

ESTUDIO DE LOS CORREDORES DE FLUJO DEL RÍO DE LA PLATA INTERIOR CON EL MODELO RPP-2D

Mariano Ré, Ángel N. Menéndez

Instituto Nacional del Agua (INA)

Casilla de Correo 21, 1802 Aeropuerto Ezeiza, Argentina, (54-11) 4480-4500, m.re@ina.gov.ar

RESUMEN

Se presenta un estudio de detalle referente al desarrollo de los corredores de flujo del Río de la Plata Interior. Se simulan las circulaciones asociadas a tres escenarios: condiciones medias de verano, condiciones medias de invierno y evento de sudestada. Para ello se utiliza el modelo numérico de circulación RPP-2D, que es un modelo hidrodinámico bidimensional horizontal que comprende todo el Río de la Plata y gran parte del frente marítimo. Luego se simula el desarrollo de las capas de mezcla que se generan a partir de las desembocaduras de los principales tributarios en el Río de la Plata, en la interfase de encuentro entre los ríos Paraná de las Palmas y Paraná Guazú, por un lado, y Paraná Guazú y Uruguay, por el otro. Para ello se utiliza el software MANCHAS, basado en una técnica Lagrangiana que evita los efectos de difusión numérica típicos de las técnicas Eulerianas, que llegan a enmascarar los efectos físicos.

Los resultados muestran que, en condiciones hidrometeorológicas normales, las dos capas de mezcla permanecen relativamente acotadas en espesor a lo largo del Río de la Plata Interior, dejando a cada lado extensas zonas de corrientes de agua asociadas esencialmente al tributario de origen, que constituyen, entonces, sendos corredores de flujo. Además, se muestra que el ingreso de una onda de tormenta produce, por un lado, el frenado e, incluso, el retroceso del flujo descargado por los tributarios, y, por el otro lado, una mezcla de gran escala de las masas de agua. No obstante, a escala turbulenta las capas de mezcla siguen manteniendo su identidad durante la tormenta, de modo que el Río de la Plata Interior queda constituido esencialmente por un conjunto de masas de agua que reconocen su origen en alguno de los tributarios.

Palabras Clave: Corredores de Flujo - Río de la Plata – Modelación Numérica

INTRODUCCIÓN

Las condiciones ambientales del Río de la Plata y su Frente Marítimo están amenazados por una multiplicidad de causas antropogénicas dentro de la Cuenca del Río de la Plata, las áreas costeras y la zona común de pesca. Entre estas amenazas se destacan los desechos urbanos, agrícolas e industriales; los pesticidas, hidrocarburos y metales pesados; los sedimentos y organismos en la parte baja del Río, que reflejan la proximidad de zonas urbanas e industriales. El discernimiento de los caminos recorridos por las aguas en el Río de la Plata, constituye una información de gran utilidad para establecer el origen y destino de la contaminación. En particular, la dinámica del Río de la Plata Interior muestra que las aguas mantienen en su mayor parte una identidad de origen, de modo que los caminos del flujo pueden ser utilizados para delimitar corredores de circulación con distinto origen y destino.

Corredores de flujo en el Río de la Plata Interior

A partir de un estudio sobre el balance de nutrientes en el Río de la Plata Interior, Jaime *et al.* (2001) propusieron la esquematización del flujo medio del río en tres corredores de flujo, cada uno asociado a cada tributario principal: el Paraná de las Palmas, el Paraná Guazú y el Uruguay. La idea básica que conlleva esta esquematización es que las aguas que transitan a lo largo de cada corredor provienen, esencialmente, del tributario de origen (Figura 1). Esta propuesta está basada en un análisis hidrodinámico que indica una escasa capacidad de mezcla de las aguas, dentro del intervalo de tiempo que las parcelas tardan en recorrer el Río de la Plata Interior en sentido longitudinal. Además, se reafirma en la insignificante contribución que esa mezcla tiene en los balances de nutrientes efectuados.



Figura 1. Corredores de Flujo en el Río de la Plata.

Esta proposición resulta afín con el estudio sedimentológico del Río de la Plata de Parker *et al.* (1987), en donde se efectúa la distinción entre una faja longitudinal al norte (Uruguay y Paraná Guazú), a través de la asociación de facies de arenas y arenas limosas, y una segunda faja longitudinal al sur (Paraná de las Palmas), diferenciándose claramente de la faja anterior por texturas más finas y alto contenido de carbón vegetal. También con las consideraciones de tipo químico de Quirós y Senone (1985), que plantearon la existencia de zonas con distintas propiedades (las cuales guardan una fuerte semejanza con los corredores de flujo). Los análisis efectuados por Nagy *et al.* (2001, 2003) al asociar la calidad del agua en la costa de Montevideo y la del río

Uruguay, especialmente clara, para circunstancias de crecidas del río Uruguay, refuerzan el planteo de la conservación de la identidad original de las aguas.

La identificación de corredores de flujo es consistente con observaciones remotas de confluencia de ríos. La Figura 2 muestra la confluencia de los ríos Solimões (de aguas claras) y Negro (cargado de sedimentos), en la formación del río Amazonas, en donde según balances isotópicos y resultados hidrológicos, las aguas de estos ríos requieren entre 25 y 100 kilómetros para mezclarse según afirma Maurice-Bourgoin (2000). También se observa el Puerto de Santa Fe en donde se encuentran el flujo proveniente del Canal de Acceso al Puerto desde el río Paraná y el correspondiente al Canal Derivador, el caso de la confluencia de los ríos Paraná y Paraguay, quién aporta una importante cantidad de sedimentos que provienen del río Bermejo, y una imagen relativamente moderna del satélite AQUA con el sensor MODIS que muestra claramente la existencia de tres corredores para una situación particular.

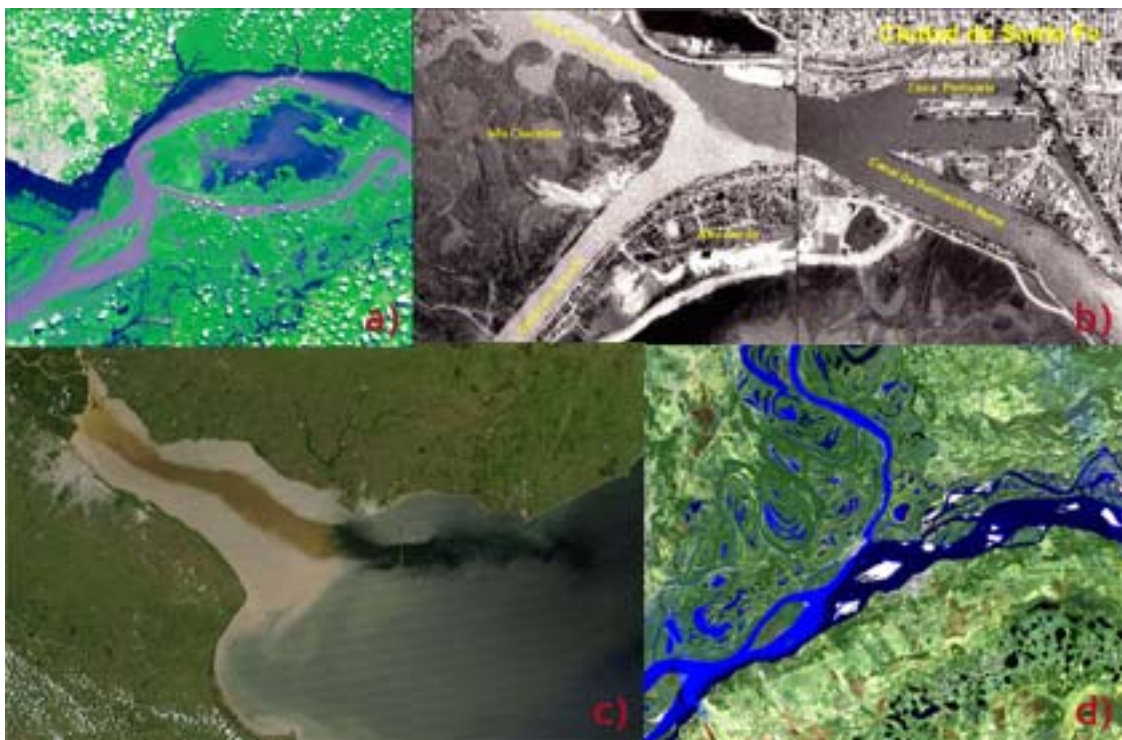


Figura 2. Observaciones Remotas: a) Confluencia río Solimões y Negro (Brasil). b) Puerto de Santa Fe. c) Río de la Plata. d) Confluencia ríos Paraná y Paraguay.

