

MODELADO MATEMATICO HIDROSEDIMENTOLÓGICO TRIDIMENSIONAL DEL IMPACTO DE OBRAS DE DRAGADO

Pablo A. Tarela, Francisco van Avermaete y Elizabeth A. Perone

*CCyA Ingeniería, Bruselas 1050, 1408 Ciudad Autónoma de Buenos Aires,
ptarela@ccyaingenieria.com.ar, <http://www.ccyaingenieria.com.ar>*

Palabras Clave: Hidrodinámica, Transporte de Sedimentos, Dragados, Impacto Ambiental.

Resumen. El objetivo principal del proyecto fue predecir el impacto por turbidez sobre el Río de la Plata, como consecuencia de las operaciones de dragado que tendrán lugar para la construcción de los 2 mega emisarios subfluviales del conglomerado urbano de Buenos Aires. Cada emisario requiere un dragado en zanja del lecho del río, que deberá realizarse utilizando una metodología que asegure que las tomas de agua para potabilización (más de 5 millones de personas) no sufran efectos de sobre turbidez, a la vez de mantener acotado el impacto en el cuerpo principal del río como consecuencia de la generación de plumas de turbidez. Para estudiar este proceso se seleccionaron 3 alternativas potenciales de tecnología de dragado y método de operación, y se simuló su impacto utilizándose un modelo 3D hidrodinámico y de transporte de sedimentos. El modelo seleccionado fue Coherens, desarrollado para el estudio de flujos litorales y plataforma marina. Primeramente se implementó un modelo global de todo el estuario del Río de la Plata, y se trabajó con el método de modelos anidados para lograr un modelo final en la zona de dragados. El modelo ha sido validado con 3 meses de datos continuos obtenidos en un conjunto de 6 bollas oceánicas que determinan el perfil 3D de velocidades y el nivel de agua, entre otros parámetros. Se han obtenido excelentes resultados de esta comparación, para un sistema complejo forzado por la acción de vientos, mareas y descargas de grandes sistemas fluviales. Luego, se utilizó un módulo Euleriano para simular el transporte de sedimentos en sus fases de interés para este proyecto: limos y arcillas. El modelo de transporte de sedimentos ha sido validado previamente mediante el uso de imágenes satelitales y campañas de monitoreo en el cuerpo del río. Se analizan y comparan las distintas estrategias de dragado, determinándose cuales pueden ser aptas para los objetivos planteados.

1 INTRODUCCION

La ciudad de Buenos Aires está localizada sobre la costa oeste del Río de la Plata, el cual se forma por la descarga conjunta de los ríos Paraná y Uruguay, de alrededor de 22.000 m³/seg. La carga de sedimentos arrastrados es del orden de 60 MM Ton/año. En su zona interior, el Río de la Plata presenta un ancho que supera los 40 km, mientras que en la región externa y ya en su boca, llega a 300 km. Las aguas oceánicas entran al estuario a través de una cuña salina, generando un flujo con cambio de densidad y con influencia marcada del movimiento mareal. En este contexto, el Río de la Plata interior puede verse como un mar de agua dulce.

La ciudad de Buenos Aires tiene una población de alrededor de 13 MM de habitantes. Actualmente se desarrolla un proyecto de tratamiento de efluentes cloacales para la mega ciudad que finaliza con la descarga de las aguas tratadas en el Río de la Plata interior. Dos emisarios subfluviales de varios kilómetros de longitud cada uno son requeridos para la dispersión de los efluentes y evitar la contaminación costera. Para su instalación, cada emisario necesita el dragado de varios kilómetros del lecho del río, actividad que puede resuspender grandes cantidades de material sedimentario. El incremento en la turbiedad de las aguas dependerá de múltiples factores, entre ellos la tecnología de dragado y el programa de operación. A los efectos de minimizar el impacto de estas operaciones de gran escala, se requiere determinar la mejor opción de dragado.

Para responder esta cuestión, se ha implementado un modelo matemático tridimensional (3D) para la hidrodinámica del Río de la Plata y el transporte de sedimentos, integrado en el soft *Coherens*. En este trabajo presentamos una breve descripción del desarrollo realizado para dar respuesta a esta cuestión predictiva, con énfasis en el modelo computacional utilizado: se detalla el proceso de implementación y, especialmente, el de validación del modelo, los principales resultados y las conclusiones obtenidas, que muestran un impacto diferencial en función del método de dragado seleccionado.

2 OBJETIVO

El objetivo del estudio fue determinar el efecto sobre la turbidez del Río de la Plata, utilizando un modelo computacional 3D, como consecuencia de las tareas de dragado para la ejecución de los emisarios subfluviales de la ciudad de Buenos Aires. Se analizaron diferentes estrategias de dragado a los efectos de evitar impactos no deseados y excesos de turbidez en las tomas de agua de la ciudad.

3 OBRAS EN EL RIO DE LA PLATA

3.1 Proyecto de emisarios subfluviales

La mayoría de las aguas residuales domésticas e industriales de Buenos Aires son descargadas en cuencas internas con tratamientos previos deficientes. Finalmente, estos efluentes alcanzan la línea de costa del Río de la Plata, dando lugar a un nivel de contaminación creciente en función del incremento en el desarrollo económico que siguió a la crisis del 2001.

La solución proyectada para este problema incluye nuevas plantas de tratamiento y la descarga final de las aguas residuales a través de un par de emisarios subfluviales, lejos de la

costa. Estos emisarios están equipados en sus últimos kilómetros con un sistema de difusores para asegurar un cierto nivel de dilución inicial. En esta zona, la construcción de cada emisario requiere el dragado de grandes cantidades de material del lecho del río, y su disposición.

El emisario Riachuelo tendrá una línea de difusores de 2.3 km de longitud, mientras que el emisario Berazategui alcanzará 3.5 km de distribución de difusores, en ambos casos del tipo roseta. La figura 1 muestra la localización de las zonas de difusores, que coinciden con las de dragado. Las tareas de construcción requerirán trincheras de unos 20 m de ancho y 6 m de profundidad en términos medios.

