

XXVI CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA SANTAGO, CHILE, AGOSTO 2014

PRINCIPALES PATRONES DE TRANSPORTE DEL SEDIMENTO FINO EN EL RÍO DE LA PLATA

Mónica Fossati¹, Florence Cayocca², Ismael Piedra-Cueva¹

(1) Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA), Uruguay

*(2) Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer (IFREMER), Francia
mfossati@fing.edu.uy, Florence.Cayocca@ifremer.fr, ismaelp@fing.edu.uy*

RESUMEN:

Se investigan en este estudio los patrones principales del transporte de sedimentos finos en las distintas zonas del Río de la Plata (RP), zona intermedia, transición y zona exterior. La metodología combina el análisis de nuevas mediciones de campo y de resultados de simulaciones de 2 años obtenidas con un modelo numérico hidrodinámico y de sedimentos finos calibrado para el área (MARS3D). Los resultados permiten describir el origen del sedimento que se acumula en el Río de la Plata y la contribución relativa de los aportes fluviales y de la erosión del sedimento de fondo local en el material total que se encuentra en suspensión. El análisis de los resultados del modelo y de los datos recolectados generó la definición de varias zonas que exhiben una dinámica de sedimentos finos distinta. En la zona intermedia, la dinámica de sedimentos está influenciada principalmente por las descargas fluviales. En la zona intermedia y exterior, la erosión del material de fondo y los procesos de deposición determinan las características del sedimento en suspensión. La costa sur de la zona intermedia presenta una dinámica dominada por las mareas astronómicas y meteorológicas mientras que sobre la costa uruguaya domina el efecto del oleaje. En la zona exterior la dinámica es gobernada por las olas y por la influencia de la estratificación vertical de salinidad sobre los perfiles de sedimento en suspensión.

ABSTRACT:

This paper investigates the main fine sediments transport patterns in the Río de la Plata (RP) intermediate, transition (frontal) and outer zones. The methodology combines the analysis of new field measurements and two-year simulation results obtained with a numerical model for sediment dynamics (MARS3D). The results allowed us to describe the source of sediment accumulation in the RP and the relative contributions of river inputs and local erosion in the overall suspended material. The analysis of the model results and the collected data lead to the definition of several zones exhibiting different types of sediment dynamics in the area. In the inner zone, the sediment dynamics is mainly influenced by the fluvial discharges. In the intermediate and outer zones, bottom erosion and deposition processes determine the suspended sediment characteristics. The southernmost part of the intermediate zone, close to the Argentinean coast is dominated by the astronomical and meteorological tides whereas the Uruguayan coast is dominated by wave effects. The outer zone dynamics is governed by the waves, and the influence of the vertical salinity stratification determines the vertical suspended sediment profiles.

PALABRAS CLAVES:

Sedimento cohesivo, Río de la Plata, patrones de transporte

INTRODUCCIÓN

El Río de la Plata (RP) (Figura 1) es un extenso cuerpo de agua ubicado y compartido entre Argentina y Uruguay. El 97% de la descarga continental de agua dulce proviene de los ríos Paraná y Uruguay con un caudal medio anual de 22.000 m³/s. El RP tiene una compleja dinámica río-estuario-océano dividiéndose en dos zonas según un cambio abrupto topográfico denominado Barra del Indio ubicado entre Montevideo y Punta Piedras donde se incrementa tanto la batimetría como la sección lateral y donde se ubica el frente de salinidad (Sepúlveda, et al., 2003). La carga de sedimento en suspensión al RP proviene principalmente del río Paraná con 160 millones de toneladas al año de arena fina, limo y arcillas. La arena fina deposita principalmente en la cabeza del RP siendo responsable de la progradación del frente del delta del Paraná (Menéndez and Sarubbi, 2009). El sedimento cohesivo fino fluvial alcanza la zona inicial (interior) del Río de la Plata. El estudio del frente de turbidez del Río de la Plata utilizando imágenes satelitales presentada por Framiñan y Brown (1996) concluye que la ubicación de frente de turbidez se relaciona con la topografía de fondo coincidiendo con la isobata de 5 m en la costa Sur y siguiendo Barra del Indio en la zona de transición.