Procesos que intervienen

Forzantes

Los forzantes principales de la hidrodinámica del Río de la Plata son la onda de marea que ingresa desde el océano, los vientos que actúan sobre toda la superficie del agua y la descarga de los tributarios que penetra en la cabecera del río.

La onda oceánica que llega al Río de la Plata tiene un régimen de desigualdades diurnas, presentando grandes diferencias entre pleamares o bajamares consecutivas. La componente de mareas M_2 representa más del 65% de la energía presente en la marea como afirman D'Onofrio *et al.* (1999). La forma, la extensión y su régimen astronómico micromareal (con pocas decenas de centímetros de amplitud) determinan que los procesos atmosféricos, especialmente el régimen de

vientos, tengan una importancia fundamental en la dinámica del río. El viento actúa sobre la superficie del agua variando los niveles, la velocidad de propagación de la onda de marea y la mezcla en la vertical. El Río de la Plata está situado bajo la influencia del anticiclón del Atlántico Sur, estando los patrones climáticos supeditados a su posición.

La descarga de los tributarios constituye el determinante principal de los corredores de flujo. El caudal medio del Río de la Plata es del orden de los 23.000 m³/s. Más del 97% del ingreso de agua al Río de la Plata es aportado por los ríos Paraná y Uruguay. La descarga del río Santa Lucía, relativamente cercana a Montevideo, es despreciable con respecto a la totalidad del sistema, aunque es un importante factor local para las costas uruguayas. De igual manera resultan despreciables los aportes de una serie de pequeñas descargas que se dan de la margen argentina.

El río Paraná presenta una marcada estacionalidad, alcanzando valores pico, durante las crecidas extraordinarias, que superan los 50.000 m³/s. En el período húmedo 1971-2001 el caudal medio de este río fue de 18.500 m³/s, lo que representa un 15% más respecto de la media histórica (1931-2001) según Jaime y Menéndez (2002). La transición del río Paraná al Río de la Plata, se da a través de un amplio delta, cuya extensión es de unos 320 km, presentando un ancho muy variable, alcanzando alrededor de 100 km sobre el frente de desembocadura.

El río Uruguay se distingue por tener mayor variabilidad del ciclo estacional, con valores máximos altos tanto en otoño (abril-mayo) como en primavera (octubre). El valor medio de la distribución de caudales medios mensuales alcanza los 4688 m³/s, siendo muy frecuentes descargas que oscilan entre los 1000 y 2000 m³/s como lo indican Jaime y Menéndez (2002)

Fenómeno de dispersión

Un contaminante pasivo es aquel que no afecta la hidrodinámica del sistema y se transporta con el movimiento natural del agua. Según los trabajos de Menéndez (1986) y Carreras y Menéndez (1990) este transporte se puede desglosar como la composición de un flujo medio (que no solo transporta la sustancia, sino que sus gradientes espaciales contribuyen al desparramamiento) y un flujo turbulento (que desparrama el material mediante procesos difusivos). Al efecto combinado de estos gradientes y la difusión turbulenta se lo llama dispersión.

En la Figura 3 se analizan las distintas componentes del proceso de dispersión. Se parte de una condición inicial con una distribución constante de velocidades, en donde la difusión en sentido horizontal es homogénea dada las características medias del flujo. Pero debido a la existencia de velocidades diferentes en la vertical se produce un fenómeno de advección diferencial. Finalmente este último efecto conduce a una difusión turbulenta en el sentido vertical.

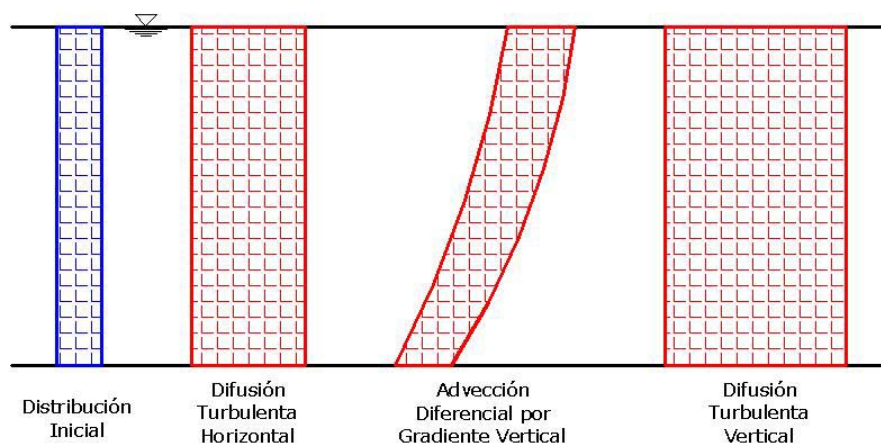


Figura 3. Mecanismos de Dispersión.

La ecuación del balance de masa de un contaminante modela la difusión turbulenta, que es la forma de expresar matemáticamente el proceso de dispersión. La expresión de la misma en dos dimensiones es la siguiente:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial c}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial c}{\partial y} = \frac{1}{h} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left(h \cdot k_{11} \cdot \frac{\partial c}{\partial x} + h \cdot k_{12} \cdot \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{1}{h} \cdot \frac{\partial}{\partial y} \left(h \cdot k_{21} \cdot \frac{\partial c}{\partial x} + h \cdot k_{22} \cdot \frac{\partial c}{\partial y} \right) \quad (1)$$

en donde c es la concentración, t el tiempo, x e y las coordenadas espaciales, u y v las componentes de velocidad y k_{11} , k_{12} , k_{21} , k_{22} los componentes del tensor de dispersión. Esta descripción bidimensional integrada en la vertical es válida para el caso de estuarios, como el Río de la Plata, y bahías bien mezclados verticalmente.

Metodología

Problema a resolver

Las capas de mezcla se desarrollan a partir de las desembocaduras de los tributarios en el Río de la Plata, en la interfase de encuentro de dos corredores. El objetivo es predecir el crecimiento del espesor de esas capas con la distancia hacia aguas abajo, para la que se origina por el encuentro de los ríos Paraná de las Palmas y Paraná Guazú, por un lado, y la que surge del encuentro de los ríos Paraná Guazú y Uruguay. Para analizar esta cuestión se planteó un problema distinto pero de resultado equivalente: el desarrollo de una pluma de difusión de una sustancia conservativa, generada en el punto de encuentro entre ambas corrientes. Para la simulación de la pluma de difusión se dispuso del software MANCHAS, desarrollado en el Instituto Nacional de Agua (INA) por Carreras y Menéndez (1990). La pluma es motorizada por las corrientes, que se simulan con el modelo RPP-2D, también desarrollado en el INA por Ré y Menéndez (2003).