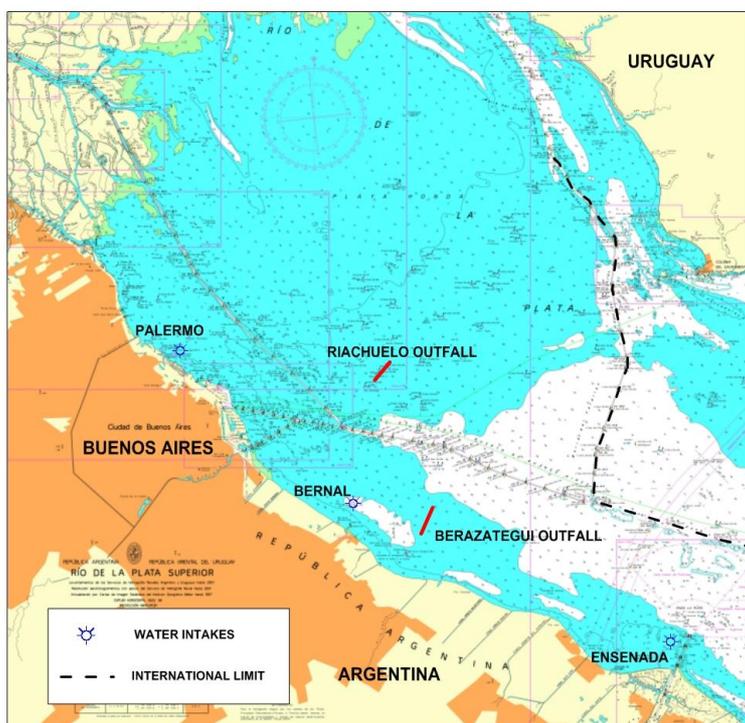


Figura 1. Zonas de dragado (líneas rojas).

3.2 Alternativas de dragado

En la zona de trabajo el Río de la Plata, que es un sistema de aguas poco profundas, presenta profundidades que no superan los 10 m. Esta característica, sumada a la presencia de canales de navegación y tomas de agua para potabilización masiva, restringe las opciones de dragado.

En este trabajo inicial se consideraron 3 alternativas:

- A. Dragadora cortadora
- B. Dragadora de succión por arrastre con cántara
- C. Dragadora de succión por arrastre con chorro de descarga lateral

A los efectos de dar un marco común a la comparación de alternativas, dentro de las posibilidades de trabajo se consideró un período operacional de 12 horas al día, 7 días a la semana. Se debe considerar que actúan otras restricciones operacionales, como eventos meteorológicos que pueden posponer las tareas (por ejemplo, fuertes vientos del sector SE).

En el caso de la draga cortadora (escenario A), la longitud de avance se estableció en 50 metros, mientras que el material dragado es dispuesto en un punto fijo a 2 km de distancia, mediante cañerías satélite.

Para las dragas de succión por arrastre, la velocidad recomendada de navegación fue definida en 3.2 nudos. La cántara, en el escenario B, se llena al cabo de 23 minutos, mientras que el tiempo de tránsito hasta el punto de disposición es del orden de 45 minutos y el tiempo de drenaje de 8 minutos. Luego, se pueden realizar 6 ciclos al día.

En el escenario C, el material dragado es dispuesto en el sitio, alrededor de 50 m sobre el lateral de la embarcación, produciendo una cantidad importante de sedimentos resuspendidos en la columna de agua.

3.3 Metodología

Para alcanzar los objetivos de este análisis predictivo, se estableció la siguiente metodología:

- Análisis detallado de las tecnologías de dragado disponibles para este sistema de aguas poco profundas (cuyo breve resumen se presentó en la sección anterior),
- Monitoreo hidrodinámico 3D usando estaciones SDCP en distintos puntos: desarrollo de una base de datos y análisis estadístico de los resultados,
- Modelado matemático hidrodinámico 3D, usando una estrategia de modelos dinámicos anidados,
- Modelado matemático 3D de transporte de sedimentos para cada tecnología de dragado analizada,
- Análisis de las alternativas para asegurar el menor impacto ambiental posible.

En este trabajo el foco está puesto en la implementación, validación y uso del modelo computacional, lo cual se presenta en las secciones siguientes.

4 MODELADO MATEMÁTICO

4.1 Modelo Coherens

Coherens (MUMM, 1999) es un modelo 3D hidrodinámico multipropósito para zonas costeras y plataforma marina, que está acoplado con modelos biológicos, de transporte de sedimentos y de transporte de contaminantes. Resuelve escalas estacionales y mesoescalas.

El programa computacional fue desarrollado en la década de los 90 por un grupo multinacional Europeo, como parte de los proyectos MAST, PROFILE, NOMADS y COHERENS, bajo financiación de la Unión Europea.

Los principales atributos de Coherens son:

- Una componente física con módulos de corrientes, salinidad y temperatura
- Un modelo de simulación de ciclos de procesos biológicos,
- Un modelo de sedimentos con la descripción de la deposición y erosión de material orgánico e inorgánico,
- Módulos Eulerianos y Lagrangianos para simular el transporte advectivo-difusivo de contaminantes.

El modelo computacional puede implementarse en distintas plataformas, siendo que en este trabajo se optó por PC bajo LINUX. Requiere cierto grado de experticia en modelado, pero su física general lo vuelve atractivo como producto sofisticado de simulación.

Como principales ventajas se pueden citar su transparencia a través de una estructura modular muy prolija, y la flexibilidad para seleccionar diferentes procesos, esquemas específicos o diferentes tipos de forzantes para cada aplicación en particular.

