

Dinámica de flujo, del campo salino y de los sedimentos finos en el Río de la Plata

M. Fossatia, P. Santoroa, R. Mosqueraa, C. Martíneza, F. Ghiardoa, P. Ezzattib, F. Pedocchia & I. Piedra-Cuevai

To cite this article: M. Fossatia, P. Santoroa, R. Mosqueraa, C. Martíneza, F. Ghiardoa, P. Ezzattib, F. Pedocchia & I. Piedra-Cuevai (2014) Dinámica de flujo, del campo salino y de los sedimentos finos en el Río de la Plata, *Ribagua*, 1:1, 48-63, DOI: [10.1016/S2386-3781\(15\)30007-4](https://doi.org/10.1016/S2386-3781(15)30007-4)

To link to this article: [https://doi.org/10.1016/S2386-3781\(15\)30007-4](https://doi.org/10.1016/S2386-3781(15)30007-4)



Published online: 31 May 2017.



Submit your article to this journal [↗](#)



Article views: 479



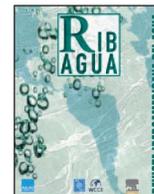
View related articles [↗](#)



View Crossmark data [↗](#)



Citing articles: 4 View citing articles [↗](#)



Original

Dinámica de flujo, del campo salino y de los sedimentos finos en el Río de la Plata

M. Fossati^{a,*}, P. Santoro^a, R. Mosquera^a, C. Martínez^a, F. Ghiardo^a, P. Ezzatti^b, F. Pedocchi^a e I. Piedra-Cueval^a

^a Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA), Facultad de Ingeniería, Uruguay

^b Instituto de Computación (Inco), Facultad de Ingeniería, Uruguay

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Historia del artículo:

Recibido el 11 de agosto de 2014

Aceptado el 27 de septiembre de 2014

Palabras clave:

Dinámica de estuarios

Medición

Modelos numéricos

Río de la Plata

RESUMEN

Se presenta una recopilación de los principales avances realizados por el grupo en el estudio de la dinámica de flujo y de transporte de sustancias en el Río de la Plata, sobre la base de la implementación de diversos modelos en el área (RMA, MOHID, MARS) e incorporando la información de campo de calidad existente. En el Río de la Plata, los principales forzantes que influyen sobre la circulación del agua son la descarga fluvial de sus tributarios, las ondas de mareas oceánicas (astronómica y meteorológica) y los vientos. Existe una clara diferencia entre el comportamiento de la zona interior-intermedia y la zona exterior del Río de la Plata, cuya división es lo que se denomina zona del frente, una zona donde coincide una gran expansión de la sección y un incremento de la profundidad. Estas características hacen que el campo salino que ingresa desde el océano llegue hasta dicha zona, con mayor intensidad en las zonas profundas, donde la estratificación salina es más marcada. Esto, a su vez, determina que las velocidades residuales en la zona intermedia sean de características bidimensionales típicas de una descarga fluvial (transporte neto hacia el exterior), mientras que el flujo residual en la zona exterior presenta patrones más complejos de características tridimensionales, con flujo mayormente entrante hacia el continente en las zonas profundas y un flujo de descarga por las zonas poco profundas costeras principalmente, con una zona de corriente residual casi nula en la zona del frente. Además de esta clara diferencia espacial en el comportamiento del cuerpo de agua, las condiciones meteorológicas muestran tener una influencia determinante. En este sentido, se presentan en este trabajo diversas caracterizaciones del comportamiento de las corrientes, la salinidad y la dinámica de sedimentos finos bajo escenarios de calma y tormenta.

© 2014 IAHR y WCCE. Publicado por Elsevier España, S.L.U. Todos los derechos reservados.

Flow, saline field and fine sediment dynamics in the Río de la Plata

ABSTRACT

This article summarizes the main advances made by our group in the study of flow and substance transport dynamics in the Río de la Plata, based on the implementation of various models (RMA, MOHID, MARS) and incorporating existing high-quality field information. In the Río de la Plata, the main forcings that influence water circulation are flow discharge from its tributaries, tide waves (astronomic and meteorologic), and winds. There is a clear difference between the inner-middle region and the outer region of the Río de la Plata. The division between these two regions is known as the frontal region, where there is considerable widening of the section and an increase in depth. Because of these characteristics, the salinity field coming from the Atlantic Ocean reaches this region, with greater intensity in the deep regions where the saline stratification is more pronounced. This in turn gives the residual velocities in the middle region the typical two-dimensional characteristics of a flow discharge (net transport toward the outer region), while the residual flow in the outer region shows more complex, three-dimensional characteristics, with mainly incoming flow toward the continent in the deep areas and flow discharge mainly through the shallow coastal areas. There is an area of almost nil residual current in the frontal region. In addition to this clear spacial difference in the behavior of the body of the water, the meteorological conditions have a determining influence. The present study discusses diverse behaviors of the currents, salinity and fine sediment dynamics under calm and storm conditions.

© 2014 IAHR y WCCE. Published by Elsevier España, S.L.U All rights reserved.

Keywords:

Estuarine dynamics

Numerical models

Measurement

Río de la Plata

* Autor para correspondencia.

Correo electrónico: mfossati@fing.edu.uy (M. Fossati).

1. Introducción

La comprensión de la dinámica de la zona del estuario del Río de la Plata y de los cuerpos de agua adyacentes, como la zona costera, la zona fluvial y la zona oceánica, es esencial para enfrentar problemas de ingeniería que se plantean alrededor de este ambiente. Algunos ejemplos de problemas concretos que se deben atender son: la determinación del impacto ambiental de diversos emprendimientos como obras de infraestructuras, descargas de contaminantes, actividades de dragado y disposición; determinación de los forzantes (solicitaciones) naturales a los que se verá sometida la infraestructura que pretenda instalarse en la zona costera; búsqueda y rescate de personas u objetos en situaciones de accidentes marítimos; tareas de reparación y prevención ambiental frente a derrames de sustancias; pronóstico de situaciones hidrodinámicas extremas; gestión del tráfico marítimo, etc. En todos estos casos se requiere una cuantificación de las características de la evolución de hidrodinámica en escala temporal corta (“dinámica instantánea”) y no de patrones medios o tendencias solamente.

Desde la ingeniería hidráulica estos temas deben abordarse teniendo en cuenta tres componentes: los desarrollos teóricos, los modelos numéricos y las medidas de campo. Es necesario estudiar cómo es la dinámica de estos cuerpos de agua considerando los conceptos básicos de la mecánica de fluidos. Además, es preciso entender y manejar modelos actualizados y adaptarlos a este sistema. Se requiere contar con la infraestructura computacional y el respaldo técnico adecuados. Por otro lado, el desarrollo de tecnologías de medición de variables ambientales ha crecido y en los últimos años se han incorporado actividades de medición de campo y ensayos de laboratorio que suministran información imprescindible para comprender el sistema. En el Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA) de la Facultad de Ingeniería se vienen desarrollando desde hace ya más de 25 años tareas de investigación y modelación del Río de la Plata y su frente marítimo. La experiencia más extensa se tiene en lo que respecta a la simulación de su hidrodinámica, desde la escala regional hasta la local, buscando dar respuesta a los problemas de ingeniería vinculados.

El objetivo de este artículo es presentar una recopilación de los principales avances obtenidos en el IMFIA en el estudio de la dinámica de flujo y de transporte de sustancias en el Río de la Plata, sobre la base de la implementación de diversos modelos en el área (RMA, MOHID, MARS) e incorporando la información de campo de calidad existente. El artículo está estructurado de la siguiente forma: en el apartado 2 se presentan las características generales de la zona de interés, así como diversos antecedentes relativos al estudio de su hidrodinámica y la dinámica de salinidad y sedimentos; en los apartados 3 y 4 se presentan varias de las herramientas y metodologías utilizadas por nuestro grupo para el estudio del Río de la Plata, tanto en lo que refiere a modelación numérica como a mediciones de campo, respectivamente; el apartado 5 incluye los principales avances del grupo en cuanto a la comprensión y caracterización de la hidrodinámica del Río de la Plata, la dinámica de su campo de salinidad y la dinámica de sedimentos finos; finalmente, el apartado 6 es una síntesis del trabajo presentado.

2. Antecedentes

El Río de la Plata (figura 1) está ubicado sobre la costa este de América del Sur, aproximadamente entre los 34° y 36° latitud sur y 54°50' y 58°30' de longitud oeste, y vierte en el Océano Atlántico; se trata de la segunda cuenca de aporte más importante de Sudamérica después de la cuenca amazónica. Es un cuerpo de agua de gran importancia socio-ambiental para los dos países que comparten su jurisdicción, la República Argentina y la República Oriental del Uruguay. La superficie total del Río de la Plata se estima en aproximadamente 30.000 km², la longitud aproximada es de 280 km a lo largo del eje y tiene una sección transversal que aumenta hacia el sureste desde 2 km en Punta Gorda, 32 km entre Colonia y La Plata, 100 km entre Montevideo y Punta Piedras y 220 km entre Punta del Este y Punta Rasa.

En los últimos años se han realizado grandes avances en lo referente a la caracterización de la zona y al diagnóstico socio-ambiental del Río de la Plata a través del desarrollo de proyectos con fondos internacionales, como ECOPLATA y FREPLATA, durante los cuales se reali-

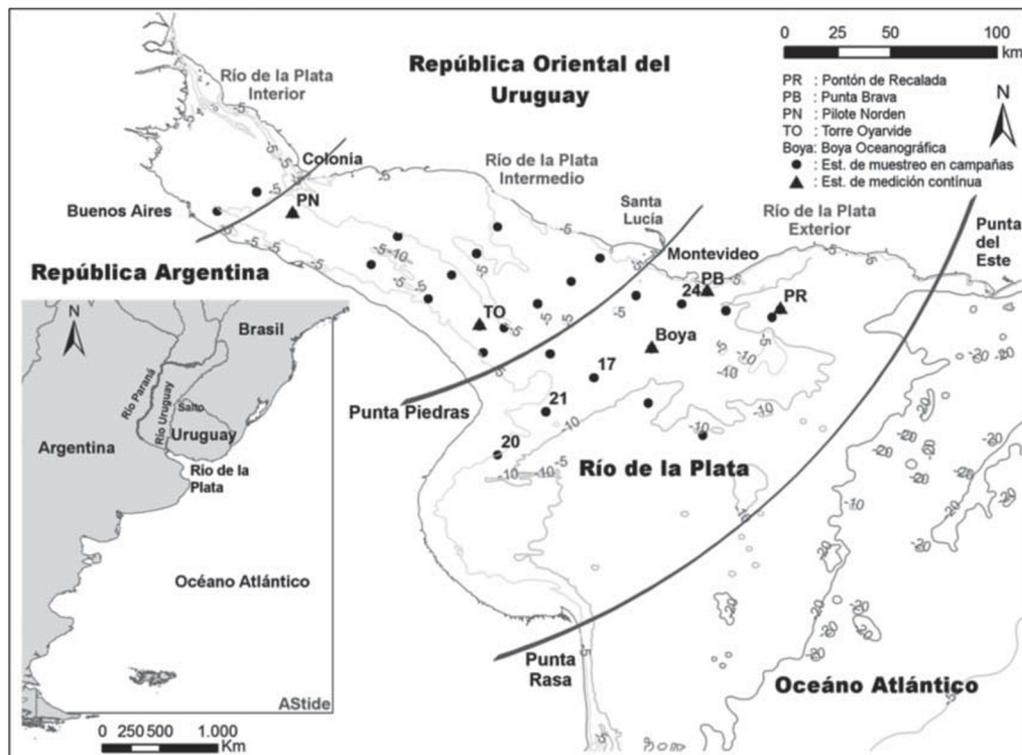


Figura 1. Ubicación del Río de la Plata y del Océano Atlántico sur; detalle del Río de la Plata y ubicación de las estaciones de medición continua y de muestreo durante las campañas.

zaron estudios técnicos y mediciones de campo para avanzar en el conocimiento de la dinámica del cuerpo de agua [1-3]. Según sus características físicas, el Río de la Plata se divide en dos grandes zonas, la zona intermedia (desde Barra del Indio hacia los tributarios) y la zona exterior (desde Barra del Indio hacia el océano). La zona interior-intermedia está caracterizada por una dinámica fluvial de comportamiento cuasi-bidimensional con influencia de las mareas, el agua es dulce y tiene una turbidez permanente. La zona exterior se define por una dinámica del tipo estuario con flujo de características tridimensionales. La zona incluida entre Montevideo y Punta Piedras, hasta Barra del Indio y hacia la desembocadura del río Santa Lucía, es lo que se denomina la zona del frente del Río de la Plata, y coincide con la gran expansión de su sección transversal.

En el Río de la Plata, los principales forzantes que influyen sobre la circulación del agua son la descarga fluvial de sus tributarios, las ondas de mareas oceánicas (astronómica y meteorológica) y los vientos que soplan sobre la superficie del agua. Las variaciones en los parámetros físico-químicos (particularmente la salinidad) afectan también a la circulación, ya que modifican la densidad del agua. El efecto de los forzantes sobre el agua está condicionado, a su vez, por la configuración de la línea de costa y la batimetría de fondo. El aumento, primero paulatino y luego abrupto, en la sección transversal del río tiene gran influencia en sus características hidrodinámicas [3]. La marea astronómica en el Río de la Plata es micromareal de régimen diurno con desigualdades semidiurnas, y la componente principal de marea es la M_2 [3,4]. A través de los ríos Paraná y Uruguay proviene más del 97% del ingreso de agua dulce al Río de la Plata, siendo la descarga media aproximadamente 23.000 m³/s. El agua dulce se mezcla con las aguas oceánicas generando una dinámica del campo salino en toda la zona exterior del Río de la Plata.