Modelos numéricos

El modelo RPP-2D es un modelo hidrodinámico bidimensional que comprende todo el Río de la Plata y una porción significativa de su Frente Marítimo, tal como se indica en la Figura 4. El software HIDROBID II propuesto por Menéndez (1990), que simula numéricamente flujos cuasi-bidimensionales (en el plano horizontal) a superficie libre, es el utilizado para la implementación del modelo RPP-2D. Está basado en la resolución numérica de las ecuaciones para aguas poco profundas. Este modelo dispone de fetch suficiente como para generar las ondas de tormenta que se desarrollan en la zona. En cuanto a su resolución, su paso temporal de cálculo es de 60 segundos y su paso de grilla es de 2500m. La descarga de cada uno de los tres tributarios considerados (Paraná de las Palmas, Paraná Guazú-Bravo y Uruguay) se impone como una condición de borde en la cara de la celda respectiva que representa su punto de entrada. El modelo tiene tres bordes oceánicos (Este, Norte y Sur), que constituyen contornos matemáticos. El Borde Este fue considerado como un contorno impenetrable (la energía de onda que lo atraviesa es muy baja en relación con la que se propaga a lo largo de la plataforma continental) y el Borde Norte fue tratado como un contorno no reflejante. La onda de marea astronómica es impuesta como condición de contorno en el Borde Sur del modelo a partir de análisis con el Modelo Global de Marea RSC94 desarrollado por Cartwright y Ray (1990). La información de campos de vientos que se utiliza, pertenece a la serie de reanálisis de NCEP/NCAR propuestos por Kalnay *et al.* (1996).

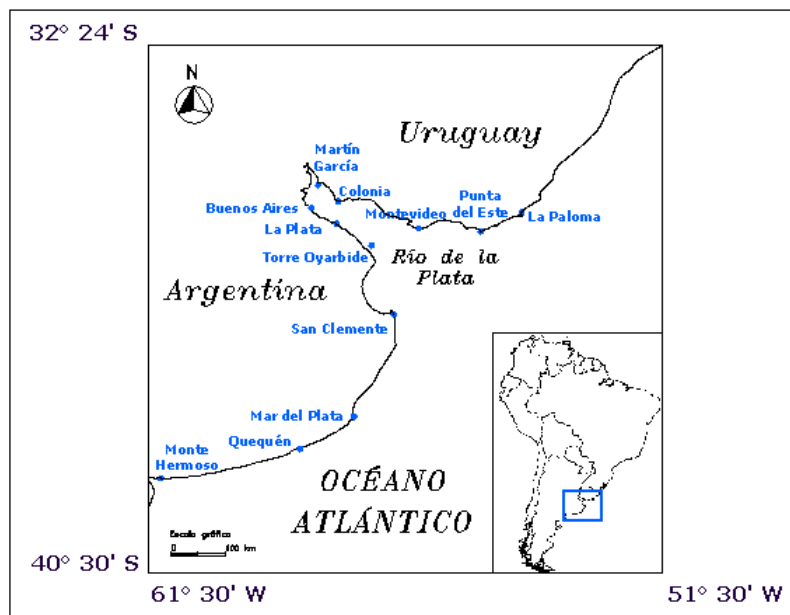


Figura 4. Dominio de Cálculo del Modelo RPP-2D.

La calibración del modelo hidrodinámico RPP-2D, según Ré y Menéndez (2003), se desarrolló en varias etapas en base al criterio de discriminar efectos, permitiendo así una validación y ajuste progresivo. Se definieron cuatro escenarios de calibración: Escenario de Marea Astronómica Predicha, con referencia en los niveles de agua predichos por las Tablas de Mareas; Escenario de Marea Astronómica Registrada, con niveles de agua observados en un período de relativa calma; Escenario de Marea Normal, con niveles de agua y velocidades de corrientes registradas durante intervalos de tiempo en los que se incluyen efectos de viento sin la presencia de tormentas; Escenario de Tormenta, con niveles de agua en períodos en los que se desarrollan eventos de tormentas significativos. En las Figuras 5, 6 y 7 se muestran resultados para el Escenario de Marea Astronómica, Escenario de Marea Normal y Escenario de Tormenta respectivamente.

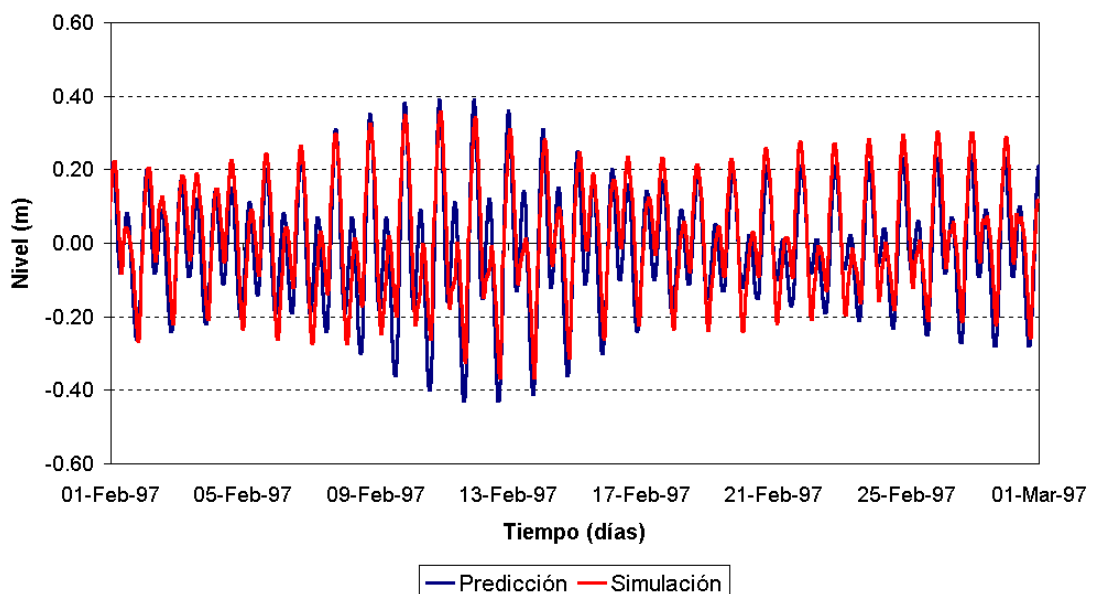


Figura 5. Calibración Escenario de Marea Astronómica. Colonia (URU), Febrero de 1997.

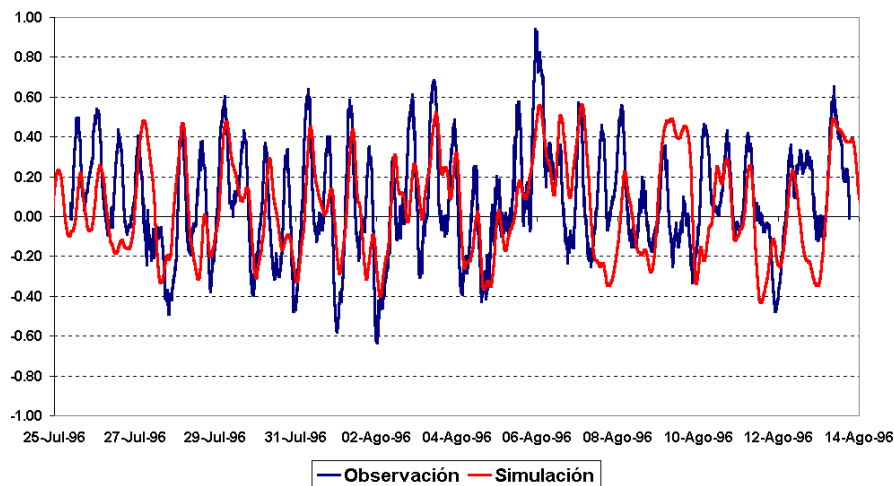


Figura 6. Calibración Escenario de Marea Normal. Velocidades de Corrientes (dir E-O), Río de la Plata Exterior).