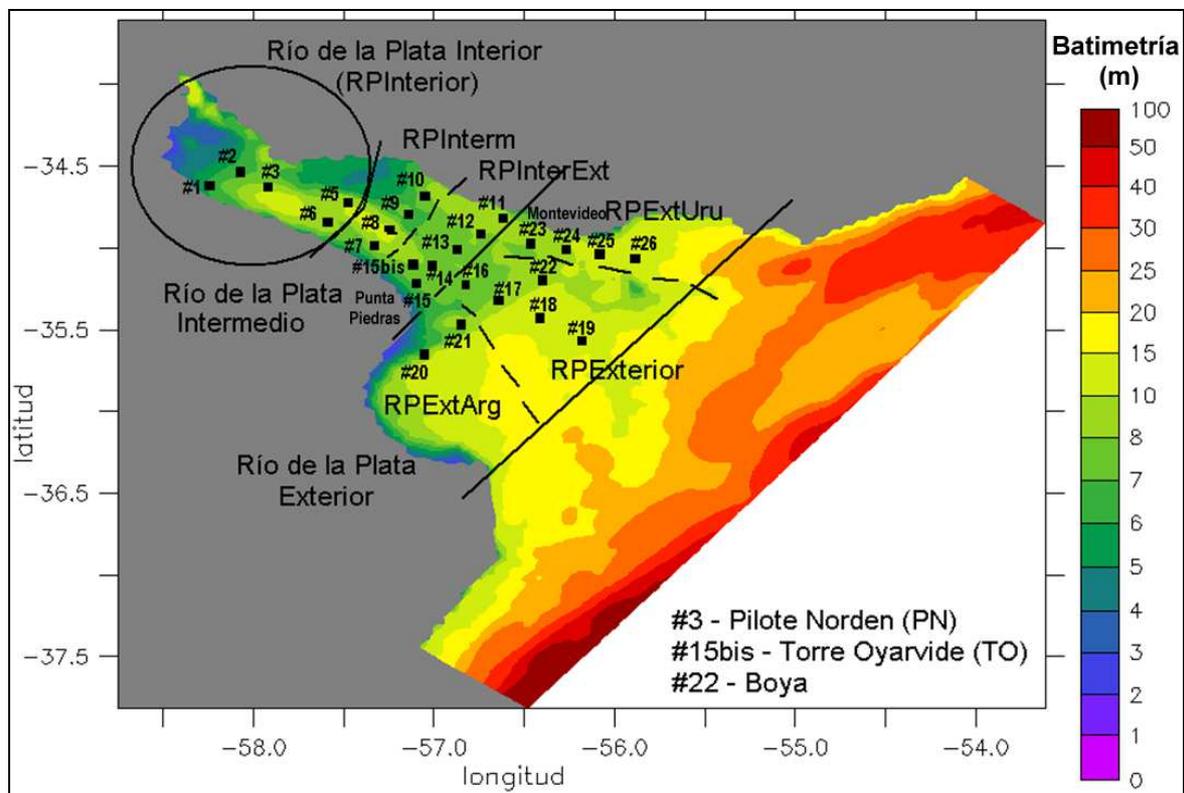


Figura 1.- Ubicación, batimetría, estaciones de medición y zonas del Río de la Plata.

El objetivo de este trabajo es determinar los patrones principales de transporte de los sedimentos finos en la zona intermedia, en la zona de transición (frente) y en la zona exterior del Río de la Plata. La metodología combina el análisis de información de campo disponible (Moreira et al, 2010) y de los resultados de simulaciones numéricas obtenidas con el modelo MARS3D calibrado para el área (Fossati et al, 2012).

Los nuevos datos incluyen series temporales hidrodinámicas (temperatura, salinidad, corrientes) y de turbidez durante varios meses en 3 estaciones, perfiles verticales de CTD y turbidez adquiridos durante 6 campañas distribuidas en 13 meses, y extracción de material en suspensión y de fondo en 26 estaciones. Las mediciones comenzaron en noviembre 2009 y finalizaron en diciembre 2010. En etapas previas el modelo hidrodinámico y de sedimentos finos tridimensional MARS3D (Lazure and Dumas, 2008, Le Hir et al., 2011) se implementó en el área. El modelo

calcula la erosión, advección y deposición de distintas fracciones de sedimentos (en este caso se incluyeron limo y arcilla). La erosión generada por el oleaje se incluye considerando resultados del modelo de oleaje SWAN (Booij et al, 1999). El modelo hidrodinámico, el modelo de oleaje y el modelo de sedimentos finos fueron calibrados en estudios previos (Fossati et al, 2012).

METODOLOGÍA

Las series medidas de turbidez se analizaron y correlacionaron con las tensiones de corte de fondo (generadas por las corrientes de marea y por el oleaje) obtenida con los modelos numéricos. La concentración de sedimento y la distribución de tamaño de grano de las muestras de agua así como también la información de los perfiles del CTD recolectadas durante las campañas de medición en las 26 estaciones fueron analizadas obteniendo la variabilidad temporal y espacial de los mismos a lo largo del Río de la Plata. Por otra parte se calculó la correlación entre los perfiles de turbidez y de salinidad recolectados en la zona de transición y exterior del RP. Las características del sedimento de fondo obtenidas del análisis de las muestras de fondo recolectadas también fueron analizadas desde el punto de vista espacial y temporal. Utilizando la distribución del tamaño de sedimento de fondo se obtuvo una nueva clasificación textural utilizando la metodología propuesta en (Flemming, 2000).

En relación al modelo numérico se trabaja con el período de dos años completos 2009-2010 por la disponibilidad de los forzantes. Se realiza un análisis exhaustivo de la dinámica de sedimentos finos durante los dos años simulados determinando la evolución del sedimento en suspensión y del sedimento de fondo. En particular se analizan las series temporales y los patrones espaciales tanto del sedimento en suspensión en la columna de agua como del sedimento de fondo. Los resultados obtenidos muestran una gran variabilidad de la dinámica en función de la zona del Río de la Plata, donde los forzantes corrientes y tormentas presentan diversas características. Además, en la zona exterior el campo salino es determinante en la dinámica de sedimento cohesivo. De esta manera es posible determinar zonas de dinámica de sedimentos cohesivos diferente en el Río de la Plata.