Las ecuaciones básicas del modelo 3D son (MUMM, 1999):

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x_1} + v \frac{\partial u}{\partial x_2} + w \frac{\partial u}{\partial x_3} - fv \\ = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x_1} + \frac{\partial}{\partial x_3} \left(\nu_T \frac{\partial u}{\partial x_3} \right) + \frac{\partial}{\partial x_1} \tau_{11} + \frac{\partial}{\partial x_2} \tau_{21} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x_1} + v \frac{\partial v}{\partial x_2} + w \frac{\partial v}{\partial x_3} + fu \\ = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x_2} + \frac{\partial}{\partial x_3} \left(\nu_T \frac{\partial v}{\partial x_3} \right) + \frac{\partial}{\partial x_1} \tau_{12} + \frac{\partial}{\partial x_2} \tau_{22} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial x_3} = -\rho g \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x_1} + \frac{\partial v}{\partial x_2} + \frac{\partial w}{\partial x_3} = 0 \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x_1} + v \frac{\partial T}{\partial x_2} + w \frac{\partial T}{\partial x_3} \\ = \frac{1}{\rho_0 c_p} \frac{\partial I}{\partial x_3} + \frac{\partial}{\partial x_3} \left(\lambda_T \frac{\partial T}{\partial x_3} \right) + \frac{\partial}{\partial x_1} \left(\lambda_H \frac{\partial T}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(\lambda_H \frac{\partial T}{\partial x_2} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x_1} + v \frac{\partial S}{\partial x_2} + w \frac{\partial S}{\partial x_3} \\ = \frac{\partial}{\partial x_3} \left(\lambda_T \frac{\partial S}{\partial x_3} \right) + \frac{\partial}{\partial x_1} \left(\lambda_H \frac{\partial S}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(\lambda_H \frac{\partial S}{\partial x_2} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

donde (u, v, w) son las componentes 3D de la corriente, T es la temperatura, S la salinidad, $f = 2\Omega \sin\phi$ la frecuencia de Coriolis, $\Omega = 2\pi/86164$ rad/s la frecuencia de rotación terrestre, g la aceleración de la gravedad, p la presión, ν_T y λ_T los coeficientes de viscosidad de torbellino verticales, λ_H el coeficiente de viscosidad de torbellino horizontal para salinidad y temperatura, ρ la densidad, ρ_0 una densidad de referencia, c_p el calor específico del agua a presión constante y $I(x_1, x_2, x_3, t)$ la irradiación solar. Las componentes horizontales del tensor de esfuerzos están definidas por:

$$\tau_{11} = 2\nu_H \frac{\partial u}{\partial x_1} \quad (7)$$

$$\tau_{21} = \tau_{12} = \nu_H \left(\frac{\partial u}{\partial x_2} + \frac{\partial v}{\partial x_1} \right) \quad (8)$$

$$\tau_{22} = 2\nu_H \frac{\partial v}{\partial x_2} \quad (9)$$

donde ν_H es el coeficiente de difusión horizontal para el momentum.

Los coeficientes de torbellino ν_T y λ_T son provistos por un esquema de turbulencia. Un amplio rango de esquemas de turbulencia están incorporados en el modelo: desde formulaciones algebraicas simples hasta esquemas de clausura de Segundo orden con ecuaciones de transporte adicionales para las cantidades turbulentas. Entre ellos, está disponible el ampliamente conocido esquema de nivel 2.5 de cierre de la turbulencia de Mellor y Yamada (1982) con las modificaciones introducidas por Galperin et al. (1988).

Adicionalmente, se requiere una ecuación de estado:

$$\rho = \rho_0 \left(1 + \beta_S(S - S_0) - \beta_T(T - T_0) \right) \quad (10)$$

En cuanto a las condiciones de contorno, para las velocidades se impone la condición nula en la línea de costa, mientras que en la superficie libre se impone un esfuerzo superficial en función de las componentes del viento. En el fondo se aplica una ley de fricción usando la parametrización dada por Tarela (2000).

En el borde oceánico se impone el régimen de mareas, mientras que los caudales de los ríos tributarios se aplican en los contornos fluviales que ingresan al sistema. Todas estas condiciones tienen la forma de condiciones de radiación derivadas utilizando el método de las características, y se imponen mediante variables de Riemann (MUMM, 1999).

Para el transporte de sedimentos se resuelve una ecuación de advección-difusión, utilizándose el mismo esquema de turbulencia que en el caso de las corrientes. La depositación se modela usando una tasa que depende del tamaño, forma y densidad de las partículas. El mecanismo de resuspensión se modela con el esquema de Jones et al. (1995):

$$E(\psi) = F(\psi) \alpha_s \left| \frac{\tau_{100}}{\tau_{b,ref}} \right|^{n_s} \quad (11)$$

donde τ_{100} es el esfuerzo de corte en el fondo a una altura de referencia de 1 m, α_s y n_s son parámetros ajustables adoptados de Jones et al. (1995), y $\tau_{b,ref}$ es un valor de esfuerzo de referencia nominal de valor 0.1 N/m². El factor $F(\psi)$ es una función de la cantidad de material depositado de cada fracción de tamaños.

4.2 Aspectos Numéricos

Para discretizar el modelo matemático en el espacio se utilizan diferencias finitas conservativas (equivalente a la técnica de volúmenes finitos para malla Cartesiana). La grilla elegida para la discretización horizontal es la bien conocida malla Arakawa C (Mesinger and Arakawa, 1976) la cual intercala los nodos de Corrientes y presión/elevación para dar una

buena representación de las cruciales ondas de gravedad y proveer representaciones simples para los bordes costeros y abiertos.

Para la resolución numérica, todas las ecuaciones arriba presentadas se transforman en un sistema de coordenadas sigma, por lo cual la superficie libre y el fondo pasan a ser superficies coordenadas. Esto produce una precisa representación de los procesos en ambas superficies, a la vez que resulta en un mismo número de elementos en cada columna vertical de agua.

Las ecuaciones de momentum se resuelven aplicando una técnica de separación de modos como en el modelo de Blumberg and Mellor (1987). El método consiste en resolver las ecuaciones de momentum y continuidad integradas en la vertical para el modo barotrópico, con un pequeño paso de tiempo que satisface la restrictiva condición de estabilidad de Courant-Friedrichs-Levy (CFL) para ondas de gravedad superficiales. A su vez, las ecuaciones de momentum 3D y las ecuaciones de transporte de escalares 3D para el modo baroclínico se resuelven utilizando pasos de tiempos mayores. Se aplica un esquema de paso predictor-corrector para las ecuaciones de momentum horizontales, a los efectos de satisfacer el requerimiento básico de que las corrientes integradas en vertical obtenidas de los modos de ecuaciones 2D y 3D tengan idénticos valores.

La estabilización se puede conseguir aplicando diferentes esquemas, siendo que para problemas como el presente puede ser suficiente el upwinding, dado que los efectos térmicos no son significativos. En caso de ser necesario, los mejores resultados se obtienen aplicando el método TVD, aunque esto incrementa significativamente los tiempos computacionales.