En los últimos años se han realizado avances importantes en la comprensión de la dinámica global del Río de la Plata a través de la realización de campañas de medición y la implementación de modelos numéricos. Respecto a las mediciones, son realizadas principalmente por el Servicio Hidrográfico Argentino (SHN), el Servicio de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología de la Armada (SOHMA) de Uruguay, la Dirección Nacional de Recursos Acuáticos (DINARA) de Uruguay o el Instituto Nacional de Investigación y Desarrollo Pesquero (INIDEP) de Argentina. Entre las publicaciones de referencia vinculadas a mediciones y análisis oceanográficos en la zona de estudio se destacan: Framiñan y Brown [5], en donde se analiza la dinámica del frente de turbidez a través de datos de satélites; Guerrero et al [6], donde se presentan los aspectos generales de la dinámica considerando la importancia del campo salino en la zona exterior. Más recientemente, cabe mencionar Piola et al [7], donde se presenta una caracterización climatológica del campo salino; Sepúlveda et al [8], que ofrecen los resultados de mediciones en la zona central del Río de la Plata; Simionato et al [9], donde se presenta la dinámica del perfil de velocidades obtenidas a partir del análisis de mediciones con *acoustic Doppler current profilers* (ADCP) en dos puntos del Río de la Plata realizadas en el marco del proyecto FREPLATA [3], y Acha et al [10], que ofrece una actualización del modelo conceptual físico y ecológico del Río de la Plata basado en mediciones e información secundaria.

En relación con la dinámica del campo salino, existen varios trabajos que han analizado el tema, ya sea a través de mediciones de campo o de modelación numérica [6-8,11-12], además de los estudios realizados en el marco de los Proyectos ECOPLATA y FREPLATA ya mencionados. Básicamente, el campo salino se extiende desde la zona del frente hasta la zona de plataforma, y presenta mayor variabilidad sobre el sector norte del Río de la Plata, es decir, sobre el Canal Oriental. La ubicación del mismo depende principalmente del caudal fluvial y de los vientos, siendo también muy variable la estratificación vertical del campo salino. En general, el Río de la Plata exterior se encuentra en condiciones de estuario parcialmente mezclado (es decir, con cierta estratificación vertical), pero la turbulencia de los vientos frecuentes genera fácilmente condiciones de mezcla vertical.

En lo que respecta a la dinámica de sedimentos, la carga de sedimento en suspensión al Río de la Plata proviene principalmente del río Paraná, con 160 millones de toneladas al año de arena fina, limo y arcillas. La arena fina se deposita principalmente en el Río de la Plata interior, en la zona próxima a la descarga de los afluentes, siendo responsable de la progradación del frente del delta del Paraná [13]. El sedimento cohesivo fino fluvial alcanza la zona interior del Río de la Plata. El estudio del frente de turbidez del Río de la Plata utilizando imágenes de satélite presentado por Framiñan y Brown [5] concluye que la ubicación del frente de turbidez se relaciona con la topografía de fondo coincidiendo con la isóbata de 5 m en la costa sur y siguiendo Barra del Indio en la zona de transición.

Se han aplicado diversos modelos numéricos en los estudios llevados a cabo en el Río de la Plata teniendo en cuenta la idoneidad de los mismos para las distintas aplicaciones. En este artículo nos centraremos en el trabajo realizado en el IMFIA. Otros grupos de investigación han aplicado exitosamente modelos numéricos en la zona de estudio y han logrado avances importantes, principalmente en el análisis de procesos de gran escala y en la determinación de climatologías. El grupo del Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA) de la Universidad de Buenos Aires (Argentina) estudió diferentes aspectos de la circulación global en el Río de la Plata utilizando el modelo HAMSOM 3D en su versión barotrópica con densidad constante [14-16]. Por otro lado, diversos aspectos ecológicos en la zona del frente del Río de la Plata se estudiaron utilizando el modelo tridimensional baroclínico ECOM [17]. Además, ha habido avances en la modelación de la circulación en la plataforma del Océano Atlántico [18-20], aunque normalmente la resolución de estos modelos en la zona del Río de la Plata es baja. Por último, se destaca el desarrollo y aplicación del modelo HIDROBID II en el Instituto Nacional del Agua de Argentina (INA), enfocado en la zona interior e intermedia del Río de la Plata principalmente [21,22].

Por último, es importante mencionar el proyecto internacional FREPLATA-FFEM [23], en el cual participaron instituciones de Argentina (SHN, CIMA, INIDEP, INA), de Francia (Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer, IFREMER) y de Uruguay (SOHMA, IMFIA) desarrollado entre 2009 y 2011. El proyecto comprendió básicamente dos grandes componentes, la realización de campañas de campo para medir las principales variables vinculadas con la hidrosedimentología del Río de la Plata y el trabajo en el modelo numérico MARS desarrollado por IFREMER. El principal avance logrado en el proyecto fue la generación de una nueva y extensa base de datos de información vinculada a sedimento en suspensión y sedimento de fondo en todo el Río de la Plata [24,25]. Los nuevos datos recolectados en el Proyecto FREPLATA-FFEM incluyen series temporales hidrodinámicas (temperatura, salinidad, corrientes) y de turbidez durante varios meses en tres estaciones, perfiles verticales de CTD y turbidez adquiridos durante seis campañas distribuidas en 13 meses, y extracción de material en suspensión y de fondo en 26 estaciones (fig. 1). Las mediciones comenzaron en noviembre de 2009 y finalizaron en diciembre de 2010. Por otro lado, también se iniciaron trabajos de modelación numérica [26] de la dinámica de sedimentos finos en el Río de la Plata con la aplicación del modelo tridimensional MARS desarrollado en IFREMER [27], que incluso había sido implementado en otros estudios en el Río de la Plata [28]. Durante y con posterioridad a la finalización del proyecto se implementó el modelo numérico MARS y se analizaron los resultados en el IMFIA [29,30].

3. Modelación numérica

A partir del año 2000, el IMFIA comenzó a utilizar el conjunto de modelos en elementos finitos RMA [31], incluyendo el modelo hidrodinámico bidimensional integrado en vertical RMA-2, el modelo hidrodinámico baroclínico tridimensional RMA-10 y el modelo de transporte de sustancias RMA-11 que utiliza el cálculo hidrodinámico

de los dos anteriores. Varios avances se realizaron aplicando el modelo en elementos finitos RMA integrado en vertical. Por ejemplo, se determinaron los principales corredores de flujo en la zona interior e intermedia del Río de la Plata producto de la descarga de los principales tributarios [32]; se investigó el comportamiento del campo salino y su variación estacional [12], y se estudió la circulación de flujo en la Bahía de Montevideo [33] y las alteraciones generadas en la misma por descargas térmicas [34].

El modelo numérico en volúmenes finitos MOHID [35] se aplicó en su versión tridimensional baroclínica para estudiar la circulación general en todo el Río de la Plata y determinar los patrones principales de flujo residual en toda la zona [4]. El flujo residual se define en este trabajo como el promedio de las corrientes calculadas en cada punto durante un determinado período de tiempo. El modelo hidrodinámico se utilizó como base de un modelo lagrangiano de calidad de agua que se utilizó para estudiar la descarga de emisarios submarinos utilizando la técnica de modelos anidados para incrementar la resolución espacial en las zonas de interés [36]. En los últimos años se ha avanzado en el desarrollo y aplicación de la estrategia de modelos de pronóstico aplicando el modelo MOHID en el Atlántico Sur y el Río de la Plata [37].

La hidrodinámica del Río de la Plata, además de estar controlada por los forzantes locales (atmosféricos, caudales erogados por sus afluentes, etc.), depende fuertemente de las mareas astronómica y meteorológica que ingresa desde el Océano Atlántico [38]. Debido a esto, inicialmente se utilizaba información de niveles medidos en la zona exterior del Río de la Plata como condición de borde del modelo para representar el ingreso de la onda de marea [4], lo cual presentaba dos desventajas principales: la imposibilidad de abordar situaciones que requieren información de pronóstico a corto plazo en tiempo real, y los inconvenientes en relación con la disponibilidad de datos de mediciones de buena calidad e ininterrumpidos. Surgió así la necesidad de independizarse de las mediciones y adoptar una estrategia de modelos anidados. A este fin, se comenzó en 2007 a desarrollar un sistema basado en el acople unidireccional del modelo atmosférico de mesoescala WRF [39] y el modelo hidrodinámico MOHID [40]. Se parte de un primer nivel a escala regional que abarca gran parte del Océano Atlántico sur, denominado ASTide, y un segundo nivel a escala local del Río de la Plata, denominado RPtide. Esta primera implementación del modelo MOHID a escala regional fue utilizada en Santoro et al [38] para mostrar que la correcta representación de la marea meteorológica observada en el Río de la Plata requiere de la simulación de un dominio regional que abarca el sur de la plataforma continental argentina. Posteriormente, Fernández [41] realizó una revisión de las características de implementación del modelo MOHID a escala regional, mejorando su representatividad. Actualmente, se ha incorporado al modelo hidrodinámico ASTide el forzante atmosférico en la superficie (vientos y presiones) obtenido de los reanálisis del National Centers for Environmental Prediction (NCEP) de Estados Unidos [42] y se ha realizado la calibración [43].

Una estrategia de modelación hidrodinámica similar se utilizó en el proyecto FREPLATA-FFEM mencionado anteriormente [23] utilizando el modelo numérico MARS con dos dominios anidados. El primero, implementado en versión bidimensional integrada en vertical denominado rank0, incluye la zona del Atlántico sur, y el segundo nivel, que se trata de un modelo tridimensional baroclínico de diez capas verticales denominado rank1, incluye la zona del Río de la Plata y el frente marítimo. El modelo de marea es forzado por el modelo global astronómico FES2004 en el primer dominio rank0 y por los forzantes atmosféricos obtenidos de campos de diversos reanálisis. El modelo de sedimentos finos MARS [44] implementado y calibrado calcula la erosión, la advección y la deposición de distintas fracciones de sedimentos (en este caso se incluyeron limo y arcilla). La erosión generada por el oleaje se incluyó considerando resultados del modelo de oleaje SWAN [45] implementado también en el dominio rank1. El modelo de oleaje SWAN es forzado por los vientos de reanálisis y por

la información de oleaje global obtenida del modelo WW3 implementado por IFREMER a escala planetaria [46].

Tanto la componente del modelo hidrodinámico tridimensional MARS como el modelo de oleaje SWAN se calibraron utilizando una gran cantidad de información de campo de las variables vinculadas (niveles, corrientes, salinidad y parámetros de oleaje) en la mayor parte del Río de la Plata. Los resultados obtenidos muestran que ambos modelos representan las principales características de la hidrodinámica en la zona de estudio con buena calidad [29,30]. A grandes rasgos, el modelo hidrodinámico representa los niveles reales en el Río de la Plata con un error promedio asociado entre 0,2 m en la zona exterior, que aumenta hacia la zona interior a valores entre 0,3 y 0,4 m; en relación con las corrientes, el modelo presenta errores del orden de los 0,2 m/s en las capas de fondo, que se incrementa hacia las capas superficiales superando los 0,4 m/s; y en cuanto a la salinidad, el modelo hidrodinámico presenta errores de entre 3 y 4 ppm en la zona estuarina del Río de la Plata. El modelo de oleaje representa principalmente los picos de oleaje durante las tormentas, con errores en la altura de ola que varían entre 0,14 y 0,2 m en función del mes comparado en la zona cercana a Montevideo, y entre 0,16 y 0,3 m en la zona exterior del Río de la Plata.

El proceso de calibración del modelo de sedimentos finos MARS resultó en una herramienta que, en términos generales, representa correctamente las principales características de la dinámica de sedimentos finos observada en los datos [29,30]. Los errores calculados a partir de la representación de los perfiles verticales en la zona interior e intermedia muestran valores razonables con un promedio de 15 mg/l, mientras que el error obtenido en la representación de la serie continua de Torre Oyarvide es igual a 26 mg/l. En la zona exterior, la dinámica de sedimentos finos es distinta a la descrita en la zona interior e intermedia, y el modelo lo representa. La comparación de las series continuas medidas en la Boya muestra que el modelo reproduce correctamente los valores bajos de concentración en períodos de calma y el incremento de concentración y la duración de los eventos de resuspensión generados por las tormentas. La comparación de los perfiles verticales muestra, a su vez, que el modelo en general representa estratificación como las medidas, siendo el error promedio en la zona exterior de 30 mg/l.

4. Mediciones de campo

En relación con las mediciones, se destacan los estudios de la dinámica en la costa uruguaya realizados a partir del análisis de las mediciones realizadas con un ADCP ubicado en la zona por la Intendencia Municipal de Montevideo (IMM) en cooperación con el SOHMA y el IMFIA [47,48]. Se fondeó un perfilador acústico (RDI Instruments, 1.200 KHz) a 3,5 km de la costa de Montevideo (34°57'36" S, 56°9'39" W) a 9 m de profundidad promedio (PB en la fig. 1). El ADCP se fondeó mirando hacia la superficie (configuración *uplooker*) utilizando un domo con forma de pirámide truncada. El correntómetro se programó para registrar datos de intensidad y dirección de corrientes con una resolución vertical de 0,35 m y realizó mediciones promediando 2 minutos de medidas tomadas a 1 Hz, cada 30 minutos. Asimismo, el ADCP fue configurado para registrar el oleaje, recopilando datos de velocidades, niveles y presión a 2 Hz por 20 minutos, cada 3 horas. Estos datos se procesaron luego para obtener los espectros direccionales y omnidireccionales para cada estado de mar y a partir de ellos caracterizar el oleaje. El ADCP fue fondeado en diciembre de 2003 y registró corrientes y oleaje durante casi 6 años, con interrupciones para el mantenimiento, hasta que fue finalmente extraído en noviembre de 2009. Las mediciones realizadas constituyen el registro más largo de corrientes y oleaje frente a la costa de Montevideo. A continuación se describen algunos de los principales estudios llevados a cabo con los datos medidos por este equipo.