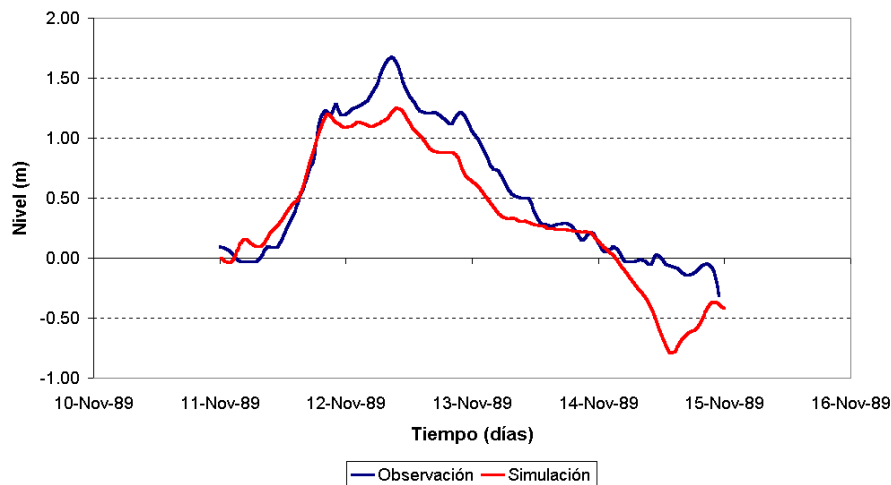


Figura 7. Calibración Escenario de Tormenta. Marea Meteorológica, Torre Oyarvide (NOV 89).

Para la simulación de la pluma de difusión se dispuso del software MANCHAS, que permite una descripción en 2D de la pluma cuando la escala de dispersión es mucho menor que la escala hidrodinámica. Se basa en una técnica Lagrangiana para evitar los efectos de difusión numérica típicos de las técnicas Eulerianas, que enmascaran los efectos físicos. Se denomina mancha a toda zona contaminada cuya extensión sea pequeña respecto de la escala de longitudes hidrodinámica. Su evolución está gobernada por la ecuación de balance de masa de un contaminante. Se supone que la distribución de concentración media vertical de una mancha es Gaussiana

La descarga continua de sustancia se representa mediante una inyección discreta de pulsos, cada uno de los cuales da lugar a una mancha. El modelo resuelve la evolución de la posición, orientación y deformación de cada mancha, sometida a los efectos advectivos y difusivos de la corriente.

Semejanza Capa de Mezcla-Pluma de Difusión y Espesor de mezcla

Se desarrollaron capas de mezcla a partir de las desembocaduras de los tributarios en el Río de la Plata, en la interfase de los encuentros. Se consideraron tres flujos: Paraná de las Palmas, Paraná Guazú y Uruguay. En la Figura 8 se presenta el esquema del problema teórico planteado, para un caso simplificado de encuentro de dos corrientes paralelas. Para predecir el crecimiento del espesor

de esa capa con la distancia hacia aguas abajo se planteó el desarrollo de una pluma de difusión de una sustancia conservativa, generada en la interfase de dos corredores.

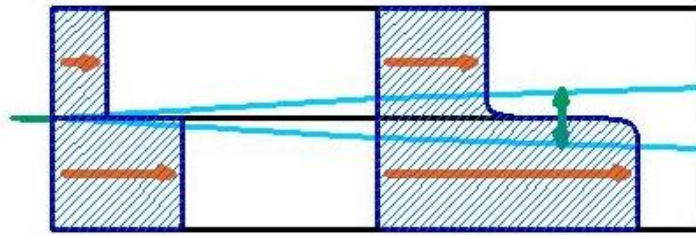


Figura 8. Desarrollo esquemático de una capa de mezcla.

En la Figura 9 se muestra esquemáticamente el progreso de una pluma de difusión, donde se ve que el crecimiento del espesor de la pluma es equivalente al crecimiento de la capa de mezcla, ya que se trata del mismo mecanismo físico de difusión.

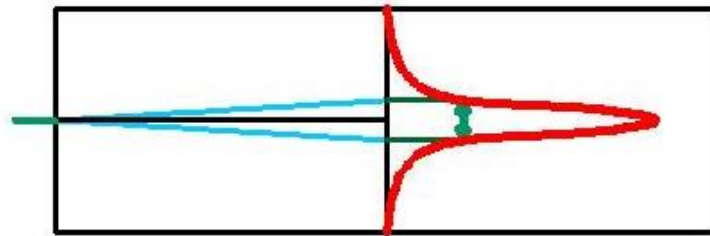


Figura 9. Desarrollo esquemático de una pluma de difusión.

Las características de los procesos difusivos han sido validadas anteriormente, disponiéndose de un estudio realizado por Carreras y Menéndez (1988) con valores adecuados para los coeficientes de difusión turbulenta transversal (0,25) y dispersión longitudinal (20). Este último mecanismo resulta de la superposición de la difusión turbulenta longitudinal y el efecto combinado de la advección diferencial (por el gradiente vertical de velocidades) y la difusión turbulenta vertical, que resulta dominante.

Siguiendo la idea del desarrollo de la pluma de difusión como indicador de las características difusivas del flujo, se estudia la distribución de la concentración del contaminante. En el presente caso, dada la distribución Gaussiana de la concentración, se considera como espesor de la capa de mezcla a la longitud entre los dos puntos de la curva en donde la concentración vale la concentración pico (la de la interfase de los dos flujos) dividido el número e como se muestra en la Figura 10.

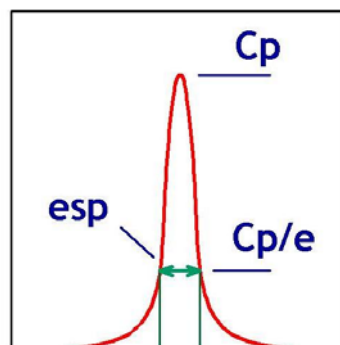


Figura 10. Espesor de Mezcla.

Ensayos

Introducción

Se realizaron tres ensayos asociados a sendos escenarios: uno de condiciones medias de verano, uno de condiciones medias de invierno y un evento de sudestada. Se buscó con estos ensayos determinar patrones de comportamiento de los espesores de mezcla de los distintos corredores del Río de la Plata en situaciones típicas. Se utilizó el modelo RPP-2D para generar las circulaciones hidrodinámicas y el software MANCHAS para analizar el desarrollo de la pluma de difusión en cada uno de los escenarios. El análisis de la evolución de las plumas de difusión se realizó en distintas secciones transversales del Río de la Plata Interior. Se tomaron 18 cortes en esta porción del río, paralelos entre sí y perpendiculares al eje del río, y con una separación de aproximadamente de 10 Km (Figura 11).

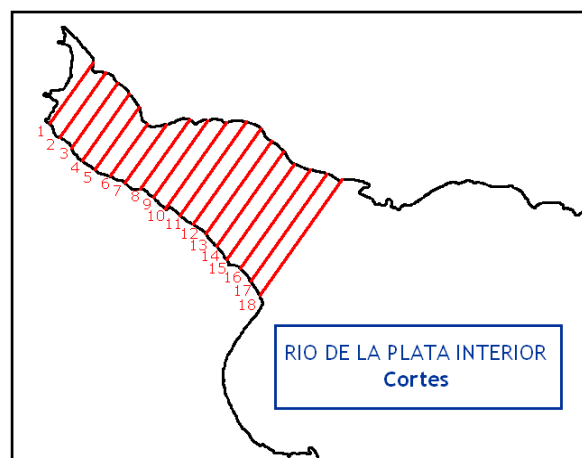


Figura 11. Cortes transversales en el Río de la Plata Interior.