4.3 Implementación del modelo en el Rio de la Plata

Se utilizó el siguiente esquema de modelos anidados de 2 pasos:

- 1) Modelo Regional: el estuario completo del Rio de la Plata es modelado, desde el Delta formado por los tributarios fluviales hasta el océano abierto. El área computacional es de 300 km por 250 km, y la malla horizontal tiene un tamaño de 1 km. La condición CFL se cumple utilizando un paso barotrópico de tiempo de 20 segundos. La información mareal en el contorno oceánico está disponible a partir de mediciones periódicas realizadas en estaciones hidrográficas de Argentina y Uruguay. A su vez, las descargas fluviales son informadas por el Instituto Nacional del Agua (Borus et al., 2009). El campo de esfuerzos superficiales se obtiene a partir de un esquema de interpolación bilineal que utiliza datos meteorológicos horarios de 4 estaciones de Argentina y Uruguay. Los parámetros de referencia utilizados son: $\beta_S = 7,6 \cdot 10^{-4} \text{ PSU}^{-1}$, $\beta_T = 1,8 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, $\rho_0 = 1025 \text{ kg/m}^3$, $S_0 = 30 \text{ PSU}$, $T_0 = 16^\circ \text{ C}$. Para el modelo de cierre turbulento se utilizan condiciones limitantes $k - \varepsilon$. Otros detalles, incluyendo la validación del modelo regional, fueron presentados en Destuynder et al. (2002).
- 2) Modelo Local: es un modelo de detalle de 31 km por 88 km en sus dimensiones horizontales, que contiene las zonas de dragado lejos de sus contornos, de forma de evitar efectos numéricos de borde. La solución obtenida con el Modelo Regional se impone en los contornos abiertos, mientras que las descargas de los ríos tributarios se controlan con las condiciones de Riemman. Una batimetría detallada está disponible para la zona de estudio, incluyendo los canales de navegación y zonas portuarias. El Modelo Local es 100 veces más detallado que el Modelo Regional, incrementando significativamente el tiempo de CPU dado que la condición de estabilidad CFL

restringe el paso temporal a 4 segundos. El conjunto de parámetros utilizado es consistente con el del Modelo Regional.

En esta aplicación los parámetros sedimentológicos utilizados para el mecanismo de resuspensión fueron $\alpha_s = 8 \cdot 10^{-5}$ y $n_s = 3$, obtenidos a través de un estudio de validación del modelado con datos de campo e imágenes satelitales (van Avermaete y Tarela, 2005). Las fracciones de sedimento se caracterizaron a través de diferentes diámetros representativos de las arcillas y limos presentes en el perfil vertical del lecho, datos que fueron aportados por el desarrollador del proyecto. En las fuentes de sedimentos se utiliza una ecuación de equilibrio de flujos consistente con el esquema numérico de discretización. Las concentraciones de sedimentos en el campo cercano se obtuvieron de un estudio específico realizado para el desarrollador del proyecto, información que no puede ser reproducida aquí. De todas formas, dependiendo del tipo de tecnología y zona de dragado, las mismas pueden variar entre algunas decenas y varios cientos de mg/l. Se destaca que en el campo cercano, el perfil de concentración de sedimentos tiene una fuerte dependencia con la profundidad local, efecto que puede ser incorporado en esta simulación ya que se utiliza un modelo 3D, sin tener que reducirlo a simplificaciones 2D de homogeneidad en la vertical.

4.4 Validación del modelo

El modelo hidrodinámico fue validado comparando sus resultados con mediciones en 6 estaciones de monitoreo del perfil vertical de corrientes equipadas con sensores ADCP e instaladas dentro del área del Modelo Local. Mientras el Modelo Regional fue validado con datos de 3 meses, para el Modelo Local se utilizó un período de validación de 2 semanas, debido al enorme crecimiento del tiempo de cómputo requerido para correrlo. Por razones de espacio, se presentan aquí solo algunos resultados a modo de ejemplo.

La figura 2 muestra la comparación entre las mediciones de nivel de la superficie en la estación de monitoreo ADCP #6, instalada en la zona de difusores del futuro emisario Berazategui, y los niveles obtenidos con el modelo. Se obtuvo un muy buen acuerdo para todo el período analizado, con un seguimiento del movimiento mareal del Río de la Plata por parte del modelo muy aceptable en amplitud y fase.

La figura 3 presenta la comparación entre la dirección de la corriente medida en la estación ADCP #5, instalada en la zona de difusión del futuro emisario Riachuelo, y la dirección simulada. Se observa que las direcciones tanto en las pleamares como en las bajamares son representadas por el modelo con gran precisión. A su vez, el cambio en la dirección de las corrientes que ocurre durante las estoas, es simulado sin retrasos. Nótese que en este período de comparación 3 pleamares han “desaparecido” en las mediciones. Este frecuente comportamiento del Río de la Plata, debido a fuerzas meteorológicas combinadas con la acción mareal, es perfectamente capturado por el modelo, que logra representar este sistema físico con sus principales características en gran detalle.

La figura 4 muestra la intensidad de corriente superficial en la estación ADCP #5. Se alcanza un excelente acuerdo comparando mediciones con la respuesta del modelo, tanto en la evolución de la intensidad de la corriente como su fase.

Este proceso de comparación fue llevado a cabo para todas las estaciones ADCP y para estaciones meteorológicas donde se registra el nivel de las aguas, mostrando un excelente desempeño del modelo computacional. Por razones de espacio, aquí solo se ha presentado una selección de estas comparaciones, en las estaciones de mayor interés para este estudio.