A partir de los registros de oleaje del ADCP se diferenciaron dos tipos de oleaje, mar de viento (*sea*) y mar de fondo (*swell*). El mar de

viento presenta ondas cortas e irregulares, mientras que el mar de fondo se define por ondas largas y regulares. Para poder caracterizar estadísticamente el oleaje es importante diferenciar estas dos poblaciones. Trabajos anteriores en el Río de la Plata utilizaron una frecuencia de corte fija de 0,17 Hz para este fin, pero se comprobó que se logra una mejor caracterización utilizando una frecuencia de corte dependiente de la velocidad del viento, de acuerdo con Hanson y Phillips [49], ya que muchas veces el rango de frecuencias de mar de viento y mar de fondo se superponen:

$$f_c \geq \frac{g}{2\pi} \frac{1}{KU_{10}},$$

donde U_{10} es la velocidad del viento a 10 m sobre el nivel del suelo y K una constante, igual a 1,5 en nuestro caso. En la figura 2 se muestra la evolución del espectro de energía a partir de los datos del ADCP y los diferentes criterios de separación de los oleajes tipo *sea* y *swell*. En esta zona del Río de la Plata, el mar de viento claramente es predominante y el mar de fondo es muy débil. El análisis del registro de oleaje del ADCP muestra que la altura significativa estuvo por debajo de 0,6 m el 70% del tiempo, solo se observaron olas mayores de 1,12 m el 5% del tiempo, mientras que las olas de altura significativa mayor de 1,49 m únicamente se registraron el 1% del tiempo.

Por otra parte, el retorno acústico del ADCP fondeado fue calibrado utilizando muestras de agua tomadas durante las visitas de mantenimiento para obtener una medida indirecta de la concentración de sedimento en suspensión. Los sedimentos del lecho en la zona están constituidos principalmente por arcilla (62,5%), limo (37%) y arena (0,5%). Como el tamaño de los sedimentos es mucho menor que la longitud de onda del ultrasonido de 1.200 kHz, que es aproximadamente 1 mm, inicialmente no se esperaba una buena correlación en-

tre la concentración de sedimentos y el retorno acústico. Sin embargo, Bellón y Piedra-Cueva [50] encontraron una fuerte correlación, que se atribuye a la presencia de microflocs (agregados muy fuertes y estables ante los esfuerzos inducidos por la turbulencia). El análisis de los sedimentos en suspensión demuestra que tanto la corriente como el oleaje controlan la resuspensión de sedimentos del lecho en la costa de Montevideo. La figura 3 muestra la concentración de sedimentos a dos profundidades, comparada con la velocidad combinada en la cercanía del lecho asociada a corrientes y oleaje.

En lo que respecta a series de niveles (elevación de la superficie libre), se han utilizado registros en varias estaciones mareográficas del Río de la Plata, las cuales son gestionadas por distintos organismos (SOHMA, Dirección Nacional de Hidrografía [DNH] de Uruguay, INA y SHN de Argentina). Las mismas han sido de gran utilidad, tanto para su estudio en sí mismo, como para la calibración y validación de los modelos hidrodinámicos.

5. Dinámica del Río de la Plata

5.1. Propagación de las mareas

En la figura 4 se presentan algunos de los resultados obtenidos en trabajos recientes sobre el estudio de la marea astronómica y meteorológica en el Río de la Plata utilizando mediciones de niveles en las estaciones costeras del Río de la Plata y del frente marítimo [41,38]. Por un lado, se presenta la amplitud de las principales componentes de marea astronómica en cada estación del Río de la Plata y la importancia relativa de cada componente por estación, y por otro lado la importancia de la componente meteorológica de marea expresada

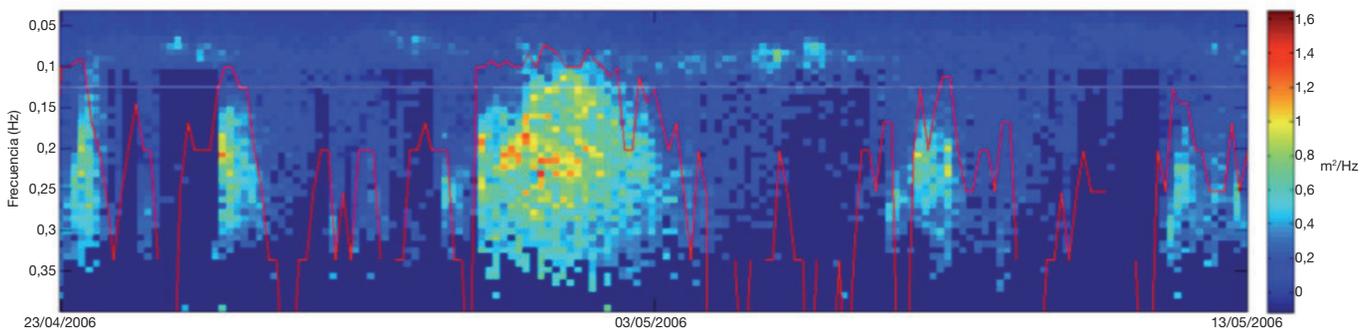


Figura 2. Discriminación entre mar de viento y mar de fondo utilizando una frecuencia de corte fija (línea blanca) y una frecuencia de corte móvil dependiente de la velocidad del viento (línea roja).

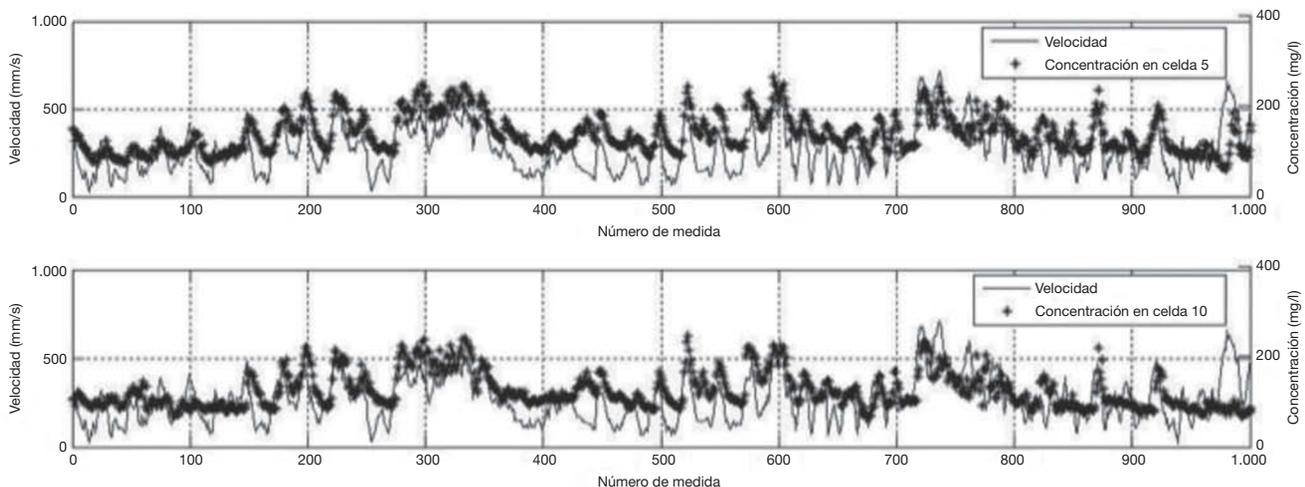


Figura 3. Velocidad en la celda más cercana al lecho ubicada a 1,3 m del lecho y concentración de sedimento a 2,7 m y a 4,45 m del lecho.

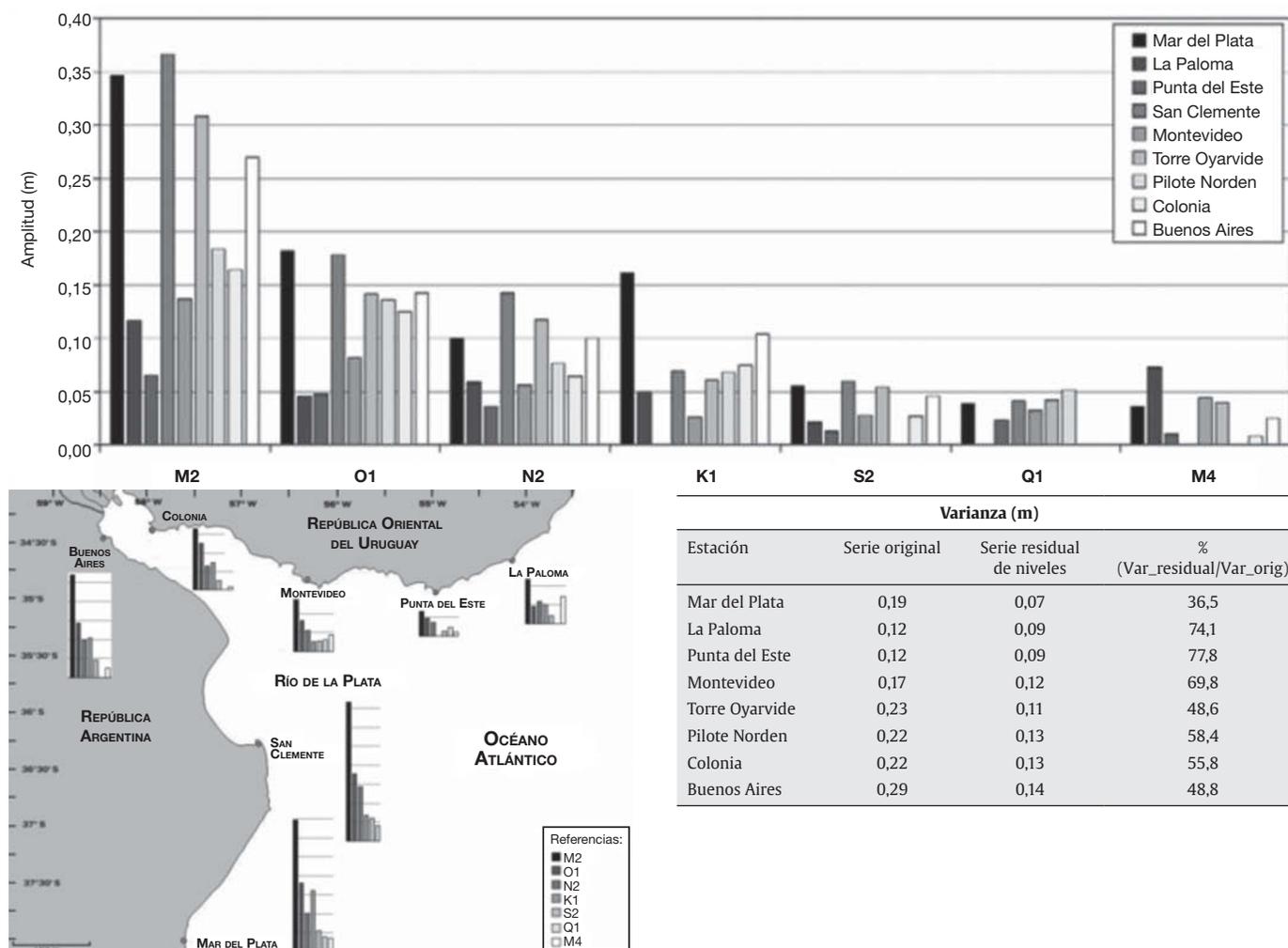


Figura 4. Resultados del análisis de mediciones de niveles: amplitud (m) de las principales componentes de marea astronómica en el Río de la Plata (panel superior); distribución espacial de la importancia relativa de las principales componentes de marea astronómica por estación (panel inferior izquierdo) e importancia por estación de la componente meteorológica de la marea (panel inferior derecho).

como el porcentaje de varianza de la serie total de niveles. La componente meteorológica de marea en el Río de la Plata básicamente corresponde a la componente no-astronómica de la marea, siendo generada por la interacción atmósfera-océano en el Atlántico sur. Se observa que la marea astronómica presenta mayores amplitudes en las estaciones ubicadas sobre la costa argentina del Río de la Plata que sobre la costa uruguaya. Respecto a la marea meteorológica, es relevante (desde el punto de vista energético) en todo el Río de la Plata, con una tendencia a ser de mayor influencia en los niveles de las estaciones ubicadas sobre la costa uruguaya.

Diversos análisis, tanto sobre datos observados como con herramientas numéricas, mostraron las condiciones y regiones determinantes en la generación de la marea meteorológica en el Río de la Plata [38]. Se concluyó que la región sur de la plataforma argentina desempeña un papel de suma importancia en la generación de las ondas de marea meteorológica que luego ingresan al Río de la Plata. Las condiciones que desencadenan eventos de niveles máximos en las series residuales de niveles del Río de la Plata se asocian con la ocurrencia de vientos provenientes del sudoeste sobre la región antes mencionada. Por el contrario, eventos de niveles mínimos en las series residuales observadas en el Río de la Plata tienen lugar en general después de la ocurrencia de vientos del oeste-noroeste sobre la plataforma argentina. La gran mayoría de los eventos observados en las series residuales de niveles tienen un origen remoto, sin embargo existen eventos aislados de menor magnitud que se observan únicamente en

las estaciones más interiores del Río de la Plata y se pueden atribuir al efecto de los forzantes a escala local. A su vez, el forzante local parece tener una influencia en la amplificación de los eventos que tienen origen remoto, siendo los vientos alineados con el eje del estuario los que favorecen el incremento de los niveles máximos cuando son del sureste y disminuyen los niveles mínimos cuando son del noroeste.

