

**EVALUACION DE LAS ALTERNATIVAS DE DESCARGA EN PUNTA DEL ESTE  
MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE UN MODELO NUMERICO TRIDIMENSIONAL****PARTE I: MODELACIÓN HIDRODINÁMICA**

**MSc. Ing. Mónica Fossati, Ing. Mariana Fernández, Dr. Ing. Ismael Piedra-Cueva**

Facultad de Ingeniería, Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA).

Calle: J. Herrera y Reissig 565  
Tel: 598 (2) 711 3386 int 118

Ciudad: Montevideo Uruguay CP: 11200  
Fax: 598 (2) 711 5277 e-mail: mfossati@fing.edu.uy

**RESUMEN**

En este trabajo se presentan las principales características de la aplicación de un modelo numérico tridimensional baroclínico para representar las corrientes, la elevación de la superficie libre y el campo de salinidad en la costa de Maldonado. Se utilizó el modelo en volúmenes finitos MOHID utilizando la metodología de mallas encajadas con cuatro niveles de resolución, partiendo desde un nivel global que abarca todo el Río de la Plata y el Frente Marítimo, hasta un nivel de alta resolución que cubre la mayor parte de la costa del departamento de Maldonado. Se describen las principales características y los resultados obtenidos durante las etapas de implementación, calibración y validación del modelo hidrodinámico. El ajuste del modelo hidrodinámico es una etapa necesaria en el estudio de las diferentes alternativas de descargas subacuáticas del líquido cloacal generado y que se prevén puedan generarse en los próximos años en el área Maldonado-Punta del Este. A partir del mismo se calculan dos de los principales procesos que intervienen en el transporte de un contaminante en un cuerpo de agua, el transporte advectivo y la difusión generada por las corrientes turbulentas de la zona.

**INTRODUCCIÓN**

A principios del 2006 la empresa Tahal Consulting Engineers encomendó al Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República una serie de estudios técnicos marítimos para evaluar la alternativa de descarga en Punta del Este mediante un emisario subacuático de los líquidos residuales de la ciudad y de los alrededores [1]. Estos estudios se llevaron a cabo aplicando un modelo numérico hidrodinámico baroclínico y un modelo de transporte de sustancias tridimensional en la costa del departamento de Maldonado, a partir de los cuales es posible obtener la variación temporal de las corrientes, niveles, salinidad y la concentración del contaminante descargado en cualquier punto del dominio analizado.

En el IMFIA se vienen desarrollando desde hace varios años tareas de investigación y de modelación del Río de la Plata y su Frente Marítimo. En los últimos años, la existencia de nuevas mediciones de corrientes en varias profundidades en distintos puntos del dominio de cálculo y la mejora en la tecnología computacional posibilitaron la implementación y calibración del modelo tridimensional MOHID para representar el flujo en la zona [2]. Sin embargo, la baja resolución del modelo definido no permite representar procesos que requieren alta resolución del campo hidrodinámico como el transporte de sedimentos, el transporte de sustancias contaminantes, chorros de descarga, etc. Debido a esto, fue necesario aplicar en este trabajo la metodología de mallas encajadas para obtener el campo hidrodinámico tridimensional en la zona costera de Maldonado. Esta metodología se basa en utilizar modelos de diferentes niveles de discretización y resolución para describir el sistema, los cuales se conectan a través de las condiciones de borde. Los tiempos de cálculo del sistema de mallas encajadas fueron optimizados utilizando computadoras con multi procesadores (MPI).

Por otra parte, la calibración y validación de un modelo hidrodinámico de detalle que represente el flujo en cualquier zona de interés requiere información de campo de buena calidad y resolución. Aunque en el marco de este proyecto no fueron realizadas mediciones de campo específicas, se tuvo acceso a los resultados a las campañas



de medidas realizadas en la zona de Punta del Este en el marco del Plan de Saneamiento Ambiental del Departamento de Maldonado, PEC 11 [3] a principios de los años 90. Estas campañas incluyen, entre otras, mediciones de corriente en tres zonas de la costa de Maldonado que además de permitir la caracterización del flujo en la zona posibilitaron el ajuste de ciertos parámetros del modelo de corrientes.

## **OBJETIVOS Y METAS**

El principal objetivo de este trabajo es presentar las características y los resultados obtenidos en la aplicación de una herramienta numérica sofisticada en la zona de Punta del Este con el fin de evaluar distintas alternativas de descarga. Para ello, fue necesario en primer lugar implementar y calibrar un modelo hidrodinámico tridimensional para representar el flujo y las propiedades del agua en el Río de la Plata y el Frente Marítimo enfocado en la zona de Punta del Este.

## **METODOLOGIA**

El modelo numérico hidrodinámico tridimensional utilizado para representar el flujo en la zona de Punta del Este es el modelo en volúmenes finitos MOHID [4]. El modelo MOHID ha sido desarrollado en el Instituto Superior Técnico - Maretec de Portugal y describe el flujo en diversos tipos de cuerpos de agua. Este modelo ha sido aplicado con éxito en varias zonas costeras y estuarios demostrando una gran capacidad para simular flujos con comportamientos complejos [5, 6, 7, 8]. Para este trabajo se implementó el modelo en su versión tridimensional y fueron definidas como variables del sistema las tres componentes de la velocidad, la elevación de la superficie libre y la salinidad del agua.

Una característica muy importante del modelo MOHID es que permite utilizar la metodología de mallas encajadas. A través de esta metodología, es posible anidar grillas de resolución espacial creciente, forzando los modelos locales con resultados de aplicaciones de mayor escala. De esta forma, el modelo permite estudiar áreas cada vez más cercanas a la región de interés a partir del traspaso de las condiciones de borde del modelo “padre”.

