

CIRCULACIÓN ESTACIONAL Y CORREDORES DE FLUJO EN EL ESTUARIO DEL RÍO DE LA PLATA SOBRE LA BASE DEL MODELO HAMSOM/CIMA

Virna Meccia⁽¹⁾, Claudia G. Simionato⁽¹⁾⁽²⁾,
Walter Dragani⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾ y Mario N. Núñez⁽¹⁾⁽²⁾

⁽¹⁾ Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA/CONICET-UBA)

⁽²⁾ Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos de la Universidad de Buenos Aires

⁽³⁾ Servicio de Hidrografía Naval de la Armada Argentina (SHN)

⁽⁴⁾ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

Introducción

Aunque el Río de la Plata es un área de importancia estratégica, hasta el momento no se ha realizado en el estuario ningún estudio observacional de gran escala que permita una determinación adecuada de la circulación media y su variabilidad, que resulta esencial para una gestión apropiada. Ante la carencia de observaciones directas de corrientes, la mayor parte de lo que se conoce acerca de la circulación en el estuario se ha inferido a partir de la salinidad, que controla la densidad en el estuario, de otras variables hidrográficas y de los sedimentos. El estuario recibe agua dulce a través de un número de tributarios, de los cuales los más importantes son los ríos Paraná (en sus dos brazos principales, Guazú-Bravo y Palmas) y Uruguay. A partir de un análisis de sedimentos de fondo Parker *et al.* (1987) infirieron que las aguas de estos ríos circulan, al menos en la parte superior y media del estuario, en por lo menos dos ramas distintas. La rama del sur, que baña las costas bonaerenses, estaría asociada al caudal del Paraná de las Palmas, mientras que las aguas provenientes de los otros brazos del Paraná y las del río Uruguay, circularían por el norte, bañando las costas uruguayas. Jaime *et al.*, (2001) postularon la existencia de 'corredores de flujo' en el estuario. Según esta hipótesis, las aguas de los tres tributarios principales circularían a través de 'corredores' bien diferenciados, con escasa o nula mezcla lateral. De esta manera, las costas bonaerenses estarían casi exclusivamente bañadas por aguas provenientes del Paraná de las Palmas, las costas uruguayas por aguas con origen en el río Uruguay y las aguas del Paraná Guazú-Bravo ocuparían la porción central del estuario. Aunque la determinación del camino de las aguas de los afluentes principales del estuario, así como el efecto de la variabilidad de los vientos y la descarga continental sobre este camino, es fundamental, la cuestión no ha sido aún profundamente analizada. En este contexto los modelos numéricos constituyen una excelente alternativa a la carencia de observaciones y su complemento. A fin de simular el transporte de sustancias en el Río de la Plata, las ecuaciones de advección-difusión para trazadores pasivos fueron acopladas al modelo HamSOM/CIMA para simular las plumas correspondientes a los diferentes tributarios principales del estuario. Se buscó identificar el área de influencia de cada tributario a través del estudio de la pluma correspondiente. Se realizaron simulaciones, para escenarios de caudal medio, alto y bajo y vientos medios de invierno y verano. Se analizó el efecto de eventos de vientos intensos en la deformación de las plumas y los tiempos de persistencia de la señal introducida por estos. Los campos de corrientes resultantes permitieron determinar las características fundamentales de la circulación media en el estuario, su relación con la batimetría y la línea de costa y la variabilidad en la descarga y los vientos. Los resultados de estas simulaciones permitieron asimismo realizar estimaciones de los tiempos de permanencia y lavado de las aguas de los diversos tributarios en el estuario.

Resumen de resultados y conclusiones

La resolución horizontal de la grilla elegida fue de 1.5 Km, suficiente como para definir adecuadamente el detalle de la batimetría y la línea de costa en la región de estudio (porciones superior y media del estuario). Se utilizaron 13 niveles verticales. El dominio de simulación, mostrado en la Fig. 1 conjuntamente con la batimetría utilizada, es suficientemente extenso como para que los efectos de los contornos puedan ser considerados despreciables en la zona de interés.