A modo de ejemplo, en la figura 5 se presenta la serie temporal de la oscilación de la superficie libre obtenida para todo el año 2010 (panel superior) con el modelo numérico *ASTide* [43] en Montevideo considerando solo la marea astronómica como forzante y considerando además la marea meteorológica generada por los vientos remotos (marea real). En el panel intermedio se presenta el detalle del mes de febrero y en el panel inferior el mes de agosto de 2010. Se observa claramente que en el Río de la Plata la dinámica está gobernada por una combinación de períodos de varios días en los cuales dominan las condiciones astronómicas y por otros donde la marea meteorológica es determinante y se superpone a la variabilidad semidiurna de la señal astronómica dominante, tanto con eventos de incremento de niveles como con eventos de disminución de niveles.

5.2. Corrientes

El patrón de corrientes en la zona está regido por la interacción del régimen semidiurno de la marea (tanto astronómica como meteorológica), que genera una oscilación de 12 horas con una inversión del

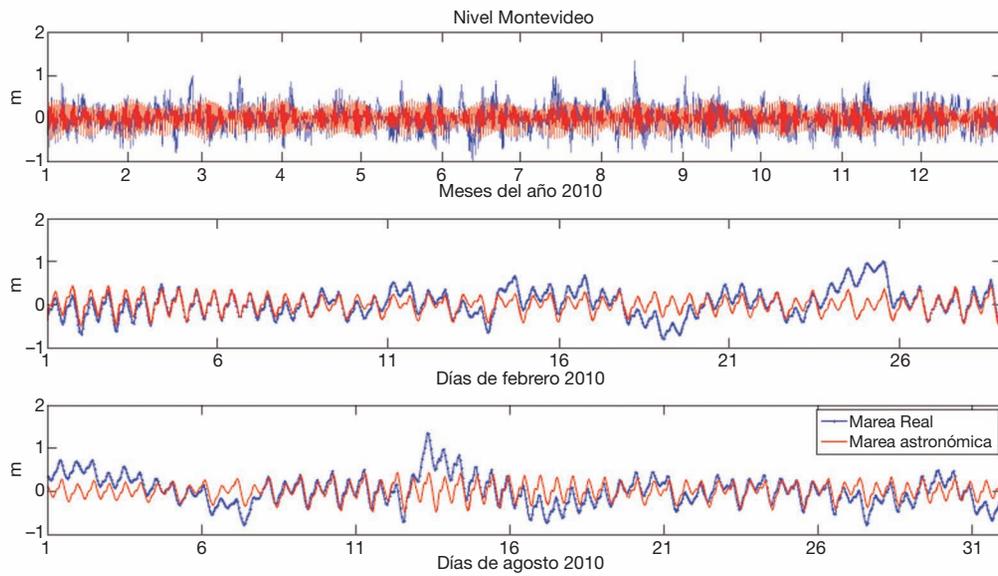


Figura 5. Series temporales de oscilación de la superficie libre en Montevideo correspondientes a marea astronómica y marea real durante el año 2010 (panel superior), febrero de 2010 (panel intermedio) y agosto de 2010 (panel inferior), obtenidas con el modelo numérico AStide.

sentido de la corriente cada 6 horas en todo el Río de la Plata, con el caudal fluvial de los ríos Paraná y Uruguay y los vientos. Se presentan a modo de ejemplo en la *figura 6* los campos de corrientes para distintos instantes de tiempo (cada 3 horas) obtenidos en las capas 2 (fondo) y 7 (zona superficial) con el modelo MARS durante un día de

un período de tiempo de características básicamente astronómicas. El objetivo es mostrar la gran dinámica y variabilidad del flujo en la zona (en sentido y en intensidad) en función de la evolución del ciclo de marea. Se observa en particular la diferencia entre el flujo de fondo y de superficie en la zona exterior del Río de la Plata. Por otro lado, se

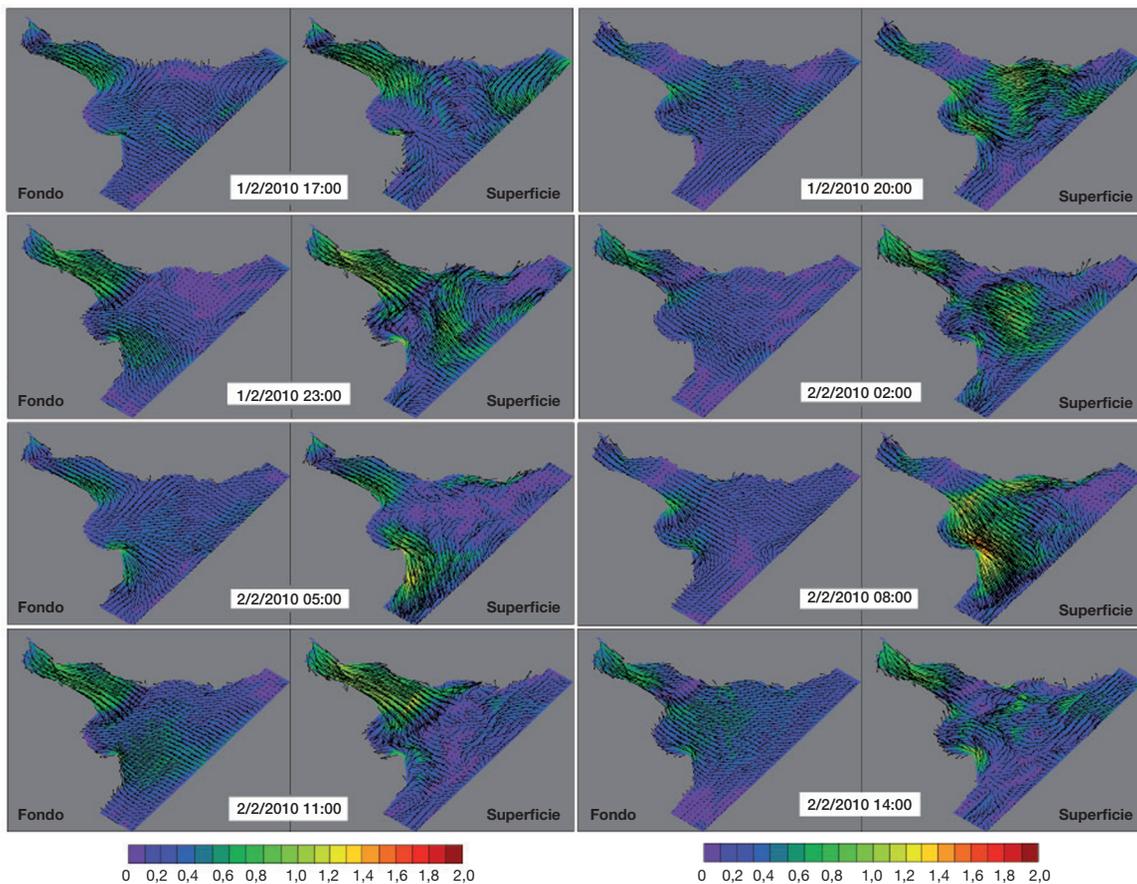


Figura 6. Campos de corrientes instantáneos (modelo MARS) en la capa de fondo (paneles izquierdos) y en la capa superficial (paneles derechos) cada 3 horas durante un día de condiciones astronómicas; 1 de febrero de 2010, 17:00 horas, al 2 de febrero de 2010, 14:00 horas.

presentan en la **figura 7** los campos de corrientes instantáneos obtenidos con el modelo en la capa 2 de fondo y la capa 7 cercana a la superficie durante una tormenta ocurrida entre el 12 y el 14 de agosto de 2010, que corresponde a condiciones de grandes niveles (**fig. 5**) y, por tanto, de marea meteorológica y vientos del sector sur-suroeste.

Los ejemplos presentados muestran que en la zona interior e intermedia el flujo tiene el mismo sentido en toda la columna de agua, con intensidades que aumentan hacia la superficie libre, característicos de un flujo bidimensional, con intensidades mayores sobre la costa argentina. En la zona exterior se observa una gran diferencia espacial tanto en el sentido como en la intensidad de corriente, con algunos canales preferenciales de flujo; se destaca la zona del Canal Oriental por el norte sobre la costa uruguaya y el Canal Marítimo sobre la costa sur argentina. En la zona central, en algunas situaciones, las corrientes son bajas pero en situaciones de tormenta (fuertes vientos) hay un ingreso o salida fuerte de corrientes por la zona central del Río de la Plata. Por otra parte, se observa mayor variabilidad en el patrón de

corrientes durante períodos de tormenta y marea meteorológica, que durante períodos de marea astronómica. Estos resultados muestran claramente la gran diversidad de flujo en la zona y, por tanto, no resulta sencillo caracterizar los principales patrones de circulación.

Se calcularon los campos residuales de flujo en fondo y en superficie para distintos períodos de integración. El campo residual en fondo y en superficie obtenido para el mes de febrero 2010 y el mes de agosto se presentan en la **figura 8**. Estos campos se obtuvieron promediando el flujo calculado por el modelo durante todo el mes. Se observa que las intensidades del flujo neto son mucho menores que las intensidades instantáneas debido a la rotación del flujo por el efecto de la marea. En la zona interior, las diferencias entre el flujo residual en superficie y en fondo son mucho menores que las diferencias que se observan en la zona exterior, lo que se debe al efecto del caudal fluvial (flujo de deriva), de gran influencia para la zona. En la zona exterior se observa que principalmente hay un flujo neto sobre el fondo que ingresa al Río de la Plata por el canal oriental ubicado al

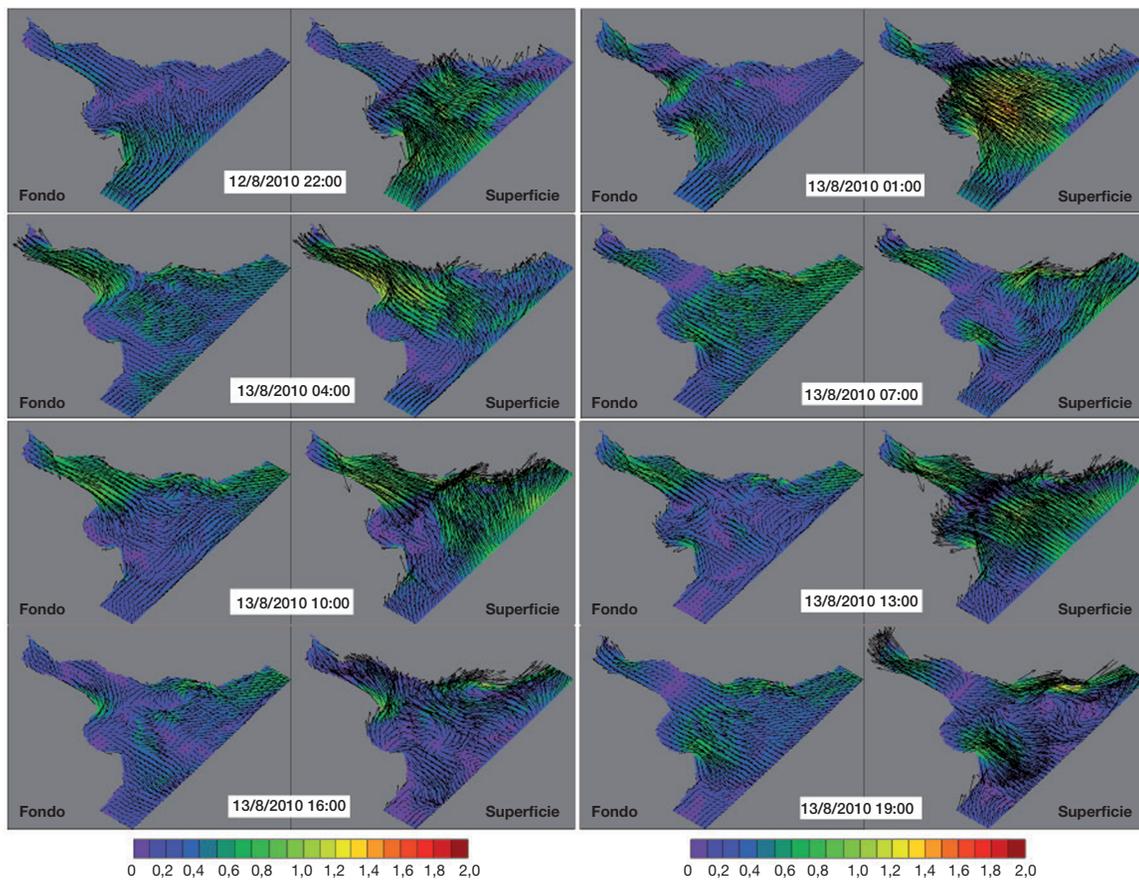


Figura 7. Campos de corrientes instantáneos (modelo MARS) en la capa de fondo (paneles izquierdos) y en la capa superficial (paneles derechos) cada 3 horas durante condiciones de tormenta; 12 de agosto de 2010, 22:00 horas, al 13 de agosto de 2010, 19:00 horas.

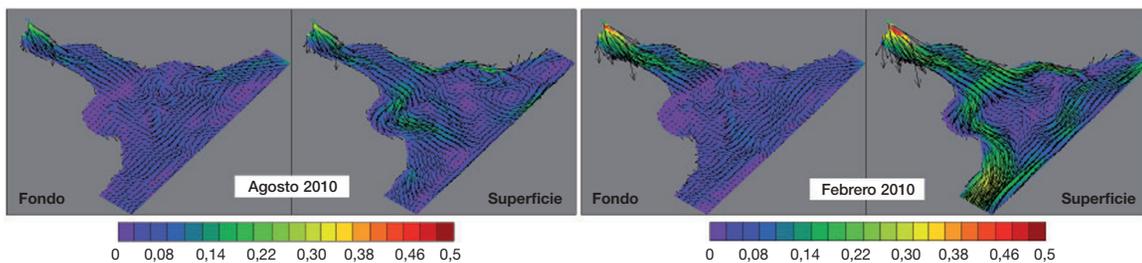


Figura 8. Campos residuales de corrientes (modelo MARS) en la capa de fondo y en la capa superficial para el mes de agosto de 2010 (paneles izquierdos) y febrero de 2010 (paneles derechos).

norte, mientras que sobre la zona superior de la columna de agua se observa un flujo saliente al Río de la Plata por las zonas bajas costeras de ambas márgenes (norte y sur) y también por la zona central sobre el Banco Inglés.