La capa de mezcla entre los corredores Guazú y Uruguay se estudió desde la primera sección expandida del Río de la Plata, ya que el modelo no tiene una resolución adecuada en la zona estrecha donde desembocan ambos tributarios. Para establecer los espesores iniciales de cada capa de mezcla se tomó en cuenta un crecimiento del espesor de la capa de mezcla con un ángulo de alrededor de 7° propuesto por White (1974). Por lo tanto, el espesor inicial de la capa de mezcla entre los corredores Uruguay y Guazú, luego de aproximadamente 12 km desde el origen de la mezcla, es de 3000 m y el de la que se desarrolla entre los corredores Guazú y Palmas, luego de unos 5 km, es de 1300 m. Como criterio conservativo, se impuso un espesor inicial de alrededor de 3000 m a ambas capas en la primera sección.

Escenarios de Verano e Invierno

Las dos situaciones, invierno y verano, se simularon con el modelo RPP-2D. Los caudales medios de verano y de invierno para los tributarios se determinaron a partir del estudio hidrológico efectuado por Jaime y Menéndez (2002), resultando los valores que se muestran en la Tabla 1. Se considera que el río Paraná llega al Río de la Plata principalmente por dos de sus brazos, el Paraná de las Palmas, con alrededor del 23% del caudal total, y el Paraná Guazú-Bravo, con el 77% restante como plantean Bombardelli *et al.* (1994).

Tabla 1. Caudales (invierno y verano).

	Paraná de las Palmas	Paraná Guazú	Uruguay	RIO DE LA PLATA
INVIERNO (Jun/Jul/Ago/Sep)	3700 m ³ /s	12400 m ³ /s	5200 m ³ /s	21300 m ³ /s
VERANO (Nov/Dic/Ene/Feb/Mar)	4400 m ³ /s	14800 m ³ /s	4100 m ³ /s	23300 m ³ /s

Los vientos medios asociados a estos dos escenarios consisten en los valores medios del período 1972-2001 de la base de reanálisis de NCEP/NCAR. El período de simulación en ambos casos fue de 28 días. Para ser introducidos en el modelado de la pluma de difusión se extrajeron campos instantáneos de velocidades de corrientes y niveles cada 2 horas.

Para las condiciones medias de invierno y a modo de corroboración, se realizó el seguimiento de trayectorias de partículas en el Río de la Plata Interior. Éstas fueron lanzadas sobre una misma sección aproximadamente perpendicular al eje del río (sección 1, según la descripción anterior). En la Figura 12 se muestran los resultados obtenidos a los 8, 16, 24 y 32 días de simulación. Se advierte que cada partícula se mantiene en el corredor en que fue lanzada. Por otro lado, las distintas velocidades que adoptan las partículas en su recorrido también muestran las características de los distintos corredores.

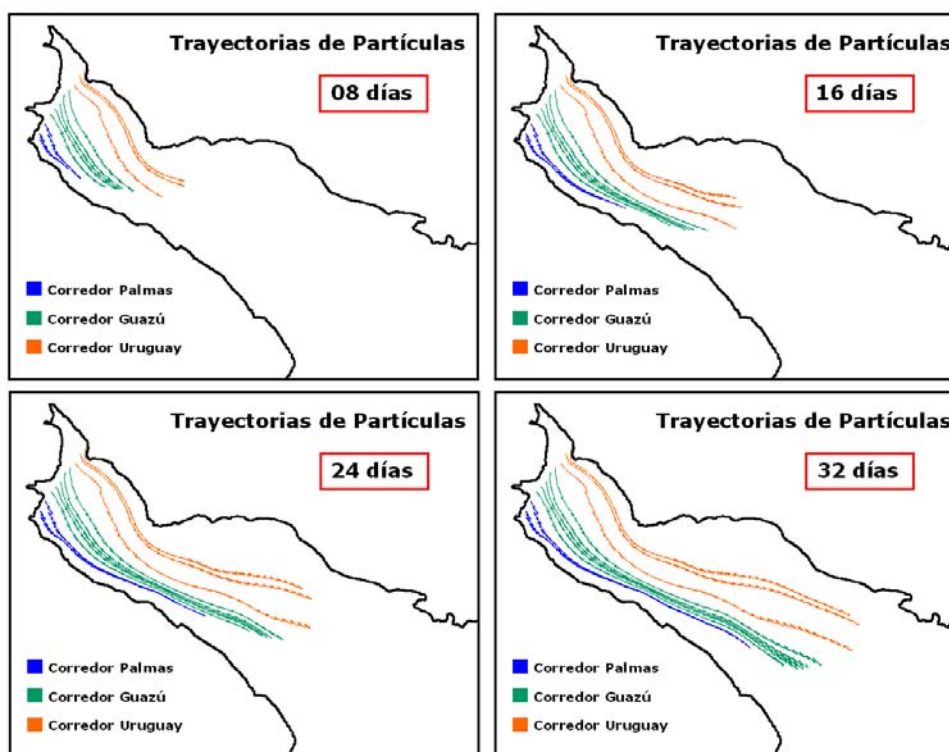


Figura 12. Trayectorias de Partículas (invierno).

El análisis de los espesores de capa de mezcla en condiciones medias de invierno y verano se realizó comparando los valores obtenidos en cada sección de control para cada una de las interfases de corredores de flujo, durante un día en el que la pluma de contaminante se encuentra bien desarrollada en todo lo que corresponde al Río de la Plata Interior. De cada corte, en intervalos de una hora y media, se obtuvo una distribución de concentraciones, y en función de los dos picos obtenidos, se calcularon los valores del espesor.

Dado que se tiene dieciséis cortes durante ese día en cada sección, distintos entre sí dado el carácter impermanente del flujo por la acción de la marea, se calculó el valor mínimo y máximo del espesor de capa de mezcla y el promedio de los mismos. En base a los espesores máximos de mezcla para cada una de las dos situaciones, invierno y verano, se trazaron líneas envolventes suavizadas, las cuales se muestran en las Figuras 13, 14, 15 y 16, respectivamente.

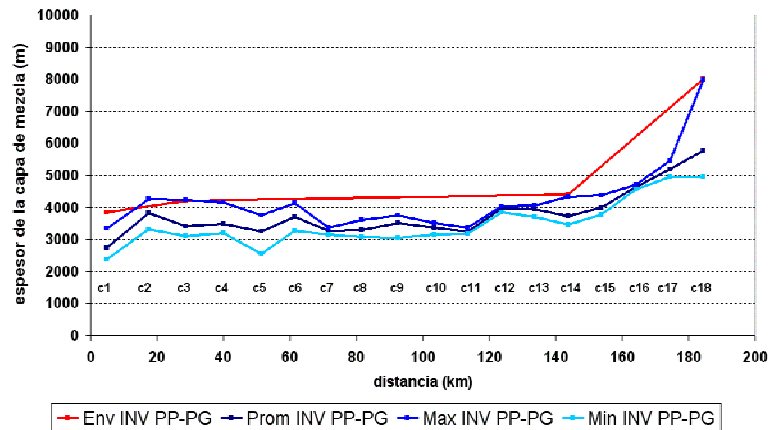


Figura 13. Espesores de Capa de Mezcla (Invierno, Corredor Palmas- Corredor Guazú)

