

EVALUACIÓN DE UN MODELO HIDRODINÁMICO REGIONAL PRE-
OPERACIONAL

Mariana Fernández, Pablo Santoro, Mónica Fossati, 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:

Desde el año 2007 se viene desarrollando en el IMFIA un modelo pre-operacional basado en la aplicación de modelos numéricos hidrodinámicos y de circulación atmosférica de última generación que sea capaz de efectuar previsiones de las principales variables hidrodinámicas en el Río de la Plata. Este modelo es forzado con marea astronómica y forzantes atmosféricos suministrados por un modelo de circulación atmosférica de mesoescala (WRF). El principal objetivo de este trabajo es evaluar la calidad del modelo pre-operacional regional implementado en el IMFIA para representar la hidrodinámica del Río de la Plata. Con este fin, varios métodos estadísticos han sido utilizados para comparar su desempeño con el de otros modelos de mayor y menor escala. Los resultados obtenidos con el modelo pre-operacional son comparados con los resultados del modelo global de marea FES2004 y con los resultados de un modelo tridimensional implementado en la región del Río de la Plata. Para realizar dichas comparaciones se utilizaron series de niveles horarios en seis estaciones costeras ubicadas en la región de interés. En base a los resultados obtenidos con marea astronómica, se puede afirmar que el modelo pre-operacional es más preciso que el FES2004 y que el modelo tridimensional. Por otro lado, a partir de los resultados obtenidos con marea meteorológica se puede concluir que el modelo pre-operacional es más preciso que el modelo tridimensional para representar anomalías de niveles de marea meteorológica en el Río de la Plata.

ABSTRACT:

Since 2007, IMFIA has been developing a pre-operational model based on the application of hydrodynamic and atmospheric circulation numerical models that is capable of forecasting the main hydrodynamic variables in Rio de la Plata. This model is forced with astronomical tides and atmospheric forcings provided by a mesoscale atmospheric circulation model (WRF). The main purpose of this study is to evaluate the quality of the pre-operational regional model implemented by IMFIA to represent the hydrodynamics of Rio de la Plata. With this aim, several statistical methods were used to compare its performance with other models of bigger and smaller scale. The results obtained with the pre-operational model are compared with the results of the global tidal model FES2004 and with the results of a three-dimensional model implemented in the region of Rio de la Plata. To make such comparisons hourly water level series of six tidal gauges were used. Based on the results obtained with astronomical tide, it can be stated that the pre-operational model is more accurate than the global model FES2004 and the three-dimensional model. On the other hand, from the results obtained with meteorological tide, it can be concluded that the pre-operational model is more accurate than the three-dimensional model when used for representing meteorological tide anomalies in Rio de la Plata.

PALABRAS CLAVES: (1^{era} hoja)

Evaluación, Modelo Pre-operacional, Río de la Plata

INTRODUCCIÓN

En el IMFIA se vienen desarrollando desde hace varios años tareas de investigación y de modelación del Río de la Plata. Uno de los modelos más desarrollados ha sido un modelo numérico tridimensional baroclínico que permite representar el campo hidrodinámico en la zona del Río de la Plata y del Frente Marítimo utilizando como condición de borde datos de niveles en Mar del Plata y La Paloma. Con este modelo se logró una buena representación de niveles y corrientes con marea astronómica y meteorológica en el Río de la Plata. Si bien este modelo permite evaluar diferentes escenarios o situaciones de proyecto, el mismo no sirve para abordar otro tipo de situaciones que requieren información de pronóstico a corto plazo en tiempo real como ser actividades de búsqueda y rescate en accidentes marítimos, ayuda a la navegación por zonas de profundidad restringida, ayuda a la gestión de derrames de contaminantes, etc. Es así que surge la necesidad de contar con un sistema operacional basado en la aplicación de modelos numéricos hidrodinámicos y de circulación atmosférica de última generación que sea capaz de efectuar previsiones de las principales variables hidrodinámicas (niveles, corrientes, sedimentos, oleaje). En respuesta a esta necesidad, desde el año 2007 se viene desarrollando en el IMFIA un modelo pre-operacional para el Río de la Plata.

Actualmente existen varios modelos capaces de predecir la contribución de la marea astronómica y del efecto atmosférico (marea meteorológica) en la variación de niveles a escala global. Si bien los modelos globales alcanzan una precisión del orden de pocos centímetros en zonas de gran profundidad la precisión de estos modelos disminuye abruptamente en las zonas costeras. Es por esto que para alcanzar resultados con mejor precisión en las zonas costeras se desarrollan modelos regionales y/o locales (Lfevre, F. et al., 2000).

En este trabajo se evalúa cual es la mejora obtenida con la implementación de un modelo pre-operacional de escala regional para el pronóstico de niveles en el Río de la Plata frente a modelos de mayor y menor escala implementados en la zona.

OBJETIVO

El principal objetivo de este trabajo es evaluar la calidad de un modelo pre-operacional regional implementado para representar la hidrodinámica del Río de la Plata. Con este fin, varios métodos estadísticos han sido utilizados para comparar su desempeño con otros modelos numéricos de mayor y menor escala implementados en la zona de estudio.

Por otro lado, también se plantea como objetivo evaluar la calidad de los pronósticos de niveles a 96 horas generados con el modelo pre-operacional utilizando el diagrama de Taylor.

CARACTERÍSTICAS DEL AREA DE ESTUDIO

El Río de la Plata es un cuerpo de agua complejo ubicado entre Uruguay y Argentina y vierte en el Océano Atlántico la segunda cuenca de mayor aporte de Sudamérica ($3.170.000 \text{ km}^2$) luego de la cuenca amazónica (Figura 1). A través de los ríos Paraná y Uruguay proviene más del 97% del ingreso de agua dulce al Río de la Plata, siendo la descarga media aproximadamente $22.000 \text{ m}^3/\text{s}$.

La dinámica del Río de la Plata y su Frente Marítimo es muy compleja debido a las variaciones batimétricas, la influencia del aporte fluvial, el efecto de la marea astronómica y meteorológica proveniente del Océano Atlántico y la acción de los vientos locales. El Río de la Plata es un

ambiente micro-mareal en el cual las variaciones de nivel debido a la marea astronómica son mucho menores a las generadas por el efecto del viento y las ondas provenientes del océano.

