



**INSTITUTO NACIONAL DEL AGUA**  
SUBSECRETARÍA DE RECURSOS HÍDRICOS  
SECRETARÍA DE OBRAS PÚBLICAS  
REPÚBLICA ARGENTINA



# **MODELACIÓN DEL IMPACTO DE UN RELLENO COSTERO SOBRE LA DINÁMICA DEL RÍO DE LA PLATA**

## **Informe de Avance N° 1**



*Proyecto LHA 300  
Informe LHA 02-300-08  
Ezeiza, Diciembre de 2008*

**Laboratorio de Hidráulica**

**AUTORIDADES DEL INA**

**PRESIDENTE**

Dr. Raúl A. LOPARDO

**GERENTE DE PROGRAMAS Y PROYECTOS**

Ing. Jorge A. MAZA

**DIRECTOR DEL LABORATORIO DE HIDRÁULICA**

Ing. Julio C. DE LÍO

**JEFE DEL PROGRAMA DE HIDRÁULICA COMPUTACIONAL**

Dr. Ángel N. MENÉNDEZ

**DIRECTOR DEL PROYECTO**

Dr. Ángel N. MENÉNDEZ

**EQUIPO DE TRABAJO**

Sr. Emilio LECERTÚA

Ing. Pablo GARCÍA

Ing. Mariano RE

**INFORME PRODUCIDO POR**

Mariano RE

Angel MENENDEZ

# MODELACIÓN DEL IMPACTO DE UN RELLENO COSTERO SOBRE LA DINÁMICA DEL RÍO DE LA PLATA

## Informe de Avance N° 1

### RESUMEN

Se presenta un estudio acerca del impacto que un relleno costero adyacente a la Isla Demarchi, en la Ciudad de Buenos Aires, tiene sobre la dinámica del Río de la Plata, en base a la modelación matemática. Se describe la implementación del modelo matemático, que incluye la representación de la hidrodinámica y el transporte de calor. Se muestra su validación. Se plantea el relleno definido, al que se aplica el modelo. Se obtienen conclusiones acerca de la extensión de la zona de impacto y el tipo de impacto sobre la velocidad de la corriente, la distribución de sobretemperatura causada por la descarga de la Central Costanera y la tasa de sedimentación.

**Descriptores temáticos:** Modelación Hidrodinámica, Relleno Costero, Pluma Térmica, Sedimentación.

**Descriptores geográficos:** Río de la Plata, Buenos Aires, Costanera Sur, Boca del Riachuelo.

## ÍNDICE

<b>INFORME DE AVANCE Nº 1</b>	<b>1</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN</b>	<b>2</b>
<b>2 RIO DE LA PLATA</b>	<b>3</b>
<b>2.1 Características generales</b>	<b>3</b>
<b>2.2 Hidrodinámica</b>	<b>3</b>
<b>2.3 Modelación Hidrodinámica</b>	<b>4</b>
<b>2.4 Morfología costera</b>	<b>4</b>
<b>3 MODELO DEL RÍO DE LA PLATA</b>	<b>6</b>
<b>3.1 IMPLEMENTACIÓN</b>	<b>6</b>
3.1.1 Sistema de Modelación MOHID	6
3.1.2 Dominios de Cálculo	7
3.1.3 Batimetría	8
3.1.4 Forzantes	10
3.1.5 Disipación	12
3.1.6 Paso temporal	12
<b>3.2 VALIDACION DEL MODELO HIDRODINÁMICO</b>	<b>12</b>
3.2.1 Escenario de validación	12
3.2.2 Comparación	13
<b>4 APLICACIÓN DEL MODELO</b>	<b>17</b>
<b>4.1 DEFINICIÓN DEL RELLENO</b>	<b>17</b>
<b>4.2 DEFINICIÓN DE LOS DOMINIOS</b>	<b>18</b>
<b>4.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	<b>24</b>
<b>5 CONCLUSIONES</b>	<b>36</b>

## **1 INTRODUCCIÓN**

La construcción del aliviador del Arroyo Maldonado plantea el problema de disponer de un volumen muy significativo de tierra y escombros dentro del perímetro de la ciudad de Buenos Aires. El Gobierno de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires ha proyectado la construcción de un relleno en el Río de la Plata, adyacente a la Isla Demarchi, para disponer de ese material. Este relleno producirá un impacto sobre otros usos del río.

El objetivo de este estudio es producir una evaluación del impacto hidráulico que el relleno habrá de generar en su entorno. En particular, interesa establecer la afectación sobre dos de los usos más significativos del Río de la Plata en su zona de influencia: las descargas del agua de refrigeración de la Central Costanera – que podría impactar sobre sus obras de toma – y la sedimentación en el Canal de Acceso Sur.

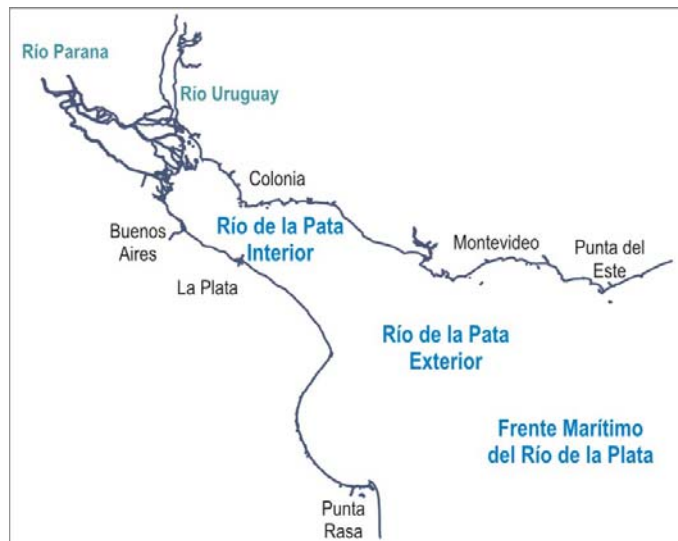
En este Primer Informe de Avance se describe la implementación del modelo y se presentan y discuten los resultados obtenidos con su aplicación al relleno definido. Previamente, se describen en forma sucinta las principales características físicas del Río de la Plata y de la zona de intervención.

## 2 RIO DE LA PLATA

### 2.1 Características generales

El Río de la Plata es un extenso estuario localizado en la costa Este de Sudamérica, aproximadamente entre las latitudes  $34^{\circ}$  S y  $36^{\circ}$  S y las longitudes  $54^{\circ} 50'$  O y  $58^{\circ} 30'$  O. El río, cuya forma de embudo se orienta en el sentido NE-SE, alcanza una longitud aproximada de 290 km. Rápidamente adquiere un ancho de unos 50 Km. en la zona de aguas arriba (Río de la Plata Superior), incrementándose hasta unos 70 Km. en la zona del Río de la Plata Medio (ambas zonas constituyen el llamado Río de la Plata Interior) y expandiéndose en el Río de la Plata Exterior hasta alcanzar unos 200 Km. en línea imaginaria Punta Rasa (Argentina) - Punta del Este (Uruguay) (Figura 2.1.1).

Sobre la costa argentina del Río de la Plata Interior, y dentro de la zona que se extiende desde la cabecera hasta la línea imaginaria Punta Piedras (Argentina) – Montevideo (Uruguay), se desarrolla la Región Metropolitana de Buenos Aires (RMBA), el principal conglomerado urbano del país con unos 14 millones de habitantes donde, además de población, se concentra fuertemente la actividad industrial de la Argentina. La Ciudad Autónoma de Buenos Aires es el centro de gravedad de esta región.



**Figura 2.1.1.** Río de la Plata

### 2.2 Hidrodinámica

Los forzantes principales de la hidrodinámica del Río de la Plata son la descarga de los tributarios principales que penetran en su cabecera (ríos Paraná y Uruguay), la onda de marea que ingresa desde el océano y los vientos que actúan sobre toda la superficie del agua.

El caudal medio del Río de la Plata es del orden de los 23.000 m<sup>3</sup>/s (Jaime y Menéndez, 2002). Más del 97% del ingreso de agua al Río de la Plata es aportado por los ríos Paraná y Uruguay, con el porcentaje restante distribuido en una serie de relativamente pequeñas descargas que llegan a ambos márgenes. El río Paraná llega al Río de la Plata a través de un delta, presentando una marcada estacionalidad y alcanzando caudales que pueden superar los 50,000 m<sup>3</sup>/s durante las crecidas extraordinarias. El río Uruguay tiene un caudal medio de aproximadamente 4.700 m<sup>3</sup>/s y se distingue por tener mayor variabilidad del ciclo estacional, con caudales máximos tanto en otoño (abril-mayo) como en primavera (octubre).

La onda oceánica que arriba al Río de la Plata tiene un régimen astronómico micromareal (amplitud de pocas decenas de centímetros), por lo que los procesos atmosféricos, especialmente el régimen de vientos oceánicos (condicionado por el anticiclón del Atlántico Sur), tienen un efecto relevante en la forma e intensidad de la onda incidente. La componente de mareas M<sub>2</sub> (componente lunar principal semidiurna) representa más del 65% de la energía presente en la marea (D'Onofrio et al., 1999).

El viento actúa sobre la superficie del río variando los niveles, la velocidad de propagación de la onda de marea y la mezcla vertical. El fenómeno meteorológico más importante para la dinámica del Río de la Plata es la "Sudestada", caracterizada por la persistencia de vientos, de regulares a fuertes, del sector Sudeste.

### 2.3 Modelación Hidrodinámica

En la región existe una larga experiencia en el desarrollo y aplicación de modelos numéricos hidrodinámicos al Río de la Plata.

La experiencia del INA en la modelación numérica hidrodinámica de este cuerpo de agua se remonta a principios de la década de 1970, cuando se efectuaron intentos iniciales. El primer desarrollo sistemático, que fue pionero en la región, fue presentado en la tesis de graduación de Molinari (1986), que utilizó el software HIDROBID II (Menéndez, 1985, 1990) para modelación bidimensional. Mejoras y aplicaciones de este modelo siguieron en tesis de graduación sucesivas (Albarracín, 1987; Olalde, 1988). Entre las últimas aplicaciones, también desarrolladas utilizando el software HIDROBID II, se destacan el modelo RP2000, que presenta una gran resolución espacial (malla de 1.000 m de lado) y una cuidadosa calibración (Jaime y Menéndez, 1999), y el RPP2D (Re y Menendez, 2003), capaz de simular la generación de ondas de tormenta, cuyo dominio incluye gran parte del Frente Marítimo. Una aplicación posterior a este desarrollo es el modelo RPP3D (Kind, 2004), que tiene como objetivo estudiar la interfase entre las masas de agua dulce y salada del Río de la Plata, utilizándose en este caso un modelo matemático tridimensional basado en el software de dominio público POM (Princeton Ocean Model).

Se destacan, además, otros trabajos de modelación del Río de la Plata efectuados en la región, como los de Guarga et al. (1991), Kaplan (1998) y Simionato et al. (2004).

### 2.4 Morfología costera

Los rasgos geomorfológicos reconocidos de la zona costera de la Ciudad de Buenos Aires corresponden a una costa de acreción, condicionada por las características de la hidrodinámica litoral. Este sector de ribera presenta una importante modificación respecto de sus características naturales debido a la acción antrópica. La secuencia de estas modificaciones fue estudiada, entre otros, por Holocwan (1996).

En la evolución costera de la ribera de la Ciudad de Buenos Aires, los rellenos artificiales deben ser considerados como un importante proceso morfogenético. Según Marcomini y López (2004), las superficies rellenadas artificialmente desde 1836 en el litoral de la ciudad de Buenos Aires, hasta la configuración de la costa actual, fue de aproximadamente 2.054 hectáreas, con una progradación que varió de 400 a 1.000 m, dependiendo del sector costero. El periodo durante el cual fueron rellenadas las mayores áreas fue entre 1964 y 1991, correspondiendo en un 80% al sector de Costanera Sur y en un 20% al sector de Costanera Norte. A modo de ilustración, en las figuras 2.4.1 y 2.4.2 se presentan algunos de estos cambios en la línea de costa en el sector de Costanera Sur.



**Figura 2.4.1.** Fotografías aéreas referidas a los años 1964 y 1998 de la Costanera Sur (Marcomini y López, 2004).



**Figura 2.4.2.** Comparación del sector costero de Costanera Sur (<http://mapa.buenosaires.gov.ar/>).

### 3 MODELO DEL RÍO DE LA PLATA

#### 3.1 IMPLEMENTACIÓN

##### 3.1.1 Sistema de Modelación MOHID

Para este estudio se utiliza el sistema de modelación MOHID, desarrollado y mantenido por MARETEC (Marine and Environmental Technology Research Center) en el Instituto Superior Técnico (IST) de la Universidad Técnica de Lisboa. MOHID permite la adopción de una filosofía de modelación integrada, no solo de procesos físicos o biogeoquímicos, sino también de múltiples escalas y sistemas, permitiendo el uso de modelos anidados. La versión inicial de este sistema (Neves, 1985) fue un modelo bidimensional para la simulación de mareas, del cual se mantuvo el nombre “*MOdelo HIDrodinâmico*”. El Sistema MOHID consiste en una herramienta capaz de simular problemas costeros complejos y flujos estuarinos (Cancino y Neves, 1999, Martins et al. 2001, Coelho et al. 2002, Trancoso et al. 2005, Saraiva et al. 2007, entre otros).

MOHID resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes en tres dimensiones utilizando las aproximaciones hidrostáticas y de Boussinesq:

$$(1) \quad \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(uu)}{\partial x} + \frac{\partial(vu)}{\partial y} + \frac{\partial(wu)}{\partial z} - fv = -g \frac{\rho_\eta}{\rho_0} \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_{atm}}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho'}{\partial x} dz +$$

$$\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial x} \left( \nu_h \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial y} \left( \nu_h \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu_v \frac{\partial u}{\partial z} \right)$$

$$(2) \quad \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial(uv)}{\partial x} + \frac{\partial(vv)}{\partial y} + \frac{\partial(wv)}{\partial z} - fu = -g \frac{\rho_\eta}{\rho_0} \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_{atm}}{\partial y} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho'}{\partial y} dz +$$

$$\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial x} \left( \nu_h \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial y} \left( \nu_h \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu_v \frac{\partial v}{\partial z} \right)$$

$$(3) \quad \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

donde  $u$ ,  $v$  y  $w$  son las componentes del vector velocidad en las direcciones  $x$ ,  $y$  y  $z$  respectivamente,  $f$  el parámetro de Coriolis,  $\nu_h$  y  $\nu_v$  los coeficientes de viscosidad turbulenta en las direcciones horizontal y vertical y  $p_{atm}$  es la presión atmosférica. La masa específica es  $\rho$ , la anomalía de masa específica es  $\rho'$  y la densidad de referencia es  $\rho_0$  ( $\rho = \rho_0 + \rho'$ ),  $\rho(\eta)$  representa la densidad en la superficie libre. La masa específica se calcula como una

función de la temperatura y la salinidad mediante una ecuación de estado simplificada (Leendertsee y Liu, 1978).