Por último, se utiliza el modelo para evaluar hacia dónde se dirige el sedimento de fondo del Río de la Plata, y para determinar de dónde proviene el sedimento en suspensión que se observa en las diversas áreas del mismo. Esto se realizó dividiendo el fondo del Río de la Plata en 10 zonas diferentes, definidas según los principales aspectos de la dinámica determinados en los análisis anteriores. Para cada zona se definieron dos variables del modelo, el sedimento tipo limo y el sedimento tipo arcilla, y se realizó una simulación de 12 meses de duración. Las fracciones de limo y arcilla provenientes de los tributarios también fueron marcadas durante las simulaciones. Analizando la evolución temporal del sedimento originario de cada zona se determinan nuevos elementos sobre el transporte de sedimento fino en la zona de estudio.

RESULTADOS OBTENIDOS

Mediciones continuas

Gran parte de las medidas de turbidez registradas en la zona exterior del RP, Boya (Figura 2(d)), son valores nulos, los cuales representan el 58% de los datos. La variación temporal muestra una variabilidad de la señal de turbidez asociada a eventos de aumento y disminución de turbidez principalmente. Analizando simultáneamente la variabilidad de las señales de turbidez y tensión de fondo total (dominada por la tensión de fondo generada por el oleaje que en promedio representa el 65% de la tensión total) se observa claramente que los eventos de aumento de turbidez coinciden con eventos de aumento de la tensión de corte consecuencia de las tormentas en la zona (Figura 2). Los factores de correlación obtenidos entre la serie de turbidez y las tensiones de corte total, por

corrientes y por oleaje, iguales a 0,4165, 0,1890 y 0,4186, respectivamente, certifican dicho comportamiento. Se observa también que prácticamente no hay eventos de aumento de turbidez durante los períodos de calma predominantes. Respecto a la relación entre la serie de turbidez y la salinidad, se obtuvo para este período de medición un valor bajo igual a 0,16.

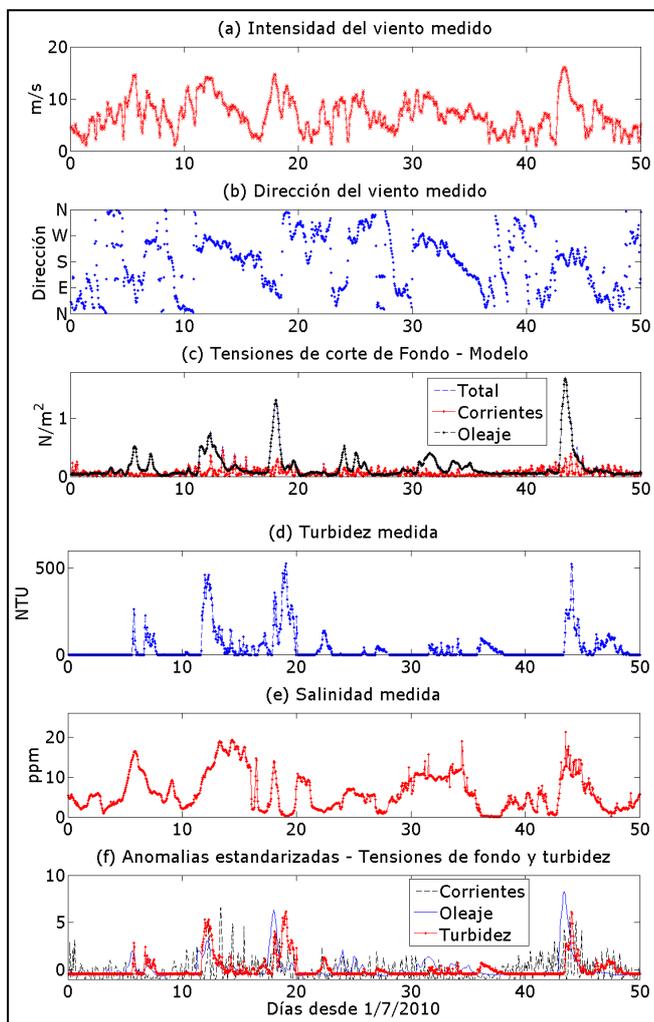


Figura 2.- Variación temporal: (a) y (b) del viento medido, (c) de las tensiones de corte de fondo obtenidas con el modelo, (d) de la turbidez medida, (e) de la salinidad medida y (f) de las anomalías estandarizadas de las tensiones de fondo y de la turbidez, en la Boya a partir del 1/7/2010.