Para simular el transporte de sustancias en el Río de la Plata, ecuaciones de advección-difusión para trazadores pasivos fueron acopladas al modelo. Lamentablemente, no existen observaciones de trazadores pasivos en todo el interior del estuario con las que validar la capacidad del modelo de representar adecuadamente los procesos de mezcla y transporte en esta región somera. Los únicos datos corresponden a un muestreo de conductividad del agua del estuario realizado en noviembre de 1982 entre las líneas Colonia - Buenos Aires y Montevideo - Punta Piedras. Aunque la conductividad depende de la temperatura, los bajos gradientes de esta última variable en el estuario a lo largo de todo el año minimizan esta desventaja. Se realizó un estudio de casos intentando reproducir la situación observada este período. Aunque la carencia de observaciones al norte de Colonia no permite una verificación exhaustiva en esta zona, los resultados en

el resto del dominio (no mostrados) indican una buena concordancia general entre las observaciones y la simulación, siendo el modelo capaz de reproducir la forma y los valores de las principales isolinias de conductividad observadas.

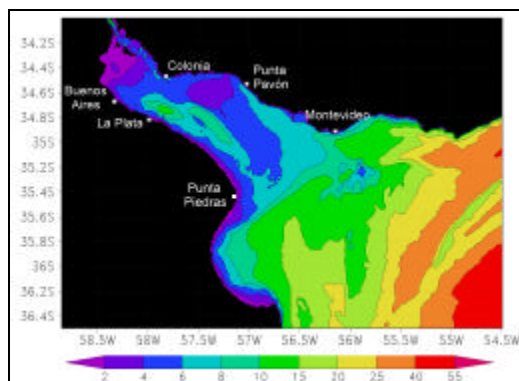


Figura 1: dominio y batimetría utilizados en las simulaciones numéricas.

Para simular las plumas correspondientes a los diferentes tributarios principales, se consideraron trazadores diferentes para los ríos Uruguay, Paraná Guazú-Bravo y Palmas. En los puntos de entrada se asume una concentración constante en la vertical con un valor nominal de 100 para todo el volumen. La superficie libre en los contornos abiertos se hace variar según la amplitud y fase de la componente de marea M_2 proporcionada por un modelo de mayor escala (Simionato *et al.*, 2002a). Para determinar el patrón característico medio de verano e invierno el modelo fue forzado en superficie con vientos medios estacionales derivados de los reanálisis de NCEP/NCAR corregidos por intensidad según Simionato *et al.* (2002b). Descargas diferentes características del invierno y el verano fueron consideradas en cada caso. La sensibilidad de las soluciones a la descarga continental fue estudiada obteniendo los patrones de flujo para escenarios de descarga alta y baja con vientos medios de verano e invierno. Para complementar la interpretación de los resultados se realizaron asimismo estudios de sensibilidad a la batimetría de fondo.