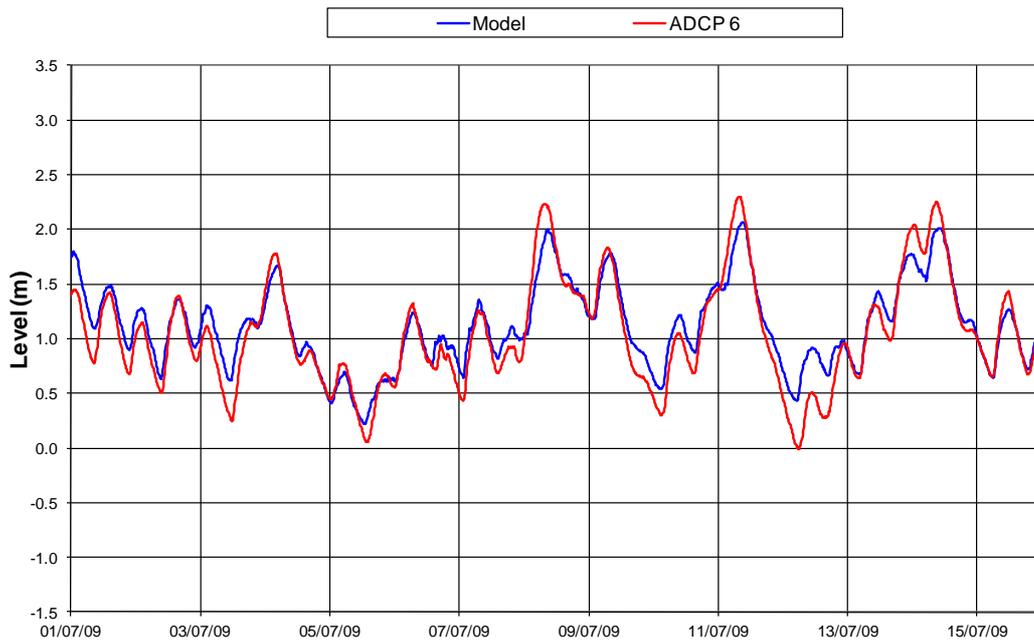


Figura 2: Validación del modelo hidrodinámico – Comparación de niveles en ADCP #6.

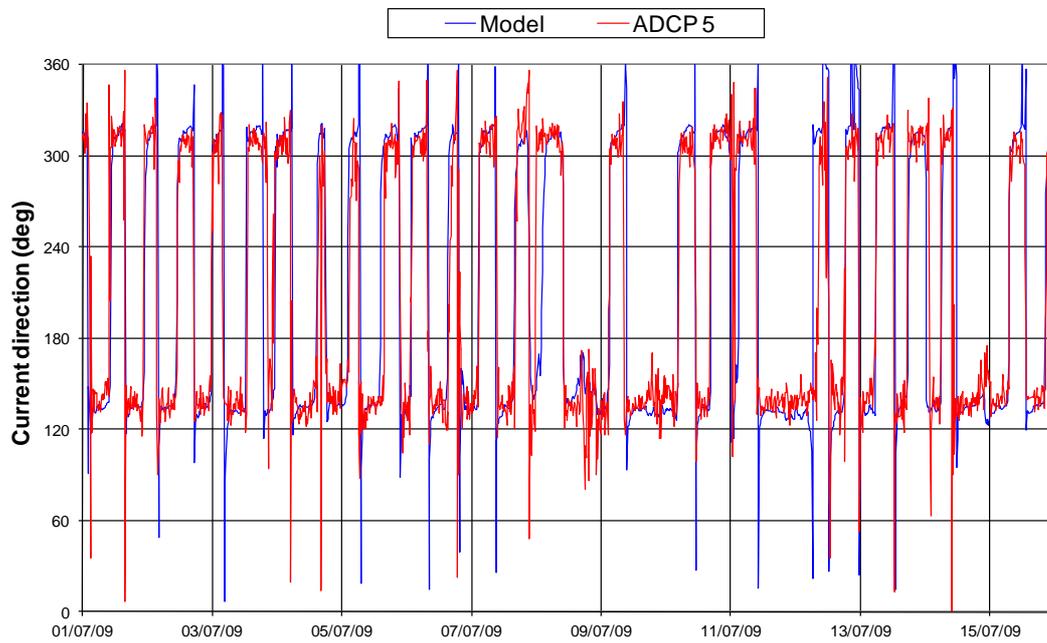


Figure 3: Validación del modelo hidrodinámico – Comparación de dirección de la corriente *superficial en ADCP #5.*

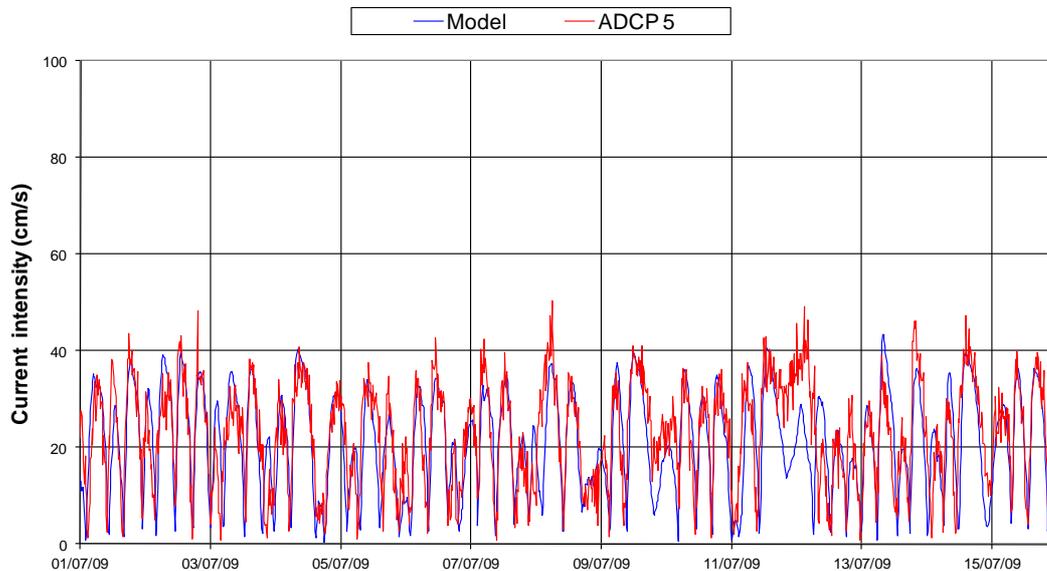


Figure 4: Validación del modelo hidrodinámico – Comparación de intensidad de la corriente superficial en ADCP #5.

Por su parte, el modelo de transporte de sedimentos fue validado previamente, comparando sus predicciones con resultados de monitoreo de concentración de sedimentos y mediante el uso de imágenes satelitales en un estudio de correlación de estas tres fuentes de información (van Avermaete et al., 2005).