### **Descripción del modelo**

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 o cartesiana u otras que permiten una buena simulación de los efectos topográficos. La discretización temporal implícita ADI (Alternating Direction Implicit) utiliza una grilla desfasada, lo que soluciona problemas de estabilidad que ocurren en métodos explícitos y que permite una resolución más simple por matrices tridiagonales en el cálculo de la elevación de la superficie libre y velocidades horizontales. El término de la fuerza de Coriolis y el transporte horizontal se resuelven explícitamente, mientras que el modelo utiliza un algoritmo implícito para resolver los términos de presión y el transporte vertical.

El modelo resuelve las ecuaciones primitivas tridimensionales para fluido incompresible. Se utilizan las aproximaciones de Boussinesq y de Reynolds, y se asume válida la aproximación hidrostática ya que en los cuerpos de agua estuarinos u oceánicos, como el Río de la Plata y el Frente Marítimo, las escalas horizontales son mucho mayores que las verticales. El modelo también resuelve las ecuaciones de transporte para la salinidad y la temperatura.

### **Implementación**

De acuerdo a los resultados obtenidos en los trabajos de modelación numérica realizados en el IMFIA [2, 9, 10], para representar correctamente las características hidrodinámicas de la zona de Punta del Este es necesario simular todo el Río de la Plata y una zona importante del Frente Marítimo. Por otra parte, para estudiar diferentes alternativas de descarga subacuática en la zona de Punta del Este es importante representar correctamente las variaciones topográficas y simular con detalle suficiente el campo hidrodinámico y el campo de densidades en dicha zona. Esto significa que es necesario simular un dominio de cálculo grande pero a su vez también es necesario un gran nivel de resolución en la zona cercana a Punta del Este. Debido a esto, se optó por utilizar en este trabajo la metodología de mallas encajadas. Esta metodología se basa en utilizar modelos de diferentes niveles de discretización y resolución para describir el sistema, que se conectan a través de las condiciones de borde.



En este trabajo se definieron cuatro niveles de resolución, que se diferencian en el área y en el nivel de discretización. El nivel más amplio (nivel global) simula el flujo en todo el Río de la Plata y gran parte del Frente Marítimo, el segundo nivel (nivel intermedio 1) simula a partir del nivel anterior el flujo en la zona central estuarina del Río de la Plata. El tercer nivel de resolución (nivel intermedio 2) se extiende desde José Ignacio hasta 15 km. al oeste de Pirlápolis. En el cuarto nivel (nivel de detalle) se definieron tres mallas enfocadas en la costa de Punta del Este y Maldonado que se diferencian en el dominio aledaño considerado.

Los cuatro niveles de resolución fueron representados utilizando un sistema de ejes cartesianos en la dirección horizontal y la coordenada vertical tipo sigma en la dirección vertical. Este tipo de coordenada permite una mejor resolución vertical en un dominio con importantes variaciones topográficas. La profundidad con esta transformación varía entre 0 y 1, siendo igual a 1 en la superficie libre e igual a 0 en el fondo. Las profundidades intermedias entre el fondo y la superficie siguen la línea de fondo y de la superficie a través de una interpolación lineal. En todas las simulaciones realizadas se utilizaron para dividir el dominio en la dirección vertical diez capas sigma distribuidas de forma equiespaciada.

#### Nivel global

El dominio del nivel global comprende un área mayor a los 250.000 km<sup>2</sup>. El límite oeste corresponde a la desembocadura de los ríos Paraná y Uruguay en el Río de la Plata; sobre la costa uruguaya el límite oceánico corresponde a un punto ubicado al norte del límite con Brasil y sobre la costa argentina el límite oceánico se corresponde con la ciudad de Mar del Plata. La malla horizontal utilizada para simular el nivel global posee 5.941 celdas activas, con un paso espacial variable en las direcciones  $x$  e  $y$  para aumentar la precisión en la zona interior y central del Río de la Plata. La dirección  $x$  se define en el sentido del eje del Río de la Plata y la dirección  $y$  perpendicular a la misma. El espaciamiento en ambas direcciones varía entre los 5.000 m en la zona del Río de la Plata y los 9.000 m en la zona del Océano Atlántico. En la Figura 1 se presenta una imagen de la malla de cálculo utilizada en el nivel global, donde se pueden observar los diferentes niveles de resolución definidos en esta malla.

Una vez definida la discretización horizontal del sistema es necesario ingresar la batimetría en cada celda de cálculo. Dicha información se extrajo de las cartas náuticas del SOHMA correspondientes a la zona de estudio. En la Figura 2 se presenta la batimetría de todo el dominio de cálculo del nivel global ingresada al modelo. La profundidad en la plataforma oceánica es mayor a los 1.000 m y supera los 3.000 m en las zonas más profundas. En la zona del Río de la Plata central las profundidades son menores a los 20 m y en la zona interior menores a 10 m.

El mayor aporte de caudal fluvial que recibe el Río de la Plata proviene de los ríos Paraná y Uruguay. En el MOHID dicho aporte es representado en este nivel global de resolución como una condición de borde correspondiente a un caudal de entrada determinado. Este ingreso de caudal se divide en dos secciones diferentes, una correspondiente al ingreso del flujo de los ríos Uruguay y Paraná – Guazú, y otra sección por donde ingresa el caudal del río Paraná – Las Palmas. La información de caudales de los ríos Paraná y Uruguay fue recopilada a través del Instituto Nacional de Agua Argentino (INA). La información disponible consiste en valores medios mensuales de descarga de ambos ríos durante el período 1991-2000, el cual incluye los períodos de mediciones de corrientes en Punta del Este y que se utilizan en este trabajo de modelación. El modelo interpola linealmente a partir de valores de caudal correspondientes a diferentes instantes y calcula de esta forma un valor de caudal para cada paso de tiempo.

Por otra parte, en la frontera oceánica se debe especificar la elevación de la superficie libre y las propiedades del agua. Se utiliza en este trabajo la condición de borde en la frontera oceánica del nivel global de resolución para imponer el efecto de la marea astronómica y de la marea meteorológica sobre el dominio de cálculo. Con respecto a las propiedades del agua en la frontera oceánica se impuso en todas las simulaciones un valor de salinidad oceánica igual a 38 ppm.