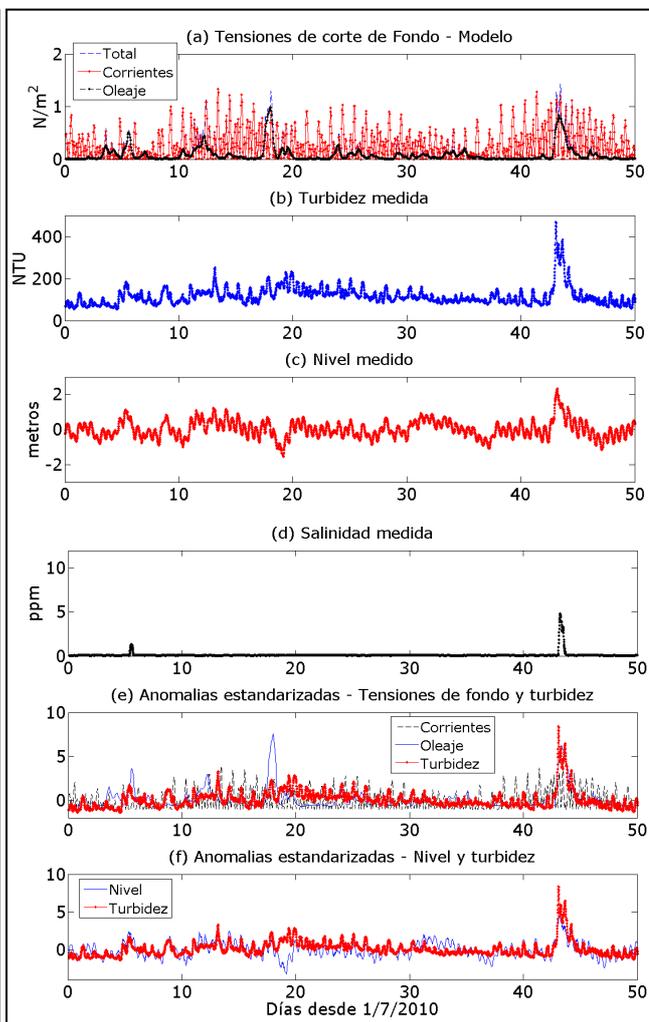


Figura 3.- Variación temporal: (a) de las tensiones de corte de fondo obtenidas con el modelo, (b) de la turbidez medida, (c) del nivel medido, (d) de la salinidad medida, (e) de las anomalías estandarizadas de las tensiones de fondo y de la turbidez y (f) de las anomalías estandarizadas de nivel y turbidez, en Torre Oyarvide a partir del 1/7/2010.

Para la estación Torre Oyarvide se analiza la serie de concentración de sedimento en suspensión obtenida a partir de la serie de turbidez medida y de una relación lineal ajustada al utilizar información de muestras de agua extraída durante tres campañas en dicha estación. A modo de ejemplo se presentan en la Figura 3 los resultados obtenidos para las mediciones durante julio y agosto 2010. Visualmente no se observa una clara correlación entre la señal de turbidez y la serie de tensión total de fondo. En esta zona la tensión de corrientes de marea predomina y en promedio representa el 76% de la tensión de corte total. En algunos casos se observa cierta correlación entre los eventos de aumento de turbidez y los eventos de tormenta, como se observa para el caso del día 50 del período de medición. Los factores de correlación obtenidos entre la serie medida de turbidez y las tensiones de corte total, por corrientes y por oleaje son 0,3180, 0,1650 y 0,5442,

respectivamente, observándose una mayor correlación entre la turbidez y el oleaje. En relación a la señal de nivel, se observa coincidencia en varios eventos entre la frecuencia del nivel y la frecuencia de la señal de turbidez, y el factor de correlación entre ambas series es 0,5599. La señal de salinidad presenta solamente dos eventos durante el período analizado de aumento de salinidad, los cuales coinciden con tormentas, picos de turbidez y valores altos de nivel asociado a eventos meteorológicos. El factor de correlación obtenido entre salinidad y turbidez es 0,4457.

Mediciones puntuales durante campañas

A partir del análisis de la información puntual recolectada reiteradamente durante varias campañas oceanográficas en estaciones de monitoreo a lo largo de gran parte del Río de la Plata es posible conocer varios aspectos de la dinámica de 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, con 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 RP. 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 identifica en las muestras de agua y en los perfiles de turbidez. Sobre dicha zona se produce la transición entre perfiles homogéneos y perfiles con cierta estratificación vertical, la 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 en Flemming (2000), el sedimento fino de fondo en el RP 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 (Figura 4 panel izquierdo).

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 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.

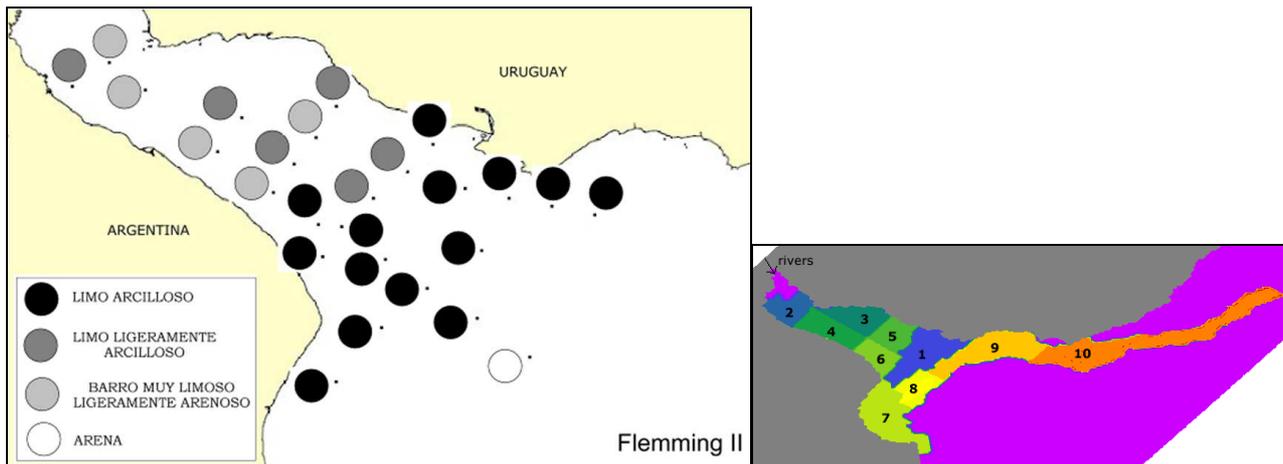


Figura 4.- Panel izquierdo: clasificación del sedimento de fondo del Río de la Plata según los diagramas triangulares de Flemming II utilizando los datos del Proyecto FREPLATA-FFEM. Panel derecho: definición de las 10 zonas en las cuales se divide el fondo del Río de la Plata según las características principales de la dinámica de sedimentos finos.