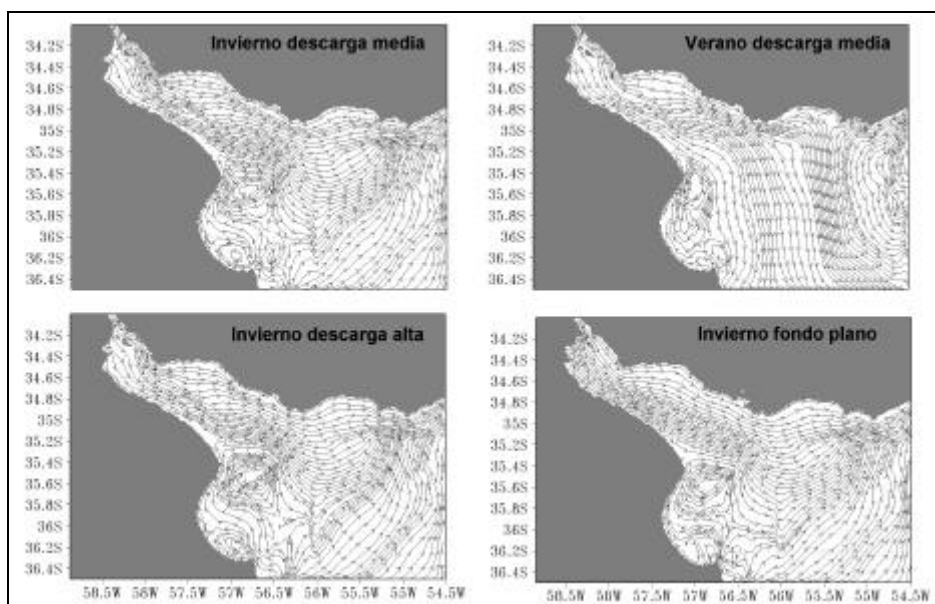


Figura 2: Líneas de corriente del flujo medio en un ciclo de marea para varias de las simulaciones realizadas.

Las líneas de corriente del flujo medio (coincidentes en este caso con trayectorias de partículas) en un ciclo de marea para varias de estas simulaciones se muestran en la Fig. 2, en la que se observa el efecto batimétrico en la circulación del Río de la Plata. En la parte superior y media del estuario en ambas estaciones el flujo tiende a seguir los canales naturales, con relativamente baja influencia de la descarga continental. En el Río de la Plata Interior el flujo se vuelca primero de la costa uruguaya hacia la argentina por la presencia del Canal Intermedio. En la parte media, favorecido en parte por el efecto de Coriolis, el flujo tiende a retornar a la costa uruguaya. Tanto en la parte superior como media del estuario, la influencia de los vientos es baja. En la zona exterior en cambio, a partir de aproximadamente Montevideo, el flujo se torna más

sensible a los vientos con una reversión importante en el sentido de circulación de invierno a verano, que es consistente con lo que se conoce de la distribución de salinidad (Guerrero *et al.* 1997). En el norte de la Bahía Samborombón se obtiene una celda de circulación horaria, cuya extensión y forma cambian con la estación pero poco con las descargas, sugiriendo que se encuentra afectada por los vientos. En la parte sur de Samborombón, el flujo parece ser mucho más sensible a los vientos, con cambios importantes de sus características de una a otra estación, aunque las corrientes medias en la bahía son débiles, sugiriendo que esta región es fundamentalmente retensiva.

Los resultados obtenidos para los 'trazadores' (ver Fig. 3 para el caso de descargas medias) permiten distinguir dos corredores de flujo. La descarga de los ríos Uruguay y Paraná Guazú-Bravo ocupa preponderantemente costa uruguaya y el centro del estuario, mientras que el aporte del Paraná de las Palmas es transportado sobre la costa argentina. Aunque se observan diferencias entre las concentraciones asociadas a los distintos tributarios en verano e invierno, el conjunto de soluciones sugiere que la diferencia está asociada a los diferentes caudales que ingresan más que a cambios significativos en la circulación de la porción más alta estuario de una a otra estación. Los corredores se mantienen para los diferentes escenarios de caudal, cambiando fundamentalmente el tiempo que las aguas de cada tributario requieren para circular por el estuario como función del caudal y, consecuentemente, su extensión. Para caudales elevados este 'tiempo de tránsito' es menor debido a las mayores velocidades residuales generadas por el mayor aporte fluvial. El porcentaje de aguas correspondiente a los diferentes tributarios en cada región está asociado por lo tanto fundamentalmente a las descargas de cada uno de ellos. Sobre Buenos Aires, la concentración de aguas del Paraná de las Palmas resulta en todos los casos muy elevada, con valores mayores al 90%, dado que este río invade en forma casi exclusiva la región de Playa Honda. La influencia de los otros tributarios aumenta lentamente a lo largo de la costa argentina hacia la parte exterior del estuario. La costa uruguaya, recíprocamente, tiene casi nula afectación en condiciones medias del Paraná de las Palmas, mientras que se haya bañada por aguas de los otros tributarios.