Cuando en las simulaciones se considera como forzante del sistema la marea astronómica, se calculan en 23 nodos, distribuidos en toda la frontera oceánica, la elevación de la superficie libre calculada a partir de la superposición de las cinco componentes armónicas principales de la marea: M2, N2, S2, O1 y Q1, cuyas amplitudes y fases deben ajustarse para representar correctamente la onda de marea en el dominio. Cuando se considera como forzante la marea meteorológica, se calcula el nivel residual (nivel medido menos el nivel correspondiente a la marea astronómica) en los nodos de la frontera oceánica donde se tienen series de niveles medidas, y luego dicho residuo se distribuye sobre los restantes nodos de la frontera oceánica. La forma de distribución del nivel residual en la frontera se determina de forma que se represente correctamente la marea meteorológica dentro del dominio de

cálculo. El nivel residual en los 23 nodos de la frontera se suma al nivel astronómico calculado en los mismos, y finalmente el modelo para cada paso de tiempo interpola linealmente para calcular el nivel en los nodos restantes de la frontera oceánica.

Por último, cuando en las simulaciones se considera como forzante del sistema al viento, se ingresa el mismo como un valor de fuerza externa que ejerce una tensión sobre la superficie libre. A partir de los datos de viento el modelo impone como condición de borde una tensión debida al viento sobre la capa superficial. En todas las simulaciones realizadas en este trabajo el viento se considera uniforme en el Río de la Plata ingresando en todos los niveles el viento medido en Laguna del Sauce durante el período correspondiente a cada simulación.

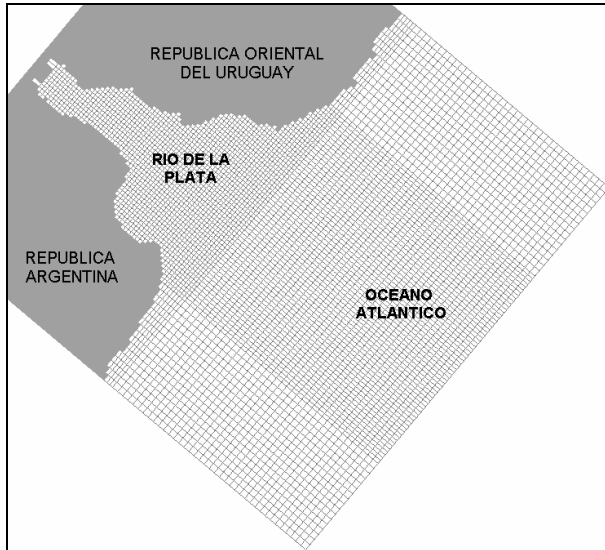


Figura 1: Malla horizontal utilizada en el nivel global.

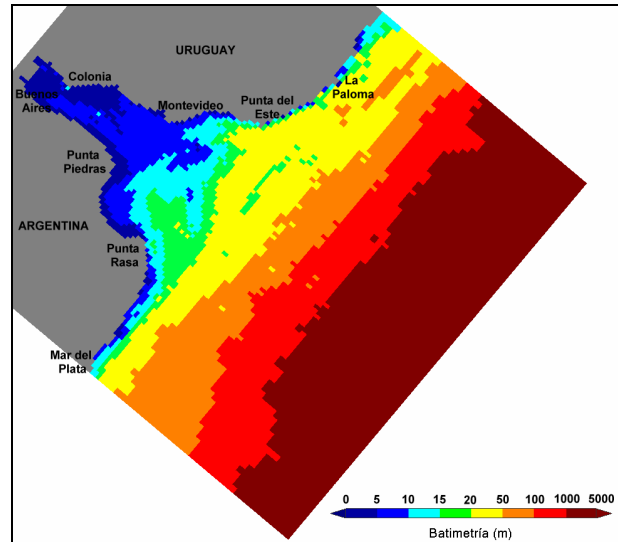


Figura 2: Batimetría correspondiente al nivel global.

### Nivel intermedio 1

El dominio representado con el segundo nivel de resolución definido para este trabajo abarca un área de aproximadamente 92.000 km<sup>2</sup>. La frontera oceánica Sur tiene una extensión de 163 km y la Norte de 137 km desde los puntos costeros correspondientes. En la Figura 3 se marca en negro el dominio representado con este nivel. La malla de cálculo horizontal utilizada para simular este nivel intermedio está formada por 22.978 celdas activas. El espaciamiento en las direcciones  $x$  e  $y$  se definió constante en esta malla e igual a 2.000 m.

La malla del segundo nivel de resolución trabaja de forma acoplada con el nivel global recibiendo a través de sus bordes la información calculada en el nivel global. De esta forma en este nivel las condiciones de borde no terrestres son los valores de la elevación de la superficie libre, velocidad de flujo y salinidad en toda la columna de agua, calculados para cada instante de tiempo en las celdas del nivel global correspondientes a dichos bordes. Debido a que los tamaños de las celdas del nivel global y del nivel intermedio 1 son distintos, el modelo realiza una interpolación lineal entre los valores calculados en las celdas mayores del nivel global para determinar los valores en las celdas frontera del nivel intermedio 1. El viento también se impone en este nivel de resolución como un valor de fuerza externa que ejerce una tensión sobre la superficie libre.

### Nivel intermedio 2

El tercer nivel de resolución espacial definido en este trabajo, denominado nivel intermedio 2, representa un dominio que abarca aproximadamente 11.000 km<sup>2</sup> del Río de la Plata y el océano Atlántico cercanos a Punta del Este. La malla de cálculo horizontal utilizada para simular el nivel intermedio 2 está formada por 11.118 celdas activas y el espaciamiento en las direcciones  $x$  e  $y$  es constante e igual a 1.000 m. De esta forma en la malla de nivel intermedio 2 se obtiene el doble de resolución espacial que en el nivel intermedio 1, y es posible representar correctamente las características morfológicas y batimétricas de la zona, como ser Punta Ballena, la Isla de Lobos, etc. En la Figura 3 se marca en rojo el dominio simulado en el nivel intermedio 2 y en la Figura 4 se presenta la batimetría ingresada a la malla.