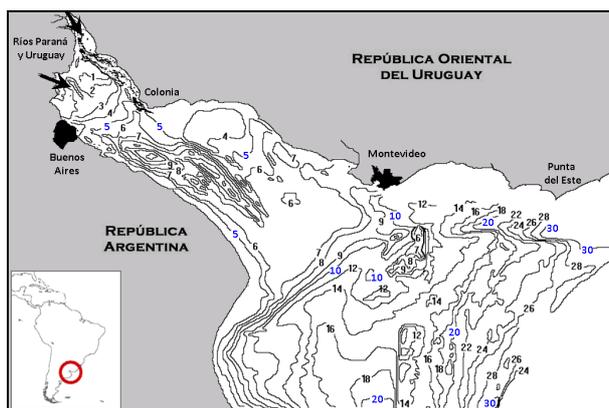


Figura 1.- Ubicación y batimetría del Río de la Plata. Modificada de Ecoplata (1997).

PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LOS MODELOS UTILIZADOS

Tanto el modelo tridimensional como el modelo pre-operacional que serán presentados en este trabajo fueron implementados utilizando el modelo numérico MOHID, desarrollado en el Instituto Superior Técnico - Maretec de Portugal (MARETEC 2006). El MOHID es un modelo de flujo a superficie libre tridimensional baroclínico basado en las ecuaciones de Navier-Stokes con las aproximaciones de Boussinesq e hidrostática. La malla tridimensional está formulada con una aproximación de volúmenes finitos con coordenada vertical sigma que permite una buena simulación de los efectos topográficos.

Modelo FES2004

El FES2004 es la última versión de los atlas de mareas FES generados con un modelo que resuelve las ecuaciones hidrodinámicas de marea. El modelo incluye además un código de asimilación con el cual se asimilan datos de 671 mareógrafos y datos de altimetría satelitales (Topex/Poseidon and ERS). Este modelo es un modelo de dominio global con una resolución espacial de $1/8^\circ$. La solución del FES2004 incluye la amplitud y fase de las siguientes componentes de marea: M2, S2, K2, N2, 2N2, O1, P1, K1, Q1, Mf, Mtm, Mm, Msqm y M4 (Lyard, F. et al., 2006).

Modelo tridimensional

Este modelo fue desarrollado por el IMFIA con el objetivo de representar el flujo en todo el Río de la Plata y gran parte de su Frente Marítimo (Fossati & Piedra-Cueva, 2006). Para esta aplicación el MOHID fue implementado en su versión tridimensional y baroclínica. En las Tablas 1 y 2 se presentan las principales características de implementación del modelo tridimensional utilizadas para simular marea astronómica (MA) y marea meteorológica (MM). En las Figuras 2 y 3 se presenta la malla de cálculo y la batimetría ingresada al dominio de este modelo.

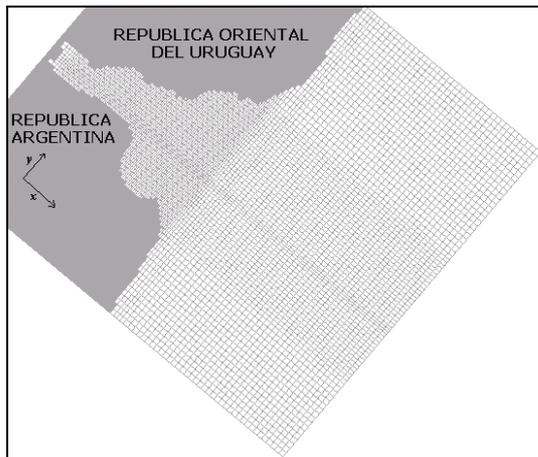


Figura 2.- Malla horizontal de cálculo del modelo 3D.

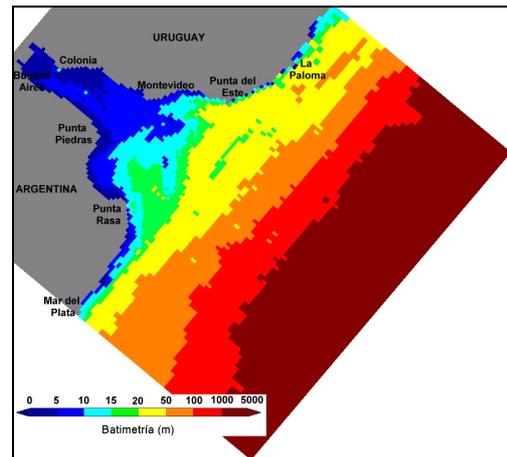


Figura 3.- Batimetría ingresada al modelo 3D.

Modelo Pre-operacional

Para representar en un pronóstico la componente meteorológica del flujo en el Río de la Plata, se deben considerar en el sistema implementado los procesos atmosféricos que actúan sobre la plataforma continental y sobre la región oceánica adyacente. Por esta razón, para desarrollar el modelo pre-operacional del Río de la Plata se utilizó la técnica de modelos encajados partiendo de un primer nivel a escala regional que abarca gran parte del Atlántico Sur. Este primer nivel es forzado con mareas astronómicas y con los forzantes atmosféricos suministrados por el modelo de circulación atmosférica de mesoescala WRF, el cual a su vez recibe las condiciones de contorno de un modelo atmosférico de pronóstico global (GFS). Las condiciones de marea astronómica sobre el borde oceánico del dominio son obtenidas a partir del atlas global de marea FES2004. En la Figura 3 se presenta un esquema del modelo pre-operacional implementado. Es importante resaltar que la capacidad de pronóstico del modelo pre-operacional surge de incluir la solución del modelo atmosférico de pronóstico GFS en el sistema de modelos.

El modelo pre-operacional implementado incluye un segundo nivel (modelo intermedio) de mayor resolución horizontal enfocado en la zona del Río de la Plata que recibe como condición de borde en los bordes laterales abiertos los resultados obtenidos con el modelo regional del Atlántico Sur. En la Figura 4 se presenta sombreado en celeste el dominio del nivel intermedio sobre la malla de cálculo del nivel regional. En la Figura 5 se presenta un detalle de la batimetría ingresada al modelo en el Río de la Plata.

Como fue mencionado anteriormente, el modelo numérico utilizado para representar la hidrodinámica del sistema es el MOHID. Para esta aplicación el MOHID fue implementado en su versión bidimensional y barotrópica. En las Tablas 1 y 2 se presentan las principales características de implementación del nivel regional e intermedio utilizadas para simular marea astronómica (MA) y marea meteorológica (MM).

Este sistema pre-operacional fue calibrado y validado utilizando información de niveles medidos en varias estaciones mareográficas distribuidas en la zona de interés (Piedra-Cueva et al., 2008).