Por otra parte, las mediciones realizadas con ADCP durante varios meses en diversas ubicaciones del Río de la Plata muestran también la variabilidad espacial que caracteriza al flujo en este cuerpo de agua. A modo de ejemplo, se presentan en la *figura 9* las mediciones (variación temporal) del perfil de corrientes (por componente) obtenidas en la zona de Montevideo y en Pontón Recalada (PB y PR en la *fig. 1*) durante los primeros 20 días de febrero 2004, junto con la variación de la elevación de la superficie libre obtenida con el modelo y el viento medido, ambos en Montevideo; también se presentan los datos de corrientes medidos durante el período mencionado en un diagrama espacial (fondo y superficie). En Punta Brava se observa que el flujo instantáneo está dominado por el régimen semidiurno de la marea

con direcciones principales este y oeste principalmente en todo el perfil. El perfil vertical muestra un flujo que mantiene el sentido, salvo en algunos pocos casos. Además, se observa que los eventos de fuerte marea meteorológica generan una inversión de flujo más leve con un flujo neto básicamente hacia fuera del Río de la Plata en dicho punto. En Pontón Recalada, el comportamiento es similar al observado en Punta Brava pero con un flujo marcado de dirección suroeste-noreste. Es interesante analizar las mediciones de flujo del día 5: en Punta Brava se observa un flujo saliente permanente durante casi un día y en Pontón Recalada la componente este indica el mismo comportamiento, mientras que la componente norte muestra un flujo opuesto en fondo y superficie, resultando en un flujo superficial noreste y un flujo de fondo sureste. Los datos revelan que durante ese período la marea meteorológica es leve pero los vientos del sur son de intensidad media a alta, lo que provoca un incremento de flujo saliente por la costa norte del Río de la Plata.

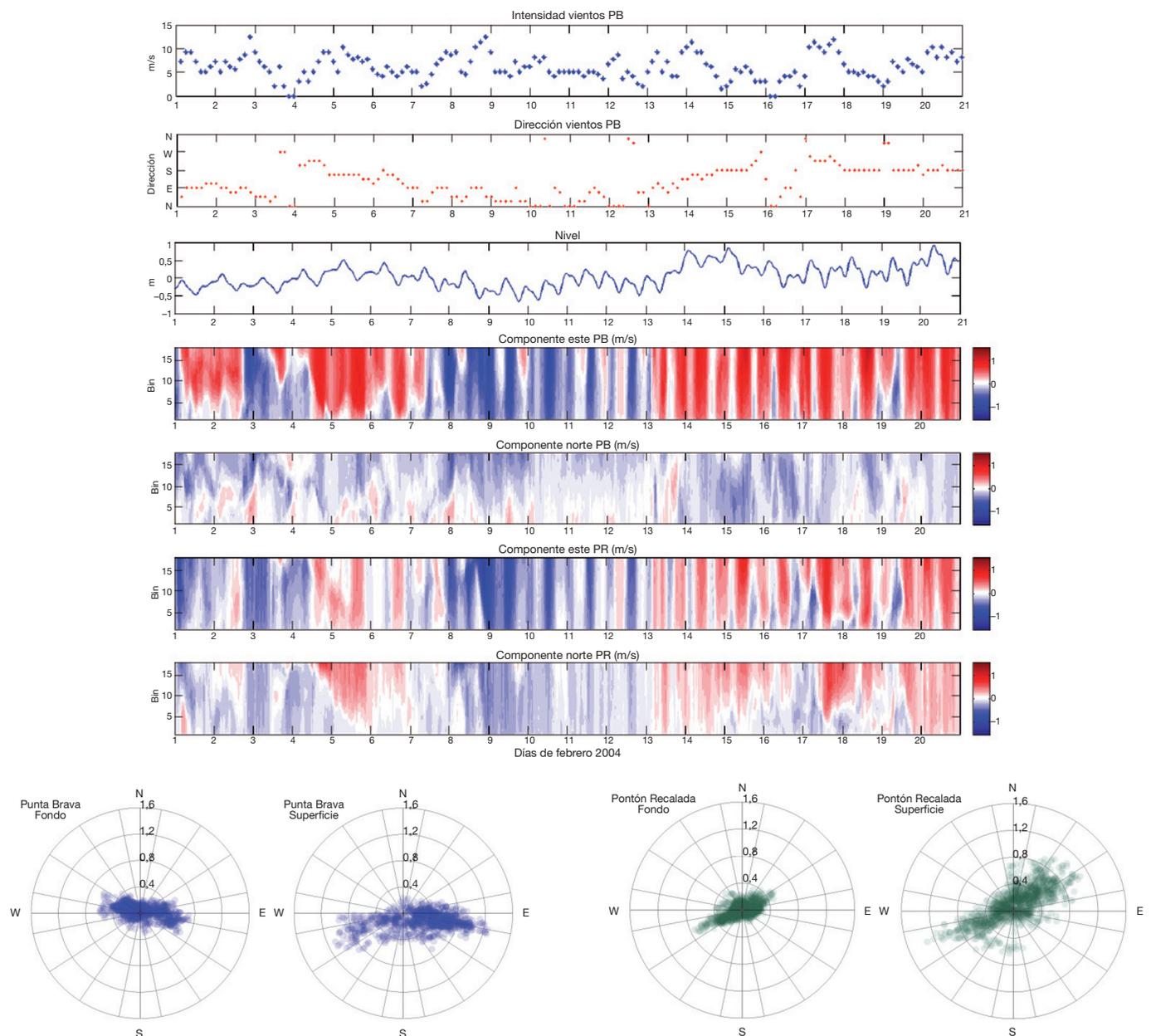


Figura 9. Series temporales de viento y nivel medidos en Montevideo; series temporales del perfil de corrientes medido y diagramas espaciales de las corrientes de fondo y superficie medida en Punta Brava (PB) y Pontón Recalada (PR) durante febrero de 2004.

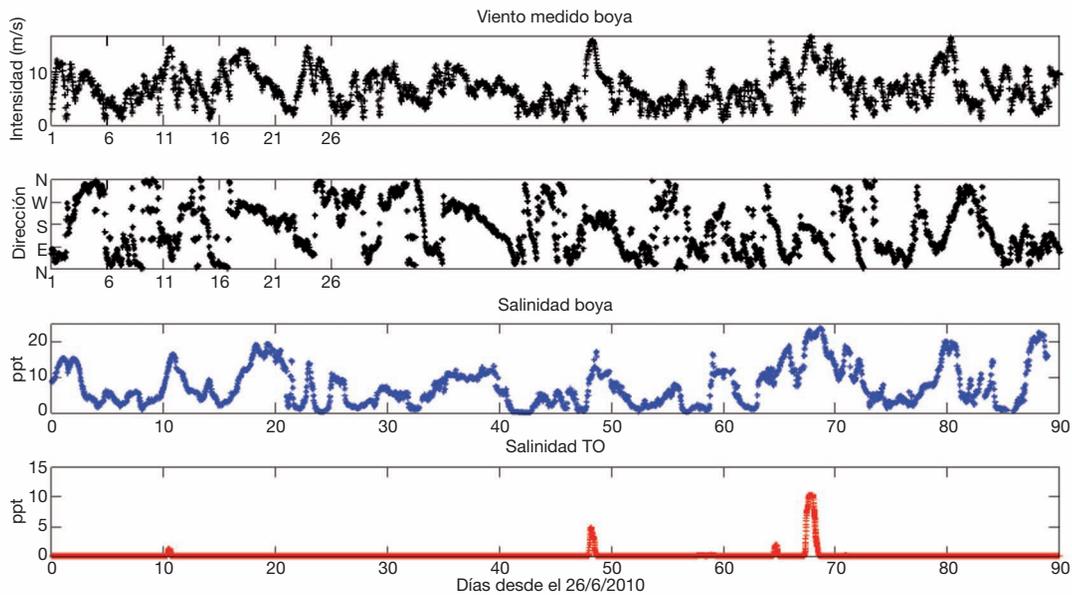


Figura 10. Series temporales de viento medido en la Boya, salinidad medida a profundidad media en la Boya y salinidad medida a profundidad media en Torre Oyarvide; julio, agosto y septiembre de 2010.

5.3. Campo de salinidad

La variabilidad temporal y espacial del campo salino en el Río de la Plata es muy alta, y existen muy pocas mediciones de campo realizadas de manera continua que permitan conocer el comportamiento del mismo en diversas situaciones meteorológicas. Utilizar modelos numéricos permite por lo menos identificar ciertos patrones que ayudan a la comprensión general. A continuación se realiza un análisis de la dinámica del campo de salinidad en el Río de la Plata, en primer lugar, a partir de mediciones de campo, y en segundo lugar a partir de los resultados del modelo numérico MARS calibrado.

En la *figura 10* se presentan las series medidas de salinidad en la Boya y en Torre Oyarvide (Boya y TO en *fig. 1*) desde fines de junio a septiembre de 2010, junto con los vientos medidos en la Boya en el mismo período. Estos datos muestran, por un lado, una gran variabilidad temporal de la salinidad en la zona de la Boya, con valores que superan los 20 ppm en ciertos eventos y valores muy bajos que indican casi agua dulce en otros eventos. Se observa también una relativa correlación entre la señal de salinidad y el viento medido en la Boya (el factor de correlación lineal obtenido entre ambas series es 0,41). Por otra parte, aunque en Torre Oyarvide en general el agua es dulce, hay eventos que indican un ingreso de la pluma salina desde la zona estuaria, que coinciden con incrementos de salinidad registrados en la Boya y con vientos intensos del sector sur.

El modelo numérico tridimensional MARS se calibró con los datos de salinidad registrados presentados anteriormente [30] y, por tanto, se puede asumir que representa las características básicas de la dinámica del campo salino. El modelo se utilizó para explorar cómo es la dinámica instantánea del campo salino y su dependencia de los vientos, analizando también la variabilidad espacial en todo el Río de la Plata [29]. Se seleccionaron diversos períodos de tiempo (días) asociados a tormentas con vientos fuertes y a períodos de calma. Para cada uno de los subperíodos se calcularon campos relevantes para entender la dinámica: los patrones medios de salinidad en fondo y superficie, y la estratificación media y máxima asociada, y el flujo residual en ambas capas. La estratificación del campo salino en cada celda se define como la diferencia entre la salinidad en la capa más cercana al fondo y la salinidad en la capa superficial. Además, con el objetivo de analizar la dinámica de salinidad a lo largo del eje del Río de la Plata y en el frente de turbidez, se calcularon los perfiles promedio de salinidad y de las corrientes (obteniendo el flujo residual), en

nueve secciones longitudinales que abarcan las zonas interior, intermedia y exterior (*fig. 11*). En términos generales, los resultados obtenidos para cada subperíodo analizado muestran diversos patrones, aunque es posible identificar comportamientos comunes, tanto en los períodos de calma como en los períodos de tormenta, los cuales se presentan a continuación.

A modo de ejemplo se muestran los patrones medios asociados a la situación de calma del período comprendido entre el 1 y el 7 de febrero de 2010 (*fig. 12*). Durante dicho período, los vientos medios no superan los 6 m/s en todo el Río de la Plata y la dirección predominante de los mismos es desde el sector noreste; en la *figura 5* se observa que durante el período las oscilaciones de la superficie libre son predominantemente astronómicas. Los resultados muestran un patrón medio de salinidad de fondo estable, consistente con la variación batimétrica, que ingresa al Río de la Plata hasta el frente con valores altos de 20 ppm en la costa de Montevideo; la salinidad en superficie en cambio muestra una mayor extensión y, por tanto, menores gradientes en la zona exterior, con una pluma de descarga de agua dulce sobre la costa uruguaya. Coherente con estas observaciones, los campos medios y máximos de estratificación muestran que los máximos valores ocurren sobre la zona de descarga contra la costa uruguaya de la zona exterior, aunque también en la zona central del exterior del Río de la

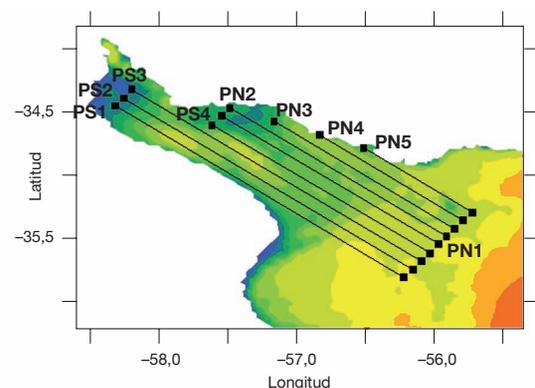


Figura 11. Ubicación de las nueve secciones definidas para analizar la variación longitudinal de la dinámica del campo salino en el Río de la Plata.