Las condiciones de borde impuestas en las fronteras abiertas del nivel intermedio 2 son los valores de la elevación de la superficie libre, velocidad y salinidad calculados en las celdas correspondientes a su frontera en el nivel de resolución intermedio 1. Nuevamente en este caso el modelo interpola para cada instante de tiempo los valores determinados en la malla de nivel intermedio 1 porque los tamaños de celda de ambos niveles son diferentes. Además, de igual forma que en los niveles de resolución anteriores, se simula el efecto del viento como un valor de fuerza externa que ejerce una tensión sobre la superficie libre.

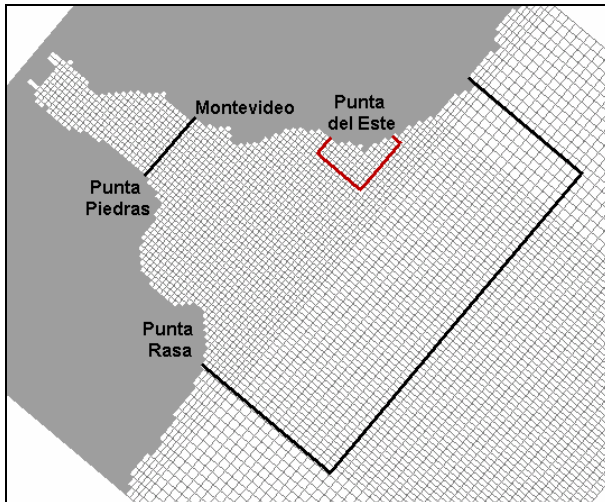


Figura 3: Dominio de cálculo del nivel intermedio 1 (negro) y del nivel intermedio 2 (rojo).

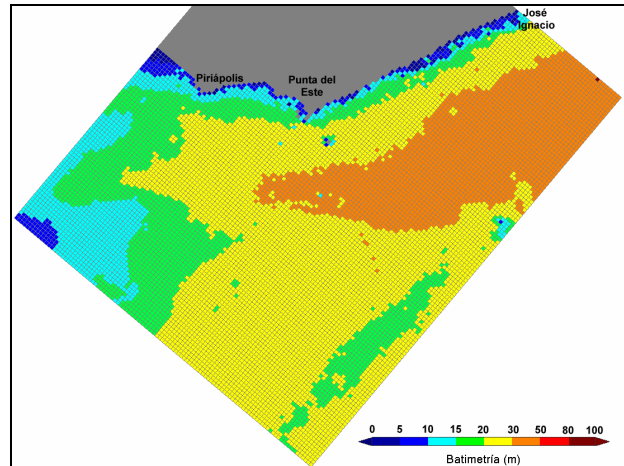


Figura 4: Batimetría correspondiente al nivel intermedio 2.

### Nivel de detalle

El nivel de detalle es el nivel de mayor resolución considerado en este trabajo de modelación. En el mismo se definieron tres mallas que representan diferentes zonas del dominio de estudio y que se utilizarán para representar las diferentes alternativas de descarga subacuática. Se utilizó la información batimétrica de la zona de Maldonado y Punta del Este publicada en las cartas náuticas del SOHMA N° 31 y N° 20 para este nivel de resolución. Los dominios de cálculo de las tres mallas de detalle están marcados sobre el nivel intermedio 2 en la Figura 5.

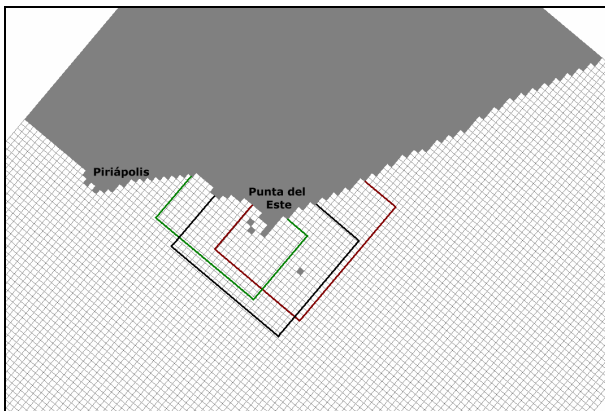


Figura 5: Dominios de cálculo del nivel de detalle. El dominio marcado en negro corresponde a la malla de detalle 1, el marcado en verde a la malla de detalle 2 y el marcado en rojo a la malla de detalle 3.

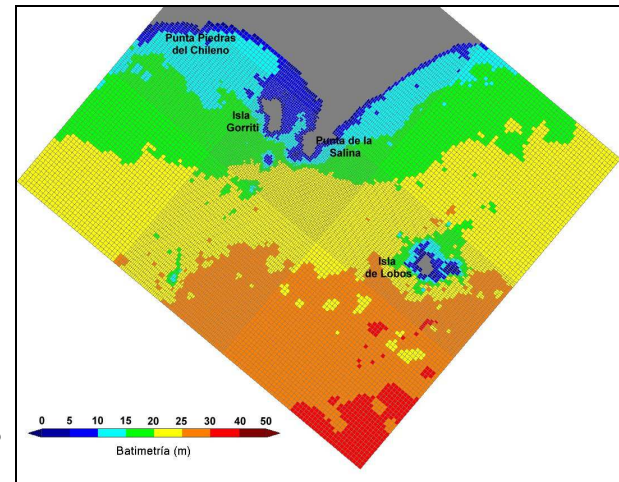


Figura 6: Grilla de cálculo y batimetría utilizada en la malla de detalle 1.