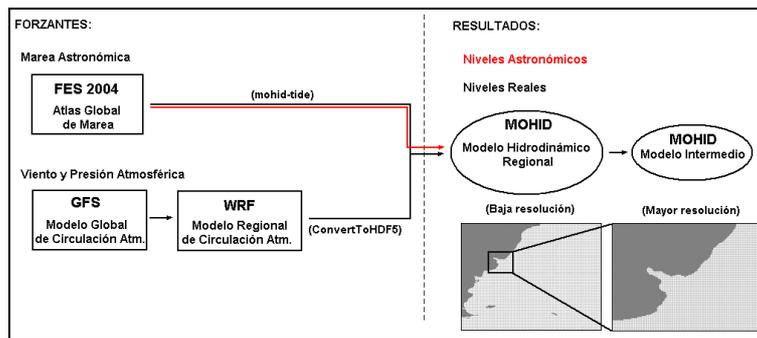


Figura 4.- Esquema del modelo pre-operacional implementado.

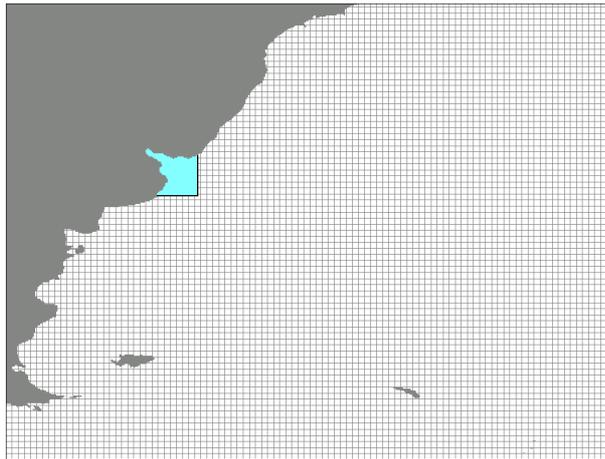


Figura 5.- Dominio de cálculo simulado en el nivel regional e intermedio (sombreado en celeste).

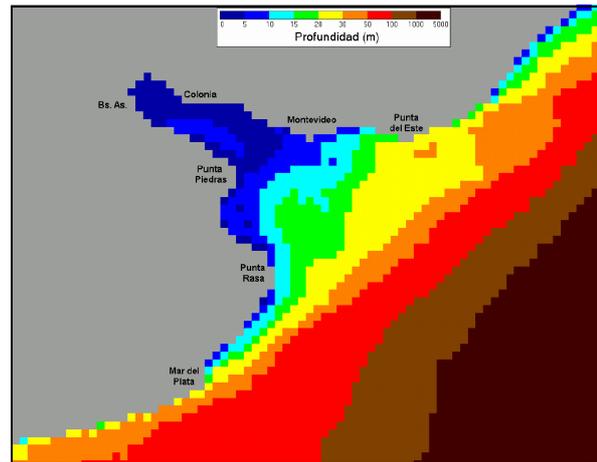


Figura 6.- Detalle de la batimetría en el Río de la Plata.

Tabla 1.- Principales características de los modelos numéricos utilizados en este trabajo.

Modelo	Discretización horizontal	Discretización vertical	Paso temporal de cálculo	Área del dominio
3D MA ⁽¹⁾	5.000 – 9.000 m	10 capas sigma	120 s	250.000 km ²
3D MM ⁽²⁾			40 s	
2D regional MA	0,1° (11 km aprox.)	1 capa sigma	180 s	16.760.000 km ²
2D regional MM			60 s	
2D intermedio MA	0,033° (3,7 km aprox.)	1 capa sigma	90 s	262.300 km ²
2D intermedio MM			20 s	

⁽¹⁾ MA: marea astronómica

⁽²⁾ MM: marea meteorológica

Tabla 2.- Forzantes considerados en las simulaciones realizadas con los modelos numéricos.

Modelo	Frontera		
	Superficie libre	Borde lateral abierto	Borde lateral cerrado
3D MA		Niveles del FES 2000	Caudal fluvial variable de los ríos Uruguay y Paraná
3D MM	Viento uniforme medido en algún punto de la zona	Niveles medidos en Mar del Plata y La Paloma	
2D regional MA		Niveles del FES 2004	Caudal constante de los ríos Uruguay y Paraná.
2D regional MM	Viento y presión atmosférica del WRF		
2D intermedio MA		Niveles del modelo 2D regional con MA	Caudal constante de los ríos Uruguay y Paraná.
2D intermedio MM	Viento y presión atmosférica del WRF	Niveles del modelo 2D regional con MM	

⁽¹⁾ MA: marea astronómica

⁽²⁾ MM: marea meteorológica

A partir de la información presentada en las Tablas 1 y 2, se puede observar que si bien los modelos 3D y 2D intermedio simulan áreas similares y ambas enfocadas en el Río de la Plata, las principales

diferencias entre estos modelos radica en la forma de representar los forzantes atmosféricos y el forzante fluvial (caudal variable en el 3D y constante en el 2D). Para representar el efecto de los forzantes atmosféricos en el modelo tridimensional se utilizan niveles medidos como condición de borde en la frontera lateral abierta y se aplica sobre la superficie libre un campo de vientos uniforme en el espacio y variable en el tiempo. Por otro lado, en el modelo pre-operacional intermedio, se ingresa la marea meteorológica obtenida con el modelo regional en la frontera lateral abierta y se aplica sobre la superficie libre el campo de vientos y el campo de presión atmosférica obtenido con el modelo WRF, siendo estos campos variables en espacio y tiempo.

DATOS Y METODOLOGIA

Como fue mencionado anteriormente, para evaluar la calidad de los resultados obtenidos con el modelo pre-operacional se compara su desempeño en la representación de los niveles en el Río de la Plata con otros modelos numéricos implementados en la zona. Para comparar los resultados obtenidos con los distintos modelos se calcularon varios índices estadísticos que evalúan la precisión de cada modelo a través de la comparación de la serie de niveles modelados y medidos en las diferentes estaciones. En este trabajo se utilizaron series de niveles horarios medidos en seis estaciones ubicadas en el Río de la Plata: Mar del Plata, La Paloma, Punta del Este, Montevideo, Colonia y Buenos Aires (Figura 8).

Para comparar los resultados de los distintos modelos se realizaron simulaciones con marea astronómica y con marea meteorológica. A continuación se describen los pasos seguidos para comparar las series de niveles obtenidas con los modelos con las series de niveles medidas para el caso de marea astronómica y para el caso de marea meteorológica.

