_{i-1,j} + p_{i-1,j-1}}{8} \right) \quad [1]$$

Donde $p_{i,j}$ y $p_{i,j}^*$ es la profundidad en la celda i,j antes y luego de aplicar el filtro, respectivamente. Los índices i,j indican la ubicación de cada celda en términos de las filas y columnas de la grilla de cálculo. La expresión anterior es válida para un filtro de radio 2. Al aumentar el radio del filtro aumenta la cantidad de celdas vecinas que son incluidas en el segundo término del miembro derecho de la ecuación. Con el fin de evaluar la influencia del filtro en la solución del modelo, se generaron además dos batimetrías a partir de la misma información de base, una con la aplicación de un filtro de radio 2 y otra con aplicación de un filtro de radio 5. En la Tabla 3 se sintetizan las características de los casos de batimetrías definidos y evaluados

Tabla 2.- Principales características de las batimetrías testeadas.

Indice	Nombre	Fuente datos	Filtro
1	GEBCO	GEBCO	Sin filtro
2	GEBCO_FREPLATA	GEBCO + FREPLATA	Sin filtro
3	GEBCO_SHN	GEBCO + SHN	Sin filtro
4	GEBCO_SHN_FREPLATA	GEBCO + SHN + FREPLATA	Sin filtro
5	GEBCO_SHN_FREPLATA_Filtro	GEBCO + SHN + FREPLATA	Filtro (Radio = 2)
6	GEBCO_SHN_FREPLATA_Filtro5	GEBCO + SHN + FREPLATA	Filtro (Radio = 5)

Revisión de las condiciones de borde en bordes laterales abiertos

En tercer lugar, se analizó la condición de borde a ser utilizada en los bordes laterales abiertos (OBC). En la configuración del modelo pre-operacional PDT para el caso de marea astronómica se trabajó con una OBC del tipo “clamped” utilizando como solución de referencia la del modelo global de marea FES2004. En esta etapa se implementó la OBC de radiación de Blumberg & Kantha (Blumberg & Kantha, 1985) utilizando también como solución de referencia la del modelo FES2004 y se realizó un análisis de sensibilidad al tiempo de relajación (Tlag). En la Tabla 3 se presentan los valores de Tlag testeados. En dicha tabla se puede observar que el tiempo de relajación es variable en la frontera abierta en función de la profundidad. En aquellas celdas de la frontera con gran profundidad, el tiempo de relajación aplicado es del orden de los 100 s mientras que en las celdas con profundidad reducida el tiempo de relajación es del orden de los 1000 s, manteniendo la relación recomendada 1:10. Se consideraron como celdas de gran profundidad a aquellas celdas con una profundidad mayor a los 3000 m y como celdas de baja profundidad a aquellas celdas con una profundidad menor a los 200 m. Entre las celdas de baja profundidad y las de gran profundidad se definió una zona de transición en la cual el tiempo de relajación varía linealmente entre el Tlag elegido para las celdas costeras y el Tlag de las celdas con gran profundidad.

Tabla 3.- Tiempos de relajación considerados para el análisis de sensibilidad del parámetro Tlag

Indice	Nombre	Tiempo de relajación (s)	
		Zona profunda (h > 3000 m)	Zona somera (h < 200 m)
1	TLag1000-100	100	1000
2	TLag1500-150	150	1500
3	TLag2000-200	200	2000

Revisión de la condición de borde en el fondo

Por último se estudió el efecto de la rugosidad de fondo. En la configuración del modelo pre-operacional PDT se utilizó un valor constante de la rugosidad absoluta igual a 10^{-4} m. En esta etapa se implementó la formulación del coeficiente de fricción en función del número de Manning (n) y se realizó un análisis de sensibilidad al valor de n. Se realizaron tres simulaciones con marea

astronómica considerando un número de Manning uniforme en todo el dominio e igual a 0.005, 0.010 y 0.015.

Para evaluar la sensibilidad del modelo a la batimetría, el tiempo de relajación y el coeficiente de rugosidad de Manning se realizaron varias simulaciones con marea astronómica de tres meses de duración variando el parámetro a estudiar y dejando fijas las demás características de implementación. Luego, para comparar los resultados del modelo obtenidos al variar el parámetro en estudio se realizó un análisis armónico de las series de niveles obtenidas en varias estaciones a lo largo de la costa, prestando especial atención a los resultados obtenidos para la componente M2 por ser ésta la responsable de más del 65% de la energía de las ondas de marea astronómica en la región de estudio (D'Onofrio et al. 1999).