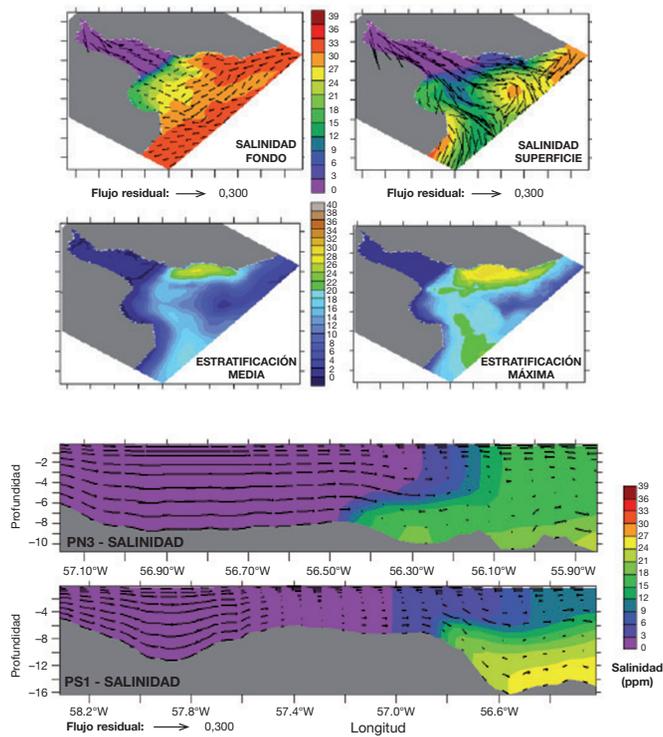


Figura 12. Caracterización del período de calma comprendido entre el 1 y el 7 de febrero de 2010 (modelo MARS). Campos espaciales medios de salinidad (ppm) y flujo residual en el fondo y la superficie, estratificación (diferencia entre salinidad del fondo y la superficie). Campo máximo de la estratificación salina. Perfiles verticales medios de salinidad y flujo residual en las secciones longitudinales PS1 y PN3; escala vertical correspondiente a la profundidad (m).

Plata la estratificación es alta. El flujo residual muestra una circulación gravitacional en toda la zona exterior (en el fondo el flujo es predominantemente entrante al Río de la Plata, mientras que en superficie es principalmente saliente) y el flujo de descarga en la zona intermedia. En la figura 12 también se presentan a modo de ejemplo los perfiles promedio de salinidad y el flujo residual en PS1 y PN3 durante el período de calma seleccionado. Se observan perfiles del campo salino, y el flujo residual asociado, característicos de un estuario estratificado, con un ingreso de agua salada por el fondo y una salida de agua dulce por la capa superior. No obstante, hay cierta variación en la sección transversal del Río de la Plata. En la zona sur se observa un frente salino marcado, favorecido por la diferencia de batimetría entre la zona intermedia y exterior, mientras que a medida que la sección se ubica hacia el norte, el perfil de salinidad vertical es gradual, indicando una mayor mezcla vertical y un ingreso paulatino del campo salino desde el océano favorecido por un gradiente más suave de la cota de fondo.

Para analizar las diversas características de la dinámica del campo de salinidad durante las tormentas se seleccionaron seis ejemplos de tormentas diferentes, las cuales corresponden a los días 16 de febrero de 2010, 18-19 de julio de 2010, 29-30 de agosto de 2010, 24-25 de febrero de 2010, 20-21 de junio de 2010 y 13-14 de agosto de 2010. Las tres primeras corresponden a tormentas generadas por vientos provenientes del sector sureste principalmente, las dos siguientes corresponden a tormentas con vientos predominantes del sector norte-noroeste-oeste, y la última tormenta corresponde a vientos predominantes del sector sur-suroeste. En todos los casos las intensidades medias de viento son entre 11 y 14 m/s en la zona del Río de la Plata.

Para las tormentas del tipo sudestadas (generadas por vientos del sureste), a pesar de que hay diferencia en los resultados en función de la intensidad de cada tormenta, es posible determinar patrones co-

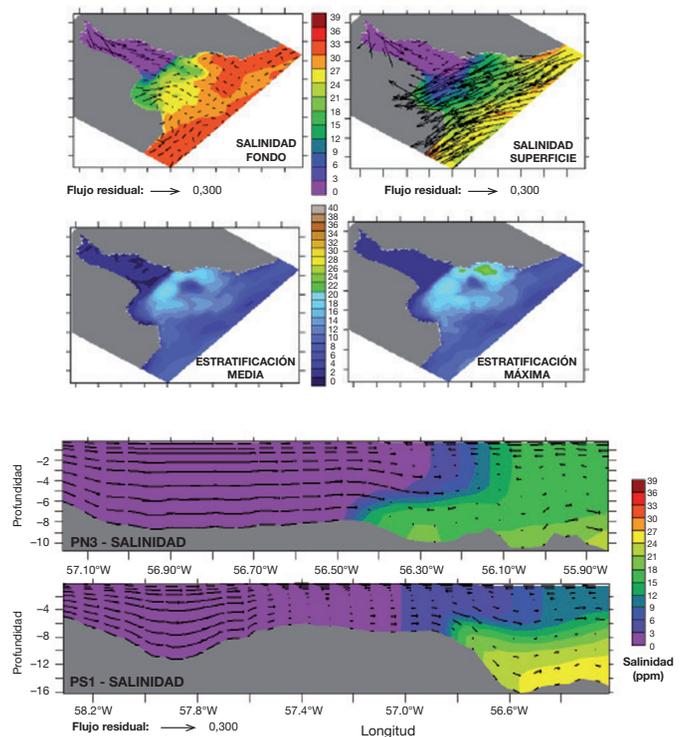


Figura 13. Caracterización del período de tormenta del sureste del 16 de febrero de 2010 (modelo MARS). Campos espaciales medios de salinidad (ppm) y flujo residual en el fondo y la superficie, estratificación (diferencia entre la salinidad del fondo y la superficie). Campo máximo de la estratificación salina. Perfiles verticales medios de salinidad y flujo residual en las secciones longitudinales PS1 y PN3; escala vertical correspondiente a la profundidad (m).

munes asociados a las mismas. El campo salino (fig. 13) presenta un ingreso de agua salada desde el océano principalmente por la costa norte. Se observa un flujo residual más intenso en relación con el de las situaciones de calma. La estratificación muestra valores medios en general en varias zonas del Río de la Plata menores que los obtenidos en las situaciones de calma. En los perfiles ubicados hacia la costa argentina se observa que durante la tormenta hay un patrón de flujo residual inverso (inverso en relación con el que se encuentra en situaciones de calma), con un ingreso (hacia el interior) neto por las capas superiores, y una salida (hacia el océano) por las capas inferiores. El campo salino presenta cierta estratificación en la vertical. En los perfiles ubicados hacia la costa norte se observa nuevamente un perfil de salinidad con menor nivel de estratificación, y un flujo residual invertido producto de los fuertes vientos del sureste.

En la figura 14 se presentan, a modo de ejemplo, los resultados obtenidos para la tormenta del sector sur-suroeste ocurrida durante agosto de 2010, los cuales presentan ciertos patrones comunes con las tormentas del norte-noroeste-oeste analizadas, y que difieren de los identificados para las tormentas generadas por vientos del sector sureste. Respecto al campo salino, se observa tanto en fondo como en superficie una pluma de descarga por la zona norte del Río de la Plata, y una leve estratificación media en la mayor parte de la zona de estudio, lo que indica una mezcla vertical del campo salino ocurrida durante la tormenta. El flujo residual presenta una descarga intensa por la costa norte del Río de la Plata, tanto en fondo como en superficie. Respecto a los perfiles verticales de salinidad, en general se observa que presentan condiciones de mayor mezcla en la vertical en relación con las situaciones de calma y de tormenta del sureste, principalmente sobre los perfiles del norte. En la costa sur el flujo residual es de descarga en la zona intermedia y entrante desde el océano, que presenta velocidades medias muy bajas en la zona del frente; en la costa norte se observa un perfil neto de descarga con velocidades muy ba-

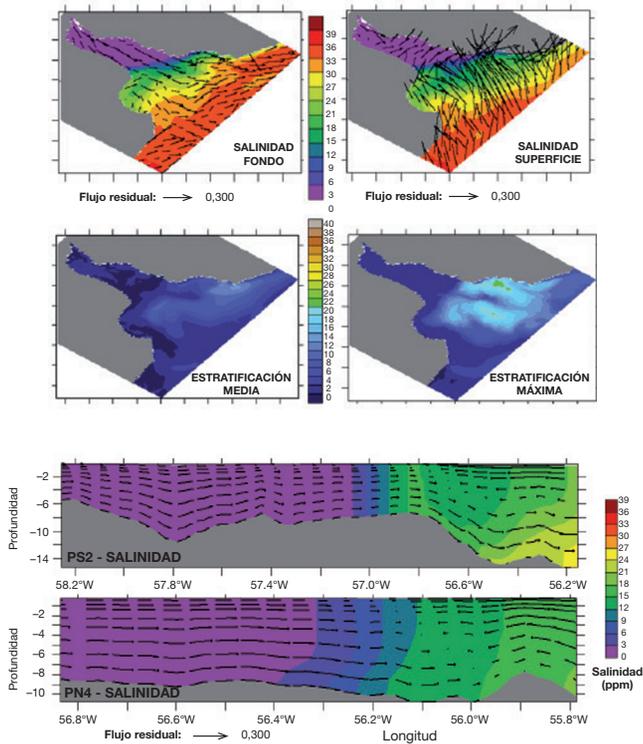


Figura 14. Caracterización del período de tormenta del sur-suroeste del 13-14 de agosto de 2010 (modelo MARS). Campos espaciales medios de salinidad (ppm) y flujo residual en el fondo y la superficie, estratificación (diferencia entre la salinidad del fondo y la superficie). Campo máximo de la estratificación salina. Perfiles verticales medios de salinidad y flujo residual en las secciones longitudinales PS2 y PN4; escala vertical correspondiente a la profundidad (m).

jas en la zona del frente y exterior. En particular, para la tormenta del sur-suroeste del 13 y 14 de agosto de 2010, el perfil de flujo residual de la costa sur muestra una descarga en la zona intermedia y un ingreso de flujo residual desde el océano que resulta en un flujo residual saliente por el fondo de la zona exterior, mientras que el perfil del norte muestra un ingreso de flujo desde el océano.

Para complementar el análisis anterior se extrajeron las series de salinidad obtenidas para dos años simulados con el MARS en la ubicación de las estaciones de medición 20, 21, 17, 22 y 24 que conforman una transecta en la zona del frente (fig. 1). A partir de las mismas se calcularon las series de estratificación y de salinidad promedio en la vertical. Se evaluó la correlación entre las series de estratificación y salinidad media en los distintos puntos y, a su vez, con el caudal fluvial. En la figura 15 se presenta, a modo de ejemplo, la variación tem-

poral de la estratificación obtenida durante agosto de 2010 en las cinco estaciones analizadas. Los resultados muestran que en las estaciones cercanas a la costa argentina hay menos estratificación que en las estaciones próximas a la costa uruguaya. Se evalúa también la existencia de correlación lineal entre las condiciones de estratificación en las estaciones estudiadas. Se obtiene una baja correlación entre la estación 24 (sobre la costa uruguaya) y las estaciones más cercanas a la costa argentina, con coeficientes de correlación menores de 0,5 en todos los casos. Las restantes estaciones presentan altas correlaciones entre sí, en todos los casos con coeficientes de correlación mayores de 0,65, y en particular se observa una muy alta correlación entre la estación 22 y la estación 17, donde el coeficiente es de 0,93. Por otra parte, se obtuvieron valores altos de correlación entre la estratificación y el caudal medio en la mayoría de las estaciones de control. Esto indicaría que mayores caudales fluviales incrementan la estratificación vertical del campo salino. No se observa esta relación sobre la costa uruguaya, de modo que otro forzante como el viento podría tener mayor incidencia en la zona.

5.4. Dinámica de sedimentos finos

A partir del análisis de la información puntual recopilada en las campañas oceanográficas en estaciones de monitorización a lo largo del Río de la Plata (Proyecto FREPLATA-FFEM) ha sido posible conocer varios aspectos de la dinámica del sedimento fino en la zona. Estas campañas están asociadas a situaciones climáticas de calma, es decir, condiciones habituales con flujos de poca energía, dominados por marea astronómica o eventos suaves de marea meteorológica, y vientos moderados. La información, por tanto, no es representativa de las situaciones de alta energía como las tormentas con vientos y oleaje fuertes que ocurren con cierta frecuencia en la zona.

Estos datos permiten identificar dos comportamientos bien claros en la dinámica del Río de la Plata. En la zona interior y en la parte superior de la zona intermedia se observan sedimentos en suspensión predominantemente limosos con bajo contenido de arcilla y sin arena, con concentraciones del entorno de los 50 mg/l, los cuales se clasifican como limos o limos ligeramente arcillosos. Hacia la parte inferior de la zona intermedia, las concentraciones comienzan a aumentar, principalmente sobre la parte cercana a la costa argentina, registrándose las máximas concentraciones (a profundidad media) en las estaciones cercanas a la Barra del Indio sobre la costa argentina. La composición del material en suspensión se mantiene en esa zona, pero sobre la costa uruguaya el contenido de arcilla se incrementa y el material comienza a transformarse en limo arcilloso. Este comportamiento define una transición hacia lo observado en la zona exterior. Esto se ha identificado tanto en las muestras de agua como en los perfiles de turbidez. Sobre dicha zona se produce la transición entre perfiles homogéneos y perfiles con cierta estratificación vertical, la

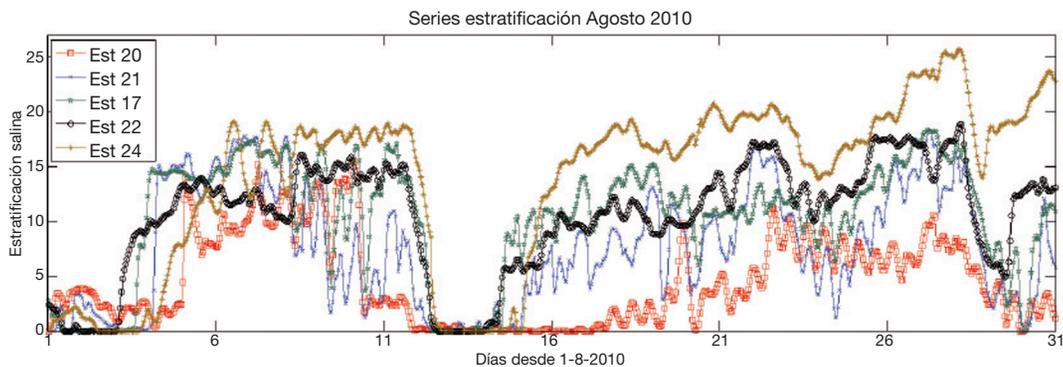


Figura 15. Evolución temporal de la estratificación obtenida con el modelo MARS durante agosto de 2010 en las estaciones de monitorización 20, 21, 17, 22 y 24.