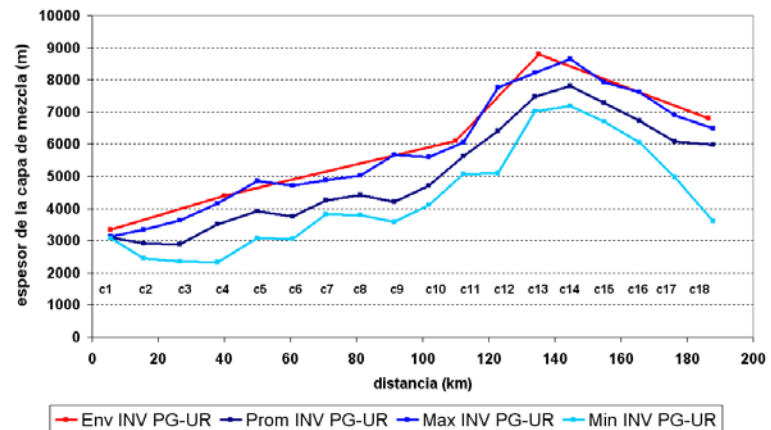


Figura 14. Espesores de Capa de Mezcla (Invierno, Corredor Guazú- Corredor Uruguay)

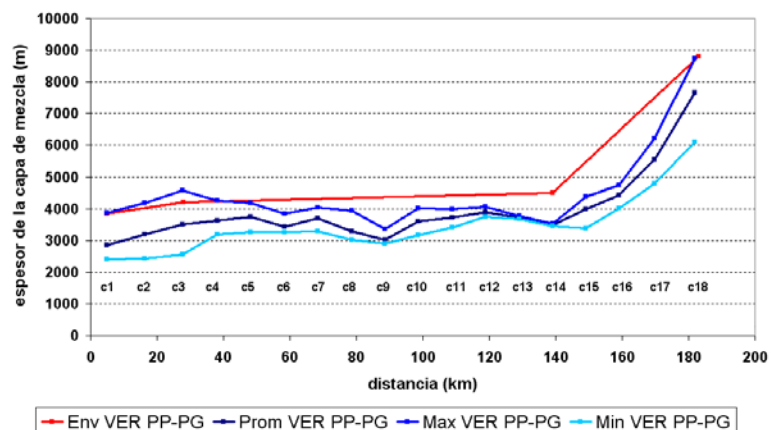


Figura 15. Espesores de Capa de Mezcla (Verano, Corredor Palmas- Corredor Guazú)

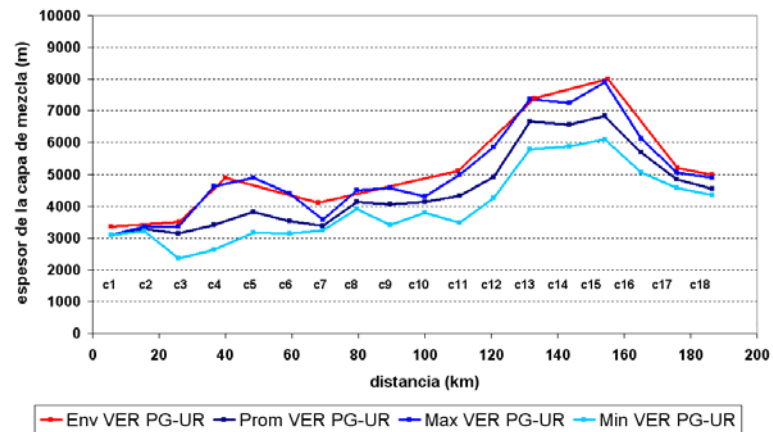


Figura 16. Espesores de Capa de Mezcla (Verano, Corredor Guazú- Corredor Uruguay)

No se advierten diferencias importantes entre ambos escenarios. La Figura 17 muestra los bordes laterales de las capas de mezcla obtenidos de las envolventes para los dos escenarios. Se observa que, aún con la maximización que supone la metodología de envolventes, las capas permanecen relativamente acotadas en espesor, dejando a cada lado extensas zonas de aguas asociadas esencialmente al tributario de origen, que es la esencia del concepto de corredores de flujo.

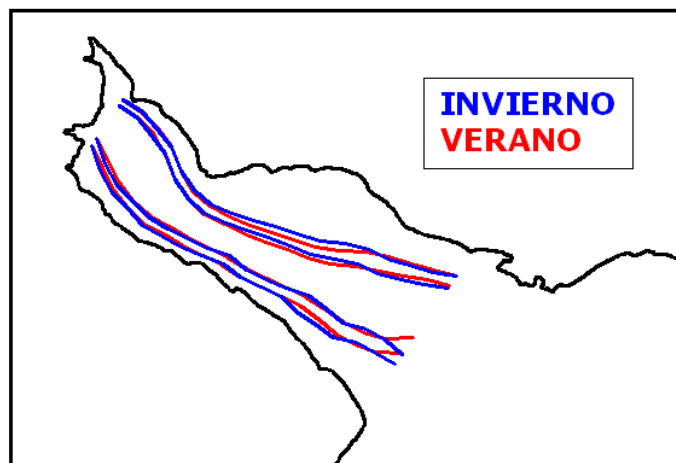


Figura 17. Envolventes de Espesores de Capa de Mezcla

Los resultados hasta aquí obtenidos incluyen tanto los efectos de la difusión turbulenta lateral como de la advección diferencial en sentido lateral. Se calculó independientemente el efecto de la advección lateral por la acción de la corriente de marea, que consiste en desplazar el centro de gravedad de la capa de mezcla. Si bien este efecto no es significativo en el Río de la Plata Interior en relación a la advección longitudinal, sí es comparable al efecto de difusión turbulenta. El desplazamiento se obtuvo, para cada sección, haciendo la diferencia entre las posiciones extremas alcanzadas por ese centro. En la Figura 18 se observan las curvas correspondientes a cada una de las dos capas de mezcla. Como los desplazamientos de invierno y verano resultan muy similares entre sí, se presentan las curvas promedio entre ambas. Además, se ha efectuado un promedio móvil de tres puntos para suavizar. Se observa que el rango aproximado de variación es de 500 a 2500 m, con mayor variabilidad a lo largo de la capa entre los corredores Palmas y Guazú, que presenta picos que superan por arriba y por abajo aquel rango. Esto se adjudica a variaciones batimétricas laterales relativamente más importantes a lo largo de su desarrollo.

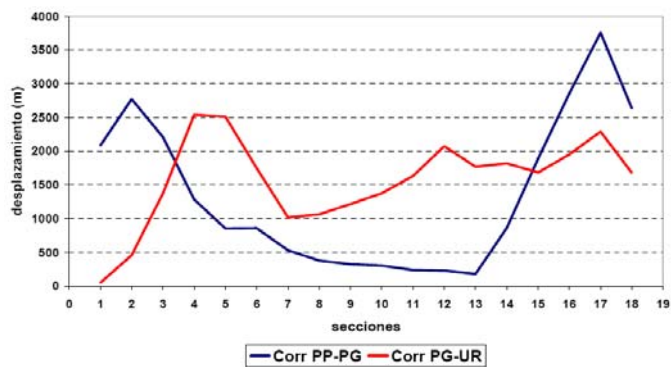


Figura 18. Desplazamientos causados por la advección lateral debida a las corrientes de marea

Escenario de Sudestada

El comportamiento de los corredores de flujo frente a un evento de tormenta se estudió planteando una situación hidrodinámica de sudestada. Esta simulación se resolvió con el modelo RPP-2D bajo condiciones iniciales de invierno y utilizando intensidades de vientos de la base de datos de reanálisis de NCEP/NCAR. La elección del invierno como condición inicial responde a que las sudestadas fuertes ocurren con mayor frecuencia durante el período de ocho meses comprendido entre marzo y octubre, según Kreimer *et al.* (2001). La tormenta base corresponde a una sudestada de mayo de 2000. Para proveer de datos hidrodinámicos de entrada al software MANCHAS se extrajeron de la simulación archivos instantáneos con valores de niveles y velocidades de corrientes en cada nodo del dominio cada dos horas.