La técnica numérica de resolución de estas ecuaciones se formula mediante volúmenes finitos, con una discretización vertical general que permite la implementación simultánea de varios tipos de coordenadas (Chippada et al. 1998; Martins et al. 2001). En el plano horizontal, las ecuaciones se discretizan utilizando una grilla escalonada Arakawa-C. La discretización temporal se lleva a cabo por medio de un algoritmo semi-implícito (ADI), con dos niveles por iteración.

El sistema MOHID también incluye la posibilidad de utilizar un modelo bidimensional (resultante de integrar las ecuaciones anteriores sobre la profundidad), especialmente apto para el Río de la Plata dada su escasa profundidad relativa (frente a la longitud de onda de marea), salvo en zonas donde pueda producirse alguna estratificación. En el Río de la Plata Interior esto sólo puede producirse en el entorno de descargas térmicas (es decir, aquellas que ingresan con una temperatura superior a la del cuerpo de agua), que es uno de los problemas a tratar en el presente estudio.

### 3.1.2 Dominios de Cálculo

El modelo se ha implementado en tres dominios anidados (Figura 3.1.1). El Dominio 1, que es el de mayor extensión (y menor resolución), provee de condiciones de borde al Dominio 2, y éste al Dominio 3, que es el de menor extensión (y mayor resolución). La zona problema se resuelve detalladamente en el Dominio 3.

El Dominio 1 abarca prácticamente todo el Río de la Plata Interior, llegando hasta la línea imaginaria Punta Piedras (Argentina) – Punta del Tigre (Desembocadura del río Santa Lucía, Uruguay). Sus dimensiones son de 210 km x 100 km, discretizado con 210 celdas en la dirección x, y 100 en la dirección y. El Dominio 2 se ubica sobre la costa del Río de la Plata Superior, aproximadamente desde San Isidro hasta Ensenada, con una longitud de 40 km y un ancho de 27 km, discretizados en 400 celdas en x y 270 celdas en y. El Dominio 3 tiene 8 km de largo y 6 km de ancho, discretizados en 400 columnas y 300 filas, comenzando en cercanías del puerto de Buenos Aires y llegando hasta Quilmes. La elección de los bordes de los dominios 2 y 3 se efectuó en base a criterios que se explican más abajo.

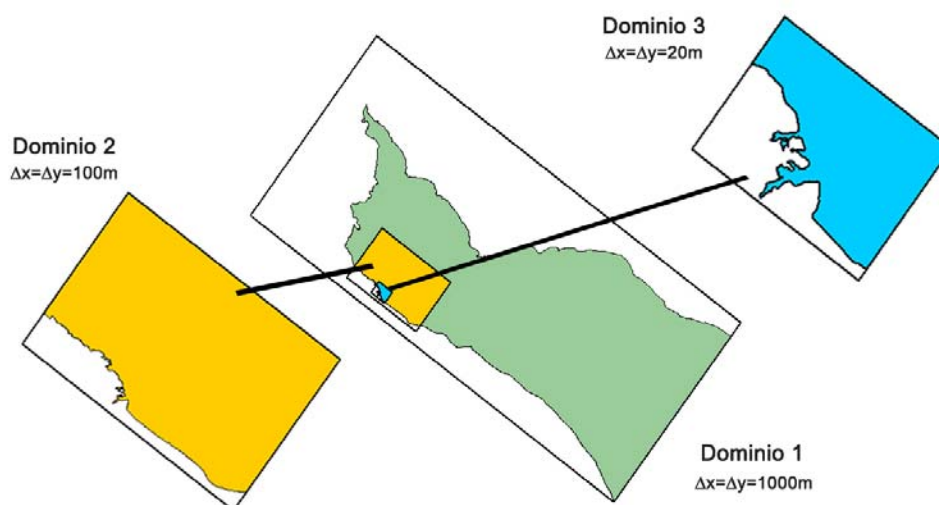


Figura 3.1.1. Dominios de cálculo.

Los efectos de estratificación térmica son resolubles recién a la escala del Dominio 3, de modo que sólo para este último se efectuará una modelación tridimensional (3D). En cambio, para los dos restantes se lleva a cabo una modelación bidimensional (2D).

### 3.1.3 Batimetría

Para construir el “modelo digital del terreno” (MDT) para el fondo del río se utilizó una base de datos batimétricos puntuales, digitalizados a partir de las siguientes cartas náuticas del Servicio de Hidrografía Naval (SHN).

- SHN-H116, Río de la Plata Medio y Superior
- SHN-H118, Río de la Plata Superior
- SHN-H130, Delta del Paraná
- SHN-H156, Puerto de Buenos Aires

Estas cartas representan distintas escalas de resolución, de modo que incluyen diferentes densidades de puntos. En las zonas de superposición entre cartas se seleccionaron los puntos con mayor densidad. En total, se digitalizaron 5.424 puntos. Las figuras 3.1.2, 3.1.3 y 3.1.4 muestran los MDT resultantes para cada dominio.

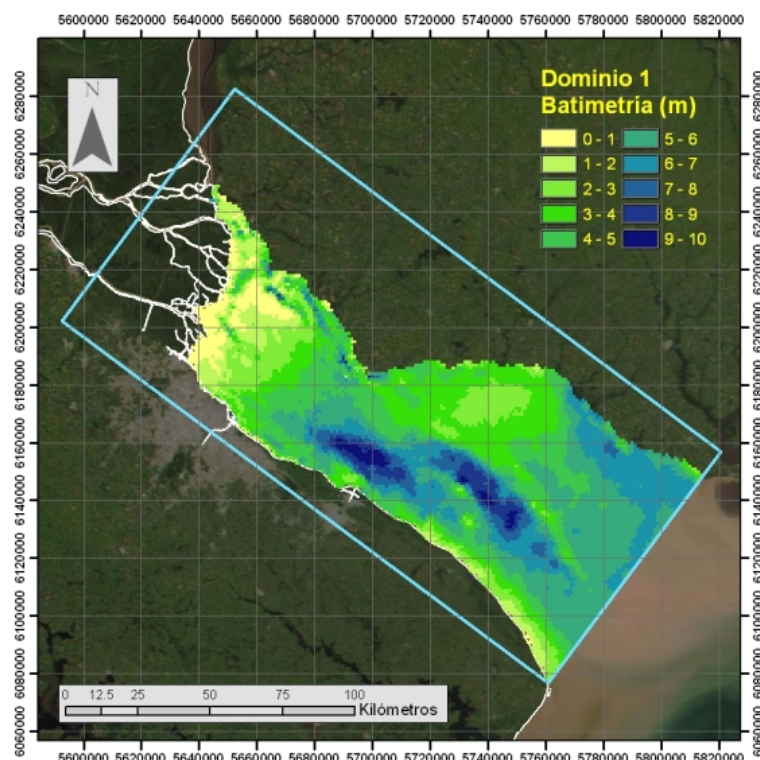


Figura 3.1.2. Batimetría Dominio 1

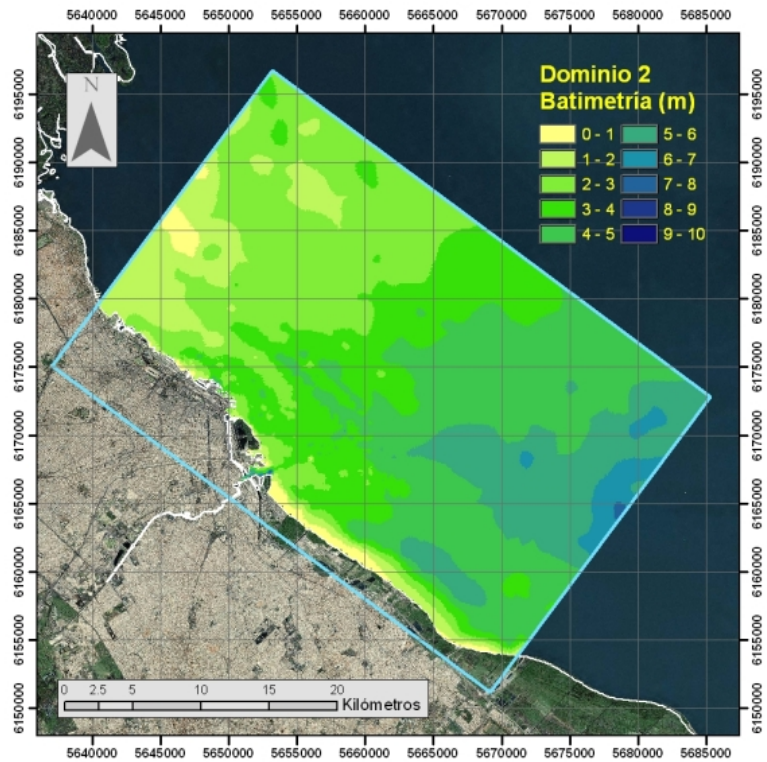


Figura 3.1.3. Batimetría Dominio 2

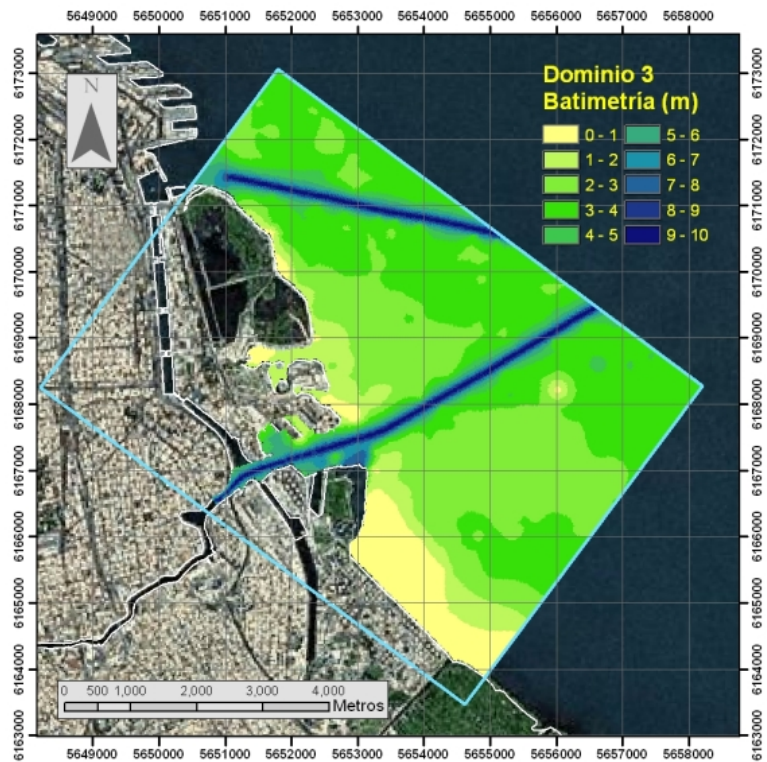


Figura 3.1.4. Batimetría Dominio 3

La batimetría del Dominio 3 incluye los canales de navegación (Canal de Acceso al Puerto de Buenos Aires, Acceso Norte y Acceso Sur), que en los dos dominios restantes no llegan a ser representados (Figura 3.1.4). A estos canales se les asignó una profundidad de 9,75 m (32 pies), sobre un ancho de 100 m de solera, con taludes de pendiente 1:8. El ancho de canal dibujado es de aproximadamente 200 m. Por cada sección de canal se dan tres puntos: eje de canal, talud izquierdo y talud derecho (la separación entre ellos es de 75 m). Por lo tanto, las profundidades consideradas son 9.75 m y 6.63 m.

### 3.1.4 Forzantes

Para el Dominio 1 (modelación 2D), dos de los forzantes de movimiento, la marea oceánica y el aporte de los tributarios, son implementados como condiciones de borde, mientras que el tercero, los vientos, se incluye como un campo de fuerzas.

La onda de marea oceánica se especifica en la línea Punta Piedras – Punta del Tigre, a partir de resultados provistos por el modelo regional RPP2D (Re & Menéndez 2003, 2007).

El aporte de los tributarios se materializa como ingresos de caudal en la cabecera del Río de la Plata, habiéndose representado las bocas de los ríos Uruguay, Sauce - Paraná Bravo, Paraná Guazú, Paraná Mini, Paraná de las Palmas, Barca Grande y Luján (Figura 3.1.5). Las series temporales de caudales de los ríos Uruguay y Paraná fueron obtenidos del Sistema Nacional de Información Hídrica (Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación); a partir del caudal del río Paraná, los correspondientes a sus diversos brazos se obtienen a través de un esquema de partición conocido (Bombardelli et al., 1995). Por su parte, el caudal medio del río Luján es de 15 m<sup>3</sup>/s.



Figura 3.1.5. Ubicación de los tributarios.

El campo de vientos actuante sobre la superficie del agua fue generado a partir de los datos de reanálisis de NCEP/NCAR (Kalnay et al. 1996), que son de libre disponibilidad (<http://www.cdc.noaa.gov/cdc/data.ncep.reanalysis.html>). Estos tienen una resolución de  $1,9048^\circ$  de latitud y  $1,875^\circ$  de longitud, por lo tanto para esta modelación se realizó una interpolación espacial para representar al forzante en la zona problema. El intervalo temporal de los datos es de 6 horas, que se interpolan linealmente para tiempos intermedios.

Los efectos de la marea oceánica y la descarga de los tributarios sobre el Dominio 2 (modelación 2D) se imponen a través de las condiciones sobre los bordes abiertos calculadas con el modelo del Dominio 1. La acción de los vientos interviene de manera análoga a la del Dominio 1.

Similarmente, el modelo del Dominio 2 provee de condiciones sobre los bordes abiertos para el Dominio 3 (modelación 3D) que representan los efectos de marea y de tributarios, con la salvedad de que las velocidades medias verticales provistas por el modelo del Dominio 2 son transformadas en perfiles verticales. Además, se agregan la descarga del Matanza-Riachuelo (caudal medio de  $8 \text{ m}^3/\text{s}$ ) y las dos descargas y dos tomas de la Central Costanera, que se convierten en significativas a esta escala de resolución. En particular, es necesario especificar la sobretemperatura de estas dos descargas, dato provisto por Central Costanera (Figura 3.1.6). El campo de vientos se obtiene de manera similar a los otros dos dominios, sólo que esta vez este actúa como condición de borde en la superficie libre.