Marea Astronómica

Para evaluar la calidad de los resultados obtenidos con el modelo pre-operacional con marea astronómica, se comparó su desempeño con el del modelo global de marea FES2004 y con el modelo tridimensional implementado por el IMFIA en la región de interés. Para comparar los resultados obtenidos con los distintos modelos astronómicos, se compara en cada estación la fase y amplitud de las principales componentes de la marea astronómica.

Para determinar las principales componentes de la marea astronómica en cada estación se utilizaron series horarias de niveles medidos de un año de extensión. En primer lugar se realizó una descomposición armónica de la serie de niveles medidos utilizando la herramienta *t_tide* (Pawlowicz et al., 2002). En la Figura 6 se presenta a modo de ejemplo una salida del *t_tide* aplicado a la serie de niveles en Mar del Plata e imponiendo como umbral de significancia un SNR (“Signal to Noise Ratio”) de 10. En dicha figura se puede observar que la mayor parte de las componentes significativas se agrupan en las bandas diurnas y semidiurnas. Por otro lado, se puede observar que si bien se identifican componentes de baja frecuencia de gran amplitud, éstas no cumplen con el criterio de significancia establecido.

Luego de identificar las componentes significativas en cada estación se seleccionaron las componentes principales como aquellas componentes que representan el 70% de la amplitud total. En la Tabla 1 se presenta la amplitud de las principales componentes armónicas identificadas en las distintas estaciones costeras (expresadas como porcentaje de la amplitud total). En la Figura 8 se grafican los valores de la Tabla 5 en un mapa. En esta figura se puede observar que la componente semidiurna M2 es la componente de mayor peso en todas las estaciones, siendo responsable en promedio del 28% de la amplitud total. La componente diurna O1 es la segunda componente de mayor amplitud en casi todas las estaciones estudiadas, seguida por la semidiurna N2. Como casos

particulares, cabe destacar que en La Paloma la M4 cobra gran importancia y en Colonia y Buenos Aires aparece como componente principal la diurna S1.

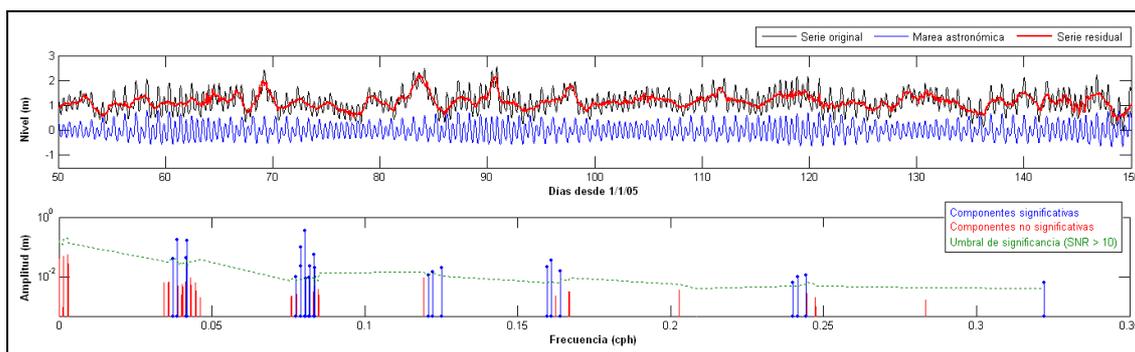


Figura 7.- Ejemplo de descomposición armónica de una serie de niveles en Mar del Plata.

Tabla 3.- Amplitud de las principales componentes expresada como % de la amplitud total de cada estación.

Componente	Frecuencia [ciclos/h]	Mar del Plata	La Paloma	Punta del Este	Montevideo	Colonia	Buenos Aires
M2	0.081	30%	25%	26%	29%	29%	31%
O1	0.039	16%	10%	19%	17%	22%	16%
S1	0.042	-	-	-	-	19%	13%
K1	0.042	14%	11%	-	6%	13%	12%
N2	0.079	9%	13%	15%	12%	11%	11%
M4	0.161	3%	16%	4%	9%	1%	3%
Amplitud total [m]		1,151	0,459	0,248	0,468	0,567	0,875

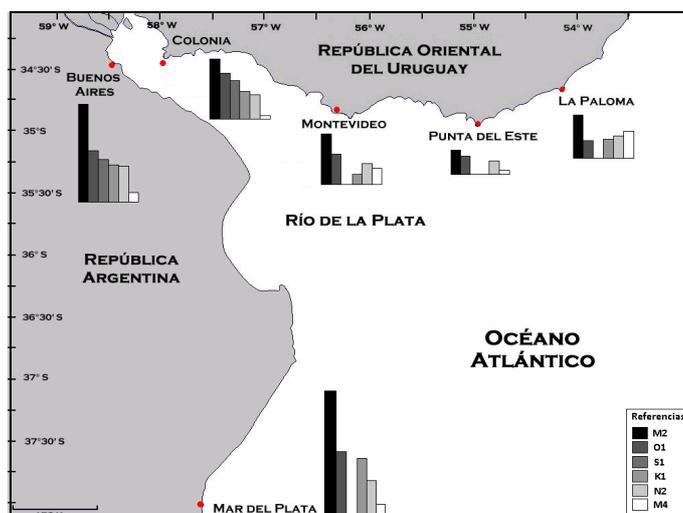


Figura 8.- Ubicación de las estaciones mareográficas e importancia de las principales componentes de la marea astronómica identificadas en las distintas estaciones costeras.

Marea Meteorológica

Para evaluar la calidad de los resultados obtenidos con el modelo pre-operacional con marea meteorológica, se comparó su desempeño con el del modelo tridimensional. Para comparar los resultados obtenidos con estos dos se utilizaron series horarias de niveles de dos meses de extensión. Con el modelo tridimensional se simuló dos meses del año 2004, mientras que con el modelo pre-operacional se simuló dos meses del año 2007. En la Tabla 3 se presenta la cantidad de datos de niveles disponibles en las distintas estaciones para comparar con los niveles obtenidos con los modelos con marea meteorológica. Los niveles medidos en la estación de Buenos Aires durante estos meses no están disponibles por lo cual esta estación no se incluye en el análisis con marea meteorológica.

Los resultados con marea meteorológica fueron contrastados con los resultados obtenidos con el modelo tridimensional.

Tabla 4.- Cantidad de datos de niveles (%) en cada estación durante los períodos simulados con marea meteorológica.