A partir de condiciones medias de invierno, desarrolladas durante 56 días se superpuso una onda de tormenta (sudestada), reemplazándose la situación de viento constante de invierno por la de la tormenta. Los espesores de capa de mezcla se analizaron tomando cuatro condiciones instantáneas por día. De la misma manera que con las condiciones medias se tomaron cortes transversales y se calcularon los espesores de mezcla con la metodología detallada. En la Figura 19 se observa que el ingreso de la onda de tormenta produce dos efectos: por un lado, frena el avance del flujo descargado por los tributarios e, incluso, lo hace retroceder; por el otro lado, genera una circulación horaria en el Río de la Plata Superior y una antihoraria en el tramo Medio, que conducen a una mezcla de gran escala (del orden del ancho del río) de las masas de agua. Estos efectos cesan junto con la tormenta, observándose una tendencia a la reconstrucción de los corredores de flujo, particularmente rápida en el Río de la Plata Superior.

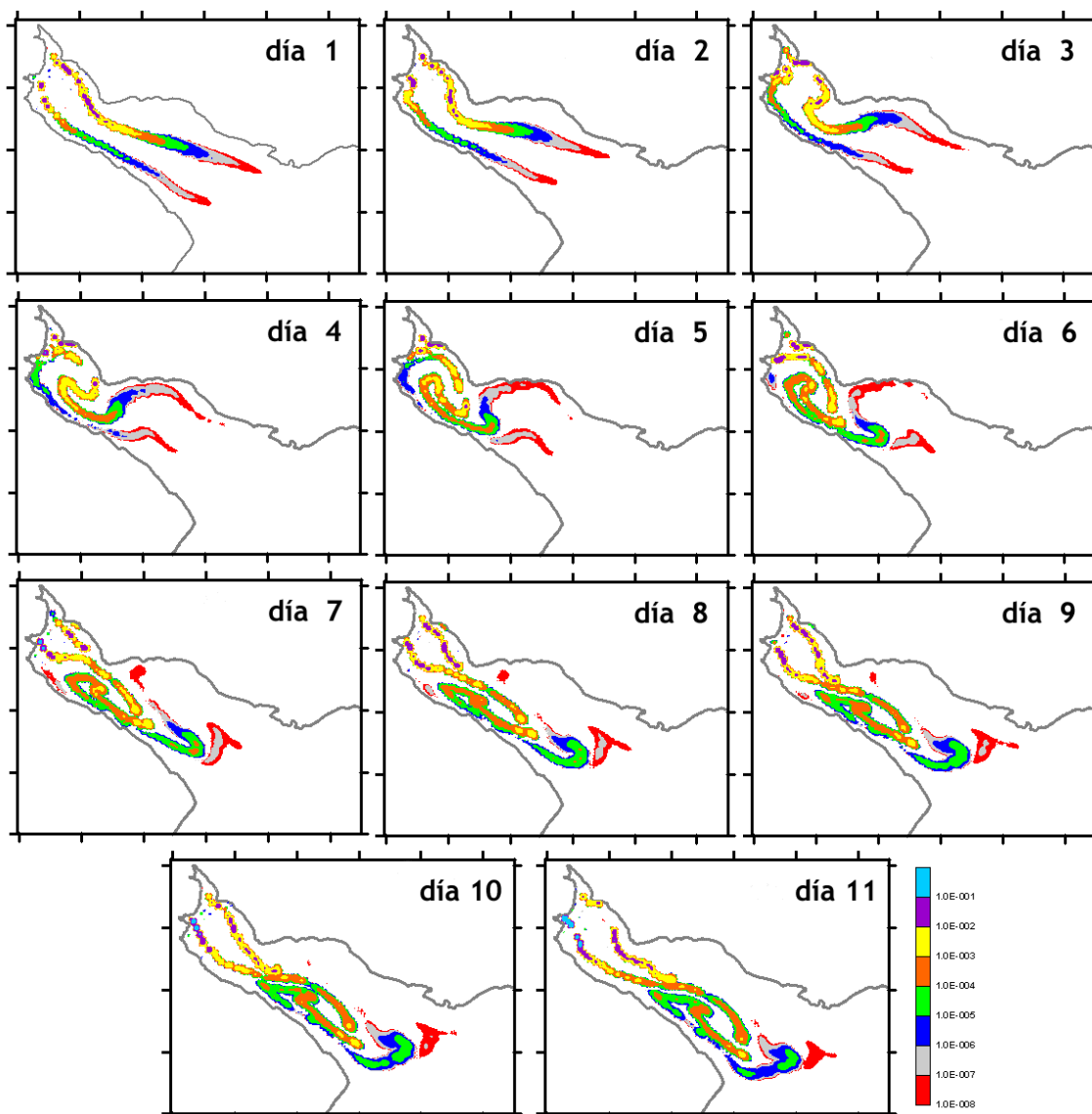


Figura 19. Secuencia de distribución de concentraciones en el Río de la Plata Interior durante la sudestada.

Si bien, de acuerdo a lo recién descrito, la tormenta produce una mezcla de las masas de agua a gran escala, no sucede lo mismo a escala de la mezcla turbulenta, conservando las interfases entre corredores una identidad bien definida, lo cual explica la rápida reconstrucción de los corredores de flujo en cuanto cesa la tormenta. En la Figura 20, se observa los valores de los espesores de capa de mezcla en la sección de control 6 en función del tiempo. Se advierte que los espesores varían en el tiempo, de acuerdo a la intensidad de la onda de tormenta. En la zona superior del Río de la Plata se incrementan durante la tormenta, alcanzando valores máximos no mayores al 50% respecto de los espesores de la situación sin tormenta. En cambio, en las secciones más cercanas al Río de la Plata Exterior el espesor de la capa de mezcla disminuye respecto de los valores sin tormenta.

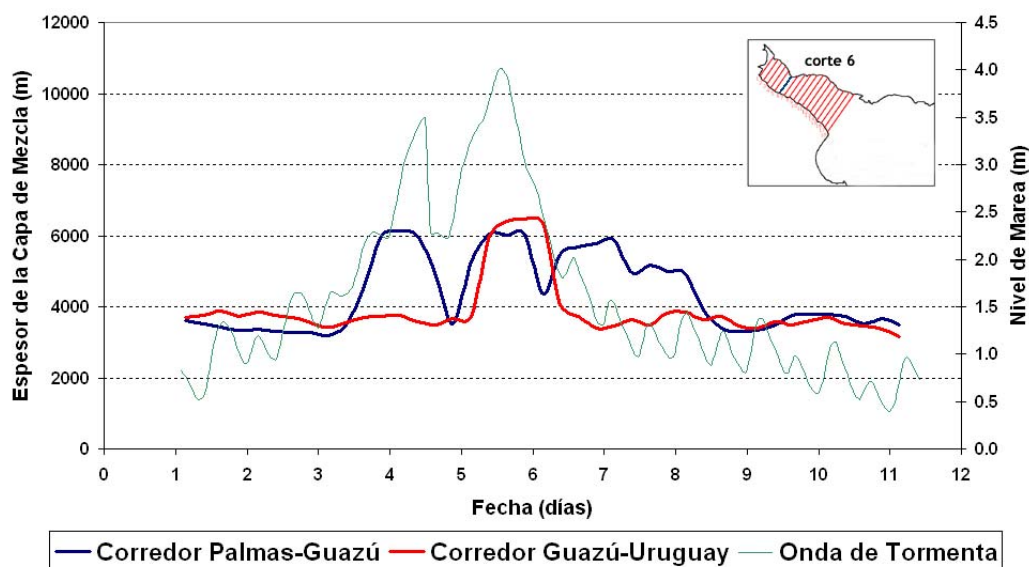


Figura 20. Espesores de la capa de mezcla. Sudestada. Sección 6.