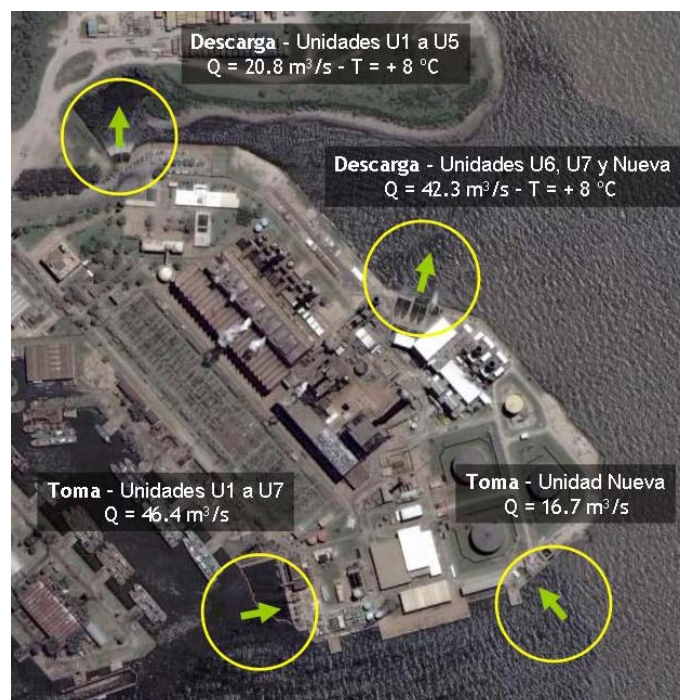


Figura 3.1.6. Esquema de Descargas y Tomas en Central Costanera.

### 3.1.5 *Disipación*

La energía mecánica se disipa en torbellinos de eje horizontal, parametrizados con un coeficiente de rugosidad, y de eje vertical, parametrizados con una viscosidad de torbellino.

El coeficiente de rugosidad condiciona la tensión de corte contra el fondo, que depende de la velocidad local del fluido. La parametrización de esta variable se realizó a partir de un coeficiente rugosidad  $n$  de Manning de 0,015, el cual coincide con lo recomendado en estudios antecedentes (Jaime y Menéndez, 1999).

La viscosidad de torbellino controla la difusión. La estimación de este parámetro se realizó a partir del Modelo de Smagorinsky (Smagorinsky, 1963), obteniéndose valores aproximadamente en el rango 1-5  $m^2/s$ . Los resultados son relativamente poco sensibles a este parámetro.

### 3.1.6 *Paso temporal*

Por razones de precisión (y, eventualmente, de estabilidad numérica), el paso temporal de cálculo depende del paso espacial y de la celeridad de propagación de la onda de marea (que es el fenómeno que determina la escala de movimiento más rápida). Estos se combinan en el número de Courant. Con MOHID se recomiendan valores del número de Courant no superiores a 4.

En base a este criterio, se trabajó con los siguientes valores del paso temporal  $\Delta t$ :

- Dominio 1:  $\Delta t = 180$  seg (número de Courant = 3,82)
- Dominio 2:  $\Delta t = 20$  seg (número de Courant = 3,59)
- Dominio 3:  $\Delta t = 2$  seg (número de Courant = 1,95)

## 3.2 VALIDACION DEL MODELO HIDRODINÁMICO

### 3.2.1 *Escenario de validación*

Se dispuso de mediciones de velocidad de corriente, realizadas por AYSA (Agua y Saneamientos Argentinos S.A.) en las ubicaciones que se presentan en la Figura 3.2.1, cercanas a las tomas de agua de Palermo y de Bernal, para el período 10/Mar a 20/Abr de 2004. Para la validación se utilizó la ventana temporal 19/Mar/04 – 24/Mar/04, que es un período durante el cual la situación es de vientos suaves, que puede considerarse como representativo de un escenario hidrodinámico medio.

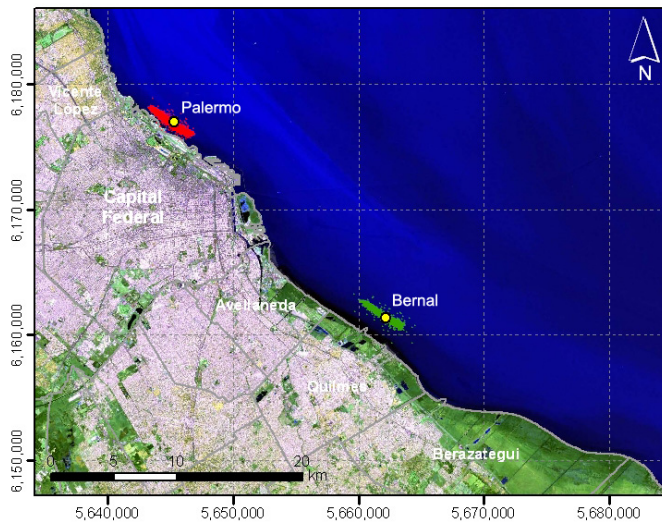
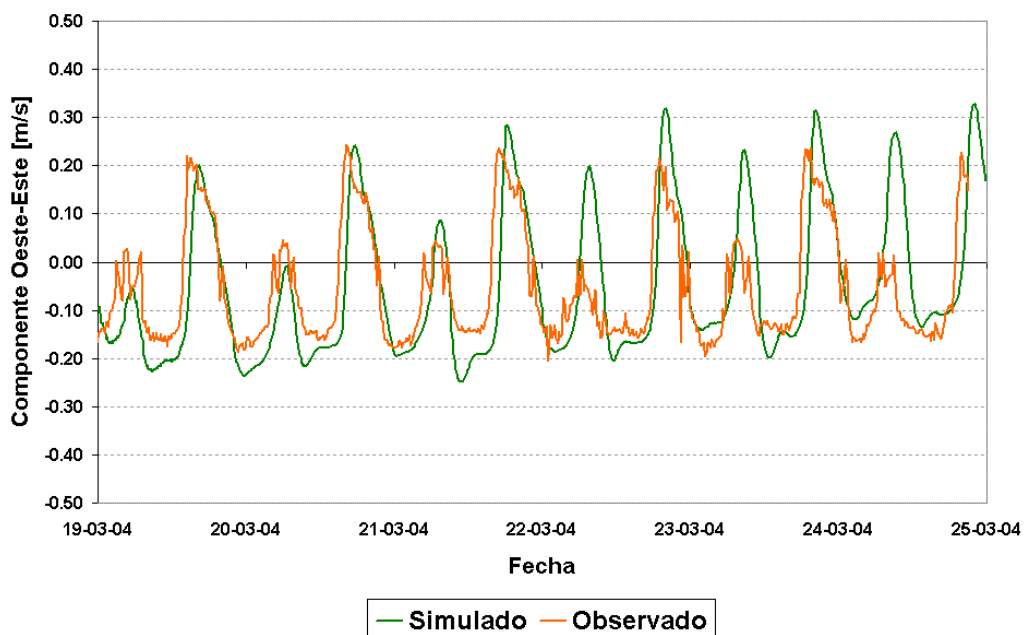


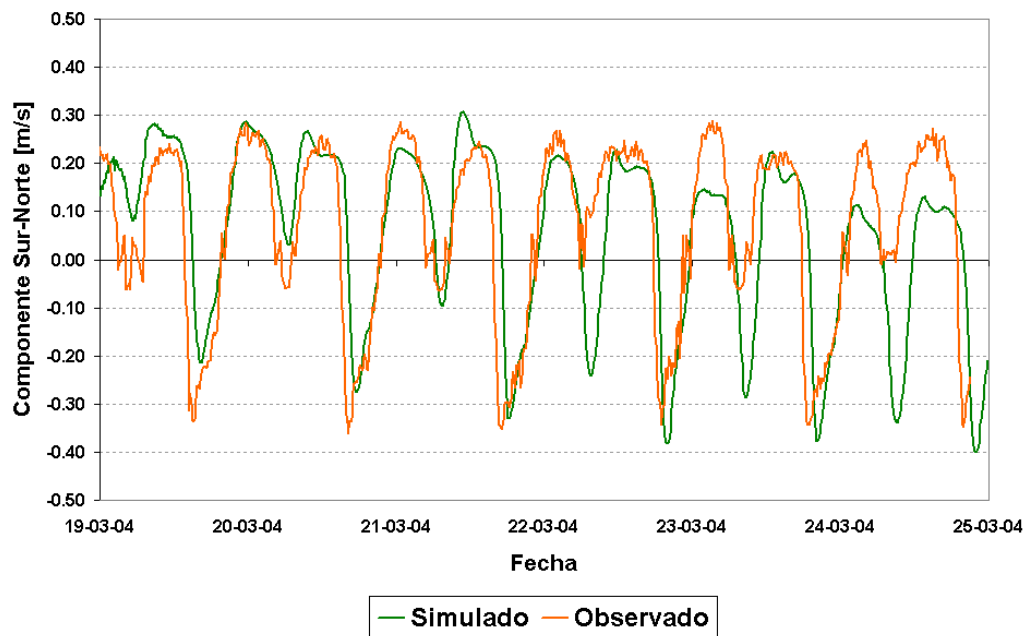
Figura 3.2.1. Ubicación de puntos de medición de velocidades.

### 3.2.2 Comparación

En las Figuras 3.2.2 y 3.2.3 se muestra la comparación entre las series temporales de las dos componentes de la velocidad de la corriente, de acuerdo al modelo y a las mediciones, para las estaciones Palermo y Bernal, respectivamente. El acuerdo general se considera satisfactorio. La Figura 3.2.4 muestra la comparación entre las rosas de corrientes para el mismo intervalo de tiempo. Se observa que existe compatibilidad general en cuanto a la dirección principal de movimiento y la magnitud de los picos de corriente en ambos sentidos. La leve diferencia de dirección que se observa para la estación Palermo, la más cercana a la costa, es un efecto de la representación discreta del contorno costero (con celdas cuadradas).

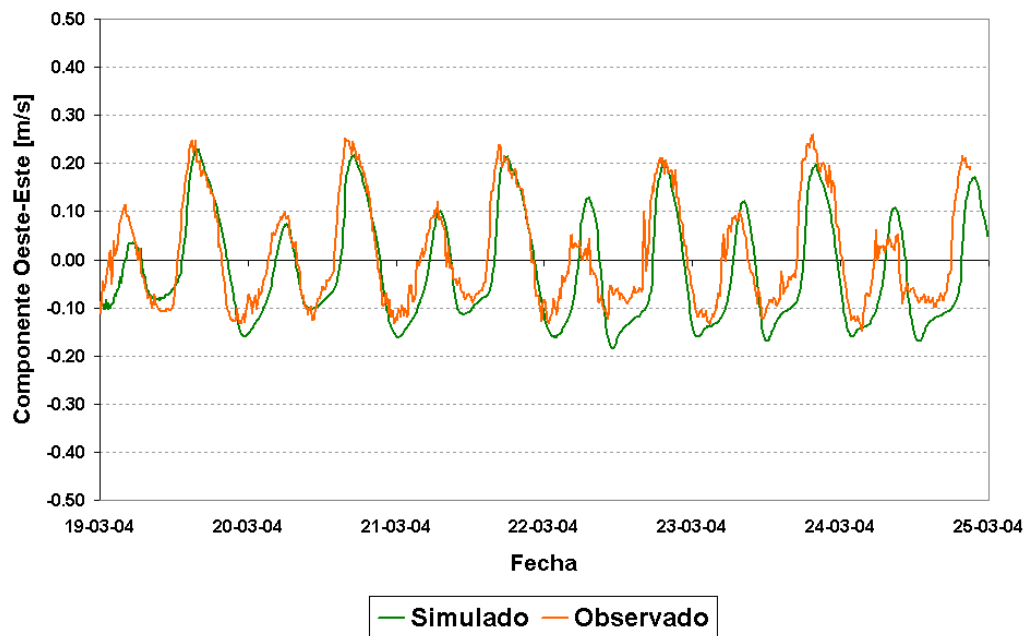


a) Componente Oeste-Este

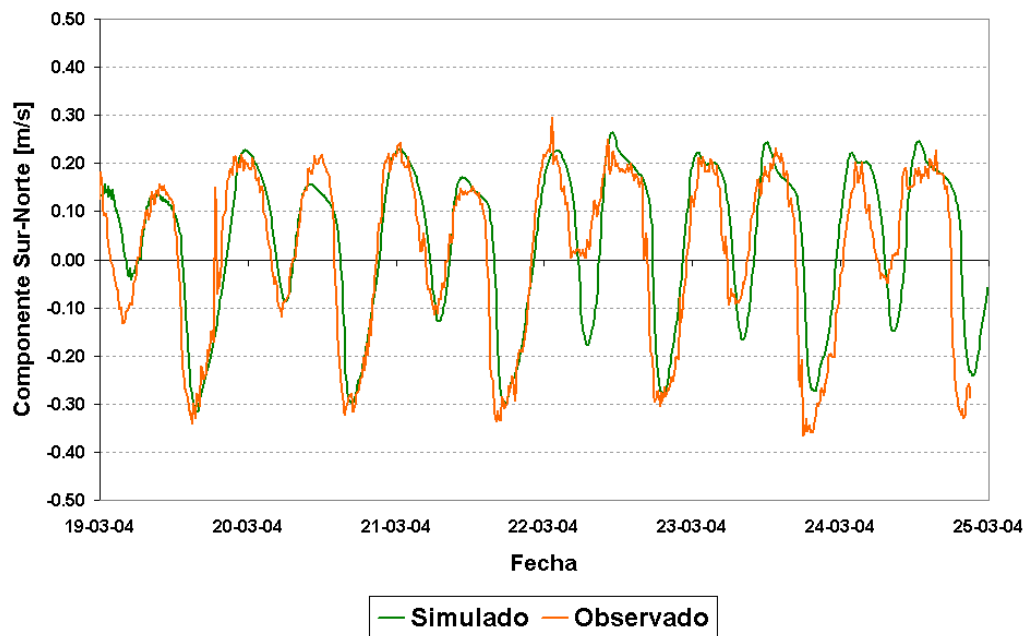


b) Componente Sur-Norte

Figura 3.2.2. Comparación de velocidades medidas y calculadas. Palermo.

