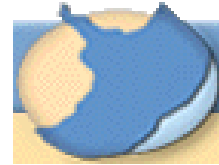




INSTITUTO NACIONAL DEL AGUA
SUBSECRETARIA DE RECURSOS HÍDRICOS
SECRETARÍA DE OBRAS PÚBLICAS
REPÚBLICA ARGENTINA



Modelación Hidro-Sedimentológica del Río de la Plata

DINAMICA DE SEDIMENTOS



Proyecto LHA 296
Informe LHA 02-296-08
Ezeiza, Enero de 2009

Laboratorio de Hidráulica

AUTORIDADES DEL INA

PRESIDENTE

Dr. Raúl A. LOPARDO

GERENTE DE PROGRAMAS Y PROYECTOS

Ing. Jorge A. MAZA

DIRECTOR DEL LABORATORIO DE HIDRÁULICA

Ing. Julio C. DE LÍO

JEFE DEL PROGRAMA DE HIDRÁULICA COMPUTACIONAL

Dr. Ángel N. MENÉNDEZ

DIRECTOR DEL PROYECTO

Dr. Ángel N. MENÉNDEZ

EQUIPO DE TRABAJO

Ing. Mariano RE

Ing. Alejo SARUBBI

Ing. Pablo GARCÍA

INFORME PRODUCIDO POR

Ing. Mariano RE

Ing. Alejo SARUBBI

Dr. Ángel N. MENÉNDEZ

Modelación Hidro-Sedimentológica del Río de la Plata

DINAMICA DE SEDIMENTOS

Informe

Mariano Re

RESUMEN

Se presenta la recopilación de datos y literatura referente a la dinámica de sedimentos en el Río de la Plata.

Descriptores temáticos: Modelación Hidrodinámica, Modelación Sedimentológica, Transporte de Sedimentos Finos.

Descriptores geográficos: Río de la Plata, Proyecto FREPLATA.

ÍNDICE

DINAMICA DE SEDIMENTOS	I
1 INTRODUCCIÓN	2
1.1 RIO DE LA PLATA	2
1.1.1 Características generales	2
1.1.2 Hidrodinámica	3
1.1.3 Olas	3
1.1.4 Geología	4
1.1.5 Morfología	5
2 TRIBUTARIOS	6
2.1 SECCIONES TRANSVERSALES	6
2.2 APOORTE DE SEDIMENTOS	14
2.2.1 Río Paraná	14
2.2.2 Río Uruguay	17
3 SEDIMENTOS EN EL RIO DE LA PLATA	19
3.1 SEDIMENTOS EN SUSPENSIÓN	19
3.1.1 Río de la Plata Interior	19
3.1.2 Río de la Plata Exterior	25
3.1.3 Dinámica general de los sedimentos en suspensión	27
3.2 SEDIMENTOS DE FONDO	28
3.2.1 Río de la Plata Interior	28
Área de arenas	29
Área de limos	29
Área de fangos	30
Dinámica General	30
3.2.2 Río de la Plata Exterior	31
3.3 ESQUEMA GENERAL DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS	34

1 INTRODUCCIÓN

1.1 RIO DE LA PLATA

1.1.1 Características generales

El Río de la Plata es un extenso estuario localizado en la costa Este de Sudamérica, aproximadamente entre las latitudes 34° S y 36° S y las longitudes 54° 50' O y 58° 30' O. El río, cuya forma de embudo se orienta en el sentido NE-SE, alcanza una longitud aproximada de 290 km. Rápidamente adquiere un ancho de unos 50 Km. en la zona de aguas arriba (Río de la Plata Superior), incrementándose hasta unos 70 Km. en la zona del Río de la Plata Medio (ambas zonas constituyen el llamado Río de la Plata Interior) y expandiéndose en el Río de la Plata Exterior hasta alcanzar unos 200 Km. en línea imaginaria Punta Rasa (Argentina) - Punta del Este (Uruguay) (Figura 1.1.1). El Río de la Plata constituye el umbral sobre el Océano Atlántico de la segunda cuenca fluvial en extensión de América del Sur: la Cuenca del Plata cuya superficie es de aproximadamente 3.1 millones de km². La profundidad media del Río de la Plata es de unos 10m, observándose zonas muy someras en el río Interior (con profundidades que oscilan entre 1 y 4 m) y alcanzando profundidades máximas del orden de los 18m. En la transición entre el agua dulce y el agua salada se manifiesta una zona conocida como la "cuña salina" donde la concentración salina es variable espacial y temporalmente, advirtiéndose un gradiente de 0 a 33 psu (Kind, 2004).