Modelo	Período	Mar del Plata	La Paloma	Punta del Este	Montevideo	Colonia
3D	Mar-04	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
	Apr-04	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
2D Regional e Intermedio	May-07	100 %	100 %	93 %	100 %	77 %
	Jun-07	100 %	85 %	92 %	85 %	76 %

Índices Estadísticos y Diagrama de Taylor

Tanto para el caso de marea astronómica como para el caso de marea meteorológica, para efectuar las comparaciones entre los resultados de los distintos modelos, se calcularon varios índices estadísticos. Los mismos se definen a continuación (Marin, 2010).

- Raíz del error medio cuadrático (RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2} \quad [1]$$

Donde x_i es la serie de niveles modelados, y_i representa la serie de niveles medidos y N es la cantidad de observaciones. El RMSE da una idea de la precisión del modelo. Se puede calcular en cada estación mareográfica o hacer un promedio en todas las estaciones obteniendo un único valor para cada modelo.

- Diferencia de los valores medios (MD):

$$MD = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i) \quad [2]$$

Este es otro indicador de la habilidad del modelo para representar el estado medio observado.

- Raíz del error centrado cuadrático medio (CRMSE):

$$CRMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [(x_i - \bar{x}) - (y_i - \bar{y})]^2} \quad [4]$$

- Coeficiente de correlación (R):

$$R = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sigma_x^2 \sigma_y^2}} \quad [3]$$

Donde \bar{x} e \bar{y} son los valores medios de la serie de niveles modelados y medidos respectivamente, y σ_x y σ_y representan las desviaciones estándar de las mismas series. El coeficiente de correlación mide la capacidad del modelo para reproducir los principales patrones observados. R vale 1 cuando las dos series tienen el mismo patrón de variación, -1 cuando varían en sentidos opuestos y 0 cuando las dos series no están correlacionadas. R^2 representa también la fracción de varianza explicada por la serie de niveles modelados.

Por último, se emplearon herramientas gráficas de comparación para comparar la calidad de los distintos pronósticos del modelo pre-operacional. El diagrama de Taylor (Taylor, 2001) es una herramienta de gran utilidad para concentrar información estadística (CRMSE, varianza de la serie de niveles medidos y modelados y R) y utilizar dicha información para comparar distintas corridas de un mismo modelo.

RESULTADOS

Simulaciones con Marea Astronómica

En la Figura 9 se presenta a modo de ejemplo una comparación de las principales componentes de marea astronómica obtenidas para con los distintos modelos y con las mediciones en Montevideo. También se presenta en esta figura el RMSE obtenido para la amplitud de las componentes así como el RMSE global, en el cual entra también en juego la fase. En esta figura se puede observar que si bien el modelo pre-operacional presenta un error mayor al del modelo tridimensional en la representación de la amplitud de las principales componentes de la marea en Montevideo, al introducir la fase, el modelo pre-operacional es el modelo que presenta el menor error. El modelo global FES2004 presenta un gran error tanto en amplitud como en fase en la representación de las componentes principales de Montevideo. Por otro lado, si bien el modelo tridimensional presenta el menor error en la amplitud de las principales componentes, al introducir la fase su error excede al obtenido con el modelo pre-operacional. En el caso de la componente diurna K1, se observa algo distinto a lo observado en el resto de las componentes principales, el FES2004 es el modelo que presenta el menor error tanto en amplitud como en el valor global. Sin embargo, la K1 es la componente principal de menor relevancia en Montevideo (ver Tabla 3).

En la Figura 10 se presentan los valores del RMSE promedio de las principales componentes de la marea astronómica en las seis estaciones consideradas para los distintos modelos evaluados. En este gráfico no se incluyó la componente diurna S1 por ser relevante únicamente en Colonia y Buenos Aires. En esta figura se puede observar que el menor error en todas las componentes principales es el obtenido con el modelo pre-operacional mientras que el mayor error es el obtenido con el modelo global FES2004. Para las componentes M2, O1, N2 y M4, la mejor solución es la del modelo pre-operacional regional mientras que en el caso de la componente K1, la mejor solución es la del modelo pre-operacional intermedio. Por otro lado, la solución del modelo 3D presenta errores similares al del modelo pre-operacional para las componentes O1, K1 y M4. No ocurre lo mismo para las componentes semidiurnas M2 y N2, en las cuales el error obtenido con el modelo 3D es sustancialmente mayor al obtenido con el modelo pre-operacional.

Cabe mencionar que en las Figuras 9 y 10, la componente no lineal M4 no presenta un valor de RMSE para el modelo global FES2004 ya que el FES2004 devuelve un valor de amplitud nulo para esta componente tanto en Montevideo como en el resto de las estaciones consideradas en este trabajo.

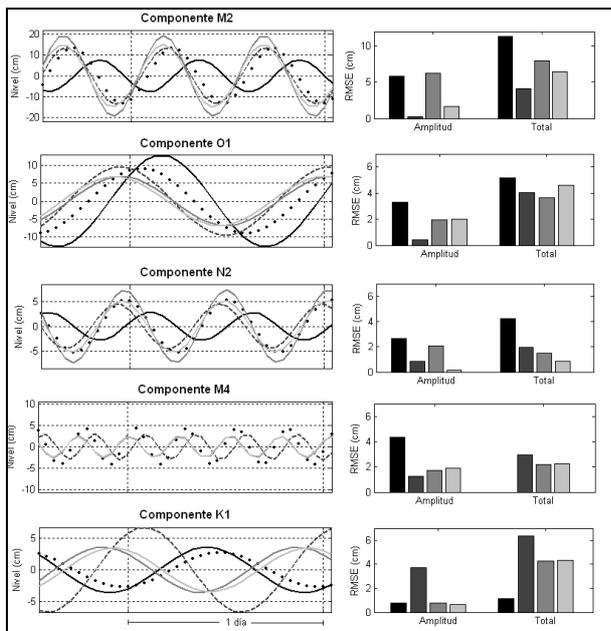


Figura 9.- Comparación de los niveles medidos y modelados en Montevideo. RMSE de la amplitud y total.