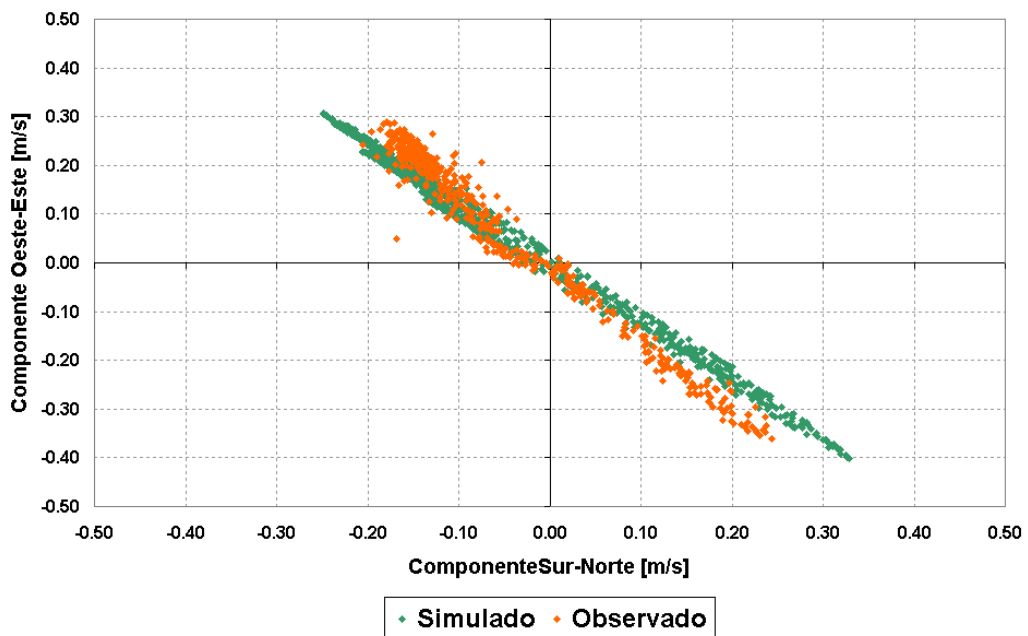


a) Componente Oeste-Este

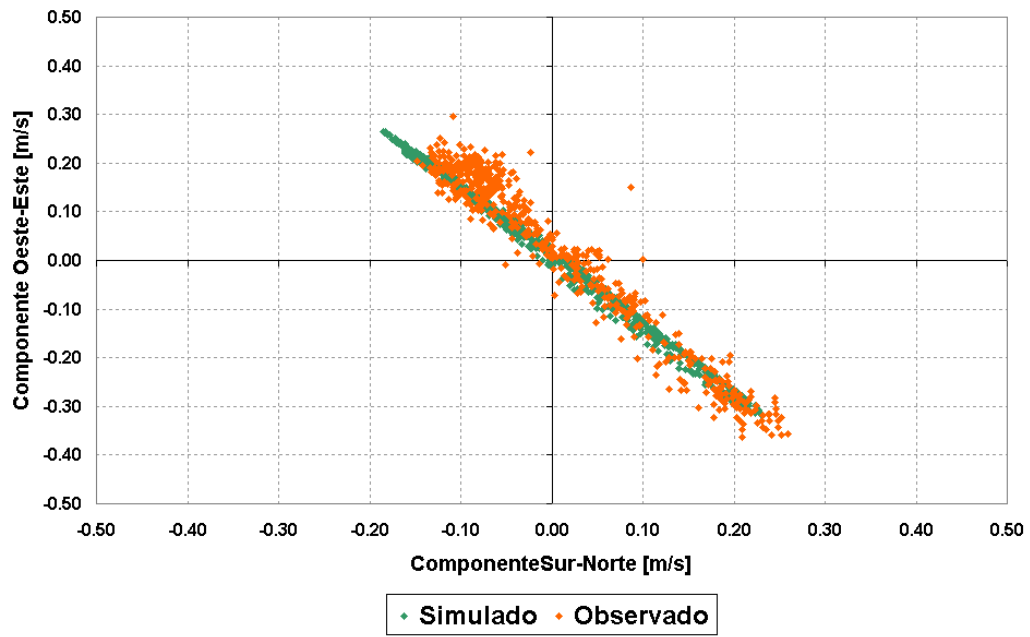


b) Componente Sur-Norte

Figura 3.2.3. Comparación de velocidades medidas y calculadas. Bernal.



a) Palermo



b) Bernal

Figura 3.2.4. Rosas de corrientes.

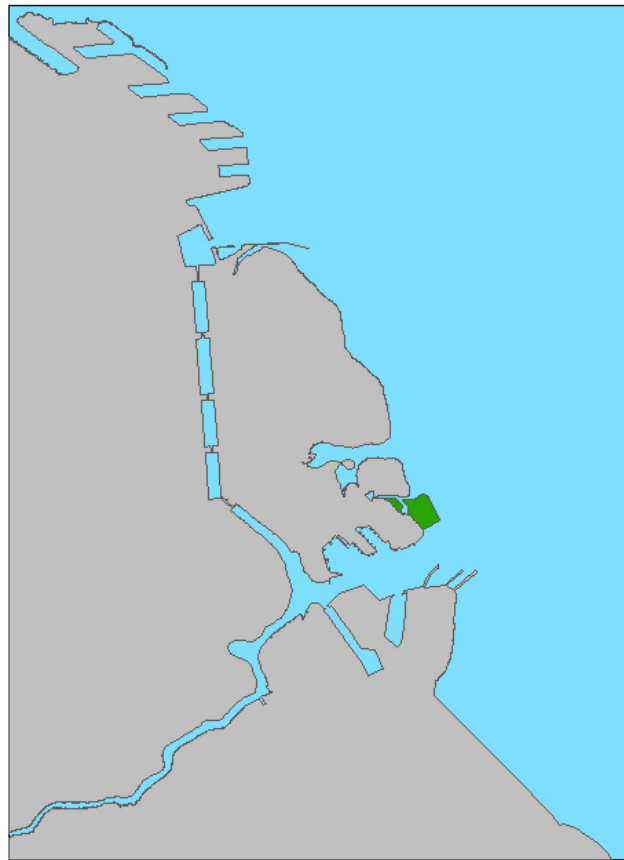
## 4 APLICACIÓN DEL MODELO

### 4.1 DEFINICIÓN DEL RELLENO

En la Figura 4.1.1 se muestra el relleno estudiado, que abarca aproximadamente 11 ha. Nótese que este puede considerarse como una rectificación costera, tal como se aprecia en la vista más panorámica que se presenta en la Figura 4.1.2. Este relleno será el sitio de disposición de tierra y escombros resultantes de la construcción del aliviador del A° Maldonado.



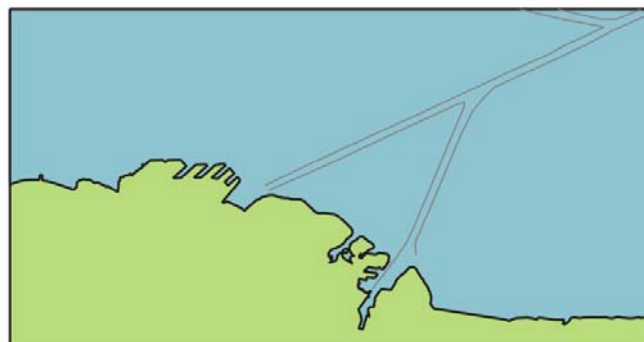
*Figura 4.1.1. Planimetría del relleno*



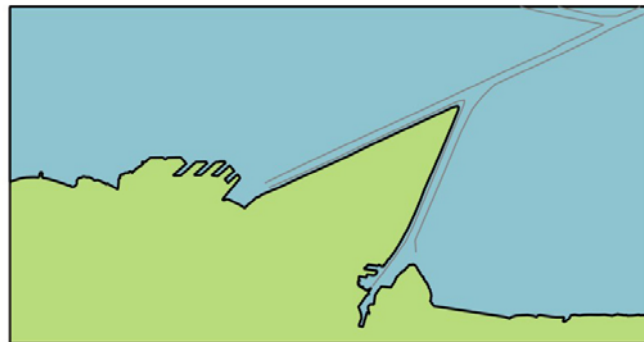
**Figura 4.1.2.** Vista panorámica del relleno

## 4.2 DEFINICIÓN DE LOS DOMINIOS

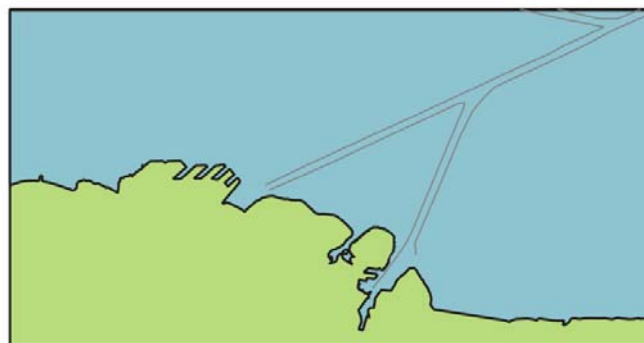
La elección de los dominios de cálculo se realizó en base al criterio de evitar efectos del relleno sobre las condiciones de borde, de modo que estas puedan ser provistas por los resultados del modelo 'padre' hacia el modelo 'hijo'. Específicamente, se plantearon tres escenarios de relleno: Situación Actual, Relleno Potencial y Relleno Ampliado, representados en la Figura 4.2.1. El escenario Situación Actual representa las condiciones sin intervención costera; el Escenario Relleno Potencial constituye una situación hipotética de máxima en la que se ocuparía toda el área entre los canales de Acceso Norte y Sur, por un total de 900 ha; el Escenario Relleno Ampliado esquematiza una situación que incluye el proyecto propuesto más una extensión de aproximadamente 30 ha.



a) Escenario Situación Actual



b) Escenario Relleno Potencial

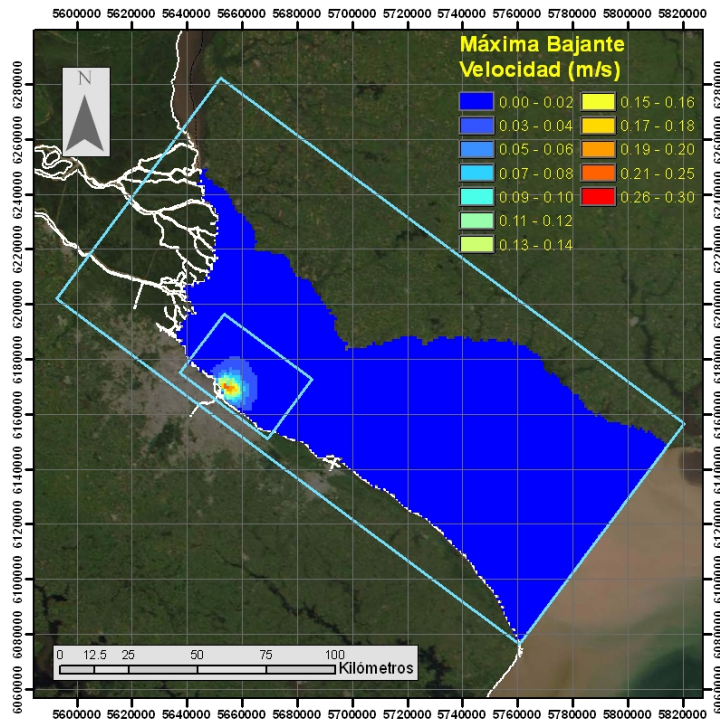


c) Escenario Relleno Ampliado

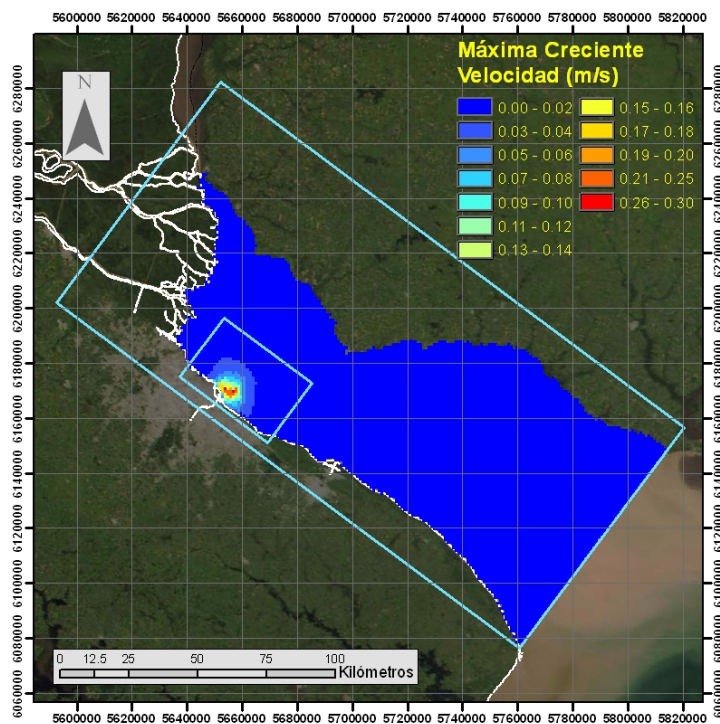
**Figura 4.2.1.** Escenarios de las simulaciones de elección de dominios.

Como variable de control del impacto de los rellenos se tomó a la velocidad de la corriente, que es la que muestra mayor sensibilidad. Se utilizó el periodo enero de 2004. Para la elección del Dominio 2 se efectuó la comparación entre los resultados del modelo de Dominio 3 para los escenarios Relleno Potencial y Situación Actual; de esta manera, el Dominio 2 podrá ser utilizado como base para estudiar cualquier extensión de relleno en el futuro. En la Figura 4.2.2 se muestra el módulo de la diferencia de velocidad entre ambos escenarios para los instantes de máxima bajante y máxima creciente (cuando el impacto es mayor). Se observa que, en ambos casos, resulta menor a 2 cm/s en los bordes del Dominio 2, valor considerado despreciable (ya que es menor a los errores de medición). Como complemento, en la Figura 4.2.3 se presenta la diferencia entre módulos de la velocidad para los mismos instantes. Ellas permiten distinguir entre la zona donde se produce una disminución de velocidad hacia el sudeste y noroeste, y la zona donde hay un aumento de la velocidad, hacia el noreste.

Para definir el Dominio 3 se analizó la diferencia entre los resultados del Dominio 2 para los escenarios Relleno Ampliado y Situación Actual; el Dominio 3 es el adecuado para estudiar el presente proyecto de relleno y alguna eventual ampliación. Las Figuras 4.2.4 y 4.2.5 muestran los resultados, de donde surgen conclusiones equivalentes a las del caso anterior.