La malla de cálculo horizontal utilizada para simular el nivel de detalle 1 está formada por 16.158 celdas activas y presenta dos espaciamientos en ambas direcciones  $x$  e  $y$ , 100 m y 200 m. De esta forma esta malla tiene un nivel de resolución mayor con celdas de 100 m por 100 m en la zona cercana a Punta Salina que en otras zonas alejadas de



los posibles puntos de descarga, donde las celdas son de 200 m por 200 m de lado. Las mallas de cálculo horizontales utilizadas para simular los niveles de detalle 2 y 3 están formadas por 23.830 y 33.500 celdas activas cuadradas de 100 m por 100 m de lado respectivamente. En la Figura 6 se presenta la grilla horizontal y la batimetría del nivel de detalle 1 definido para este trabajo.

Las tres mallas definidas en el nivel de detalle tienen como condición de borde en las fronteras abiertas el valor de elevación de la superficie libre, velocidad y salinidad calculados en las celdas correspondientes a sus fronteras en el nivel de resolución intermedio 2. El viento también se agrega a este nivel de detalle como un valor de fuerza externa que ejerce una tensión sobre la superficie libre.

### **Calibración y verificación**

El modelo MOHID implementado en la zona cercana a Punta del Este fue calibrado considerando el efecto del caudal fluvial que ingresa al Río de la Plata, de las mareas astronómica y meteorológica que ingresan desde el océano y de los vientos que actúan sobre la superficie libre. El modelo en el nivel global ya fue calibrado en estudios anteriores [3, 10], por lo que la calibración estuvo enfocada en la correcta representación de las corrientes y niveles en la zona cercana a Punta del Este. De todas formas se verificaron series de niveles medidas en Montevideo, Buenos Aires y San Clemente, para verificar la correcta representación del flujo en el modelo global.

El proceso de calibración consiste en el ajuste de ciertos parámetros del modelo para representar correctamente la hidrodinámica de una zona determinada. En este trabajo se utilizaron como valores de partida para los niveles de resolución intermedio 1, 2 y de detalle los parámetros del modelo ya calibrados para el nivel global, y se evaluaron los resultados a partir de la comparación de las series de niveles medidas en el Puerto de Punta del Este por la DNH y los registros de corrientes realizados a 800 m de Punta de la Salina entre julio del 1993 y enero del 1994 contra las series modeladas. La comparación de corrientes se realizó en dos profundidades ya que se cuenta con mediciones realizadas en fondo y en superficie y el modelo cuenta con 10 capas en la dirección vertical. Se analizó la comparación temporal de las componentes Oeste-Este y Sur-Norte de las corrientes medidas y obtenidas con el modelo, y también se realizó la comparación de dichas componentes a través de un diagrama espacial para identificar la correcta representación de las direcciones principales del flujo.

En un principio la calibración hidrodinámica del flujo en la zona cercana a Punta del Este fue realizada en el nivel intermedio 2, ya que en general la resolución de este nivel permite representar las características principales del flujo. Sin embargo, los resultados obtenidos en ese trabajo mostraron que no era posible captar con celdas de 1.000 m x 1.000 m la complejidad del flujo que genera la morfología de la zona, en especial la Punta de la Salina. Debido a esto fue realizado un segundo trabajo de calibración utilizando la malla de detalle 1, centrada principalmente en la zona de Punta Salina con celdas de como máximo 200 m x 200 m, aumentando el tiempo de cálculo computacional requerido.

Una vez realizada la calibración del modelo para representar los niveles y las corrientes generadas por la marea astronómica, la marea meteorológica, el caudal fluvial y los vientos en la zona de Punta del Este se realizaron otras simulaciones para verificar dicha calibración. Para esto, se realizó la modelación del período comprendido entre fines de 1991 y principios de 1992, introduciendo los mismos forzantes y sin modificar las características y los parámetros del modelo calibrado. Durante este período se cuenta con registros de corriente en dos ubicaciones de la zona, a 3.000 m de Punta Salina y a 1.000 m de Punta Piedras del Chileno. Debido a esto fueron utilizadas dos mallas de detalle para representar este período de tiempo, la malla de detalle 1 para validar el modelo con los datos de Punta Salina, y la malla de detalle 2 para validar el modelo utilizando los registros de corriente en la zona de Punta Piedras del Chileno. La correcta representación de los niveles y de las corrientes medidas durante dicho período de tiempo permitió verificar el ajuste de los parámetros del modelo realizado en el proceso de calibración.

## **RESULTADOS**

La correcta representación del flujo en la zona de Punta del Este en el nivel de detalle 1 de resolución fue obtenida manteniendo los mismos parámetros calibrados para el nivel global en todos los niveles de resolución salvo el paso temporal utilizado en cada uno. Estas condiciones son rugosidad absoluta igual a 0,00065 m, viscosidad horizontal determinada por la formulación de Smagorinsky con un factor de 0,4; viscosidad vertical con un modelo de turbulencia que resuelve las ecuaciones del tipo  $\kappa$ - $\epsilon$  denominado GOTM que trabaja acoplado con el MOHID y el factor  $C_D$  que interviene en el cálculo de la tensión de corte del viento igual a 0,001.

Los intervalos de tiempo necesarios para obtener una buena representación hidrodinámica fueron 40 s para el nivel global, 20 s para el nivel intermedio 1, 10 s para el nivel intermedio 2 y 5 s para el nivel de detalle. En trabajos anteriores se determinó que es necesario simular un periodo previo de 6 meses para independizarse de la condición inicial impuesta al modelo en el nivel global de resolución. En este trabajo se determinó un período previo necesario para estabilizar las condiciones del nivel intermedio 1 igual a un mes, partiendo de una condición de reposo y un gradiente horizontal de salinidad lineal entre salinidad cero correspondiente a agua dulce en la frontera interior y salinidad 38 en la frontera oceánica. En el nivel intermedio 2 el período previo es más corto ya que el dominio de cálculo es menor y las condiciones del sistema se estabilizan más rápido. El mismo es de 5 días y la condición inicial de dicho nivel es una condición del reposo y salinidad constante igual a 38. Por último, para las mallas de detalle el período previo requerido para estabilizar las condiciones hidrodinámicas fue de 2 días, partiendo también de una condición de reposo y salinidad uniforme igual a 38 en todo el dominio de detalle.