CONCLUSIONES

Las principales conclusiones de este trabajo son las siguientes:

- En condiciones hidrometeorológicas normales, las dos capas de mezcla que se desarrollan en la interfase de encuentro entre las descargas de los tres tributarios principales del Río de la Plata (ríos Paraná de las Palmas, Paraná Guazú y Uruguay) permanecen relativamente acotadas en espesor a lo largo del Río de la Plata Interior, dejando a cada lado extensas zonas de corrientes de agua asociadas esencialmente al tributario de origen, que constituyen, entonces, sendos corredores de flujo, de acuerdo a lo afirmado por Jaime *et al.* (2001).
- Tanto en condiciones medias de invierno como de verano, el espesor de la zona donde se desarrolla algún nivel de mezcla significativa es del orden, como máximo, de unos pocos kilómetros en el Río de la Plata Superior, duplicándose recién al llegar al final del Río de la Plata Interior.
- Las capas de mezcla sufren desplazamientos laterales de entre aproximadamente 500 y 2500 m, bajo la acción del régimen de mareas.
- El ingreso de una onda de tormenta (por sudestada) produce, por un lado, el frenado e, incluso, el retroceso del flujo descargado por los tributarios, y, por el otro lado, una mezcla de gran escala de las masas de agua. Estos efectos cesan junto con la tormenta, observándose una tendencia a la reconstrucción de los corredores de flujo, particularmente rápida en el Río de la Plata Superior.
- A escala turbulenta las capas de mezcla siguen manteniendo su identidad durante la tormenta, de modo que el Río de la Plata Interior queda constituido esencialmente por un conjunto de masas de agua que reconocen su origen en alguno de los tributarios. El espesor de las capas de mezcla varía temporariamente, aumentando en la zona superior y disminuyendo en la zona media del río, pero esa variación desaparece rápidamente al cesar la tormenta.
- El estudio confirma que, esencialmente, la calidad del agua en cada una de las dos costas del Río de la Plata Interior (argentina y uruguaya) es responsabilidad directa del manejo de las descargas antrópicas efectuadas por cada país.

BIBLIOGRAFÍA

- Bombardelli, F. A., Menéndez, A. N., Brea, J. D., Montalvo, J. L., Porro, G. O.** (1994) “*Estudio Hidrodinámico del Delta del Río Paraná mediante Modelación Matemática*”. Informe LHA-INCYTH 137-01-94.
- Carreras, P., Menéndez, A. N.** (1988) “*Proyecto de Tratamiento y Disposición de Efluentes Domésticos del Gran Buenos Aires*”. Modelos Matemáticos de Dispersión de Contaminantes, Informe LHA-INCYTH 070-003-88, Comitente: OSN, mayo.
- Carreras, P., Menéndez, A. N.** (1990) “*Mathematical Simulation of Pollutant Dispersion*”. Journal of Ecological Modelling, 52, november.
- Cartwright D.E., Ray R. D.** (1990) “*Oceanic Tides from Geosat Altimetry*”. Journal of Geophysical Research, 95, 3069-3090.
- D’Onofrio E., Fiore M., Romero S.** (1999) “*Return Periods of Extreme Water Levels Estimated for some Vulnerable Areas of Buenos Aires*”, Continental Shelf Research, 19, 1681-1693.
- Jaime, P., Menéndez, A. N.** (1999) “*Modelo Hidrodinámico Río de la Plata 2000*”. Informe LHA-INA 183-01-99, septiembre.
- Jaime, P., Menéndez, A. N., Natale, O. E.** (2001) “*Balance y Dinámica de Nutrientes Principales en el Río de la Plata Interior*”. Informe INA 10.4-01, septiembre.
- Jaime, P., Menéndez, A. N.,** (2002) “*Análisis del Régimen Hidrológico de los Ríos Paraná y Uruguay*”. Informe INA-LHA 05-216-02, Comitente: Proyecto Freplata, julio.
- Kalnay, E. and Coauthors** (1996) “*The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project*”. Bulletin of the American Meteorological Society, 77, 437-471.
- Kreimer, A., Kullock, D., Valdés J. B. (editores)** (2001) “*Inundaciones en el Área Metropolitana de Buenos Aires*”. The World Bank, Disaster Management Facility, Disaster Risk Management Series, Washington, D.C.
- Maurice-Bourgoin, L.** (2000) “*Le Mercure dans les Eaux de Surface du Bassin Amazonien – Transfert du mercure des sols aux milieux aquatiques*” – Spéciation, transport et sédimentation dans les rivières et plaines d’inondation. Le mercure en milieu amazonien: Incidence des activités anthropiques sur l’environnement et la santé humaine, (Carmouze J.P., Lucotte M. and Boudou A., Eds.), IRD Publications (Expertise Collégiale).
- Menéndez A. N., Norscini R.** (1982) “*Spectrum of Shallow Water Waves: An Analysis*,” Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 108, No. HY1, january.
- Menéndez, A. N.** (1985) “*Simulación Numérica de Flujos Cuasi-bidimensionales a Superficie Libre*”. Informe LHA-INCYTH S5-016-85.
- Menéndez, A. N.** (1986) “*Simulación Numérica de la Dispersión de Contaminantes en Regiones Localizadas*”. Informe LHA-INCYTH 066-01-86.
- Menéndez, A. N.** (1990) “*Sistema HIDROBID II para Simular Corrientes en Cuencos*”. Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería, Vol. 6, 1.
- Menéndez, A. N., Jaime, P., Natale, O. E.** (2002) “*Nutrients Balance in the Rio de la Plata River using Mathematical Modelling*”, 5th International Conference HydroInformatics 2002, Cardiff, UK, july.
- Nagy G. J., Gómez-Erache M., Perdomo A. C.** (2001) “*Río de la Plata*. In: The Encyclopedia of Global Environmental Change”, (Munn T, Chief Ed.), Vol. 3: Water Resources (Douglas I, Ed). ISBN 0741977969, John Wiley & Sons, New York-London.
- Nagy G. J., Pshennikov V., Robatto P.** (2003) “*Monthly Variability of Salinity at Montevideo*,” Río de la Plata’s frontal zone, in response to consecutive ENSO fluctuations and to the River Uruguay Flow (1998-2000). In: The Río de la Plata: Research for the Management of the Environment and Fisheries in the salinity front: 21-31. Vizziano D, P Puig, C Mesones and GJ Nagy (Eds), EcoPlata, Programme, Montevideo, Uruguay.
- Parker, G., Marcolini, J., Cavalloto, J., Violante, R.** (1987) “*Modelo Esquemático de Dispersión de Sedimentos en el Río de la Plata*”. Ciencia y Tecnología del Agua, Vol. 1, No. 4, pp. 68-80.
- Quirós, R., Senone, H.** (1985) “*Niveles de Nutrientes y Pigmentos Fotosintéticos en el Río de la Plata Interior*” (55° - 59° W, 34° - 36 167 S). Informe Técnico No. 1, Instituto Nacional de Investigación y Desarrollo Pesquero, Departamento de Aguas Continentales.
- Ré, M., Menéndez, A. N.** (2003) “*Modelo Hidrodinámico del Río de la Plata y su Frente Marítimo*”. Informe INA-LHA 03-216-03, Comitente: Proyecto Freplata, marzo.
- Ré, M., Menéndez, A. N.** (2003) “*Modelo Numérico del Río de la Plata y su Frente Marítimo para la Predicción de los Efectos del Cambio Climático*”, XIII Congreso sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones, ENIEF’2003, Bahía Blanca, noviembre.
- Servicio de Hidrografía Naval - SHN** (1997) “*Tablas de Marea 1997*”, Argentina.
- Simionato, C., Dragani, W., Nuñez, M. N., Engel, M.** (2002) “*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 Continental Shelf Research.
- White, F. M.** (1974) “*Viscous Fluid Flow*.” McGraw-Hill, New York.

Whitham, G. B. (1974) "*Linear and Nonlinear Waves*". Interscience, New York.