5 RESULTADOS DEL MODELO

Una vez que el modelo es validado, la ecuación de advección-difusión para el transporte de sedimentos es resuelta utilizando un esquema Euleriano (el modelo también admite el uso de un esquema de arrastre de partículas del tipo Lagrangeano).

Se deben tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

1. En todos los escenarios, las dragas navegando representan fuentes móviles de resuspensión de sedimentos, por lo que se debe imponer una condición de contorno no estándar. Para hacer esto, la distribución vertical de sedimentos en la celda fuente se impone externamente, usando datos de bibliografía y mediciones realizadas en el Río de la Plata (CCyA Ingeniería, 2010).
2. La disposición de sedimentos en el escenario A ocurre en un punto fijo (línea con bombeo), se selecciona aleatoriamente en el escenario B (la cántara arroja el material dentro de una zona permitida relativamente amplia) y ocurre en puntos móviles en el escenario C (disposición lateral respecto de la draga que navega). Cada escenario es representado apropiadamente introduciendo condiciones de contorno para las fuentes en el código computacional (CCyA Ingeniería, 2010).
3. Las tareas de dragado en esta zona del Río de la Plata resuspenden principalmente limos y arcillas. Estas fracciones son representadas con distintos tamaños característicos para considerar impactos locales (limos) y plumas de turbidez de largo alcance (arcillas).

Luego, se utilizó el modelo para estudiar el impacto en la línea de costa de Buenos Aires, en las tomas de agua y en el límite internacional, de modo de ayudar en la selección de tecnologías de dragado y modos de operación óptimos.

Las figuras 5, 6 y 7 presentan las plumas de turbidez durante un período de dragado de 15 días para los escenarios A, B y C respectivamente, para el caso del emisario Berazategui. De esta manera, se puede observar fácilmente (en un vistazo acotado) la diferencia relativa entre escenarios. La distribución de concentración máxima que se obtiene en el dominio computacional para todo el período simulado también se presenta en estas figuras.

6 CONCLUSIONES

El proceso de validación del modelo hidrodinámico ha mostrado un muy buen acuerdo entre los resultados de las simulaciones y las mediciones de nivel para períodos largos de tiempo. En el caso de las comparaciones de las intensidades y direcciones de las corrientes, el acuerdo alcanzado fue excelente, demostrando que el modelo implementado permite representar con precisión este complejo sistema forzado por la acción de mareas, la descarga de ríos de gran caudal y los vientos. El desafío de predecir el impacto por turbidez debido a la construcción de los emisarios subfluviales de la ciudad de Buenos Aires en su etapa de dragado, pudo ser cumplido a través del modelado numérico incorporando fuentes de sedimentos móviles como las dragas en navegación, y con puntos de descarga fijos, aleatorios o móviles.

El impacto menor se alcanzaría utilizando dragas de succión por arrastre con cántara, tecnología que aseguraría la no afectación de las tomas de agua de la ciudad. Por su lado, la peor situación ocurriría al emplearse dragas de succión por arrastre con disposición lateral de sedimentos mediante chorros. En cualquier caso, el potencial impacto sobre las tomas de agua podría controlarse mediante un adecuado plan de operaciones, sujeto a la validación mediante modelado matemático y monitoreo, y a las condiciones hidro-meteorológicas del momento. Cualquier solución aseguraría que las aguas no son impactadas en el límite fronterizo.

RECONOCIMIENTOS

Este estudio ha sido encargado por Agua y Saneamientos Argentinos (AySA). Los autores agradecen el aporte de AySA, incluyendo los datos de su red de monitoreo aplicados en este trabajo, y el permiso para publicar algunos resultados.