Con el objetivo de mostrar la correcta representación obtenida con el modelo del movimiento del agua en todo el Río de la Plata y el Frente marítimo en la modelación del período de calibración se presenta en la Figura 7 la comparación de los niveles medidos y obtenidos con el modelo en el nivel global en Montevideo, Buenos Aires y San Clemente para el mes de julio de 1993. En la misma se observa que se reproducen correctamente en todo el dominio modelado las fluctuaciones de la elevación de la superficie libre, lo que muestra una correcta representación de la hidrodinámica del sistema. Por otro lado, en la Figura 8 se presenta la comparación entre los niveles medidos en Punta del Este y los niveles obtenidos con la malla correspondiente al nivel de detalle 1, donde también se observa una buena representación por parte del modelo de las fluctuaciones del nivel medido.

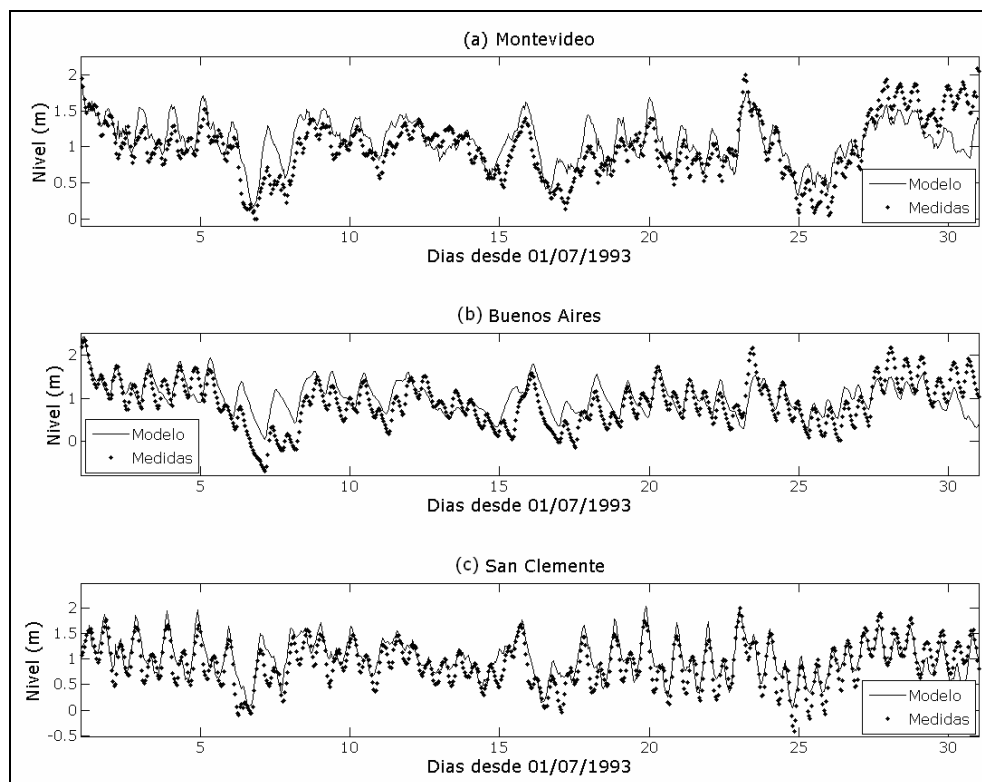


Figura 7: Comparación de los niveles medidos y obtenidos con el modelo global en (a) Montevideo, (b) Buenos Aires y (c) San Clemente, durante julio de 1993.

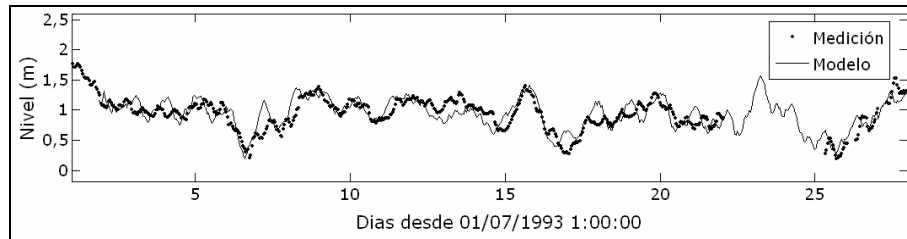


Figura 8: Comparación de los niveles medidos y obtenidos con el modelo utilizando la malla de detalle 1 en Punta del Este durante julio de 1993.

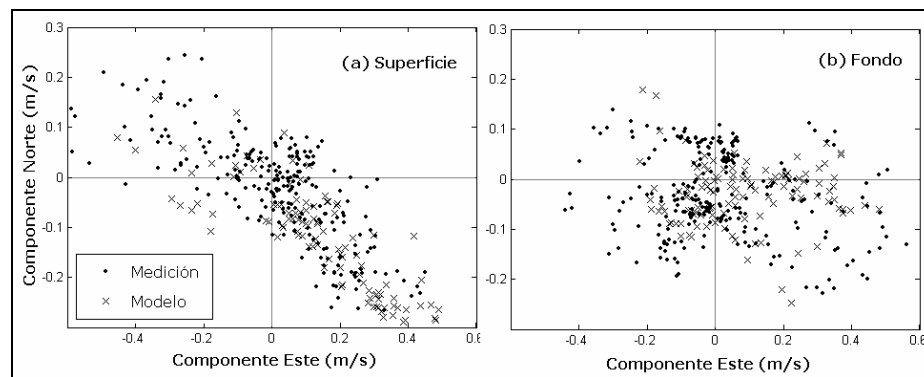


Figura 9: Comparación entre los valores de corriente medidos y modelados en (a) superficie y (b) fondo, en Punta Salina correspondientes al período comprendido entre el 3/7/1993 y el 8/7/1993.