La amplitud y fase de la componente M2 obtenida a partir de la serie de niveles modelados fue comparada con los valores de fase y amplitud teóricos en las distintas estaciones consideradas a través del RMSE relativo (normalizado por la amplitud observada):

$$RMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{2}(H_M^2 - 2H_M H_T \cos(G_M - G_T) + H_T^2)}}{H_T} \quad [2]$$

Siendo H_M y G_M los valores de amplitud y fase de la componente M2 obtenidos a partir de la serie de niveles modelada y H_T y G_T los valores de amplitud y fase teóricos de la misma componente, obtenidos a partir la serie de niveles medidos.

Las estaciones analizadas incluyen además de las estaciones del Río de la Plata en las cuales se dispone de datos de niveles, varias estaciones ubicadas sobre la costa sur de Argentina en las cuales se dispone de los valores teóricos de amplitud y fase de la componente M2 (Figura 3).

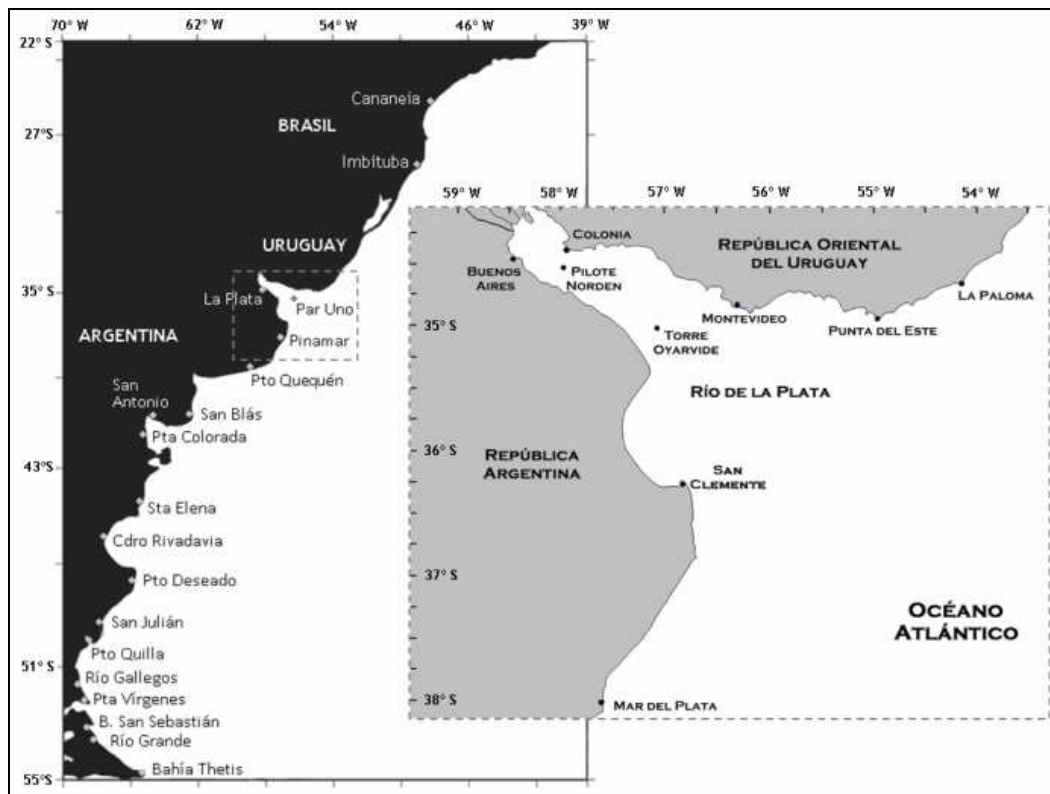


Figura 3.- Ubicación de las estaciones mareográficas en las cuales se comparó la amplitud y fase de la componente M2.

Por otro lado, con el objetivo de realizar una comparación espacial en zonas no costeras del dominio, se calcularon los mapas de líneas de isofase e isoamplitud para las distintas pruebas realizadas y se compararon con sus análogos obtenidos a partir de los resultados de otros modelos.

En todas las simulaciones realizadas se consideró la solución del modelo global de marea FES2004 como condición de borde en los bordes abiertos del dominio. También se consideró en todas las simulaciones el ingreso del caudal fluvial de los ríos Paraná y Uruguay a través de dos celdas que forman parte de la frontera oeste del Río de la Plata.