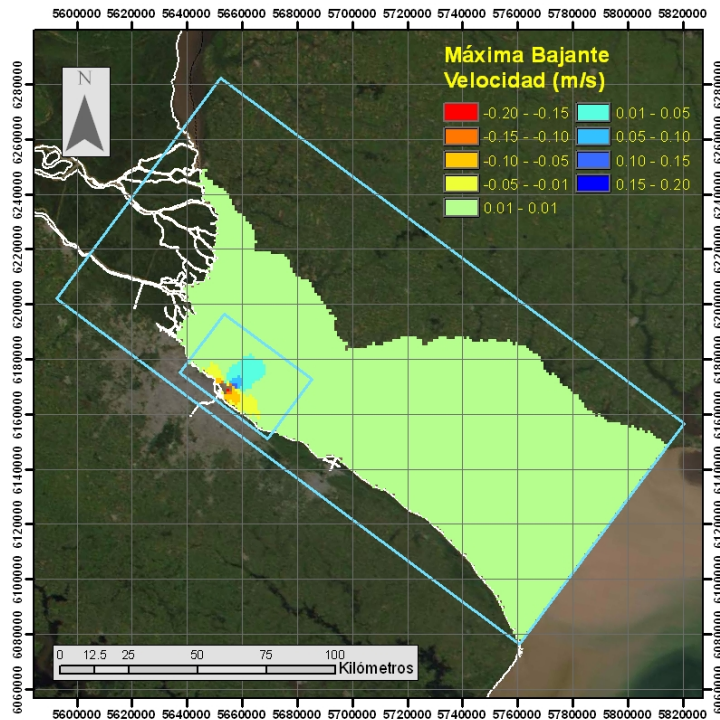


a) Instante de máxima velocidad en bajante

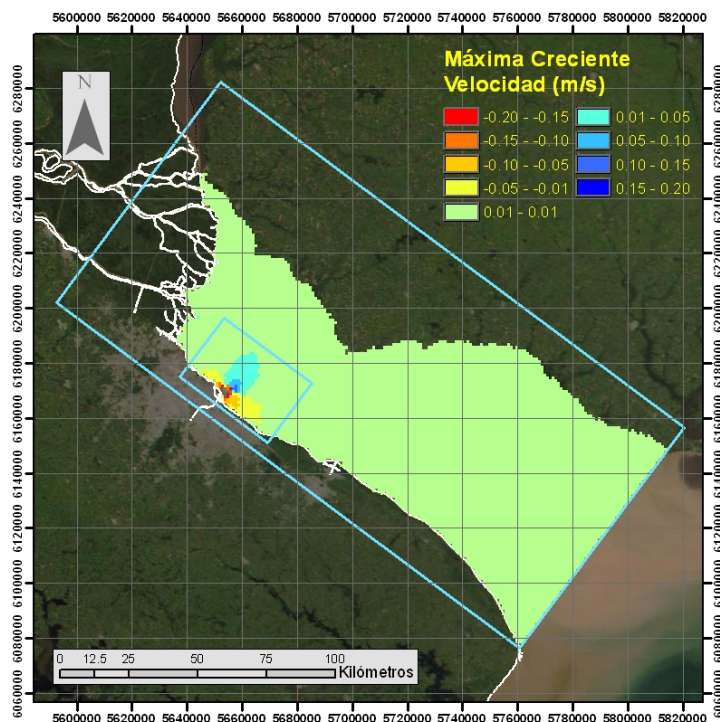


b) Instante de máxima velocidad en creciente

**Figura 4.2.2.** Módulo de la diferencia de velocidad entre resultados del modelo de Dominio 1 para los escenarios Relleno Potencial – Situación Actual

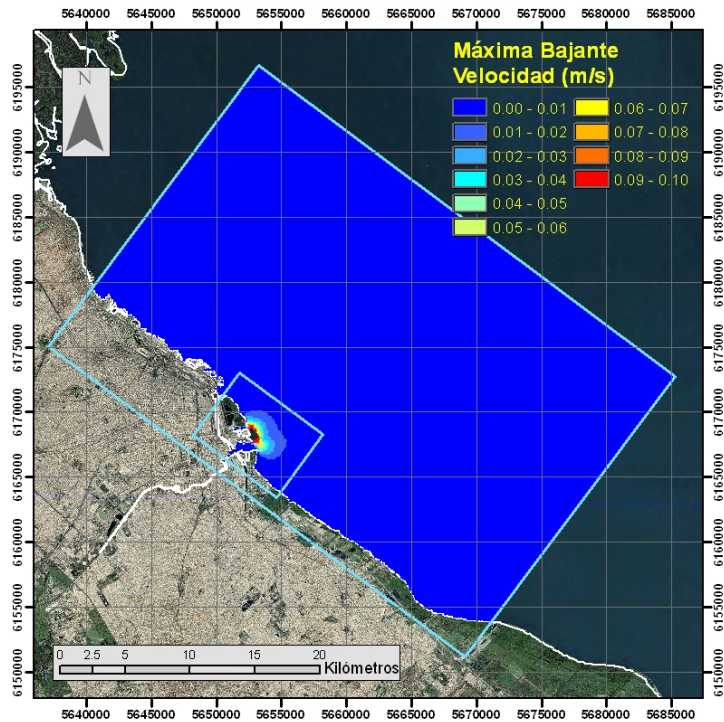


a) Instante de máxima velocidad en bajante

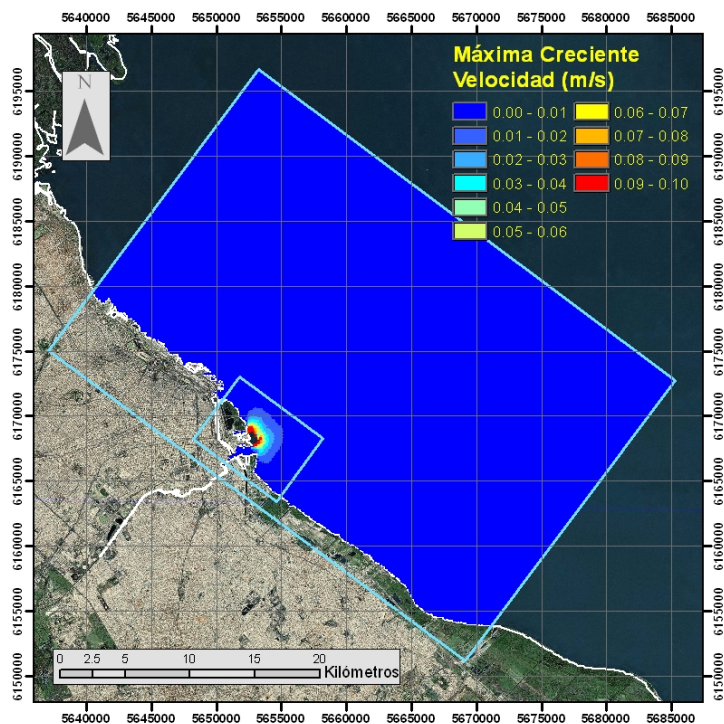


b) Instante de máxima velocidad en creciente

**Figura 4.2.3.** Diferencia del módulo de la velocidad entre resultados del modelo de Dominio 1 para los escenarios Relleno Potencial – Situación Actual

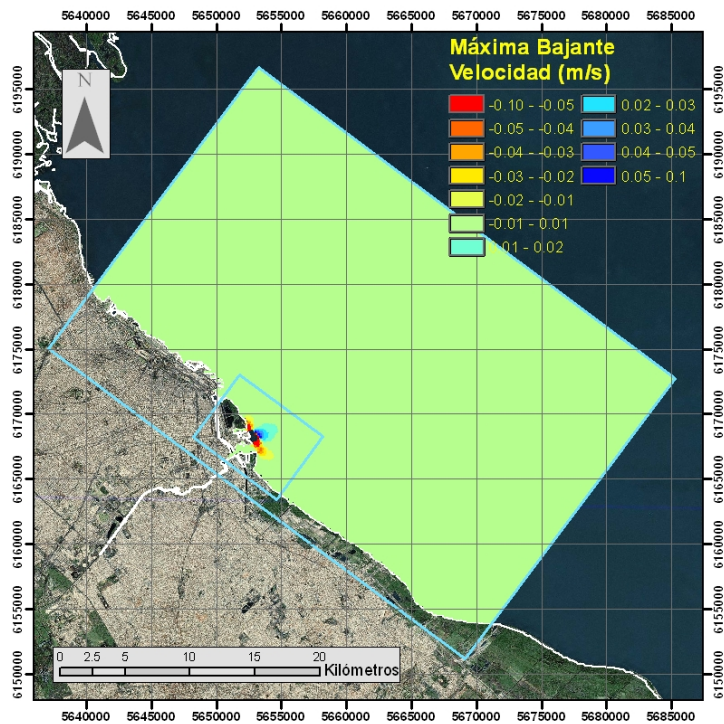


a) Instante de máxima velocidad en bajante

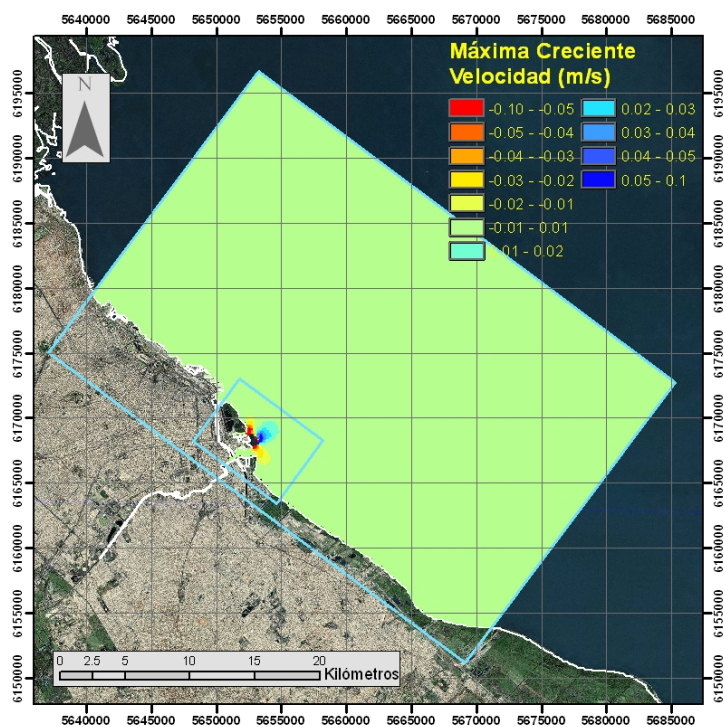


b) Instante de máxima velocidad en creciente

**Figura 4.2.4.** Módulo de la diferencia de velocidad entre resultados del modelo de Dominio 2 para los escenarios Relleno Real – Situación Actual



a) Instante de máxima velocidad en bajante



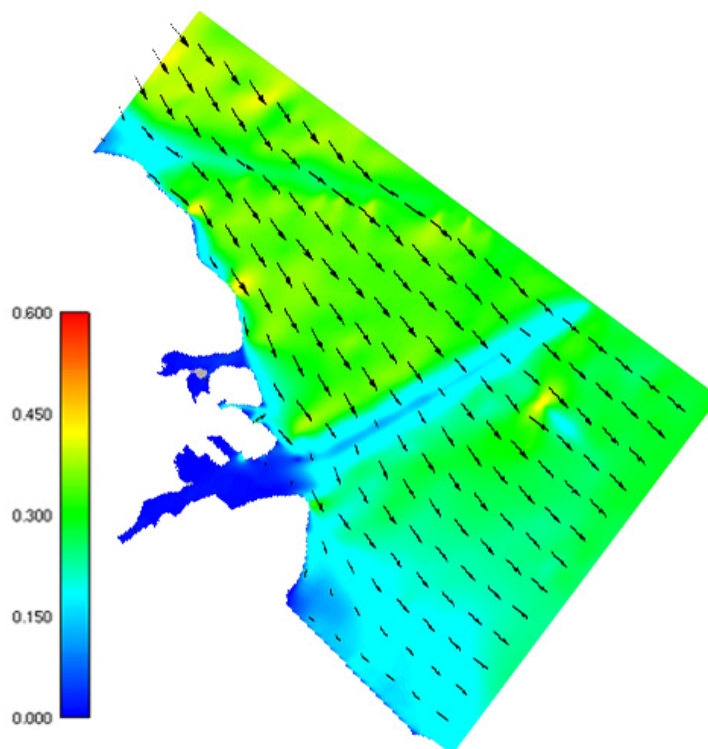
b) Instante de máxima velocidad en creciente

**Figura 4.2.5.** Diferencia del módulo de la velocidad entre resultados del modelo de Dominio 2 para los escenarios Relleno Real – Situación Actual

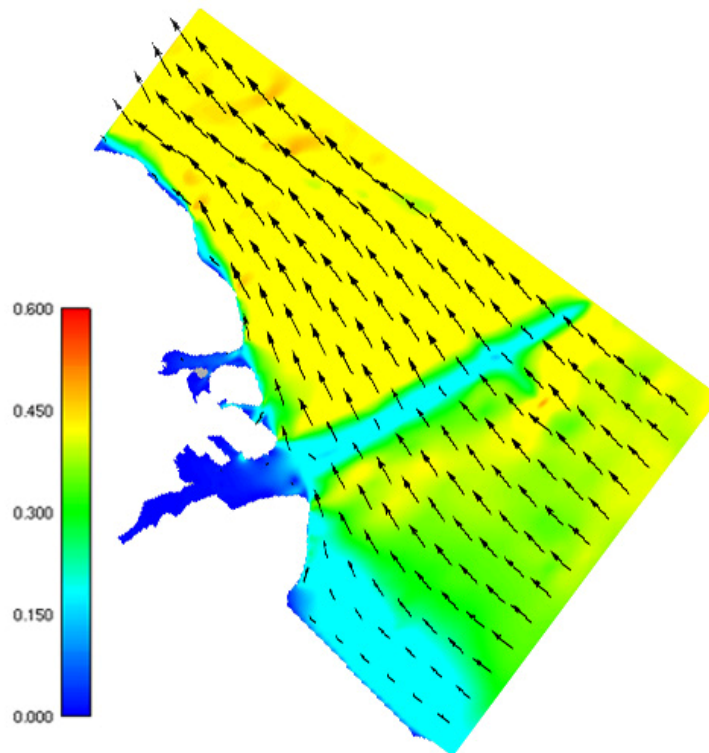
### 4.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este primer análisis se utilizó una modelación 2D para el Dominio 3. El período de simulación se extendió entre el 19/Mar/04 y el 24/Mar/04, es decir, es el empleado para la validación del modelo hidrodinámico.

Las Figura 4.3.1 y 4.3.2 presentan los campos de velocidades en los instantes de máxima velocidad en bajante y máxima velocidad en creciente (que son los instantes de máximo impacto de la presencia del relleno) para la situación actual (sin relleno) y con relleno, respectivamente. A la escala de análisis, las diferencias entre ambas son mínimas. La Figura 4.3.3 muestra el módulo de la diferencia de velocidades entre la situación con y sin relleno, que es un indicador del cambio tanto de la intensidad como de la dirección de la velocidad. Si se toma un valor de 2 cm/s como el umbral de detección, se observa que la zona de impacto del relleno se extiende hasta una distancia del orden del kilómetro desde su borde, en todas las direcciones. En la Figura 4.3.4 se indica, como complemento, la diferencia entre los módulos de las velocidades para los mismos escenarios, que es un indicador del cambio de intensidad de la velocidad. Se observa que se desarrollan dos ‘orejitas’ de disminución de velocidad en las direcciones sudeste y noroeste, y una oreja de aumento de velocidad en la dirección noreste.