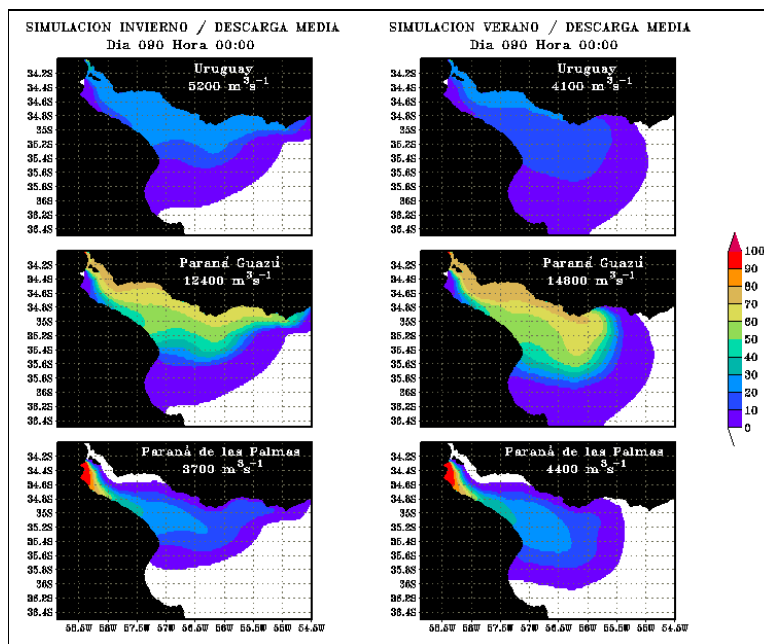


Figura 3: concentración de los 'trazadores' característicos de cada uno de los tres tributarios principales del Río de la Plata al cabo de 90 días de simulación bajo condiciones medias de caudal y vientos de invierno (izquierda) y verano (derecha).

El estudio de sensibilidad a la batimetría sugiere que la presencia de los dos corredores resulta de la geometría y la batimetría del estuario. Aunque sólo una porción menor del caudal ingresa al estuario a través del Paraná de las Palmas, las aguas de este afluente ocupan la región somera correspondiente de Playa Honda, mientras que el gran caudal asociado a los otros tributarios se canaliza por el canal del norte, más profundo. A partir de Colonia la costa, que toma una orientación este-oeste, y la presencia del canal intermedio, fuerzan al flujo a concentrarse en la parte central del estuario, favoreciendo la mezcla. Este resultado es cualitativamente consistente con lo que puede inferirse de la distribución de sedimentos de fondo (Fig. 4), así como de los pocos datos de conductividad disponibles en el interior del estuario y de imágenes satelitales. Los resultados muestran además consistencia cuantitativa con los resultados de Parker *et al.* (1987), quienes muestran que el tiempo de decantación de los sedimentos característicos del Paraná de las Palmas es del orden de los 12 días y que estos ocupan la región mostrada en rojo en la Fig. 4. Una

comparación de esta figura con nuestra solución para este río al cabo de 12 días (Fig. 4) muestra que el modelo captura adecuadamente la extensión y la forma de la pluma. La Tabla I muestra tiempo que tardan los trazadores en alcanzar algunos puntos clave de las costas argentina y uruguay del estuario y tiempo que tarda en estabilizarse la concentración de los mismos bajo condiciones constantes de viento. Aunque estos resultados corresponden a la simulación de verano, los resultados no son significativamente diferentes en la de invierno. En un escenario de vientos constantes las sustancias que son descargadas al Río de la Plata por estos tributarios comenzarían a llegar a la línea Buenos Aires-Colonia en menos de 4 días y Punta Piedras-Montevideo en aproximadamente 20-25 días. No obstante, estabilizar las concentraciones, suponiendo un flujo constante de sustancias requiere un tiempo considerablemente más largo. Las simulaciones indican que el tiempo de lavado, es decir, el tiempo en el que se produce un completo recambio, de las aguas en el estuario es del orden de 60 días.