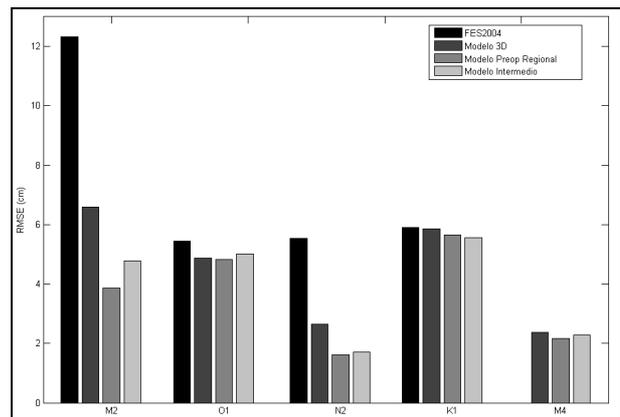


Figura 10.- Valores de RMSE promedio de las principales componentes de la marea astronómica para los distintos modelos evaluados.

Simulaciones con Marea Real

En la Figura 10 se presenta a modo de ejemplo una comparación entre los niveles medidos y modelados con el modelo 3D y el modelo pre-operacional (nivel regional e intermedio) en Mar del Plata. En dicha figura se puede observar que la solución del modelo pre-operacional regional es similar a la del nivel intermedio. En la Figura 10 se presenta además la media mensual de la serie medida (línea roja) y la media mensual de la serie de niveles modelados (línea punteada negra). Se puede observar que la media de las medidas es bastante mayor a la media obtenida con modelo tridimensional en Mar del Plata durante marzo del 2004. Por el contrario, la media obtenida con el modelo pre-operacional es bastante similar a la media de la serie de niveles medidos en Mar del Plata durante el mayo del 2007.

En las Tablas 5, 6, 7 y 6 se presentan los valores de los índices estadísticos: RMSE, MD, CRMSE y R que surgen de la comparación entre los niveles modelados y los niveles medidos en las distintas estaciones. Estos índices fueron calculados en base mensual y para cada período de modelación se calculó también el promedio mensual de cada índice. En la Tabla 5 se puede observar que, excepto en Mar del Plata y Montevideo, el modelo 3D es el que presenta los menores valores de RMSE. Por otro lado, en la Tabla 6 se puede observar que, excepto en Mar del Plata y Montevideo, el modelo pre-operacional presenta mayores valores absolutos de MD. Cabe resaltar que la media obtenida con el modelo 3D es mayor a la media de la serie de niveles medidos en todas las estaciones, salvo en La Paloma. Por el contrario, la media obtenida con el modelo pre-operacional es menor a la serie de niveles medidos en todas las estaciones. Al calcular el índice CRMSE que compara la serie de niveles modeladas con la serie de niveles medida sin tener en cuenta los errores asociados a la diferencia entre las medias, se puede observar que el modelo pre-operacional es el que presenta el menor error en todas las estaciones, salvo en Montevideo. Por último, en la Tabla 8 se presentan los valores del coeficiente de correlación obtenidos para las distintas estaciones. Se puede observar que el modelo pre-operacional es el modelo que presenta los mayores valores de R en todas las estaciones. Para el caso de Mar del Plata, el mayor R se obtiene con el modelo pre-operacional intermedio mientras que para el resto de las estaciones, el mayor R se obtiene con el modelo pre-operacional regional.

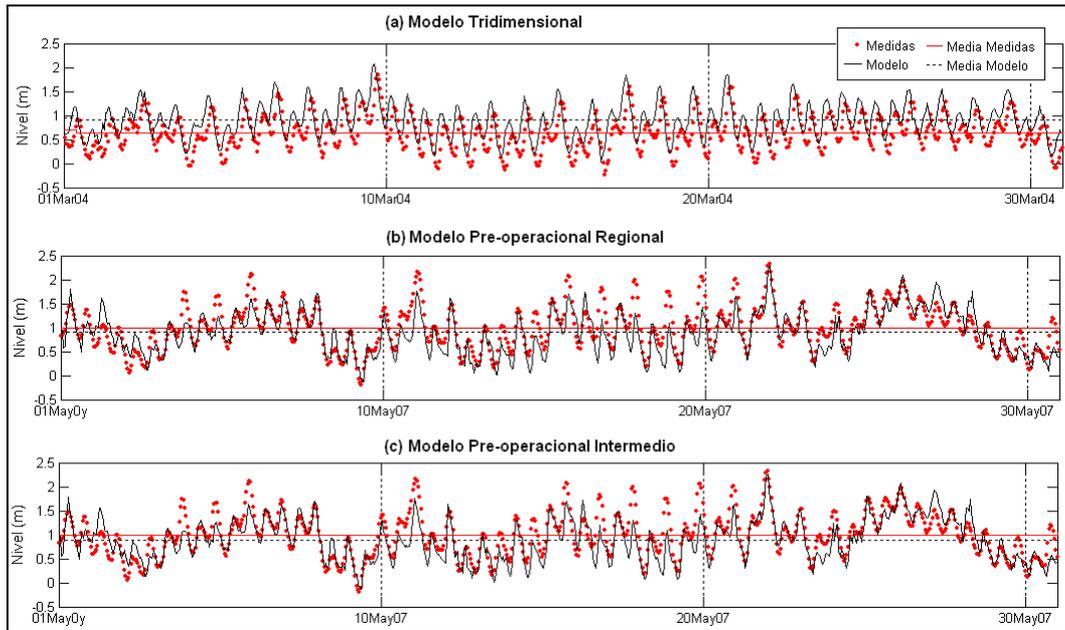


Figura 11.- Comparación de niveles medidos en Mar del Plata con los obtenidos con el modelo (a) Tridimensional, (b) Pre-operacional regional, (c) Pre-operacional intermedio.

Tabla 5.- RMSE [m]

Modelo	Periodo	Mar del Plata	La Paloma	Punta del Este	Montevideo	Colonia
3D	Mar-04	0,462	0,257	0,191	0,368	0,266
	Apr-04	0,479	0,256	0,207	0,364	0,273
	Promedio	0,471	0,257	0,199	0,366	0,270
2D Regional	May-07	0,288	0,255	0,314	0,425	0,376
	Jun-07	0,326	0,302	0,352	0,300	0,354
	Promedio	0,307	0,279	0,333	0,362	0,365
2D Intermedio	May-07	0,285	0,259	0,329	0,430	0,390
	Jun-07	0,319	0,308	0,358	0,285	0,353
	Promedio	0,302	0,283	0,344	0,358	0,371

Tabla 6.- MD [m] (media modelo – media datos)