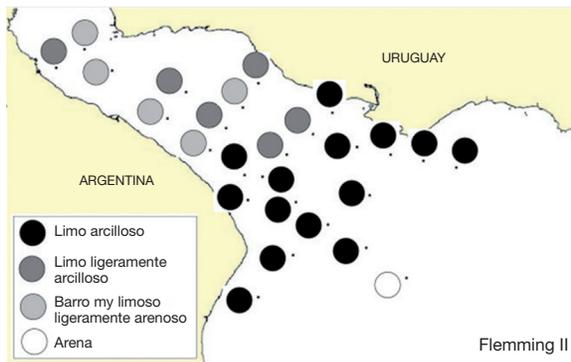


Figura 16. Clasificación del sedimento de fondo del Río de la Plata según los diagramas triangulares de Flemming II utilizando los datos del Proyecto FREPLATA-FFEM.

cual se visualiza fuertemente en la zona exterior asociada a la influencia del campo salino. En la zona interior los perfiles son homogéneos, con concentraciones medias. En la zona exterior comienza a participar la dinámica de fondo debido a las mayores profundidades. Los datos muestran concentraciones mayores de sedimento sobre el fondo, con una composición levemente variable respecto a la composición del sedimento a profundidad media. En la zona exterior predominan los materiales tipo arcilla limosa y arcilla.

El material del fondo de la zona estudiada del Río de la Plata está compuesto básicamente por material fino (barro), con una variación espacial entre las proporciones del material tipo arcilla y tipo limo. Hay un aumento gradual del contenido de material arcilloso entre el interior y el exterior, con mayores valores sobre la costa uruguaya, asociados también a un incremento en el contenido de materia orgánica y al contenido de agua. El material que se encuentra en suspensión es más fino que el material de fondo y presenta mayor variabilidad, pero se observa nuevamente una mayor proporción de material arcilloso sobre la zona exterior. Utilizando la clasificación completa presentada por Flemming [51], el sedimento fino de fondo en el Río de la Plata está formado por tres tipos, barro muy limoso ligeramente arcilloso y limo ligeramente arcilloso en la zona interior e intermedia, y limo arcilloso en la zona exterior y Barra del Indio (fig. 16).

Se exploró la correlación existente entre los perfiles de turbidez y los perfiles de salinidad medidos en cada estación de la zona exterior. En la mayoría de los casos, la correlación es alta y la comparación de

los perfiles normalizados muestra una forma similar en la variación de turbidez y salinidad en la dirección vertical, con mayores valores sobre el fondo. No obstante, en ciertos casos las correlaciones son negativas y valores altos de salinidad sobre el fondo corresponden a perfiles invertidos de turbidez, es decir, menores valores sobre el fondo. Estos dos comportamientos identificados podrían indicar diferentes procesos dominantes para cada caso. En las situaciones donde la forma de ambos perfiles es similar, la diferencia de densidades entre el fondo y el resto de la columna de agua impediría la mezcla vertical del sedimento resuspendido desde el fondo, y por tanto el sedimento permanece acotado a la zona inmediata al fondo. En cambio, en las situaciones donde los perfiles son invertidos sucede que el ingreso de agua de la zona exterior por el fondo (de mayor salinidad) no aporta sedimento en suspensión, y en cambio el flujo superficial proveniente de la zona intermedia sí. Estos dos comportamientos pueden entonces mostrar dos tipos de situaciones de transporte en la zona exterior asociado con el campo salino y los distintos tipos de flujo verticales asociados.

Resultados recientes obtenidos con el modelo de sedimentos finos MARS calibrado para la zona [29] muestran que la dinámica de sedimentos finos en el Río de la Plata está gobernada por dos tipos de forzantes hidrodinámicos diferentes en escala temporal y espacial, las mareas y las tormentas, y que esta responde de manera diferente según esté actuando uno u otro (o ambos). Esto genera una primera clasificación de la dinámica de sedimentos finos en todo el Río de la Plata, separando en condiciones de calma (sin oleaje de tormenta) y lo que se denomina condiciones de tormenta (con oleaje de tormenta). Así, los procesos de resuspensión, transporte y deposición serán diferentes según las condiciones predominantes. Por otra parte, el Río de la Plata es muy extenso y los mecanismos de transporte de sedimento presentan una zonificación importante asociada a las diversas condiciones hidrodinámicas condicionadas por la geometría y la batimetría. Es clara la división que existe en cuanto a procesos entre la zona interior-intermedia y la zona exterior del Río de la Plata; en las secciones anteriores se analizó cómo varían los procesos vinculados al campo salino y al campo de corrientes en dicha zona, y a continuación se describe cómo estos a su vez condicionan la dinámica de sedimentos finos.

Combinando estas dos clasificaciones es posible resumir las principales características de la dinámica de sedimentos finos en el Río de la Plata de la forma que se describe a continuación. Se ejemplifica en la figura 17 la dinámica de sedimentos finos asociada a condiciones de calma y tormenta.

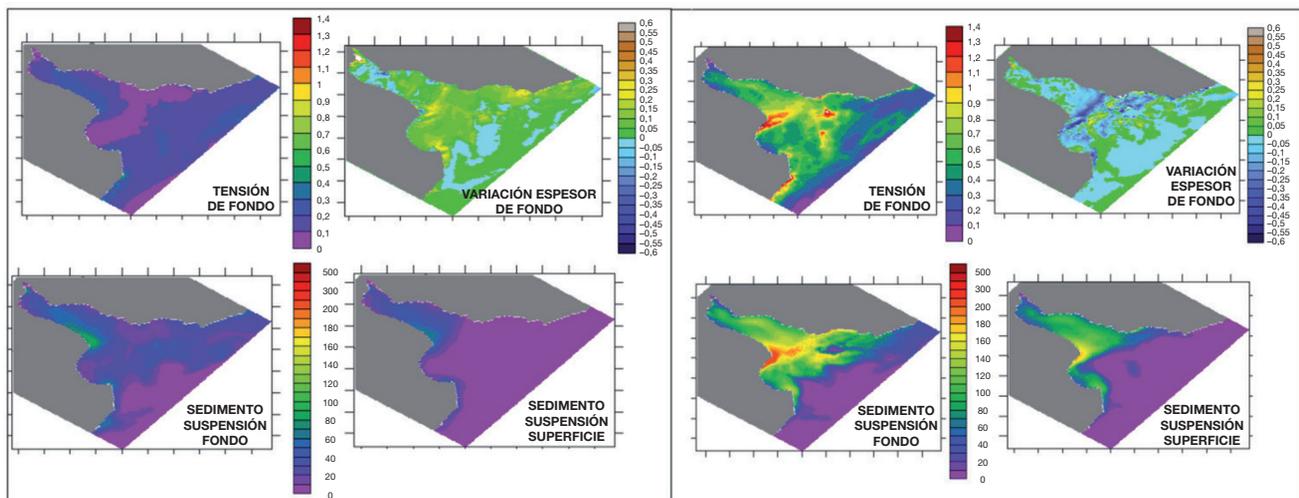


Figura 17. Caracterización del período de calma comprendido entre el 17 y el 23 de agosto de 2010 (paneles izquierdo) y caracterización del período de tormenta del sur-suroeste del 13 y 14 de agosto de 2010 (paneles derechos): campos espaciales medios de tensión de corte total de fondo (N/m^2), concentración (mg/l) de sedimento en suspensión en la superficie y en el fondo; campo de la variación (cm) del espesor del sedimento del fondo. Resultados obtenidos con el modelo numérico MARS.

1. En la zona interior-intermedia, las condiciones de marea (calma) semidiurna generan cuatro ciclos diarios (dos más intensos) de erosión, transporte y sedimentación del sedimento tipo limo (predominante en la zona) y de la arcilla, generando un valor de base de concentración de sedimento en suspensión en toda la columna de agua que fluctúa según la marea. El aporte de sedimento fino de los tributarios básicamente deposita en la zona interior cerca de la desembocadura, generando el avance del delta. En estas condiciones, las concentraciones en suspensión más elevadas se observan hacia el límite de la zona sobre la costa argentina, siendo en las restantes partes de la zona intermedia mayores en general sobre la costa argentina que sobre la costa uruguaya. Por otra parte, sobre la costa uruguaya se observa menor fluctuación diaria en la concentración, caracterizada básicamente por un pico diario debido a la mayor asimetría de marea en contraste con la zona sur, donde se observan dos picos bien marcados. En estas condiciones, el intercambio permanente con el sedimento de fondo genera que haya una variación leve del espesor del mismo con un patrón espacial caracterizado por erosión sobre la costa argentina y deposición en la costa uruguaya. El transporte neto de material (acumulado en los diversos ciclos cortos de resuspensión y sedimentación) en la zona es hacia la zona del frente, donde tanto las bajas corrientes residuales como el campo salino dificultan la descarga principalmente por la zona sur, generando deposición de material en dicha zona y un leve avance de la pluma superficial de poca concentración por la zona costera uruguaya.
2. En la zona exterior, durante condiciones de calma y predominio de la marea podemos diferenciar dos situaciones según el origen del material. Por un lado, en estas condiciones de calma el flujo no tiene capacidad para resuspender material de fondo y por tanto la dinámica de sedimentos es muy débil; solamente se observa resuspensión de material de fondo en el ciclo de marea en la zona del frente contra la costa argentina y en la zona sur de la Bahía de Samborombón. En estas condiciones, habitualmente el campo salino presenta estratificación y, por tanto, en la mayor parte de la columna de agua no se observa sedimento en suspensión. El sedimento de fondo no presenta casi variación en su composición y espesor. Sin embargo, otra situación se produce en la zona exterior cuando se tienen condiciones de calma pero posteriores a una tormenta, y por tanto en la zona exterior se encuentra material que arribó a la zona o que se erosionó durante la tormenta. En estas condiciones, la dinámica en la zona muestra una gran deposición de material en la zona del frente, y en las zonas costeras según el tipo de tormenta que haya ocurrido. Las arcillas que arriban a la zona exterior y permanecen en suspensión se transportan por los distintos patrones de flujo residual de la misma. Estos muestran un transporte de descarga más intenso por la zona costera uruguaya del material más fino que arriba a la zona, con cierta descarga por la zona central, y un menor transporte neto por la zona de Samborombón.
3. Durante las tormentas en la zona interior-intermedia del Río de la Plata se observan concentraciones de sedimento en suspensión mayores al valor de base característico de las condiciones de calma, pudiendo incluso las concentraciones más grandes ocurrir hacia la costa uruguaya y no en la costa argentina, dependiendo de la intensidad de la tormenta. En estas condiciones, todos los procesos identificados durante las calmas se intensifican, observándose descensos importantes del espesor del sedimento del fondo producto de las fuertes erosiones. Además, se observa un transporte intenso de sedimento en suspensión manteniendo el patrón observado en condiciones de calma, es decir, desde la zona interior hacia la costa uruguaya y desde la costa intermedia argentina también hacia la costa uruguaya, lo que genera que arribe gran cantidad de sedimento en suspensión hacia la zona del frente. Dependiendo del tipo de tormenta y de las condiciones de estratificación en la zona exterior, el material avanzará por la costa uruguaya o por la costa

argentina, observándose en todas las condiciones un avance del frente de turbidez en toda la sección en relación con las condiciones de calma.

4. En la zona exterior durante las tormentas se produce una dinámica de sedimento intensa, compleja y de gran escala espacial. Estas situaciones cambian todos los patrones observados en esta zona en condiciones de calma, en cuanto a patrones de erosión, deposición, concentración en suspensión, etc. Las tormentas generan resuspensión en gran parte de la zona exterior, lo que implica una gran cantidad de sedimento en suspensión y, por tanto, un incremento muy alto de las concentraciones (principalmente en la capa de fondo) respecto al valor de base. Durante las mismas se erosiona material depositado en el frente proveniente de la zona intermedia durante las calmas. Se observan patrones espaciales con mayores concentraciones en la zona inmediata al frente y en las zonas costeras. Dependiendo de las condiciones de estratificación, el sedimento resuspendido podrá mezclarse en toda la columna de agua, incluso con el sedimento que proviene de la zona intermedia. Se observan dos situaciones bien diferenciadas con una gran descarga por la zona costera uruguaya de sedimento o descarga por la costa argentina según las tormentas provengan del sector oeste o sean sudestadas, principalmente. Tras estas condiciones de fuerte resuspensión permanece en suspensión mucho sedimento de fondo, y las condiciones de calma posteriores a la misma serán las que determinen el flujo de sedimentos en la zona y su patrón de deposición.

6. Síntesis y conclusiones

Se ha presentado una recopilación de diversos avances llevados a cabo en la comprensión y modelación de la dinámica del Río de la Plata, tanto en lo que respecta a su hidrodinámica, como a la dinámica del campo de salinidad y de sedimentos finos. El objetivo ha sido estudiar las principales características del comportamiento del cuerpo de agua destacando la complejidad del problema, mostrar las diversas herramientas y metodologías empleadas por nuestro grupo de investigación para su estudio, y presentar algunos de los principales resultados obtenidos.