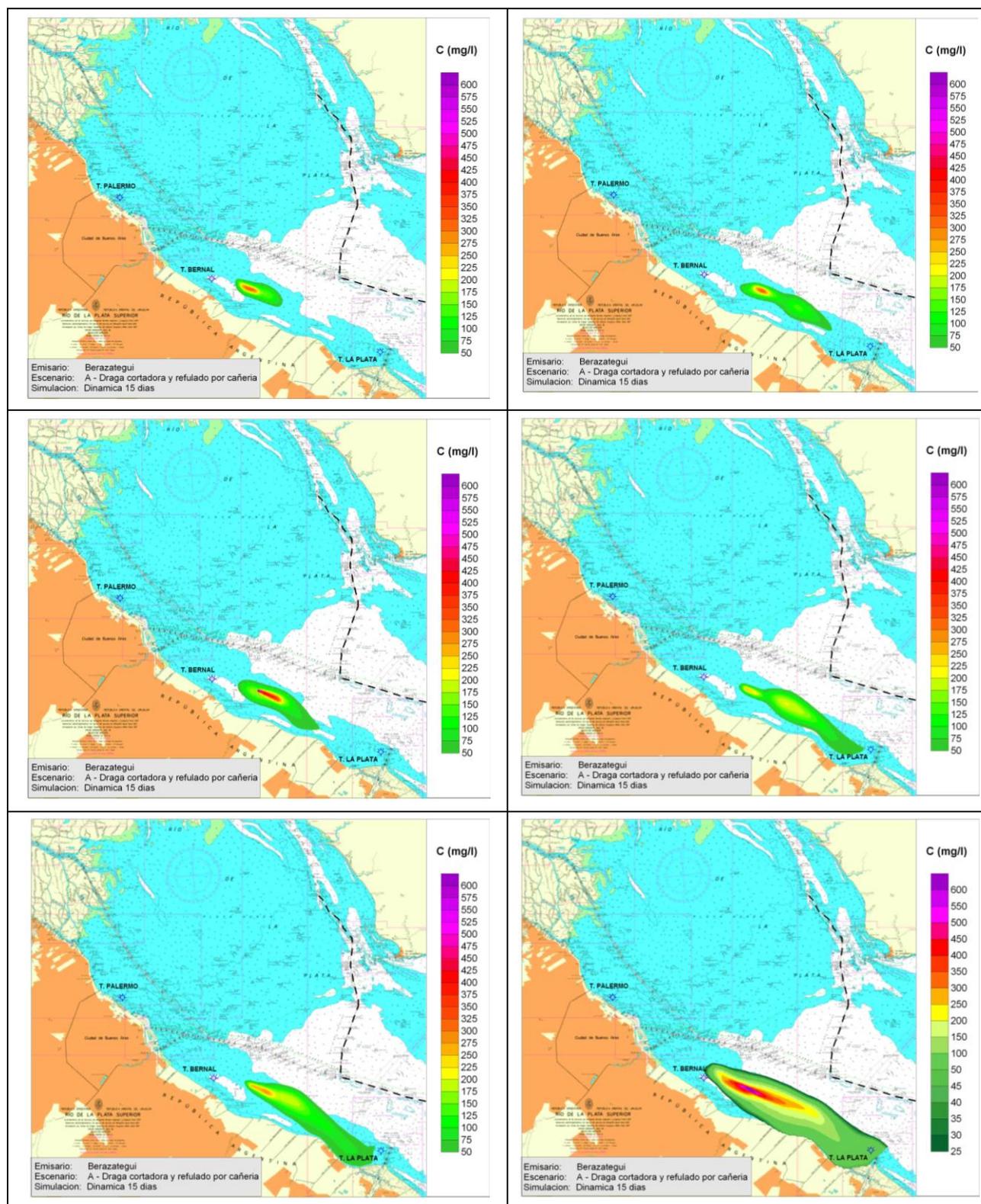


Figura 5: Escenario A, Emisario Berazategui. En orden lexicográfico: plumas de turbidez luego de 3, 6, 9, 12 y 15 días de dragado. La última figura muestra la concentración máxima durante este período.

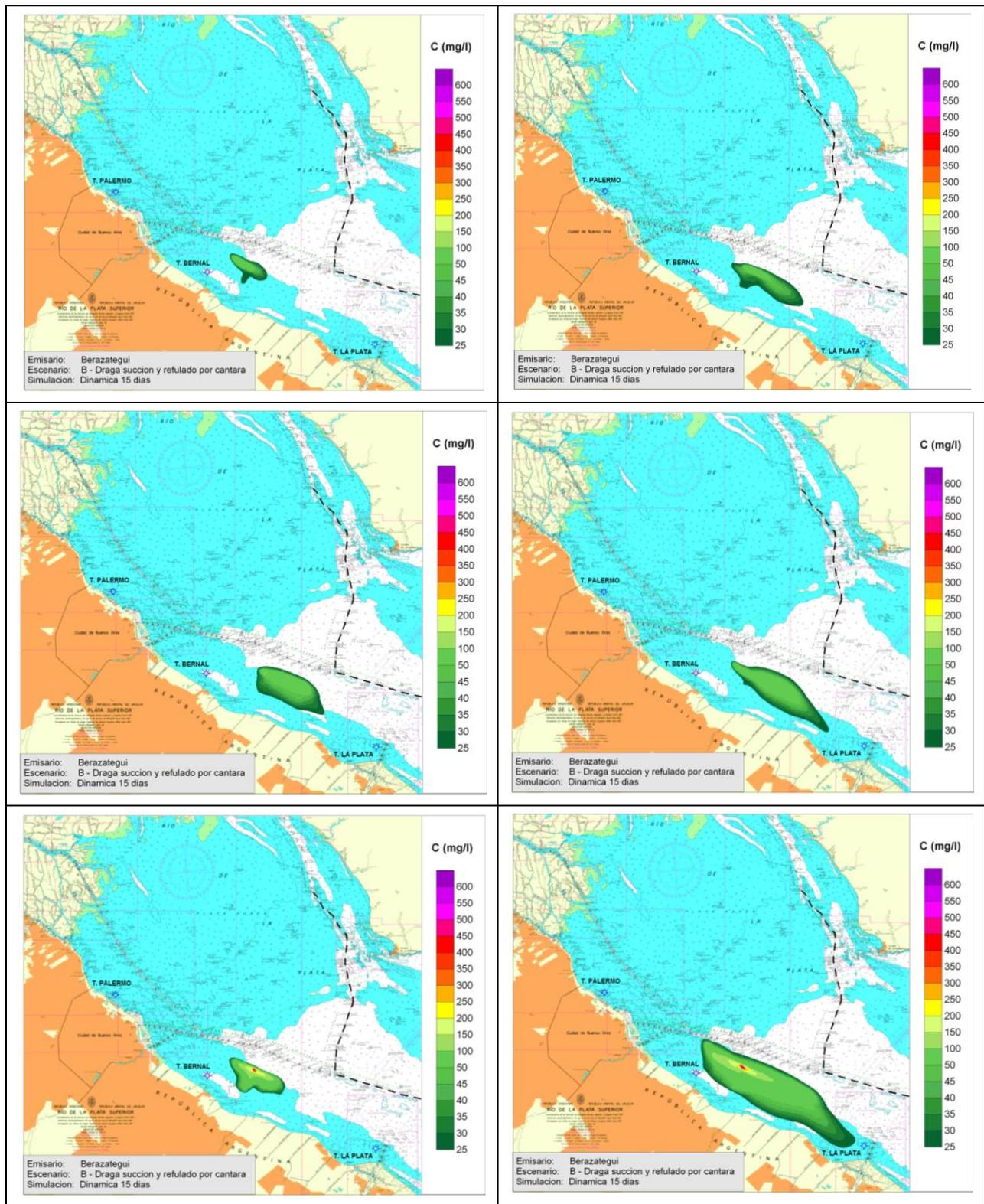


Figura 6: Escenario B, Emisario Berazategui. En orden lexicográfico: plumas de turbidez luego de 3, 6, 9, 12 y 15 días de dragado. La última figura muestra la concentración máxima durante este período.