Modelo	Periodo	Mar del Plata	La Paloma	Punta del Este	Montevideo	Colonia
3D	Mar-04	0,261	-0,159	0,080	0,262	0,046
	Apr-04	0,262	-0,132	0,064	0,226	0,058
	Promedio	0,262	-0,146	0,072	0,244	0,052
2D Regional	May-07	-0,096	-0,094	-0,216	-0,148	-0,240
	Jun-07	-0,236	-0,231	-0,304	-0,169	-0,268
	Promedio	-0,166	-0,162	-0,260	-0,158	-0,254
2D Intermedio	May-07	-0,098	-0,112	-0,233	-0,149	-0,253
	Jun-07	-0,234	-0,244	-0,314	-0,164	-0,273
	Promedio	-0,166	-0,178	-0,273	-0,157	-0,263

Tabla 7.- CRMSE [m]

Modelo	Periodo	Mar del Plata	La Paloma	Punta del Este	Montevideo	Colonia
3D	Mar-04	0,382	0,202	0,173	0,258	0,262
	Apr-04	0,402	0,220	0,197	0,285	0,267
	Promedio	0,392	0,211	0,185	0,272	0,265
2D Regional	May-07	0,271	0,238	0,228	0,398	0,289
	Jun-07	0,225	0,194	0,177	0,248	0,231
	Promedio	0,248	0,216	0,202	0,323	0,260
2D Intermedio	May-07	0,268	0,233	0,233	0,404	0,297
	Jun-07	0,218	0,189	0,173	0,233	0,223
	Promedio	0,243	0,211	0,203	0,318	0,260

Tabla 8.- Coeficiente de Correlación.

Modelo	Periodo	Mar del Plata	La Paloma	Punta del Este	Montevideo	Colonia
3D	Mar-04	0,435	0,590	0,746	0,664	0,716
	Apr-04	0,523	0,724	0,816	0,739	0,822
	Promedio	0,479	0,657	0,781	0,702	0,769
2D Regional	May-07	0,820	0,807	0,842	0,714	0,801
	Jun-07	0,846	0,794	0,817	0,738	0,781
	Promedio	0,833	0,801	0,830	0,726	0,791
2D Intermedio	May-07	0,822	0,798	0,831	0,700	0,785
	Jun-07	0,855	0,785	0,814	0,734	0,780
	Promedio	0,838	0,791	0,823	0,717	0,782

Evaluación de Pronósticos

La evaluación de pronósticos se realizó utilizando el diagrama de Taylor, en el cual cada punto representa un pronóstico de 96 horas y la ubicación del mismo en el diagrama indica el CRMSE, la relación existente entre la varianza de la serie de niveles medidos y modelados y el R. Sin embargo, los tres índices estadísticos concentrados en el diagrama de Taylor no toman en cuenta el error asociado con la diferencia entre la media de la serie de niveles medidos y la media de la serie de niveles obtenidos con el modelo.

En la Figura 12 se presenta una comparación entre los niveles medidos y los niveles pronosticados con el modelo pre-operacional en Mar del Plata. En dicha figura se presentan a modo de ejemplo 4 pronósticos simulados en el mes de mayo del 2007. En la Figura 12.2 se presentan los valores de MD obtenidos para cada pronóstico. Se puede observar que la media del modelo es menor a la media de las mediciones para los 4 pronósticos presentados, siendo máxima para el pronóstico que comienza el 17 de mayo (F). Los índices presentados en el diagrama de Taylor surgen de comparar la serie de niveles medidos y la serie de niveles obtenida con el modelo pre-operacional haciendo coincidir las medias. Dicha comparación se presenta en la Figura 12.3.

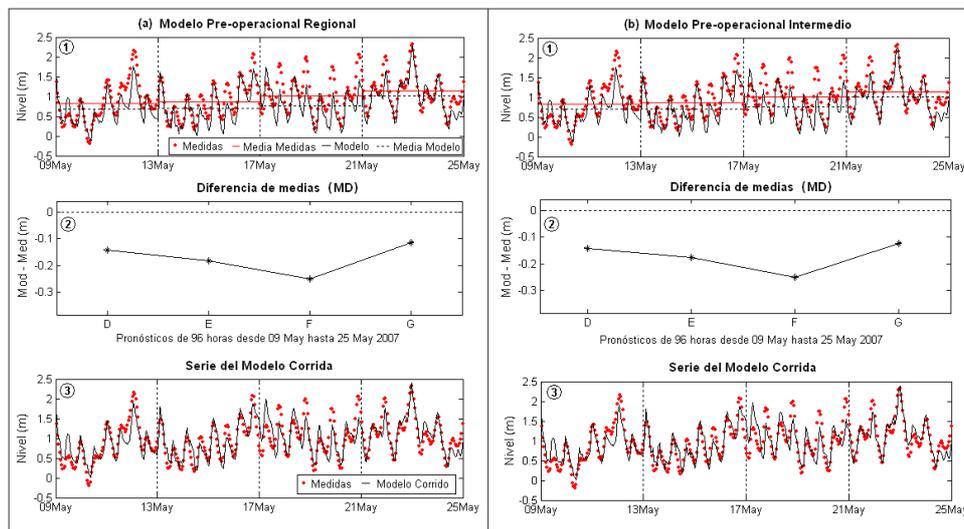


Figura 12.- 1. Comparación entre niveles medidos y pronosticados con el modelo pre-operacional (a) regional y (b) intermedio. 2. Evolución temporal del índice MD. 3. Comparación entre niveles medidos y pronosticados corriendo la media.