Las variables del sistema fueron determinadas utilizando un paso de tiempo de cálculo de 3 minutos (180 s). Por otro lado, en todas las simulaciones realizadas la viscosidad horizontal fue determinada utilizando la formulación de Smagorinsky con un factor de 0.1, siendo el mismo un valor extraído de otros trabajos de modelación similares en cuanto a la escala del dominio (Leitão, P. et al., 2004)

Finalmente, todas las simulaciones realizadas parten del reposo y un nivel uniforme igual a 0.91 m y solamente es necesario un tiempo corto de arranque para que las velocidades se ajusten a la acción de los forzantes considerados. De todas formas, para no incluir en el análisis de resultados este período de estabilización, el primer mes (en las simulaciones de 3 meses) o los primeros dos meses (en las simulaciones anuales) fueron descartados para el análisis de resultados del modelo.

Como resultado del proceso de revisión de las principales características de implementación del modelo regional pre-operacional PDT, se alcanzó una nueva configuración del modelo. Posteriormente, se realizó un proceso de evaluación de la nueva configuración del modelo regional (modelo pre-operacional TMF). En dicho proceso de evaluación se comparó el desempeño del modelo pre-operacional TMF con los resultados de otros modelos de mayor y menor escala implementados en la región de estudio. Con el objetivo de investigar cuál es la mejora obtenida en la representación de la marea astronómica con la nueva configuración del modelo regional pre-operacional en comparación con la versión anterior del mismo modelo, se incluyó en el análisis comparativo los resultados obtenidos con el modelo pre-operacional PDT.

RESULTADOS

Revisión de la extensión del dominio regional

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en el análisis de sensibilidad del modelo a la extensión del dominio de cálculo así como otros resultados más recientes (Santoro, 2011) relativos a la propagación de las ondas de marea meteorológica en el Río de la Plata y considerando además otros elementos de practicidad (como ser el tiempo de cálculo y el tamaño de los archivos de salida), se resolvió seleccionar el dominio 2 y continuar el trabajo con dicho dominio.

Revisión de la batimetría a utilizar

En la Tabla 3 se presenta el promedio del RMSE relativo en todas las estaciones consideradas en este análisis. Se presenta también el promedio del RMSE relativo agrupando las estaciones en dos categorías: por un lado las ubicadas en el Río de la Plata y su frente marítimo (estaciones del Río de la Plata), y por otro lado aquellas estaciones ubicadas fuera de esta región (estaciones fuera del Río de la Plata). Las estaciones ubicadas dentro del Río de la Plata y su frente marítimo van desde Mar del Plata hasta La Paloma, mientras que las ubicadas fuera de esta región van desde Bahía Thetis hasta Puerto Quequén sobre la costa argentina y desde Imbituba a Cananeia sobre la costa brasilera. Los valores presentados en la Tabla 3 muestran que al aumentar

la precisión de los datos batimétricos en la región del Río de la Plata y su frente marítimo, el error del modelo baja sustancialmente (de 39.2% a 16.4%) en dicha región manteniéndose casi idéntico en el resto de las estaciones. Por otro lado, se hace evidente que la aplicación del filtro mejora los resultados del modelo en las estaciones ubicadas fuera del Río de la Plata mientras que en las estaciones del Río de la Plata genera un efecto negativo. Sin embargo, los valores presentados en la Tabla 3 muestran que el mayor cambio se observa al mejorar la batimetría local, siendo el cambio observado al aplicar distintos filtros sustancialmente menor.

En base a los resultados anteriores, se construyó una nueva batimetría combinando la versión filtrada y no filtrada de la batimetría GEBCO_SHN_FREPLATA. En la zona exterior del Río de la Plata se utilizó la versión filtrada con el filtro de radio 5 y en la región del Río de la Plata se conservó la versión no filtrada. Por otro lado, se corrigieron los valores de profundidad en las celdas cercanas a las estaciones de Montevideo y La Plata dado que la información provista por el SHN es bastante distinta a la de FREPLATA y pareciendo esta última ser más acertada. En la Figura 4 se presenta una comparación entre la nueva batimetría y la batimetría utilizada en el modelo pre-operacional PDT.

Tabla 3.- Promedio RMSE relativo obtenido para las distintas batimetrías.