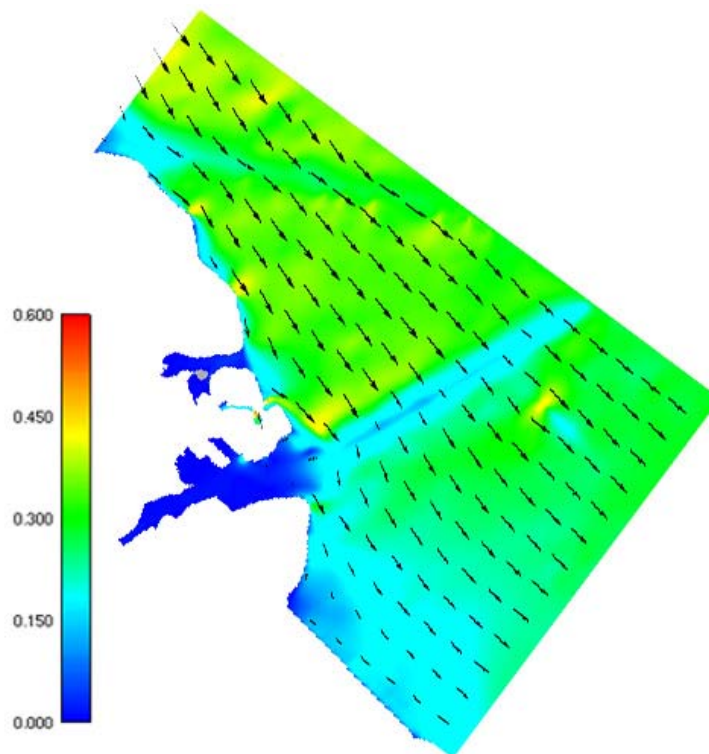


a) Instante de máxima velocidad en bajante

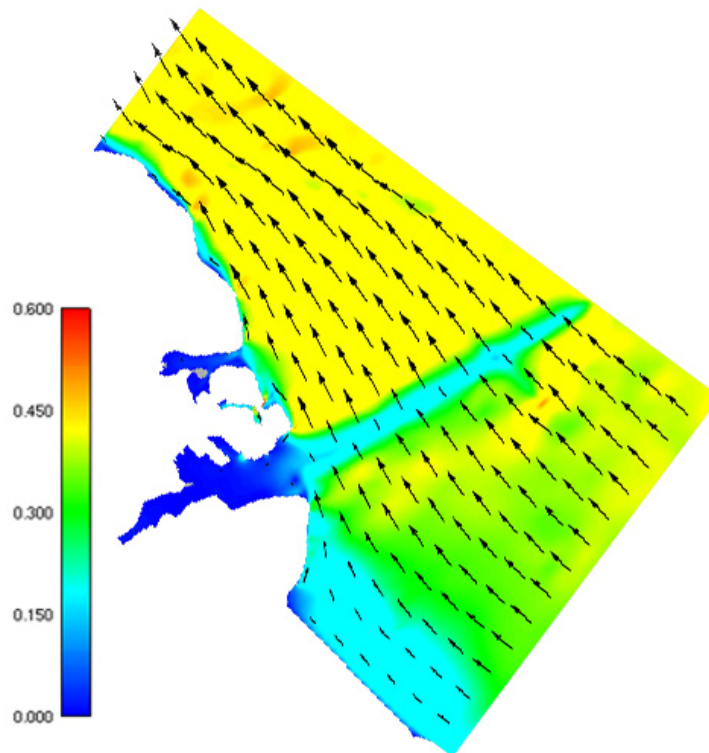


b) Instante de máxima velocidad en creciente

**Figura 4.3.1.** Campos de velocidades para la situación sin relleno

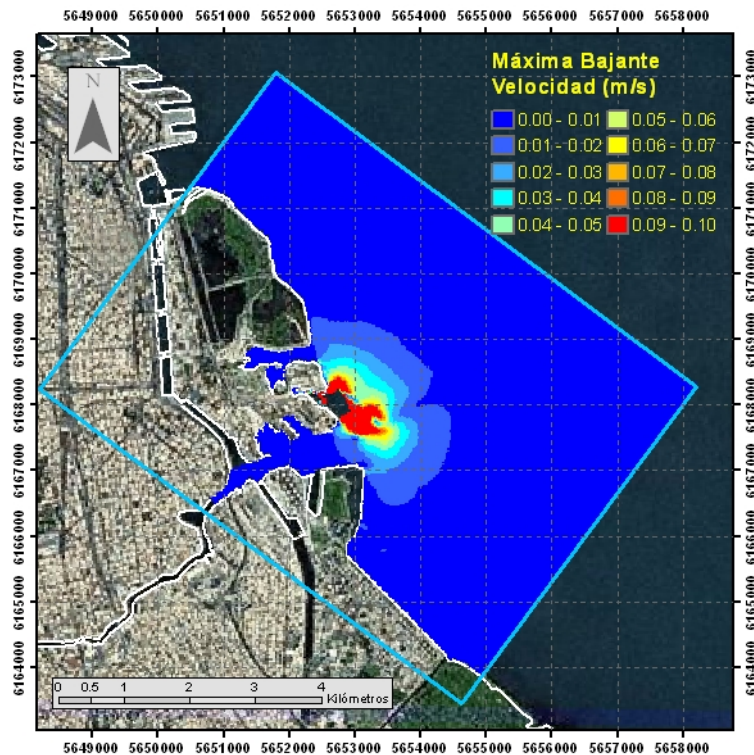


a) Instante de máxima velocidad en bajante

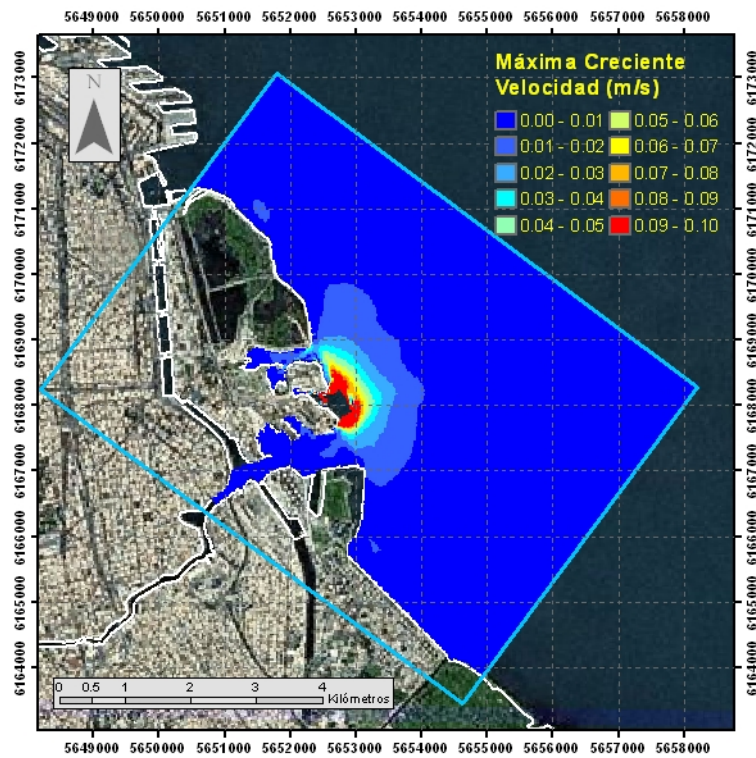


b) Instante de máxima velocidad en creciente

Figura 4.3.2. Campos de velocidades para la situación con relleno

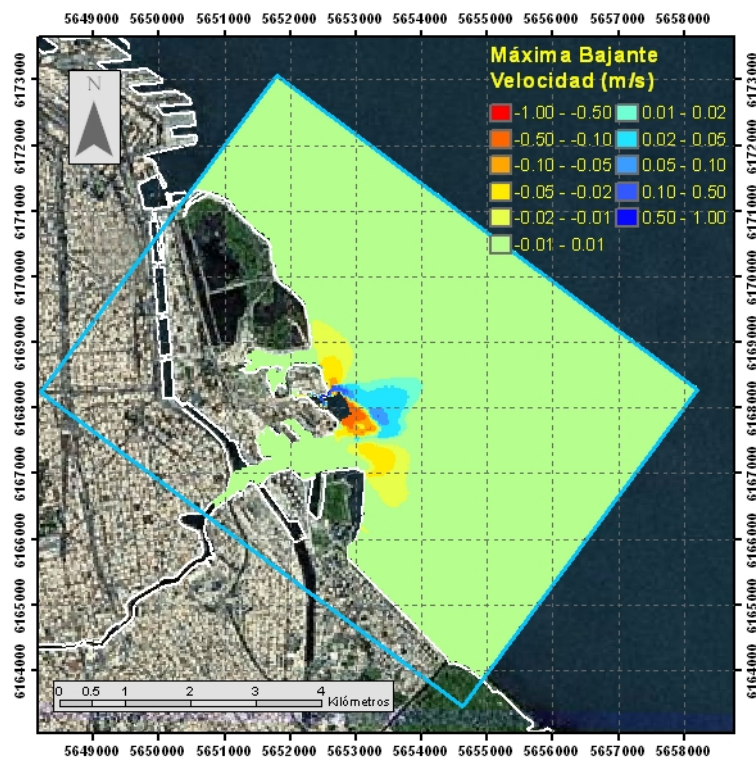


a) Instante de máxima velocidad en bajante

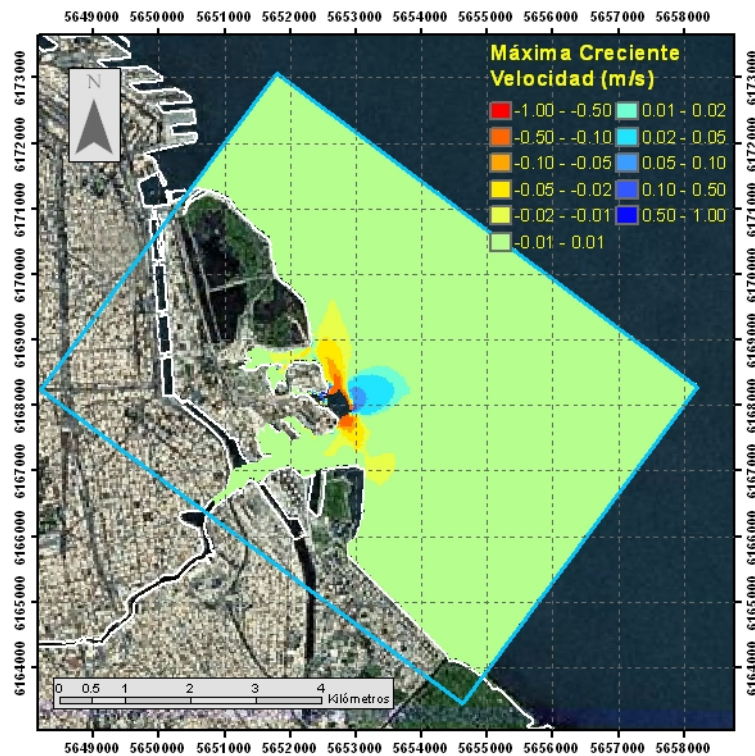


b) Instante de máxima velocidad en creciente

Figura 4.3.3. Módulo de la diferencia de velocidad entre la situación con y sin relleno



a) Instante de máxima velocidad en bajante

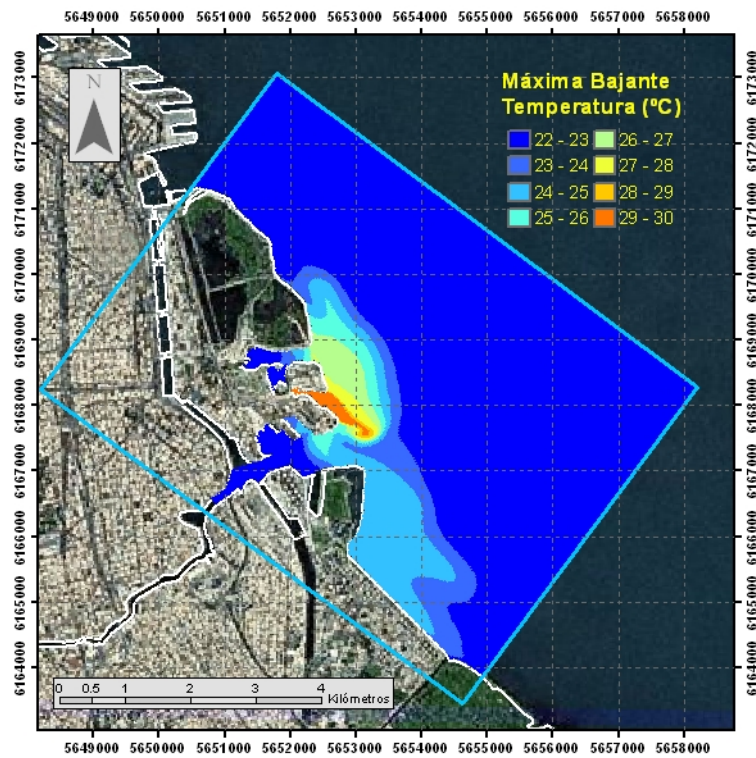


b) Instante de máxima velocidad en creciente

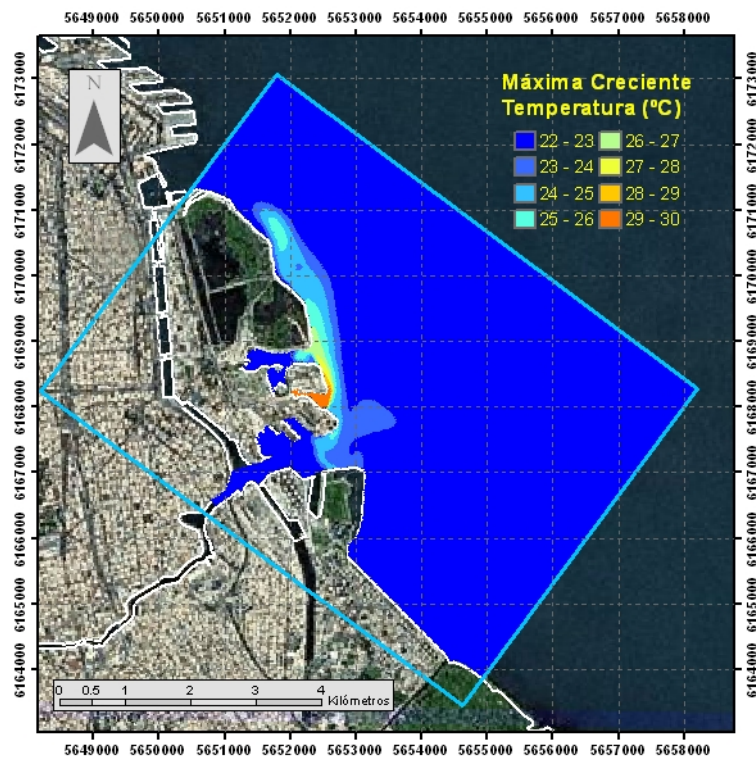
Figura 4.3.4. Diferencia del módulo de la velocidad entre la situación con y sin relleno

La distribución de temperatura para ambos escenarios se muestra en las Figuras 4.3.5 y 4.3.6 (suponiendo una temperatura del agua del Río de la Plata de 22.5°C). Si se toma una sobre-temperatura de 3°C (límite superior del rango 25-26°C) como el umbral de impacto significativo de la pluma térmica, se observa que, en bajante, el efecto del relleno se manifiesta esencialmente en un desplazamiento de la pluma costa afuera (del orden de los 300 m) y una elongación hacia el sudeste (del orden de los 2 km); por su parte, en creciente, se advierte una elongación del orden de los 500 m en sentido noroeste.