Modelo numérico

La dinámica de sedimentos finos espacial en todo el Río de la Plata durante situaciones de calma y de tormenta se analiza utilizando el modelo numérico implementado. En las Figuras 5 y 6 se presentan, entre otros, los campos medios de concentración de sedimento en suspensión en fondo y superficie, salinidad y flujo residual obtenidas con el modelo durante condiciones de calma y tormenta. El modelo permite extender el análisis realizado a la dinámica en las estaciones fijas a partir de las mediciones continuas, o el realizado en condiciones de calma mediante los datos recolectados durante las campañas puntuales, a todo el Río de la Plata y otras condiciones climáticas. La dinámica de sedimento fino en el Río de la Plata en la escala temporal corta depende de la región (intermedia vs exterior) y de las condiciones climáticas (calma vs tormenta). La zona intermedia es un área con valores de turbidez uniformes en la vertical debido a la intensa erosión de fondo por las mareas y el caudal fluvial; no hay condiciones de estratificación y durante las tormentas la resuspensión de sedimento de fondo se intensifica fuertemente. En la zona exterior hay bajos niveles de turbidez cerca del fondo principalmente atrapados por la estructura vertical de salinidad (condiciones estratificadas) durante los períodos de calma. Sin embargo, durante las tormentas el oleaje es fuerte y se observan altos niveles de turbidez debido a la resuspensión del material de fondo. Además, durante los eventos no hay estratificación salina en la columna de agua (principalmente cerca de la zona intermedia y en las áreas costeras) lo que permite la mezcla vertical del sedimento fino. Luego de las tormentas, los sedimentos se redistribuyen por los patrones de las corrientes tridimensionales en la zona exterior y las áreas de deposición dependen de la estructura del campo salino.