Figura 1.1.1. Río de la Plata

1.1.2 Hidrodinámica

Los forzantes principales de la hidrodinámica del Río de la Plata son la descarga de los tributarios principales que penetran en la cabecera (ríos Paraná y Uruguay), la onda de marea que ingresa desde el océano y los vientos que actúan sobre toda la superficie del agua.

El caudal medio del Río de la Plata es del orden de los 23000 m³/s (Jaime y Menéndez, 2002). Más del 97% del ingreso de agua al Río de la Plata es aportado por los ríos Paraná y Uruguay, con el porcentaje restante distribuido en una serie de relativamente pequeñas descargas que llegan a ambos márgenes. El río Paraná llega al Río de la Plata principalmente por dos de sus brazos: Paraná de las Palmas (25% del total del caudal) y el Paraná Guazú-Bravo (con el 75% restante) (Bombardelli et al., 1994), presentado una marcada estacionalidad y alcanzando caudales que superan los 50000 m³/s durante las crecidas extraordinarias. El río Uruguay tiene un caudal medio de aproximadamente de 4700 m³/s y se distingue por tener mayor variabilidad del ciclo estacional, con caudales máximos tanto en otoño (abril-mayo) como en primavera (octubre).

La onda oceánica que arriba al Río de la Plata tiene un régimen astronómico micromareal (amplitud de pocas decenas de centímetros), por lo que los procesos atmosféricos, especialmente el régimen de vientos oceánicos (condicionado por el anticiclón del Atlántico Sur), tienen un efecto relevante en la forma e intensidad de la onda incidente. El componente de mareas M₂ (componente lunar principal semidiurna) representa más del 65% de la energía presente en la marea (D'Onofrio et al., 1999).

El viento actúa sobre la superficie del río variando los niveles, la velocidad de propagación de la onda de marea y la mezcla vertical. El Río de la Plata está situado bajo la influencia del anticiclón del Atlántico Sur (los patrones climáticos de la región dependen de su posición). El fenómeno meteorológico más importante para la dinámica del Río de la Plata es la Sudestada y está caracterizado por la persistencia de vientos, regulares a fuertes, del sector Sudeste.

1.1.3 Olas

Considerando la orientación general del Río de la Plata (NO-SE) y su poca profundidad, solo las olas que se propagan desde el SE pueden alcanzar el Río de la Plata Interior. En general, las olas de período relativamente largo, provenientes de las aguas profundas del Océano Atlántico, se amortiguan y rompen a medida que se propagan hacia el interior del río. Por lo tanto, se puede decir que la generación local de olas sobre el Río de la Plata es la causa principal del oleaje en esa zona (Halcrow and Partners, 1969). Mediciones realizadas en la zona de Costanera Sur en Buenos Aires (Molinari y Castellano, 1990) mostraron que el rango más frecuente de los períodos se encuentra entre 3 y 4 segundos, siendo poco probables aquellos mayores que 7 segundos. Estos resultados muestran consistencia con los obtenidos por EIH (1985). En cuanto a las alturas significativas, el rango más frecuente es de 0.20 a 0.60 m, siendo improbables olas de más de 1.50 m.

En el Río de la Plata Exterior, a partir de observaciones de Dragani y Romero (2004), el clima de olas resulta de una combinación de olas de fondo (*swell*, no relacionadas con vientos locales) y las olas marinas (generadas por vientos locales), con alturas predominantes entre 0.5 y 1.5 m y con períodos de 4 a 6 segundos (cuando prevalecen las olas marinas) y 10 a 12 (cuando prevalecen las olas de fondo).