La diferencia de temperatura entre ambos escenarios se presenta en la Figura 4.3.7. Se observa que, en bajante, se produce un aumento significativo (mayor a 3°C) sólo en una pequeña zona (del orden de 100 m de diámetro) ubicada costa afuera (a alrededor de 500 m del relleno), y una disminución significativa en una estela del relleno del orden de los 500 m de extensión; por su parte, en creciente, el aumento significativo se da también en una pequeña zona (de dimensiones similares a la del caso de bajante) ubicada a alrededor de 300 m de la costa, cerca del extremo noroeste de la Reserva Ecológica.

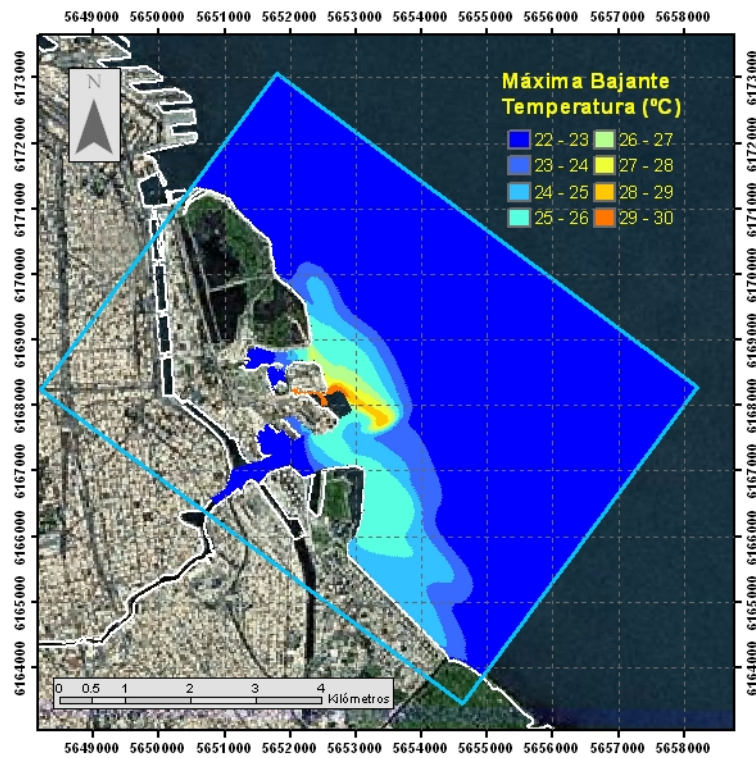


a) Instante de máxima velocidad en bajante

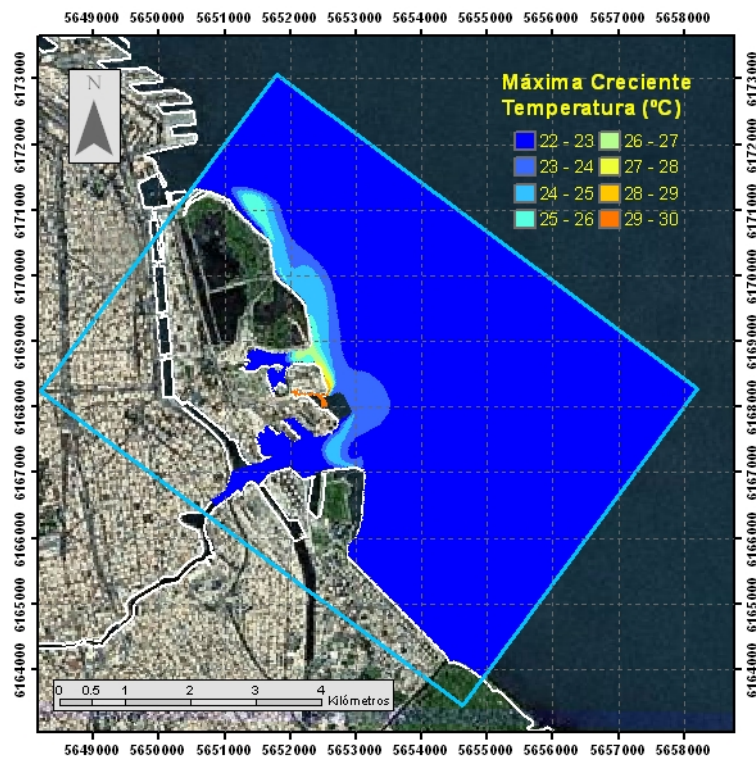


b) Instante de máxima velocidad en creciente

Figura 4.3.5. Distribución de temperatura para la situación sin relleno

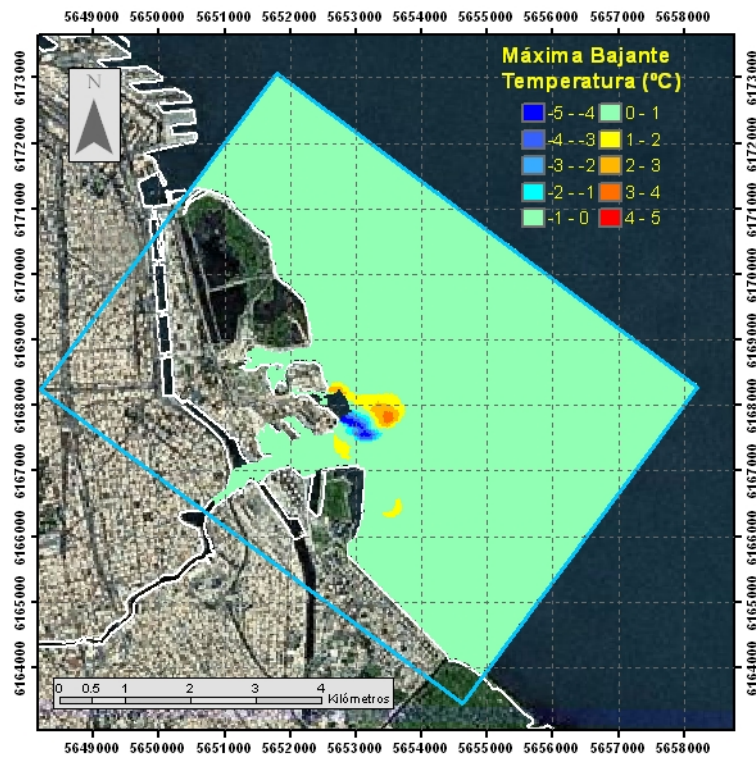


a) Instante de máxima velocidad en bajante

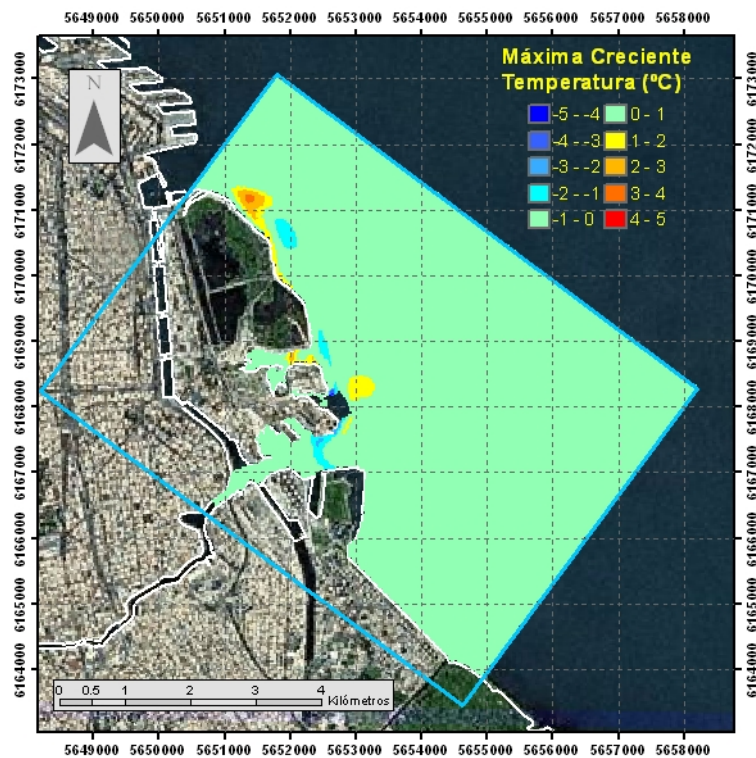


b) Instante de máxima velocidad en creciente

Figura 4.3.6. Distribución de temperatura del modelo de Dominio 3 para el escenario Relleno Real



a) Instante de máxima velocidad en bajante



b) Instante de máxima velocidad en creciente

Figura 4.3.7. Diferencia de temperatura entre la situación con y sin relleno

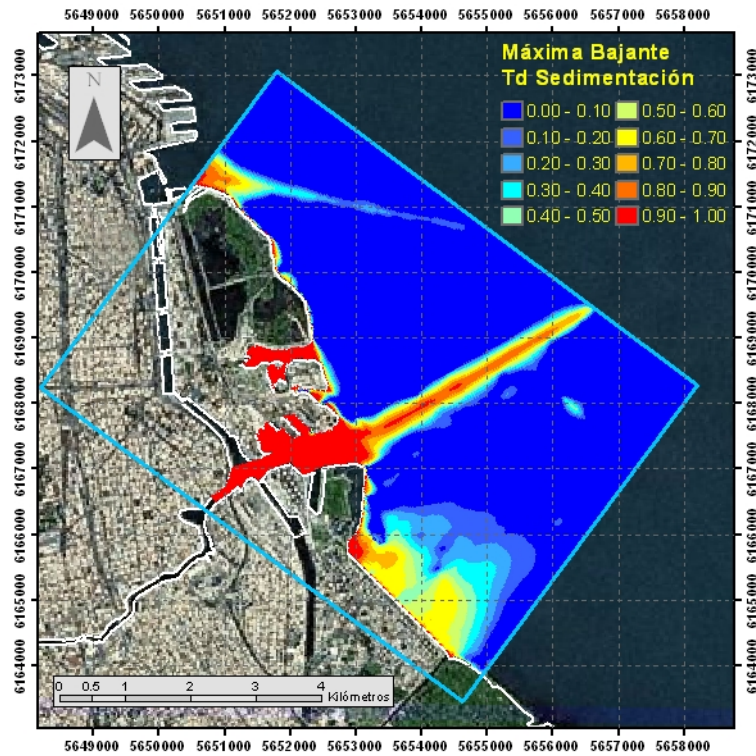
Como indicador de tasa de sedimentación se utilizó el factor de Krone (Van Rijn, 1993):

$$T_d = \begin{cases} 1 - \left( \frac{u_*}{u_{*,cr,d}} \right)^2 & \text{si } u_* < u_{*,cr,d} \\ 0 & \text{si } u_* \geq u_{*,cr,d} \end{cases}$$

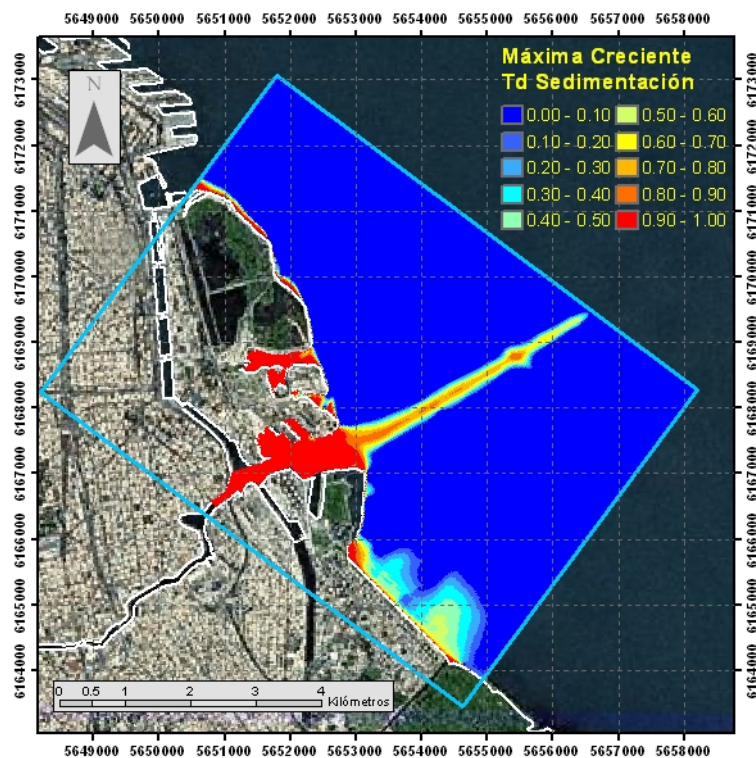
donde  $u_*$  es la velocidad de corte, y  $u_{*,cr,d}$  su valor crítico de deposición; un valor de  $T_d$  cercano a 0 significa escasa sedimentación, mientras que un valor cercano a 1 indica sedimentación cercana a la máxima tasa potencial. A partir de estudios antecedentes (Menéndez y Castellano, 2000) se ha establecido  $u_{*,cr,d} = 1,0$  cm/s. La Figura 4.3.8 muestra la distribución del indicador de sedimentación para la situación actual. Como era de esperarse, se observa que los mayores valores se dan en la zona costera, en las ensenadas (artificiales) y en el canal de navegación.

La introducción del relleno (Figura 4.3.9) produce, en bajante, un desplazamiento costa afuera de la zona de tasa máxima de sedimentación en la dirección sudeste, mientras que, en creciente, sólo se detecta la aparición de una pequeña zona de sedimentación en la estela del relleno.

En la Figura 4.3.10 se muestra la diferencia entre los indicadores de sedimentación correspondientes a la situación con y sin relleno. Considerando un valor de 0,1 como un cambio significativo en el valor del indicador, se observa que se da un aumento en la tasa de sedimentación potencial tanto hacia el sudeste como hacia el noroeste; en la dirección noroeste, la zona de impacto no supera los terrenos de IRSA; en la dirección sudeste llega hasta el canal de navegación, apareciendo algunas zonas de impacto aguas abajo del canal durante la bajante. En ningún caso esto incluye al canal de navegación; de hecho, en bajante se detecta una zona con disminución de la tasa de sedimentación.