Indice	Batimetría	Promedio RMSE relativo (%)		
		Todas las estaciones	Estaciones del Río de la Plata ¹	Estaciones fuera del Río de la Plata
1	GEBCO	37.8	39.2	36.7
2	GEBCO_FREPLATA	27.8	16.6	36.8
3	GEBCO_SHN	29.1	19.3	37.0
4	GEBCO_SHN_FREPLATA	27.9	16.4	37.1
5	GEBCO_SHN_FREPLATA_Filtro	27.4	18.2	34.7
6	GEBCO_SHN_FREPLATA_Filtro5	27.1	18.7	31.4

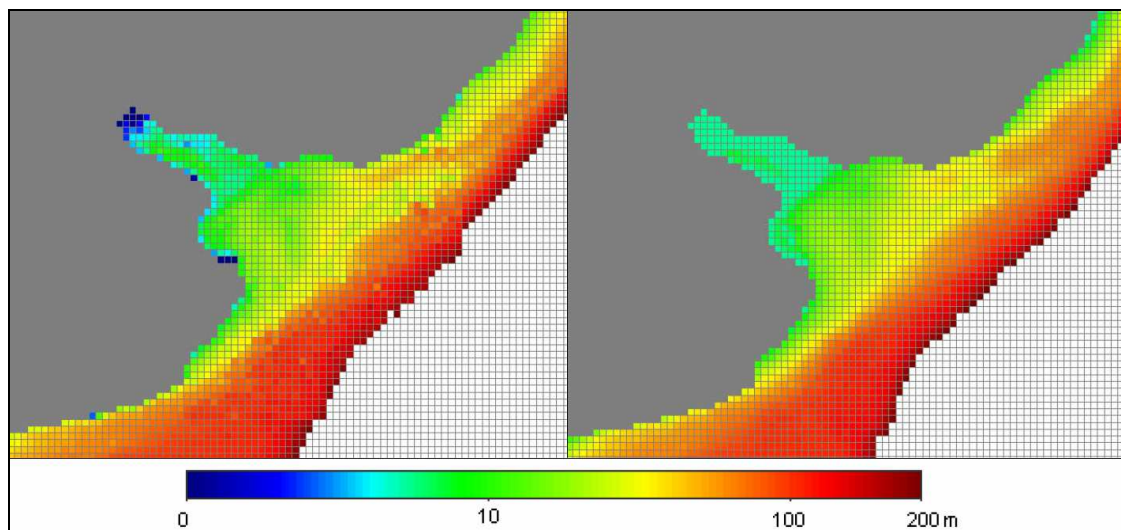


Figura 4.- Comparación de la batimetría seleccionada (izq) con la batimetría original utilizada en el PDT (der) en la región del Río de la Plata y su frente marítimo

Revisión de las condiciones de borde en bordes laterales abiertos

Los resultados obtenidos en la comparación puntual (Tabla 4) muestran que la configuración que presenta los menores errores relativos es la correspondiente a la prueba 1 (TLag = 100 – 1000 s). Por otro lado, de la comparación de mapas (no presentada en el artículo) se concluye que el patrón general de las líneas de isofase e isoamplitud de la principal componente armónica de la

¹ Estaciones que van de Mar del Plata a La Paloma

marea astronómica no se ve significativamente afectado por el tiempo de relajación elegido. En base a los resultados anteriores, para implementar la condición de radiación de Blumberg & Kantha en la frontera abierta del dominio usando como solución de referencia la extraída del modelo global del marea FES2004, se adoptó para el tiempo de relajación el esquema utilizado en la prueba 1.

Tabla 4.- Promedio RMSE relativo obtenido para los distintos valores de T_{Lag}.

Indice	Tiempo de relajación	Promedio RMSE relativo (%)		
		Todas las estaciones	Estaciones del Río de la Plata	Estaciones fuera del Río de la Plata
1	T _{Lag} = 100 – 1000 s	30.1	30.2	30.1
2	T _{Lag} = 150 – 1500 s	32.6	30.2	34.4
3	T _{Lag} = 200 – 2000 s	35.6	30.2	39.7

Revisión de la condición de borde en el fondo

Los resultados obtenidos en la comparación puntual muestran que la configuración que presenta los menores errores relativos en la mayoría de las estaciones consideradas es la correspondiente a la prueba 1 ($n= 0.005$). Por otro lado, de la comparación de mapas se concluye que el patrón general de las líneas de isofase e isoamplitud de la principal componente armónica de la marea astronómica no es sensible al número de Manning elegido. En base a los resultados anteriores, se adoptó para el coeficiente de rugosidad de fondo un número de Manning igual a 0.005. Cabe destacar que en base a la información recopilada de otros trabajos de modelación similares en los cuales se utiliza un coeficiente de rugosidad menor en zonas de menor profundidad en este trabajo también se realizaron varias pruebas disminuyendo el número de Manning en regiones someras. Sin embargo, los resultados obtenidos en estas pruebas no muestran mejoras respecto a los resultados obtenidos con un número de Manning uniforme en todo el dominio.