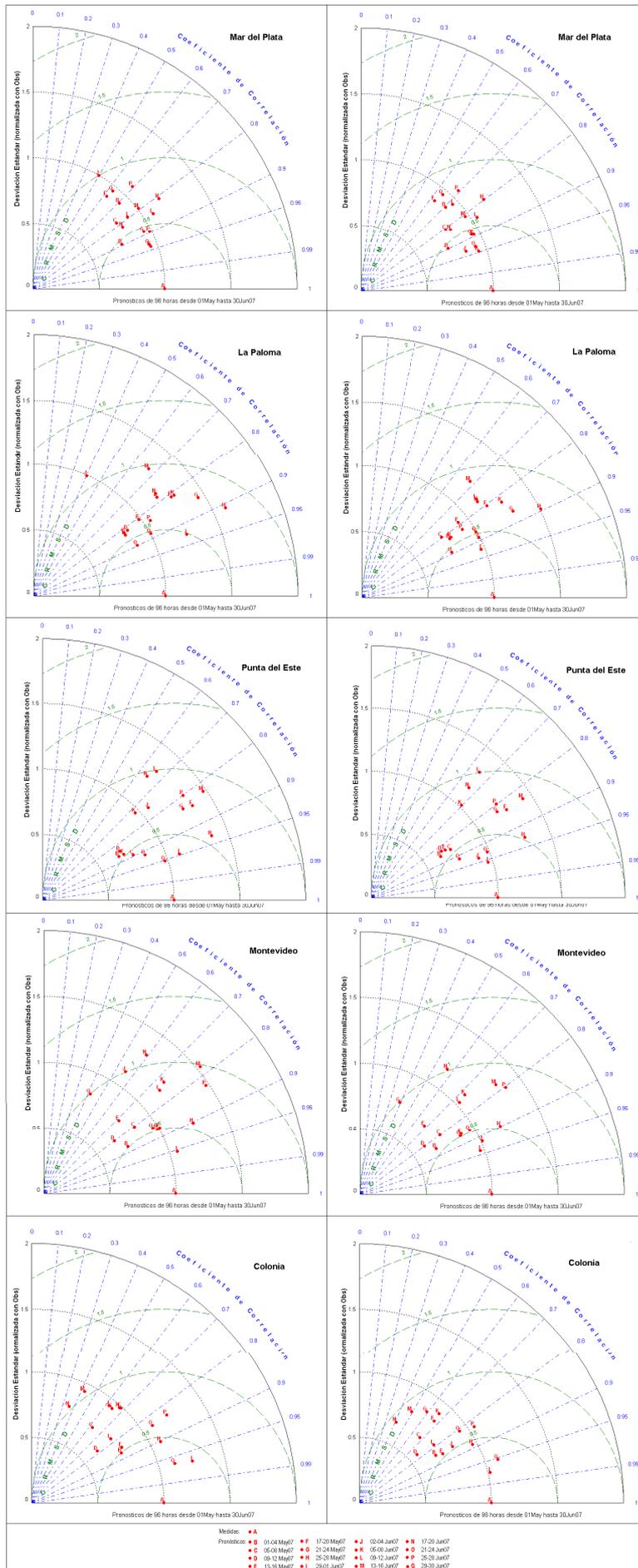


Figura 13.- Diagramas de Taylor para las distintas estaciones. Modelo 2D regional e intermedio.

En la Figura 13 se presentan los diagramas de Taylor obtenidos en las distintas estaciones para los pronósticos simulados con el modelo pre-operacional regional e intermedio durante los meses de mayo y junio del 2007 (16 pronósticos de 96 horas indicados con las letras B-Q). En esta figura, el punto A representa las mediciones y con las letras B-Q se indican los 16 pronósticos a 96 horas en orden cronológico. Por lo tanto, cuanto más cerca se ubiquen un punto del punto A mejor es la calidad del pronóstico. Por ejemplo, para el caso de Mar del Plata, el pronóstico K es el de mejor calidad tanto en el modelo regional como en el intermedio, mientras que el peor pronóstico en Mar del Plata obtenido con el modelo pre-operacional regional e intermedio es el J y el F respectivamente. En la Figura 13 se puede observar que los diagramas de Taylor del modelo pre-operacional regional e intermedio par una misma estación son muy similares. Sin embargo, se observa que en general los pronósticos obtenidos con el modelo intermedio presentan un menor CRMSE.

CONCLUSIONES

Varios métodos estadísticos han sido utilizados para evaluar la calidad de un modelo pre-operacional regional implementado para representar la hidrodinámica del Río de la Plata. Se ha comparado su desempeño en la representación de marea astronómica y meteorológica con los resultados obtenidos con otros modelos numéricos de mayor y menor escala implementados para la zona de estudio.

En base a los resultados obtenidos con marea astronómica, se puede afirmar que el modelo pre-operacional es más preciso que el modelo global FES2004 y que el modelo tridimensional implementado por el IMFIA para representar niveles de marea astronómica en el Río de la Plata. Por otro lado, a partir de los resultados obtenidos con marea meteorológica se puede concluir que el modelo pre-operacional es más preciso que el modelo tridimensional para representar anomalías de niveles de marea meteorológica en el Río de la Plata. Es decir que el modelo pre-operacional es más preciso que el modelo tridimensional en la representación de niveles de marea meteorológica si descontamos el error asociado a la diferencia entre la media de los niveles medidos y la media de los niveles obtenidos con el modelo.

El diagrama de Taylor permite comparar varias corridas de un mismo modelo en forma simultánea, identificando del conjunto de pronósticos los más y menos precisos. En etapas futuras se intentará buscar la causa de error de aquellos puntos del diagrama más alejados del valor ideal de comparación (punto A).

Finalmente, en base a la información presentada en este trabajo se puede concluir que los resultados del modelo pre-operacional regional e intermedio no presentan diferencias significativas.

Los métodos estadísticos utilizados en este trabajo permiten además evaluar la mejora en el ajuste del modelo cuando se trabaja en la calibración y verificación de un modelo. También permiten realizar una evaluación continua de los resultados de un modelo de pronóstico de forma de poder informar a los usuarios el margen de error del modelo, identificando también áreas de menor ajuste y por lo tanto áreas a re trabajar.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Fernandez, M.; Santoro, P. ; Cazes, G.; Fossati, M.; Piedra-Cueva, I. (2008). Implementación de un modelo hidrodinámico del Atlántico Sur forzado por un modelo atmosférico de mesoescala.
- Fossati, M. y Piedra-Cueva, I. (2006). “Modelación tridimensional de la circulación en el Río de la Plata”. XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Ciudad Guayana, Venezuela.
- Lfevre, F.; Le Provost, C. & Lyard, F. (2000). How can we improve a global ocean tide model at a regional scale? A test on the Yellow Sea and the East China Sea. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 105, pp. 8707-8725.
- Lyard, F.; Lefevre, F.; Letellier, T.; Francis, O. (2006). Modelling the global ocean tides: modern insights from FES2004. *Ocean Dynamics* 56, pp. 394-415.
- MARETEC (2006). “MOHID Hydrodynamic Module User Guide”.
- Martin, M. (2010). Ocean Forecasting Systems – product evaluation and skill. GODAE International Summer School, Observing, Assimilating and Forecasting the Ocean.
- Pawlowicza R.; Beardsleyb, B.; Lentz, S. (2002). Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T TIDE. *Computers & Geosciences* 28, pp. 929–937.
- Piedra-Cueva, I; Terra, R.; Cazes, G.; Fossati, M.; Fernández, M.; Santoro, P. (2008). Modelo Pre-operacional del Río de la Plata Río Uruguay . Informe final del proyecto PDT S/C/OP/70/01.
- Taylor, K.E.(2001). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *J. Geophys. Res.*, 106, 7183-7192, 2001.