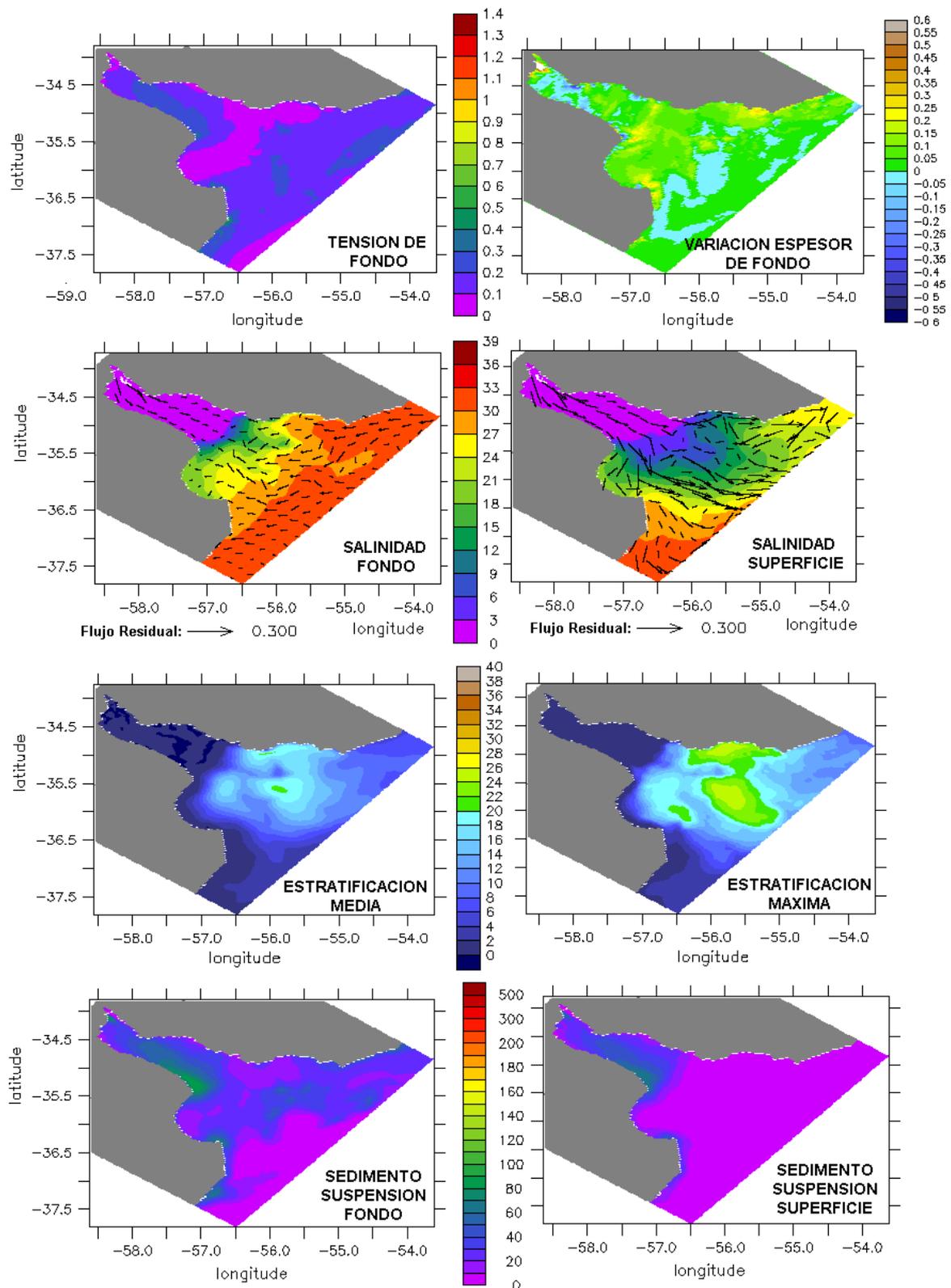


Figura 5.- Caracterización del período de calma comprendido entre el 17 y el 23 de agosto 2010. Campos espaciales medios de tensión de corte total de fondo (N/m^2); salinidad (ppm) y flujo residual en fondo y superficie, estratificación (diferencia entre salinidad fondo y superficie), concentración (mg/l) de sedimento en suspensión en superficie y en fondo. Campo máximo de la estratificación salina y variación (cm) del espesor del sedimento de fondo durante el período.

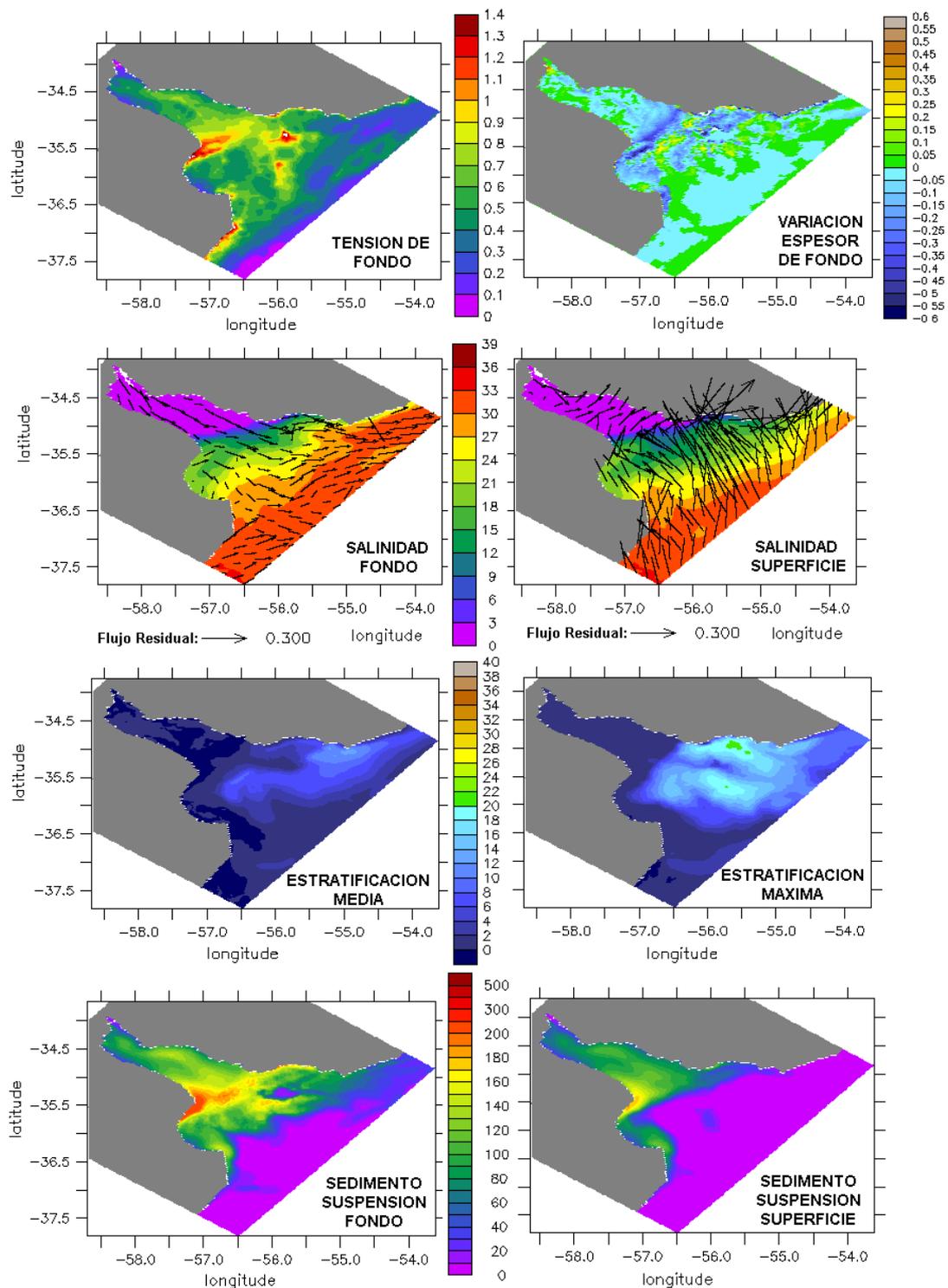


Figura 6.- Caracterización del período de tormenta del SSW del 13-14/8/2010. Campos espaciales medios de tensión de corte total de fondo (N/m^2); salinidad (ppm) y flujo residual en fondo y superficie, estratificación (diferencia entre salinidad fondo y superficie), concentración (mg/l) de sedimento en suspensión en superficie y en fondo. Campo máximo de la estratificación salina y variación (cm) del espesor del sedimento de fondo durante el período.