1.1.4 Geología

El Río de la Plata se encuentra ubicado en la confluencia de dos unidades fisiográficas bien definidas: el Escudo Uruguayo-Brasileño (predominantemente granítico) y la cuenca sedimentaria de la Pampa Argentina (con una profundidad de más de 2000 m de sedimentos finos) (López Laborde, 1997). Por lo tanto, la costa del Río de la Plata presenta características contrastantes: la costa uruguaya presenta playas arenosas, barras, cordones litorales y dunas, y la costa argentina se muestra baja, aplanada, pantanosa y con algunos cordones antiguos de playa.

La evolución geológica y paleogeográfica del Río de la Plata está relacionada a los cambios relativos del nivel del mar ocurridos durante el Cuaternario Superior a lo largo de la Plataforma Continental, involucrando estrechos procesos litorales y continentales que modelaron la costa (López Laborde, 1997). En la Figura 1.1.2 se muestran las principales etapas de estos cambios: a) *Hace 14000 años*: Desarrollo de un sistema fluvial sobre una importante planicie costera a raíz de la presencia del mar en la isobata de 150 m. b) *Entre 11000 y 6000 años atrás*: El mar comenzó a ascender produciendo la migración lateral de la línea de costa (hacia el final de esta etapa, con el nivel del mar estabilizado, comenzó la formación de un complejo de isla de barrera). c) *Entre 6000 y 4000 años atrás*: Se crea un sistema de bahías poco profundas y salobres (las actuales lagunas costeras) entre cordones y líneas de playa debido a la ingresión marina. d) *Entre 4000 años y el presente*: Estabilizado el nivel del mar, la costa se transforma en una costa de acreción desarrollando cordones de playa, barras y campos de dunas bajo condiciones dinámicas similares a las actuales.

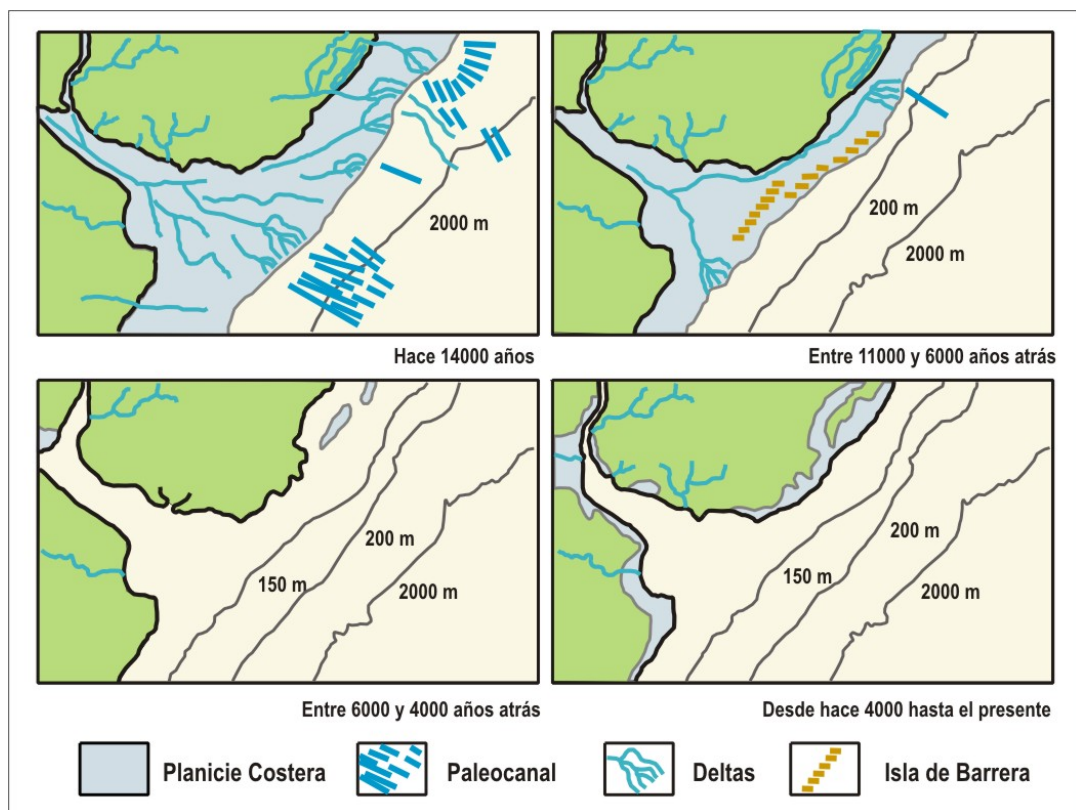


Figura 1.1.2 Evolución del sistema del Río de la Plata (López Laborde, 1997).