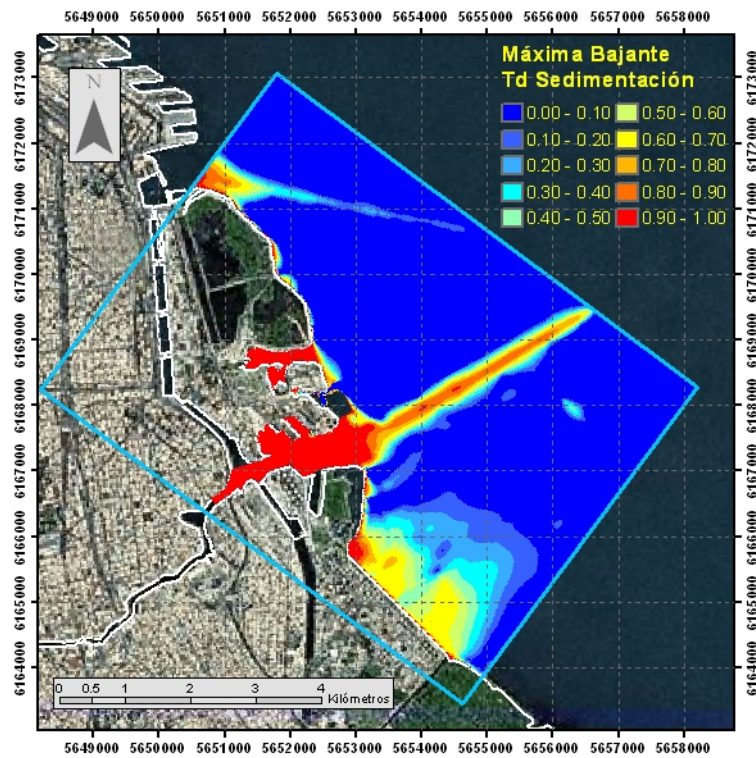


a) Instante de máxima velocidad en bajante

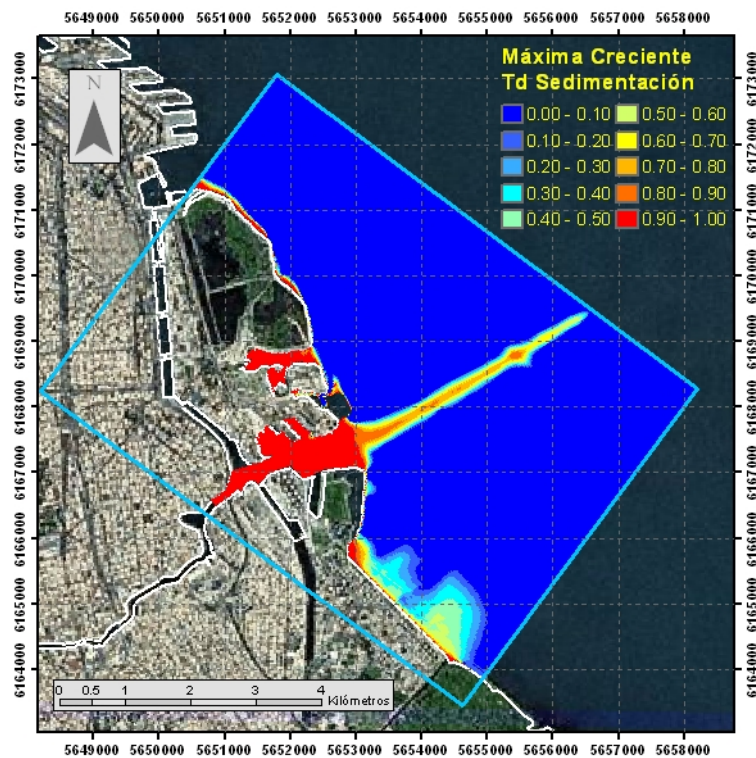


b) Instante de máxima velocidad en creciente

Figura 4.3.8. Indicador de sedimentación para la situación sin relleno

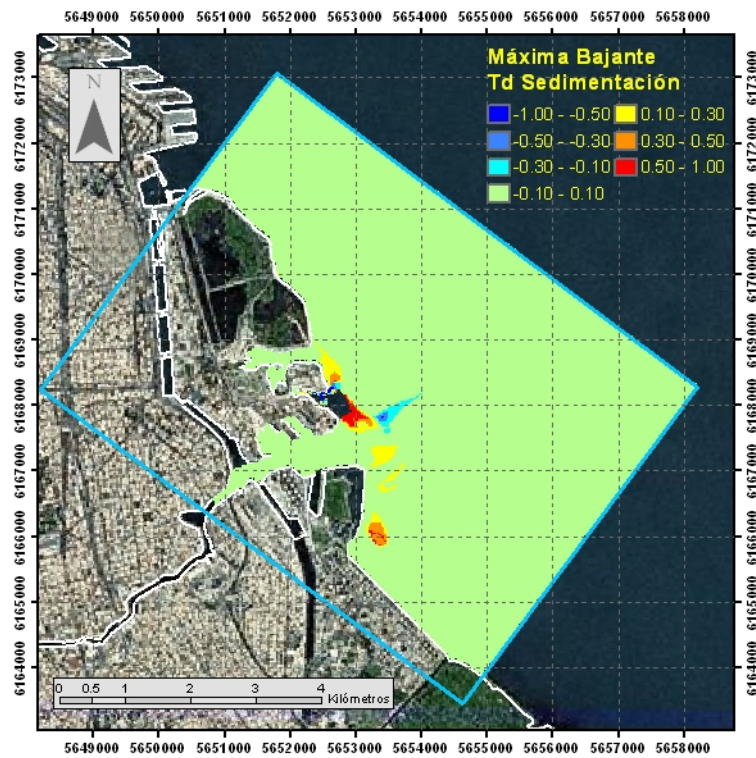


a) Instante de máxima velocidad en bajante

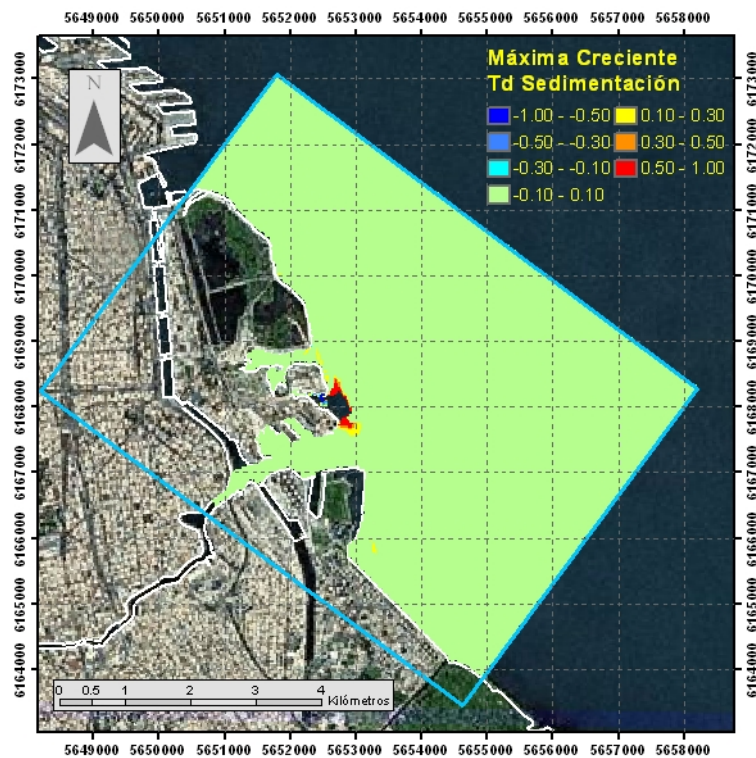


b) Instante de máxima velocidad en creciente

**Figura 4.3.9.** Indicador de sedimentación para la situación con relleno



a) Instante de máxima velocidad en bajante



b) Instante de máxima velocidad en creciente

Figura 4.3.10. Diferencia entre indicadores de sedimentación para las situaciones con y sin relleno

## 5 CONCLUSIONES

El estudio indica los siguientes impactos hidráulicos debido a la presencia del relleno analizado:

- La velocidad de la corriente disminuye en las zonas de estela del relleno (direcciones sudeste y noroeste) y aumenta en la zona adyacente lateral (dirección noreste). La zona de impacto del relleno se extiende hasta alrededor de 1 km de su borde en todas las direcciones. Se desarrollan dos 'orejas' de disminución de velocidad en las direcciones sudeste y noroeste, y una oreja de aumento de velocidad en la dirección noreste.
- Por efecto del relleno, la descarga térmica de Central Costanera produce, en bajante, un aumento significativo (mayor a 3°C) sólo en una pequeña zona (del orden de 100 m de diámetro) ubicada costa afuera (a alrededor de 500 m del relleno), y una disminución significativa en una estela del relleno del orden de los 500 m de extensión; por su parte, en creciente, el aumento significativo se da también en una pequeña zona (de dimensiones similares a la del caso de bajante) ubicada a alrededor de 300 m de la costa, cerca del extremo noroeste de la Reserva Ecológica.
- El relleno produce un aumento en la tasa de sedimentación potencial tanto hacia el sudeste como hacia el noroeste; en la dirección noroeste, la zona de impacto no supera los terrenos de IRSA; en la dirección sudeste llega hasta el canal de navegación, apareciendo algunas zonas de impacto aguas abajo del canal durante la bajante. En ningún caso esto incluye al canal de navegación; de hecho, en bajante se detecta una zona con disminución de la tasa de sedimentación

En relación a los aspectos considerados a priori de mayor relevancia, en cuanto a potenciales conflictos con otros usos del río, se concluye que:

- Los aumentos y disminuciones de temperatura por el efecto del relleno sobre la pluma térmica proveniente de la Central Costanera, que se dan en zonas delimitadas relativamente pequeñas, no implican, en principio, la generación de conflictos con los usos presentes de esa zonas.
- No se detecta un efecto significativo sobre la tasa de sedimentación en el Canal de Acceso Sur.

## REFERENCIAS

- Albarracín, J., 1987., Análisis de la hidrodinámica del Río de La Plata a partir de una simulación numérica, Tesis de grado para la Licenciatura en Oceanografía, ITBA (Argentina), Informe LHA-INCYTH 065-001-88, INCYTH, Argentina.
- Bombardelli, F.A, Menéndez, A.N, Brea, J.D., Lapetina, M.R., Uriburu Quirno, M., 1995, Estudio hidrodinámico del Delta del Río Parana mediante modelación matemática, Informe LHA-INCYTH 137-03-95.
- Blumberg, A.F. y Mellor, G.L., 1987, A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. Three-Dimensional Coastal Ocean Models, edited by N. Heaps, 208 pp., American Geophysical Union.
- Cancino, L., Neves, R., 1999a, Hydrodynamic and sediment suspension modelling in estuarine systems, Part I: Description of the numerical models, Journal of Marine Systems, 22, 105-116
- Chippada, S., Dawson, C., Wheeler, M., 1998 A Godonov-type finite volume method for the system of shallow water equations, Computer methods in applied mechanics and engineering, 151 (1), 105–130.
- Coelho, H., Neves, R., White, M., P. C. Leitão, Santos, A., 2002, A Model for Ocean Circulation on the Iberian Coast, Journal of Marine Systems, 32 (1-3), 153-179
- D'Onofrio, E.E, Fiore, M.E., Romero, S.I., 1999, Return periods of extreme water levels estimated for some vulnerable areas of Buenos Aires, Continental Shelf Research, 19, pp. 1681-1693.
- Guarga, R., Vinzón, S., Rodriguez, H., Piedra Cueva, I., Kaplan, E., 1991. Corrientes y sedimentos en el Río de la Plata. Reporte CARP (Comisión Administradora del Río de la Plata).
- Holocwan, P.T., 1996. Evolución y acción antrópica en el sector costero de la ciudad de Buenos Aires. Revista de la Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería (10):144-168. Buenos Aires.
- Jaime, P.R., Menéndez, A.N., 1999. Modelo hidrodinámico Río de la Plata 2000, Informe LHA INA 183-01-99, INA, Argentina.
- Jaime, P.R., Menéndez, A.N., 2002, Análisis del régimen hidrológico de los ríos Parana y Uruguay, informe LHA-01-216-02, INA, Ezeiza.
- Kind, M.V., 2004. Desplazamiento del frente de salinidad del Río de la Plata debido al aumento del nivel medio del mar, Tesis de Ingeniería, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires.

- Leendertsee, J.J., Liu, S.K., 1978, A threedimensional turbulent energy model for nonhomogeneous estuaries and coastal sea systems, In Nihoul, J.C.J. (Ed.), *Hydrodynamics of Estuaries and Fjords*, 387–405, Elsevier.
- Marcomini, S.C., López, R.A., 2004, Generación de nuevos ecosistemas litorales por albardones de relleno en la costa de la ciudad de Buenos Aires, *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 59 (2): 261-272.
- Martins, F., P. C. Leitão, A. Silva, R. Neves, 2001, 3D modelling of the Sado Estuary using a new generic vertical discretization approach, *Oceanologica Acta*, 24 (1), 51-62
- Menéndez, A.N., 1985. Simulación numérica de flujos cuasi-bidimensionales a superficie libre, Informe LHA-INCYTH S5-016-85, INCYTH, Argentina.
- Menéndez, A.N., 1990. Sistema HIDROBID II para simular corrientes en cuencos, *Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería*, 6 (1).
- Menéndez, A.N., Castellano, R., 2000. Simulation of sedimentation in an estuary due to an artificial island, 4th International Conference Hydroinformatics 2000, Cedar Rapids, Iowa, USA, July.
- Molinari, G.N, 1986. Simulación numérica de la circulación en el Río de la Plata, Tesis de grado para la Licenciatura en Oceanografía, ITBA (Argentina), Informe LHA-INCYTH S5-017-86, INCYTH, Argentina.
- Neves, R. J. J., 1985, Étude Expérimentale et Modélisation des Circulations Transitoire et Résiduelle dans l'Estuaire du Sado. Ph. D. Thesis, Univ. Liège
- Olalde, A.M., 1988. Simulación numérica de corrientes de deriva en el Río de la Plata, Tesis de grado para la Licenciatura en Oceanografía, ITBA (Argentina), Informe LHA-INCYTH 065-002-88, INCYTH, Argentina.
- Re, M., Menéndez, A.N., 2003, Modelo Hidrodinámico del Río de la Plata y su Frente Marítimo, Informe INA-LHA 03-216-03, INA, Argentina
- Re, M., Menéndez, A.N., 2007, Impacto del Cambio Climático en las Costas del Río de la Plata, *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, 7 (1)
- Saraiva, S., Pina, P., Martins, F., Santos, M., Braunschweig, F., Neves, R., 2007, Modelling the influence of nutrient loads on Portuguese estuaries, *Hydrobiologia* (2007) 587:5–18
- Simionato, C.G., Dragani, W., Nuñez, M., Engel, M, 2004, A set of 3-D nested models for tidal propagation from the Argentinean Continental Shelf to the Rio de la Plata Estuary - Part I: M2. *Journal of Coastal Research*, 20 (3), 893–912.
- Smagorinsky, J.S, 1963. General turbulence model of the atmosphere, *Monthly Weather Review*: 91, 99-164.
- Trancoso, A., S. Saraiva, L. Fernandes, P. Pina, P. Leitão & R. Neves, 2005. Modelling macroalgae using a 3D hydrodynamic-ecological model in a shallow, temperate estuary. *Ecological Modelling* 187: 232–246.

van Rijn, L.C., 1993, Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas, Aqua Publ.