Se marcaron los sedimentos de distintas zonas del Río de la Plata (Figura 4 panel derecho) y luego de un año de simulación se analizan dónde se deposita (Figura 7 panel superior) y donde se encuentran en suspensión en la columna de agua (Figura 8 panel inferior). Los resultados obtenidos muestran que la mayor parte del sedimento descargado por los ríos Paraná y Uruguay deposita en la zona interior del RP. El transporte de sedimento en suspensión en la zona intermedia está regulado por un ciclo continuo de procesos de advección, sedimentación, deposición y erosión dominados

por las mareas, que se intensifica durante las tormentas. De esta manera el sedimento de fondo se mueve progresivamente desde la zona interior hacia la parte superior de la zona intermedia. El sedimento de fondo de la zona intermedia presenta dos patrones principales de transporte: el material de la zona norte se transporta siguiendo el lado norte mientras que el sedimento de fondo ubicado hacia el sur se transporta en suspensión a través de toda la sección. De esta manera se forma el depósito de sedimento que se encuentra en la zona de transición generando una zona de acumulación (zona 1). De manera contraria en la zona exterior los patrones de sedimento están dominados por las tormentas cuando el oleaje erosiona el fondo. Cuando arriban las tormentas (escala temporal de una semana aproximadamente) mucha cantidad de sedimento de fondo es puesto en suspensión y al finalizar el material predominantemente arcilloso permanece en suspensión transportado por las corrientes tridimensionales existentes en la zona exterior.

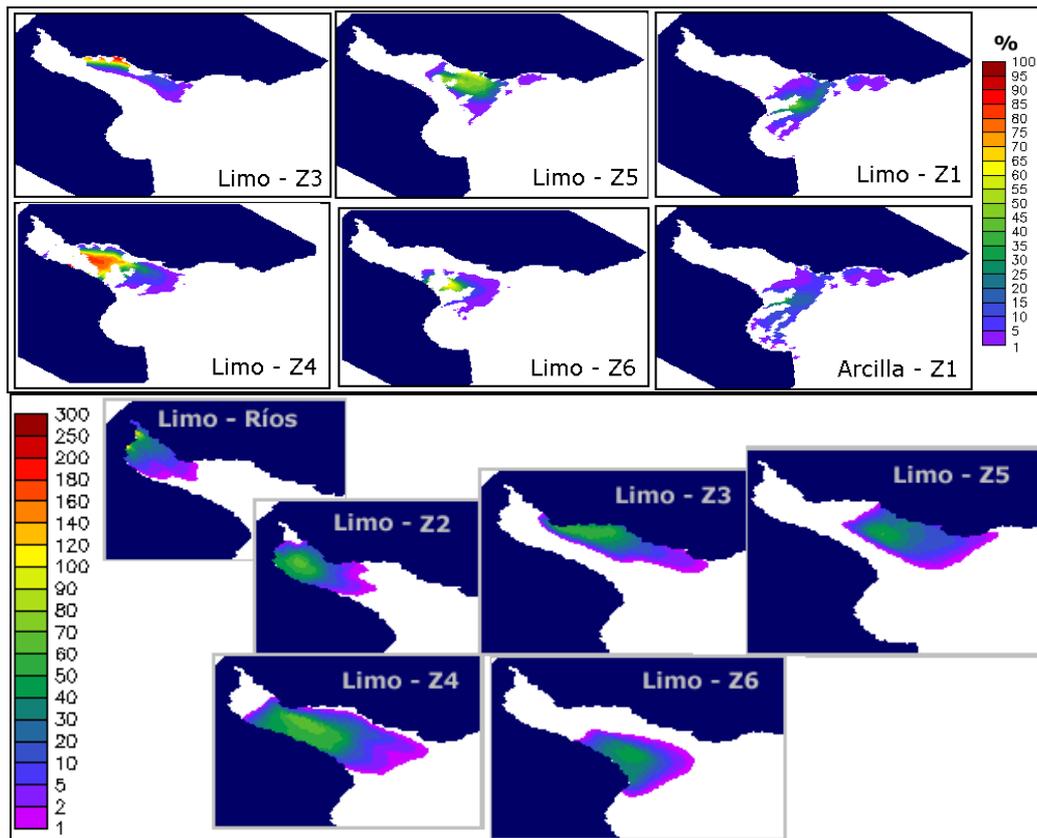


Figura 8.- Panel superior: porcentaje de los materiales tipo limo y arcilla provenientes de distintas zonas en el depósito de sedimento de fondo generado. Panel inferior: distribución espacial de la concentración de sedimento en suspensión (mg/l) en la superficie para el limo proveniente de varias zonas.