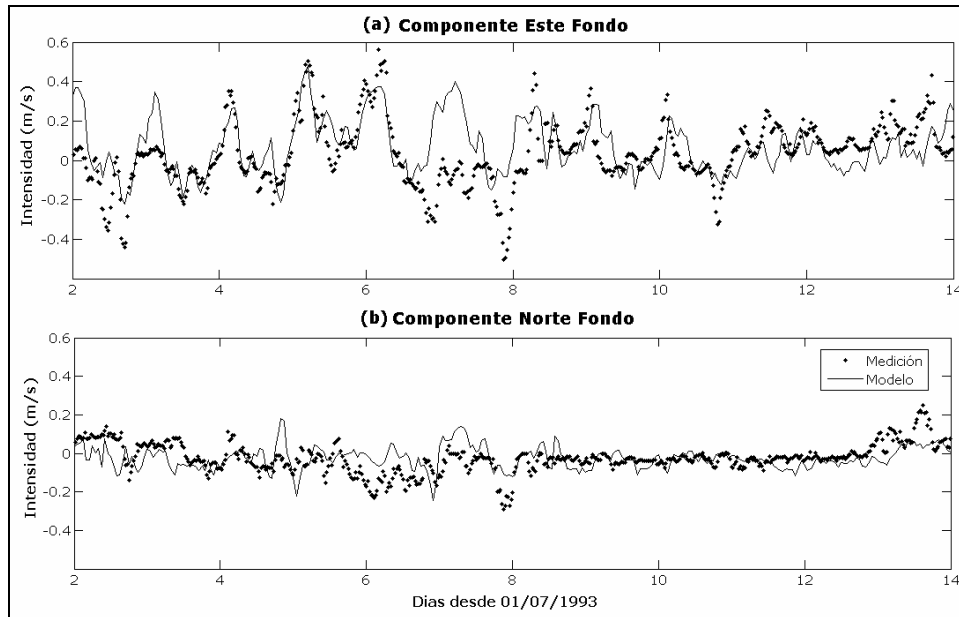


Figura 10: Variación temporal de la componente (a) Este y (b) Norte de la corriente de fondo medida y obtenida con el modelo entre el 2 y el 14 de julio de 1993.

Luego de calibrado, el modelo reproduce las características principales del flujo de la zona, tanto en superficie como en fondo. A modo de ejemplo del ajuste de corrientes, se presenta en la Figura 9 (a) la comparación de la velocidad de corriente medida en superficie en el punto ubicado a 800m de Punta de la Salina y la velocidad de corriente obtenida con el modelo en la capa 7 de la celda representativa del punto de medición, correspondientes a los 5 días comprendidos entre el 3 y el 8 de julio de 1993. Como se observa en dicha figura los ejes del gráfico son



la componente Norte (sentido positivo hacia el Norte) y la componente Este (sentido positivo hacia el Este) de cada valor de velocidad, por lo que este tipo de diagramas permite observar si el modelo simula la tendencia del flujo en un período de tiempo determinado. Se observa claramente que, aunque el modelo no reproduce exactamente los puntos medidos, sí reproduce las direcciones e intensidades que muestran los datos durante este período observando una dirección de flujo preferencial Noroeste-Sureste en la superficie. Por otra parte en la Figura 9 (b) se presenta el diagrama de comparación para la corriente de fondo entre el 3 y el 8 de julio de 1993. En este caso los valores modelados corresponden a la capa 3 de la celda correspondiente al punto de medición. En esta figura se observa nuevamente como el modelo representa el comportamiento del flujo de fondo registrado durante esos días. Comparando además los valores en superficie y en fondo, se observa que los flujos registrados son muy diferentes, y que el modelo representa esas diferencias. Esto muestra claramente la importancia de la modelación tridimensional en esta zona profunda, con grandes variaciones batimétricas y morfológicas.

En la Figura 10 se muestra la variación temporal de las componentes Este y Norte de la corriente de fondo medida y modelada durante el período entre el 2 y el 14 de julio de 1993. Se observa que en la mayor parte del período el modelo reproduce en superficie y en fondo las variaciones temporales de las direcciones y las intensidades de la corriente registrada.

Los resultados obtenidos durante la validación del modelo mantuvieron la calidad obtenida durante la etapa de calibración, tanto en los niveles como en las corrientes. La comparación entre las corrientes registradas en Punta Salina en un punto a 3.000 m de la costa con las corrientes calculadas por el modelo con la malla de detalle 1 se observa en la Figura 11, mientras que en la Figura 12 se presenta la comparación entre las corrientes medidas en la zona de Punta del Chileno y las corrientes obtenidas con el modelo utilizando la malla de detalle 2. Ambas figuras muestran como el modelo representa las principales características del flujo en ambas zonas. Sin embargo es importante mencionar que en la zona a 3000 m de Punta Salina el modelo en general reproduce mayores intensidades en el cuadrante Noroeste que los valores medidos.