Síntesis

A modo de resumen de los resultados obtenidos en los análisis de sensibilidad realizados en la Tabla 5 se presenta la variación máxima del promedio del RMSE relativo obtenido para la componente M2 al variar los distintos parámetros o características de implementación revisadas en este trabajo. En dicha tabla se puede observar que el mayor cambio en las estaciones del Río de la Plata se obtuvo al mejorar la batimetría local. Por otro lado, en las estaciones ubicadas fuera del Río de la Plata y su frente marítimo, el parámetro que más influye en los resultados del modelo es el tiempo de relajación. Por último, el parámetro que menos influye en la representación de la componente M2 de la marea astronómica sobre la zona costera del dominio es el número de Manning.

Tabla 5.- Variación máxima del promedio del RMSE relativo para la componente M2

Parámetro	Variación máxima en el promedio del RMSE relativo (%)		
	Todas las estaciones	Estaciones del Río de la Plata	Estaciones fuera del Río de la Plata
Batimetría	10.7	12.8	5.7
Tiempo relajación	5.5	0	9.6
Número de Manning	2.3	4.4	0.7

Los resultados obtenidos (no presentados) en la comparación de los resultados del modelo mejorado TMF con modelos de menor y mayor escala surge que los modelos globales pierden precisión en la representación de las principales componentes de la marea astronómica al adentrarse en el Río de la Plata. Sin embargo, los errores de los modelos globales en las estaciones ubicadas fuera del Río de la Plata son similares a los obtenidos con los modelos regionales en las estaciones del frente marítimo. En cuanto a la representación de la componente M2 en las estaciones ubicadas en la costa sur de Argentina, los modelos globales presentan menores errores que los modelos regionales. Este resultado es consistente con el hecho de que los modelos globales son calibrados

dando mayor importancia a las regiones con gran amplitud de marea. De la comparación entre el modelo pre-operacional TMF y el modelo pre-operacional PDT, se concluye que la nueva configuración del modelo regional pre-operacional logra mejoras sustanciales en la representación de las principales componentes de la marea astronómica.

CONCLUSIONES

Con este trabajo se ha avanzado significativamente en el entendimiento de la propagación de la marea astronómica en la región suroeste del océano Atlántico y en particular en la región del Río de la Plata. Como resultado del análisis de sensibilidad del modelo a la batimetría, el tiempo de relajación y el número de Manning, se observó que el mayor cambio en las estaciones del Río de la Plata y su frente marítimo se obtuvo al mejorar la batimetría local (el RMSE relativo promedio de la componente M2 bajó un 23%). Por otro lado, en las estaciones costeras ubicadas fuera del Río de la Plata, el parámetro que más influye en la representación de la componente M2 de la marea astronómica es el tiempo de relajación. Por último, se observó que la influencia del número de Manning en los resultados del modelo se ve reflejada únicamente en las zonas de baja profundidad.

Se han logrado también grandes avances en la comprensión del efecto que tienen las distintas características de implementación del modelo hidrodinámico MOHID en la representación de la marea astronómica. Esto es sumamente importante para avanzar en el proyecto de modelación operacional del Río de la Plata y constituye una de las bases del mismo. Otro avance significativo alcanzado con este trabajo es la evaluación del desempeño del modelo regional implementado en comparación con otros modelos de marea de mayor y menor escala.

REFERENCIAS

- Blumberg & Kantha** (1985). Open boundary condition for circulation models. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 111.
- D’Onofrio, Fiore, M., Romero, S.** (1999). Return periods of extreme water levels estimated for some vulnerable areas of Buenos Aires. *Continental Shelf Research*, Vol. 19.
- Fossati & Piedra-Cueva** (2007). Numerical modelling of residual flow and salinity in the Río de la Plata. *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 32.
- Leitão, P., Coelho, H., Santos, A., Neves, R.** (2005). Modeling the main features of the Algarve coastal circulation during July 2004: A downscaling approach. *Journal of Atmospheric and Ocean Science*, Vol. 10, pp. 421-462.
- 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*, Vol. 35, No. 5.
- Santoro, P.** (2011). “Estudio de la marea meteorológica en el Río de la Plata”. *Tesis de Maestría en Mecánica de los Fluidos Aplicada*, IMFIA, Facultad de Ingeniería.