CONCLUSIONES

Según los análisis presentados, podríamos resumir qué sucede con el material fino descargado por los tributarios de la siguiente manera. Parte del material fino que ingresa con los tributarios deposita en la zona inmediata a las desembocaduras, incrementando el depósito de Playa Honda, y parte del mismo permanece en suspensión, ingresando a la zona 2 (zona interior del Río de la Plata) donde comenzaría a estar sujeto a la dinámica formada por varios ciclos diarios de transporte, sedimentación, y resuspensión sucesivos que ocurren en la zona. Así, parte del material que ingresó en la zona 2 quedará en el fondo pero parte también avanzará a la zona 4 (zona intermedia superior contra costa argentina), y parte avanzará hasta la zona 3 (zona intermedia superior contra la costa uruguaya). Parte de dicho material formará el depósito de la zona 3, que en términos de unidades morfológicas se conoce como el Banco Grande de Ortiz. El material que arribe a la zona 4 en cambio probablemente vuelva a ser resuspendido y arribe quizás a la zona 6 (zona intermedia inferior contra costa argentina) o a la zona 5 (zona intermedia inferior contra costa

uruguaya). El intenso transporte neto de la zona intermedia contra la costa uruguaya generará que muy probablemente el material que arribe a la zona 5 vuelva a ser resuspendido ingresando nuevamente a los ciclos de transporte, sedimentación, y nuevamente erosión, los cuales serán acelerados por el aporte de las tormentas en la zona. Así, luego de probablemente varios años, el material descargado por los tributarios arribará a la zona 1, es decir, a la zona del frente. Gran parte del material que llegue al frente permanecerá ahí como elemento constitutivo del fondo barroso que existe en la zona, ya que la misma presenta características de zona de deposición. Otra parte del sedimento podrá durante alguna tormenta, volver a ser resuspendido y pasar a estar en suspensión. Sin embargo, ahora en esta zona el sedimento en suspensión estará sujeto a una dinámica totalmente diferente a la que se encontraba en la zona interior e intermedia. Por un lado ahora el agua ya no es dulce, sino salobre con distintos grados en función de la dinámica del frente salino, y el material muy fino arcilloso reaccionará frente a dichos cambios en el medio, y al mayor contenido de materia orgánica que se encuentra en la zona. Además, ahora el sedimento encontrará flujos residuales diferenciados en la columna vertical que generan transportes horizontales del material fino diferentes, e incluso alguna parte del sedimento podrá volver a ingresar a la zona intermedia por el fondo, estando entonces sujeto a su dinámica conocida. Podrán ahora aparecer procesos de floculación que generen flocs de materiales provenientes quizás del exterior por resuspensión en eventos anteriores. Además, debido a las mayores profundidades el sedimento que haya sido mezclado en la columna de agua probablemente permanezca en suspensión más tiempo que el que permanecía en la zona intermedia. Regulado por esta dinámica el sedimento podrá salir de la zona 1, y quizás depositar finalmente en la zona 9 sobre la costa uruguaya, o en la zona 7 sobre la costa argentina, o en la zona 8 central exterior del Río de la Plata. Parte de dicho material, no será resuspendido en la próxima tormenta, y pasará a formar parte del material de fondo de la misma, sujeto a los procesos de consolidación del suelo, los cuales dependerán de la mezcla con los otros materiales finos que arriben a la misma área, tanto en composición como en concentración, de las condiciones de salinidad, de las condiciones hidrodinámicas en la columna de agua, entre otros. Finalmente parte de dicho material sí volverá a ser resuspendido por alguna nueva tormenta severa en la zona, y mediante ciclos de transporte, sedimentación, y resuspensión a una escala mayor a la diaria, o sea, a la escala de tormentas (entre 5 y 8 días habitualmente), podrá finalmente salir en suspensión del Río de la Plata, probablemente por la zona costera uruguaya ó zona costera argentina, donde estará sujeto a una dinámica oceánica mucho más agresiva y fuerte, mediante la cual quizás siga avanzando.

BIBLIOGRAFÍA

- Moreira, D., de los Campos, T., Capeluto Ware, A., Guerrero, R., Repecaud, M., Le Bihan, C., Balestrini, C., Firpo, A. y Fossati M.** (2010). Estudio del transporte de sedimentos en el Río de la Plata: campañas oceanográficas. *XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Uruguay.
- Booij, N., Ris, R. C., Holthuijsen, L. H.,** (1999). A third-generation wave model for coastal regions, 1. Model description and validation. *Journal of Geophysical Research*, vol 104, N°. C4, April 15, 1999.
- Flemming, B. W.** (2000). A revised textural classification of gravel-free muddy sediments on the basis of ternary diagrams. *Continental Shelf Research* 20:1125–1137.
- Fossati M., Cayocca F., Piedra-Cueva I.** (2012). Dinámica de sedimentos finos en el Río de la Plata. *XXV Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Costa Rica.
- Framiñan M., Brown O.,** (1996). Study of the Río de la Plata turbidity front, Part I: spatial and temporal distribution. *Cont. Shelf Research*. 16:727-742.
- Lazure P. and Dumas F.** (2008). An external–internal mode coupling for a 3D hydrodynamical model for applications at regional scale (MARS). *Advances in Water Resources* 31 (2008) 233–250.
- Le Hir P., Cayocca F., Waeles B.** (2011). Dynamics of sand and mud mixtures: a multiprocess-based modelling strategy. *Cont. Shelf Research*. 31:135-149.
- Menéndez, A & Sarubbi, A.** (2009). A Model to Predict the Paraná Delta Front Advancement, in: RCEM 2009 Proceedings of the River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, Argentina, September 2009.
- Sepúlveda H., Valle-Levinson A., Framiñan M.,** (2003). Observations of subtidal and tidal flow in the Río de la Plata Estuary. *Cont Shelf Research*. 24:509 –525.