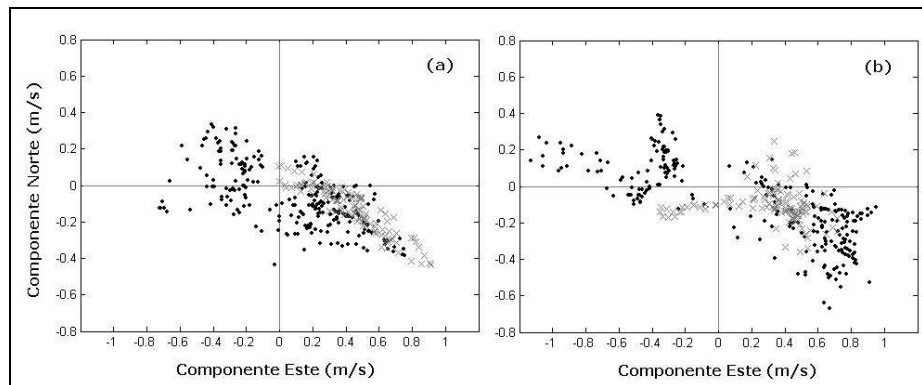


Figura 11: Comparación entre los valores de corriente medidos y modelados con la malla de detalle 1, correspondientes al período comprendido entre (a) el 5 y 10 de diciembre de 1991 y (b) el 15 y 20 de diciembre de 1991.

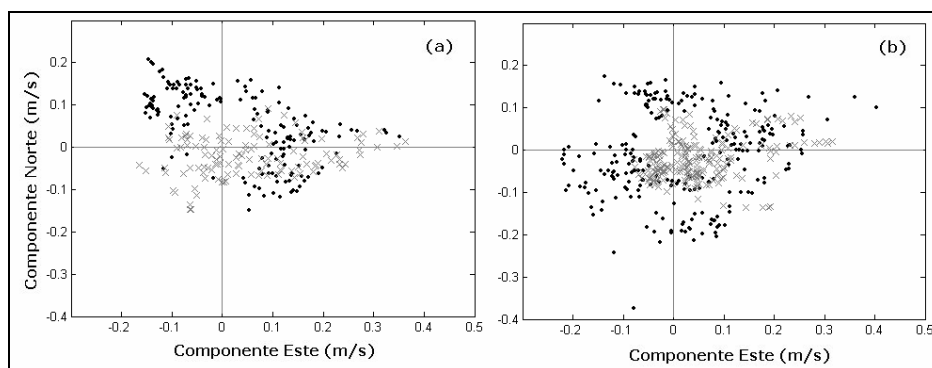


Figura 12: Comparación entre los valores de corriente medidos y modelados con la malla de detalle 2, correspondientes al período comprendido entre (a) el 6 y el 10 de diciembre de 1991 y (b) el 10 y el 15 de diciembre de 1991.



Los resultados presentados anteriormente muestran que utilizando los mismos parámetros numéricos ajustados durante la calibración, y respetando las características del sistema de mallas encajadas con cuatro niveles de resolución, es decir, los intervalos de tiempo, las características de los períodos previos, etc., es posible simular el flujo en la zona de Punta del Este con una buena calidad.

## CONCLUSIONES

La dinámica del flujo en la zona de Punta del Este es compleja, debido principalmente a la interacción del caudal fluvial, mareas, corrientes inducidas por densidad y por los vientos con los elementos morfológicos de la zona, como ser Punta Salina, Isla de Lobos, Isla Gorriti y las variaciones batimétricas asociadas a los mismos. Sin embargo, representando en un modelo tridimensional baroclínico estos forzantes principales se obtuvo una buena reproducción de las principales características de las corrientes en la zona, como se observó en las comparaciones presentadas. Esto muestra que este tipo de herramientas permiten obtener una buena caracterización y comprensión de los patrones de flujo de cualquier zona del Río de la Plata y del Océano Atlántico. Esto a su vez permite estudiar otros procesos relacionados con la hidrodinámica, como ser el transporte de sedimentos, el transporte de sustancias contaminantes, el estudio de distintos escenarios prospectivos, entre otros.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- 1.- IMFIA. Informe Final del Convenio “Estudios técnicos marítimos para evaluar la alternativa de descarga en Punta del Este” entre Tahal Consulting Engineers -Fing (IMFIA). 215 pp. Agosto 2007.
- 2.- Mónica Fossati y Ismael Piedra-Cueva. Modelación tridimensional de la circulación en el Río de la Plata. XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Ciudad Guayana, Venezuela. 10 pp. Octubre de 2006.
- 3.- PEC 11. Plan de Saneamiento Ambiental del Departamento de Maldonado. OSE. IMM. CSI Ingenieros. Informe Final. 1994.
- 4.- MARETEC. Hydrodynamic Module (Mohid). User Guide. MOHID a Water System Model. 63 pp. 2006.
- 5.- Taboada, J. J.; Prego, R. ; Ruiz-Villarreal, M. ; Gómez-Gesteira, M.; Montero, P.; Santos, A. P.; Pérez-Villar V. (1998). Evaluation of the Seasonal Variations in the Residual Circulation in the Ría of Vigo (NW Spain) by Means of a 3D Baroclinic Model. Estuarine, Coastal and Shelf Science (1998) 47, 661–670.
- 6.- Montero, P. 1999. Estudio de la hidrodinámica de la Ría de Vigo mediante un modelo de volúmenes finitos. Ph.D. Dissertation, Universidad de Santiago de Compostela.
- 7.- Martins, F. 1999. Modelacao matemática tridimensional de escoamentos costeiros e estuarinos usando uma abordagem de coordenada vertical genérica. Ph. D. Dissertation, Universidad Tecnica de Lisboa. Instituto Superior Técnico.
- 8.- Villarreal, M.; Montero, P.; Taboada, J. J.; Prego, R.; Leitao, P. C.; Pérez-Villar, V. Hydrodynamic Model Study of the Ria de Pontevedra Under Estuarine Conditions (2002). Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2002, 54, 101–113.
- 9.- Fossati, M. Modelación bidimensional del campo salino en el Río de la Plata. Tesis de la Maestría en Mecánica de los Fluidos Aplicada de la Facultad de Ingeniería, Uruguay. 2005.
- 10.- IMFIA. Informe Final PDT SC\_O\_P\_19\_04 “Modelación hidrosedimentológica del Río de la Plata”. 213 pp. Agosto 2006.

## AGRADECIMIENTO

Se agradece a la Empresa Tahal Consulting Engineers Ltd por financiar el estudio.