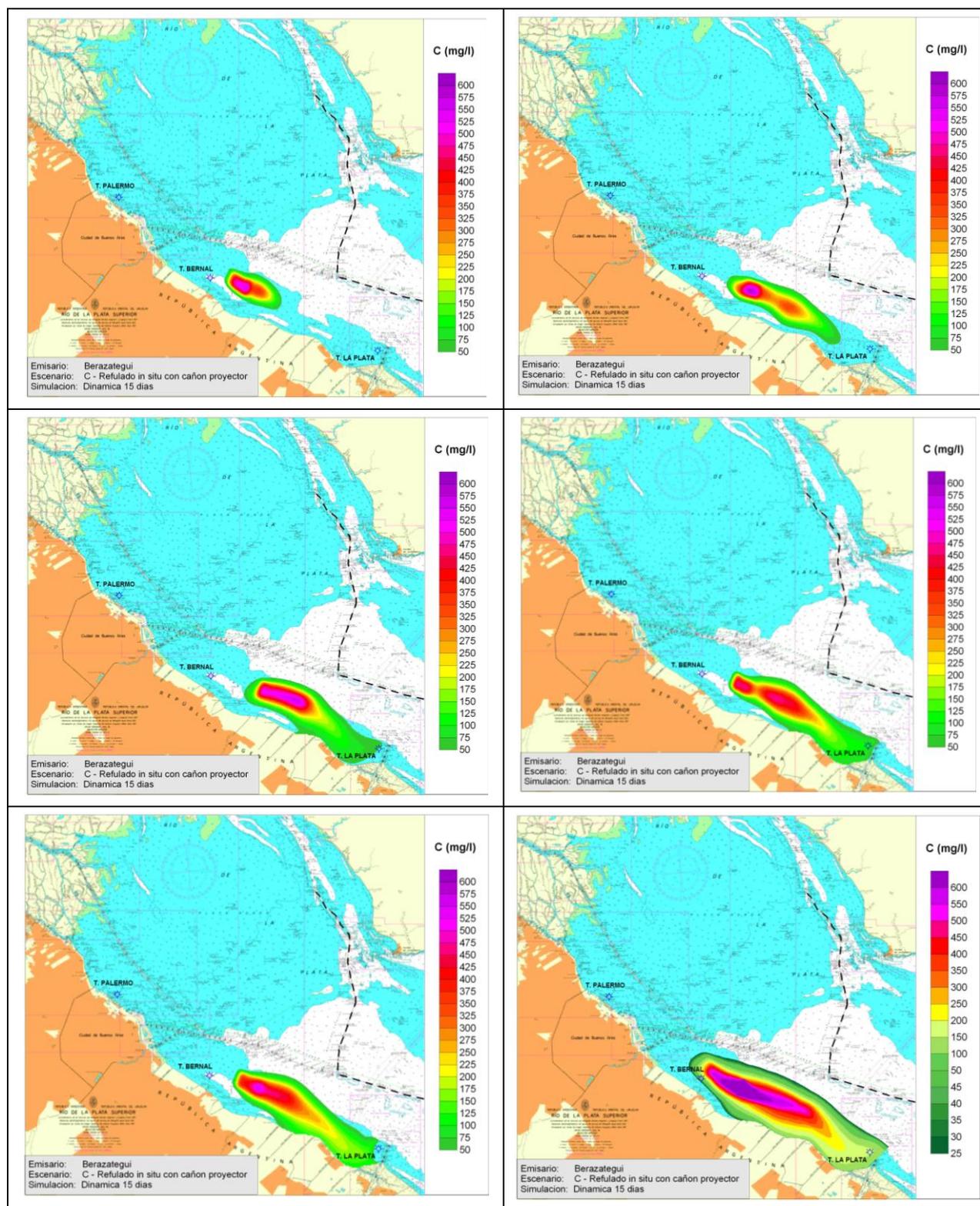


Figura 7: Escenario C, Emisario Berazategui. En orden lexicográfico: plumas de turbidez luego de 3, 6, 9, 12 y 15 días de dragado. La última figura muestra la concentración máxima durante este período.

REFERENCIAS

- Blumberg A.F. and Mellor G.L. (1987). A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. In : N.S. Heaps (Editor), *Three-dimensional Coastal Ocean Models*. Coastal and Estuarine Sciences, Vol. **4**, *American Geophysical Union*, Washington D.C., pp. 1–16.
- Borús, J., Uriburu Quirno, M. y Giacosa, J.P. (2009). Evaluación de caudales diarios descargados por los grandes ríos del sistema del Plata del estuario del Río de la Plata, *Alerta Hidrológico - Instituto Nacional del Agua*, Argentina.
- CCyA Ingeniería (2010), Modelación Matemática de Dispersión de Sedimentos en el Río de la Plata por Construcción de los Emisarios Riachuelo y Berazategui, realizado para AySA.
- Destuynder, V. y Tarela, P.A. (2002). Rio de la Plata's Saline Wedge Modeling, *XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, La Habana, Cuba.
- Destuynder, V. (2002). 3D hydrodynamic Modeling of Rio de la Plata. *Thesis for the degree in engineering at Lyon University, France, defended at Engineering School, Universidad de Buenos Aires*.
- Galperin B., Kantha L.H., Hassid S. and Rosati A., 1988. A quasi-equilibrium turbulent energy model for geophysical flows. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **45**, 55–62.
- Jones S.E., Jago C.F. and Simpson J.H. (1995). Modelling suspended sediment dynamics in tidally mixed and periodically stratified waters : progress and pitfalls. In : C.B. Pattiaratchi (Editor), *Mixing Processes in Estuaries and Coastal Seas*. *Coastal and Estuarine Studies*, Vol. **41**, American Geophysical Union, 315–338.
- Luyten P.J., Jones J.E., Proctor R., Tabor A., Tett P. and Wild-Allen K. (1999). COHERENS – A Coupled Hydrodynamical-Ecological Model for Regional and Shelf Seas. User Documentation. *MUMM Report, Management Unit of the Mathematical Models of the North Sea*, 914 pp. www.mumm.ac.be/coherens.
- Mellor G.L. and Yamada T. (1982). Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, **20**, 851–875.
- Mesinger F. and Arakawa A. (1976). Numerical methods used in atmospheric models. *Global Atmospheric Research Programme (GARP) publication series No. 17*, Volume 1, 64 pp.
- Tarela, P. A., Perone, E.A. and van Avermaete, F.J. (2008). Improving the Coastal Environment at the End of the World. *Proceedings of COPEDEC VII*, Dubai, United Arab Emirates.
- Tarela, P.A. (2000). Reservoir Sedimentation: Mathematical Modeling and Numerical Simulation. *Ph.D. Thesis approved by Engineering School - Universidad de Buenos Aires* (In Spanish).
- Van Avermaete, F. and Tarela, P.A. (2005). Transporte de sedimentos en el Río de la Plata: uso combinado de modelación numérica e imágenes sensoriales. *Congreso Nacional del Agua*, Mendoza, Argentina.