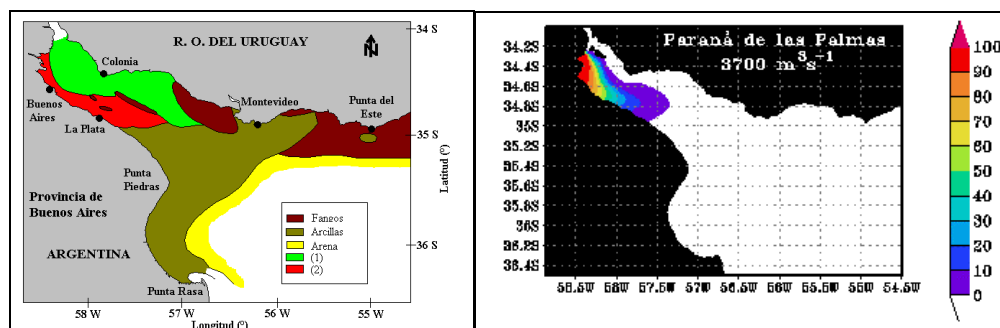


Figura 4. Izquierda: Distribución de los sedimentos de fondo en el estuario del Río de la Plata (adaptado de Parker *et al.*, 1987). Derecha: distribución del trazador característico del Paraná de las Palmas al cabo de 12 días de simulación; aunque la figura corresponde al caso medio de invierno, la solución no cambia en verano.

Para estudiar el efecto de la variabilidad de los vientos sobre los corredores de flujo se realizó un conjunto de simulaciones para escenarios de vientos intensos (sudestadas y pamperos o frentes). Las simulaciones muestran que los corredores de flujo son poco sensibles a estos eventos de vientos intensos. Aunque el efecto de los mismos afecta la mezcla relativa de las aguas de los diferentes tributarios especialmente sobre la costa argentina durante la manifestación del evento, éste se pierde al cabo de aproximadamente una semana. No obstante, desde el punto de vista de contaminantes, durante los eventos la afectación de la mezcla sobre la costa argentina podría tener efectos significativos.

		Tiempo que tarda el trazador en llegar al lugar (días)	Tiempo que tarda el trazador en estabilizarse (días)
Argentina	Buenos Aires	7 - 5 - 3	16 - 16 - 20
	La Plata	7 - 5 - 5	23 - 24 - 28
	Punta Piedras	27 - 23 - 27	>90 - >90 - >90
Uruguay	Colonia	4 - 2 - no llega	10 - 10 - no llega
	Punta Pavón	11 - 9 - no llega	30 - 30 - no llega
	Montevideo	25 - 22 - 27	56 - 54 - 58

Tabla I: tiempo que tardan los trazadores correspondientes a cada uno de los tributarios en alcanzar algunos puntos clave del estuario y tiempo que tarda en estabilizarse la concentración de los mismos bajo condiciones constantes de viento en verano.

Referencias

- Parker, G., S. Marcolini, J. Cavallo y R. Violante, 1987: Modelo esquemático de dispersión de sedimentos en el Río de La Plata. *Ciencia y Tecnología del Agua*, 1(4) 68-80.
- Jaime, P.; A. Menéndez y O. Natale, 2001: Balance y dinámica de nutrientes principales en el Río de la Plata interior. Proyecto INA 10.4. Informe 01. Instituto Nacional del Agua. Ezeiza, Sep. 2001.
- Simionato, C. G., W. Dragani, M. Nuñez y M. Engel, 2002b: A set of 3-d nested models for tidal propagation from the Argentinean Continental Shelf to the Río de la Plata Estuary - Part I M2. Submitted to Journal of Coastal Research.
- Simionato, C. G., W. Dragani, M. Nuñez, V. Meccia y T. Renaud, 2002: Modelo HamSOM/CIMA: Simulaciones de corrientes y alturas en el Río de la Plata. Comparación con observaciones. Informe CIMA/Oc-02-02 Proyecto PNUD/GEF RLA/99/G31. Sep. 2002.
- Guerrero, R.A., E.M. Acha, M.B. Framiñan y C.A. Lasta, 1997: Physical oceanography of the Río de la Plata Estuary, Argentina, *Cont. Shelf. Res.*, 17(7), 727-742.