Las herramientas de modelación numérica han mostrado ser fundamentales para el estudio del Río de la Plata, dada la interacción de aportes continentales con oceánicos y la fuerte dependencia de las condiciones meteorológicas. Por otra parte, los esfuerzos de medición en campo, que naturalmente no son sencillos por las dimensiones del Río de la Plata, son igualmente importantes en tanto permiten extraer conclusiones acerca de su dinámica y son la base para la calibración y validación de los modelos numéricos.

En lo que respecta a la propagación de la marea en el Río de la Plata, el estudio de series observadas en diversas estaciones mareográficas y los resultados de los modelos numéricos implementados han permitido comprender los aspectos fundamentales de la generación y propagación de las componentes astronómica y meteorológica. Existe una clara diferencia entre el comportamiento observado en la zona interior-intermedia y la zona exterior. Estas zonas quedan separadas por la zona del frente, donde coincide la expansión de la sección con un incremento de profundidad. Esto hace que el campo salino que ingresa desde el océano llegue hasta dicha zona con mayor intensidad en las zonas profundas, donde la estratificación salina es más marcada. Esto determina que las velocidades residuales en la zona intermedia sean fundamentalmente bidimensionales, típicas de una descarga fluvial (transporte neto hacia el exterior). Por otro lado, la zona exterior presenta patrones más complejos de características tridimensionales, con flujo mayormente entrante hacia el continente en las zonas profundas y un flujo de descarga por las zonas costeras, menos profundas. Finalmente, en la zona del frente la corriente residual es casi nula. Además de esta clara diferencia espacial, las condiciones meteo-

rológicas muestran tener una influencia determinante, por lo que es fundamental la caracterización de corrientes, salinidad y sedimentos finos, tanto para escenarios de calma como de tormenta.

Agradecimientos

El estudio presentado es fruto de varios años de trabajo durante los cuales el apoyo de varias instituciones ha sido fundamental. Se destacan en particular los convenios de asesoramiento técnico realizados con la Intendencia Municipal de Montevideo (IMM) y la Administración Nacional de Puertos (ANP); los proyectos de investigación apoyados por el Programa de Desarrollo Tecnológico PDT (S_C_OP_70_01, S_C_OP_19_04); las becas de Maestría y Doctorado otorgadas por la Comisión Sectorial de Investigación Científica de la UdelaR (CSIC) y los proyectos de investigación financiados (Programas I+D 2004, 2008 y 2012); los proyectos de investigación apoyados por FREPLATA financiados por PNUD y FFEM; las becas de iniciación (INI_X_2012_1_4400, INI_X_2012_1_4411), maestrías (2009_1473, 2009_829) y doctorado (2012_1_8876) otorgadas por la Agencia Nacional de Investigación e Innovación.

Bibliografía

- [1] Wells PG, Daborn GR. Eds. El Río de la Plata. Una Revisión Ambiental. Un informe de antecedentes del Proyecto ECOPLATA. Halifax, Nova Scotia, Canadá: Dalhousie University; 1998.
- [2] ECOPLATA. Diagnóstico ambiental y socio-demográfico de la zona costera uruguaya del Río de la Plata. Recopilación de informes técnicos. ECOPLATA: Apoyo a la gestión integrada de la zona costera uruguaya del Río de la Plata. 1999.
- [3] FREPLATA. Análisis diagnóstico transfronterizo del Río de la Plata y su frente marítimo. Documento Técnico. Proyecto Protección Ambiental del Río de la Plata y su frente marítimo. Proyecto PNUD/GEF/RLA/99/G31. 2004.
- [4] Fossati M, Piedra-Cueva I. A 3D hydrodynamic numerical model of the Río de la Plata and Montevideo's coastal zone. *Appl Math Modell.* 2013; 37: 1310–32.
- [5] Framiñan M, Brown O. Study of the Río de la Plata turbidity front, Part I: spatial and temporal distribution. *Continental Shelf Research.* 1996; 16: 727–42.
- [6] Guerrero RA, Acha ME, Framiñan ME, Lasta C. Physical Oceanography of the Río de la Plata Estuary. *Continental Shelf Research.* 1997; 17: 727–42.
- [7] Piola AR, Guerrero RA, Osiroff AP, Molinari G. Climatología de frentes y estratificación del Río de la Plata. 5.^{as} Jornadas Nacionales de Ciencias del Mar. Mar del Plata, Argentina; 2003.
- [8] Sepúlveda H, Valle-Levinson A, Framiñan M. Observations of subtidal and tidal flow in the Río de la Plata Estuary. *Continental Shelf Research.* 2003; 24: 509–25.
- [9] Simionato CG, Meccia V, Dragani W, Núñez M. Barotropic tide, barotropic tide and baroclinic waves observations in the Río de la Plata estuary. *Journal of Geophysical Research.* 2005; 110.
- [10] Acha EM, Mianzan H, Guerrero R, Carreto J, Gilberto D, Montoya N, et al. An overview of physical and ecological processes in the Río de la Plata Estuary. *Continental Shelf Research.* 2008; 28: 1579–88.
- [11] Boschi EE. El ecosistema estuarial del Río de la Plata (Argentina y Uruguay). *An Inst Cienc Mar Limnol.* 1998; 15: 159–82.
- [12] Fossati M, Piedra-Cueva I. Numerical modelling of residual flow and salinity in the Río de la Plata. *Appl Math Model.* 2008; 32: 1066–86.
- [13] Menéndez A, Sarubbi A. A model to predict the Paraná delta front advancement, workshop on morphodynamic processes in large lowland rivers. Santa Fe, Argentina; 2007.
- [14] Simionato CG, Dragani W, Núñez M, Engel M. 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. *Journal of Coastal Research.* 2004; 20: 893–912.
- [15] Simionato CG, Dragani W, Meccia V, Núñez M. A numerical study of the barotropic circulation of the Río de la Plata estuary: sensitivity to bathymetry, the Earth's rotation and low frequency wind variability. *Estuarine, Coastal and Shelf Science.* 2004; 61: 261–73.
- [16] Simionato CG, Meccia VL, Dragani WC, Núñez MN. On the use of the NCEP/NCAR surface winds for modeling barotropic circulation in the Río de la Plata Estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science.* 2006; 70: 195–206.
- [17] Simionato C, Berasategui A, Meccia VL, Acha M, Mianzan H. Short time-scale wind forced variability in the Río de la Plata Estuary and its role on ichthyoplankton retention. *Estuarine, Coastal and Shelf Science.* 2008; 76: 211–26.
- [18] Palma ED, Matano RP, Piola AR. A numerical study of the Southwestern Atlantic Shelf circulation: Barotropic response to tidal and wind forcing. *Journal of Geophysical Research.* 2004; 109.
- [19] Palma ED, Matano RP, Piola AR. A numerical study of the Southwestern Atlantic Shelf circulation: Stratified ocean response to local and offshore forcing. *Journal of Geophysical Research.* 2008; 113.
- [20] Glorioso P, Flather R. A barotropic model of the currents off SE South America. *Journal of Geophysical Research.* 1995; 100: 13427–40.
- [21] Menéndez AN. Sistema HIDROBID II para simular corrientes en cuencos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería.* 1990; 6.
- [22] Re M, Menéndez AN. Impacto del cambio climático en las costas del Río de la Plata. *Revista Internacional de Desastres Naturales.* 2007; 7.
- [23] FREPLATA. Estudio de la dinámica hidrosedimentológica del Río de la Plata: observación y modelación numérica de los sedimentos finos. Proyecto FREPLATA-FFEM, convenio de cooperación N.º CZZ 1268.01. 2011.
- [24] Moreira D, de los Campos T, Capeluto Ware A, Guerrero R, Repecaud M, Le Bihan C, et al. Estudio del transporte de sedimentos en el Río de la Plata: campañas oceanográficas. *Memorias del XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Punta del Este, Uruguay;* 2010.
- [25] Moreira D, Simionato CG, Gohin F, Cayocca F, Tejedor MLC. Suspended matter mean distribution and seasonal cycle in the Río de la Plata estuary and the adjacent shelf from ocean color satellite (MODIS) and in-situ observations. *Continental Shelf Research.* 2013; 68: 51–66.
- [26] Fossati M, Moreira D, Simionato CG, Cayocca F, Tessier C, Sarubbi A, et al. Estudio del transporte de sedimentos en el Río de la Plata: primeros resultados de la modelación numérica. *Memorias del XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Punta del Este, Uruguay;* 2010.
- [27] Lazure P, Dumas F. An external-internal mode coupling for a 3D hydrodynamical model for applications at regional scale (MARS). *Advances in Water Resources.* 2008; 31: 233–50.
- [28] Huret M, Dadou I, Dumas F, Lazure P, Garçon V. Coupling physical and biogeochemical processes in the Río de la Plata plume. *Continental Shelf Research.* 2005; 25: 629–53.
- [29] Fossati M. Dinámica global de sedimentos finos en el Río de la Plata. Tesis de Doctorado en Mecánica de los Fluidos Aplicada, IMFIA, Facultad de Ingeniería; 2013.
- [30] Fossati M, Cayocca F, Piedra-Cueva I. Fine sediment dynamics in the Río de la Plata. *Adv Geosci.* 2014; 39: 75–80.
- [31] King IP. RMA-10. A finite element model for three-dimensional density stratified flow. Davis, California: University of California, Department of Civil and Environmental Engineering; 2003.
- [32] Piedra-Cueva I, Fossati M. Residual currents and corridor of flow in the Río de la Plata. *Applied Mathematical Modelling.* 2007; 31–3: 564–77.
- [33] Santoro P, Fossati M, Piedra-Cueva I. Characterization of circulation patterns in Montevideo Bay (Uruguay). *Journal of Coastal Research.* 2013; 29: 819–35.
- [34] Fossati M, Santoro P, Urrestarazu S, Piedra-Cueva I. Numerical study of the effect of a power plant cooling water discharge in the Montevideo Bay. *Journal of Applied Mathematics.* 2011; 1–23.
- [35] Mateus M, Neves R (eds.). Ocean modelling for coastal management: Case studies with MOHID. IST Press; 2013.
- [36] Fossati M, Fernández M, Piedra-Cueva I. Determination of a submarine outfall discharge location based on a 3D hydrodynamic-lagrangian high resolution model implemented for the Río de la Plata in South America. Libro: Ocean modelling for coastal management a Case studies with MOHID. Lisboa: IST Press; 2013; p. 69–82.
- [37] Santoro P, Fernández M, Fossati M, Cazes G, Terra R, Piedra-Cueva I. Pre-operational forecasting of sea level height for the Río de la Plata. *Appl Math Modell.* 2011; 35: 2462–78.
- [38] Santoro P, Fossati M, Piedra-Cueva I. Study of the meteorological tide in the Río de la Plata. *Continental Shelf Research.* 2013; 60: 51–63.
- [39] Michalakes J, Dudhia J, Gill D, Henderson T, Klemp J, Skamarock W, et al. The Weather Research and Forecast Model: Software Architecture and Performance. Proceedings of the Eleventh ECMWF Workshop on the Use of High Performance Computing in Meteorology. Eds. Walter Zwiefelhofer and George Mozdzynski. World Scientific. 2005; p. 156–68.
- [40] MARETEC. Hydrodynamic Module (Mohid) User Guide, Instituto Superior Técnico–Maretec, MOHID Water System Model.
- [41] Fernández M. Revisión de un modelo regional de marea astronómica implementado sobre la región suroeste del Océano Atlántico. Tesis de Maestría en Mecánica de los Fluidos Aplicada. IMFIA, Facultad de Ingeniería; 2011.
- [42] Saha S, Moorthi S, Pan HL, Wu X, Wang J, Nadiga S, et al. The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Bull Amer Meteor Soc.* 2010; 91: 1015–57.
- [43] Martínez C, Santoro P, Alonso R, Fossati M, Piedra-Cueva I. Desarrollo de un sistema de simulación de largo alcance temporal de la dinámica del Río de la Plata: Modelo ASide. XXV Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Chile; 2014.
- [44] Le Hir P, Bassoullet P, Jestin H. Application of the continuous modeling concept to simulate high-concentration suspended sediment in a macrotidal estuary. En: McAnally W, Mehta A (eds.). *Coastal and Estuarine Fine Sediment Processes.* 2001; p. 229–7.
- [45] Booij N, Ris RC, Holthuijsen LH. A third-generation wave model for coastal regions, 1. Model description and validation. *Journal of Geophysical Research.* 1999; 104: C4.
- [46] Ardhuin F, Rogers E, Babanin AV, Filipot JF, Magne R, Roland A, et al. Semiempirical dissipation source functions for ocean waves. Part I: Definition, Calibration, and Validation. *Journal of Physical Oceanography.* 2010; 40: 1917–41.
- [47] Fossati M, Bellón D, Lorenzo E, Piedra-Cueva I. Currents measurements in the coast of Montevideo, Uruguay. En: RCEM 2009 Proceedings of the River, Coastal and Estuarine Morphodynamics. Santa Fe, Argentina; September 2009.
- [48] Pedocchi F, Fossati M, Mosquera R, Bellón D, Piedra-Cueva I. Waves, currents, and suspended sediment measurements in the Río de la Plata in front of Montevideo, Uruguay. Salt Lake City, Utah: Proceedings Internacional, Hydraulic Measurements and Experimental Methods; 2012.

- [49] Hanson JL, Phillips OM. Automated analysis of ocean surface directional wave spectra. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, AMS. 2001; 18: 2052-62.
- [50] Bellón D, Piedra Cueva I. Estimating suspended solids concentrations from Acoustic Doppler Current Profiles measurements on the coast of Montevideo, Uruguay. En: Vionnet C, García MH, Perillo GME, Latrubesse EM (eds). *River, Coastal and Estuarine Morphodynamics*. RCEM 2009. Florida: CRC Press; 2009; p. 1045-50.
- [51] Flemming BW. A revised textural classification of gravel-free muddy sediments on the basis of ternary diagrams. *Continental Shelf Research*. 2000; 20: 1125-37.