1.1.5 Morfología

El lecho del Río de la Plata, dada su gran extensión, presenta una serie de geoformas asociadas a la dinámica de los sedimentos. Principalmente estos rasgos geomorfológicos se dividen en bancos e islas (encauzan las descargas fluviales y, al mismo tiempo, atrapan y/o dispersan sedimentos), las cuencas erosivas (actúan alternativamente como receptores temporarios y como fuentes de aporte de sedimentos) y los canales (que representan la rutas de descargas fluviales) (López Laborde, 1997). A continuación se listan algunos de estos emplazamientos:

- **Islas:** Martín García, Oyarvide, Juncal, Hornos, El Matón, San Gabriel, López, Flores, Gorriti, Juncalito
- **Bancos:** Ortiz Alemán, Playa Honda, Chico, Magdalena, Cuirassier, Rouen, Arquímedes, Inglés
- **Barras:** del Indio, del Farallón, del Globo
- **Canales:** Farallón, Oriental, Marítimo, Norte
- **Otras:** Pozo San Juan, Umbral de Cufre, Umbral de Samborombón

En la cabecera del Río de la Plata, en la transición con el Río Paraná, se ubica un amplio Delta, constituyendo la principal geoforma del sistema estuárico. Esta formación comprende un área con predominio de la sedimentación, desarrollado como consecuencia del aporte de carga clástica del sistema fluvial y controlado por el régimen mareal y la intensidad del oleaje (Silva Busso et al., 2004). El continuo avance del frente del Delta del Paraná está alimentado por la provisión de sedimentos que se produce en la parte superior de la Cuenca del Plata (una zona geomorfológicamente joven, aún con una gran dinámica de transformación y una gran capacidad potencial de aporte) (Sarubbi, 2007).

2 TRIBUTARIOS

2.1 SECCIONES TRANSVERSALES

Se recopiló información correspondiente a las secciones transversales de los tributarios, que incluyen al río Uruguay y los dos brazos principales del Paraná, el Paraná Guazú y el Paraná de las Palmas. Dichos datos corresponden a relevamientos de la Dirección de Vías Navegables.

Para el río Paraná de las Palmas se contó con 32 secciones comprendidas entre la localidad de Baradero (bifurcación con el Guazú) y la desembocadura, cubriendo así una extensión de 128 km. Por su parte, para el río Paraná Guazú se obtuvieron 26 secciones distribuidas desde la localidad de Ibicuy (bifurcación con el Palmas) hasta la desembocadura (94 km). Para el río Uruguay se contó con 28 secciones que van desde la localidad de Concordia hasta su desembocadura en el Río de la Plata (370 km).

Toda la información topográfica fue procesada y georeferenciada para poder incorporarse dentro un Sistema de Información Geográfica (GIS). En la Figura 2.1.1 se muestran las secciones volcadas en el GIS.

Del análisis de los datos recabados surge lo siguiente: Para el río Paraná de las Palmas el ancho del cauce principal varía entre los 300 y los 800 m siendo el promedio de 450 m. Los mayores valores se dan en la desembocadura (progresiva cero) para luego ir disminuyendo en forma gradual. Respecto a la profundidad, los valores máximos en cada sección varían entre los 10 y 30 m, con un promedio de 20 m. Las mayores profundidades se dan entre las progresivas 40 y 80 km (tramo medio). En la Figura 2.1.2 se muestra el perfil longitudinal del nivel a cauce lleno. El salto que se observa en el mismo coincide con la desembocadura de un tributario, y podría estar relacionado a efectos de la marea (saltos similares se registran en los otros ríos, ver más abajo). Los perfiles transversales pueden observarse en la Figura 2.1.3.

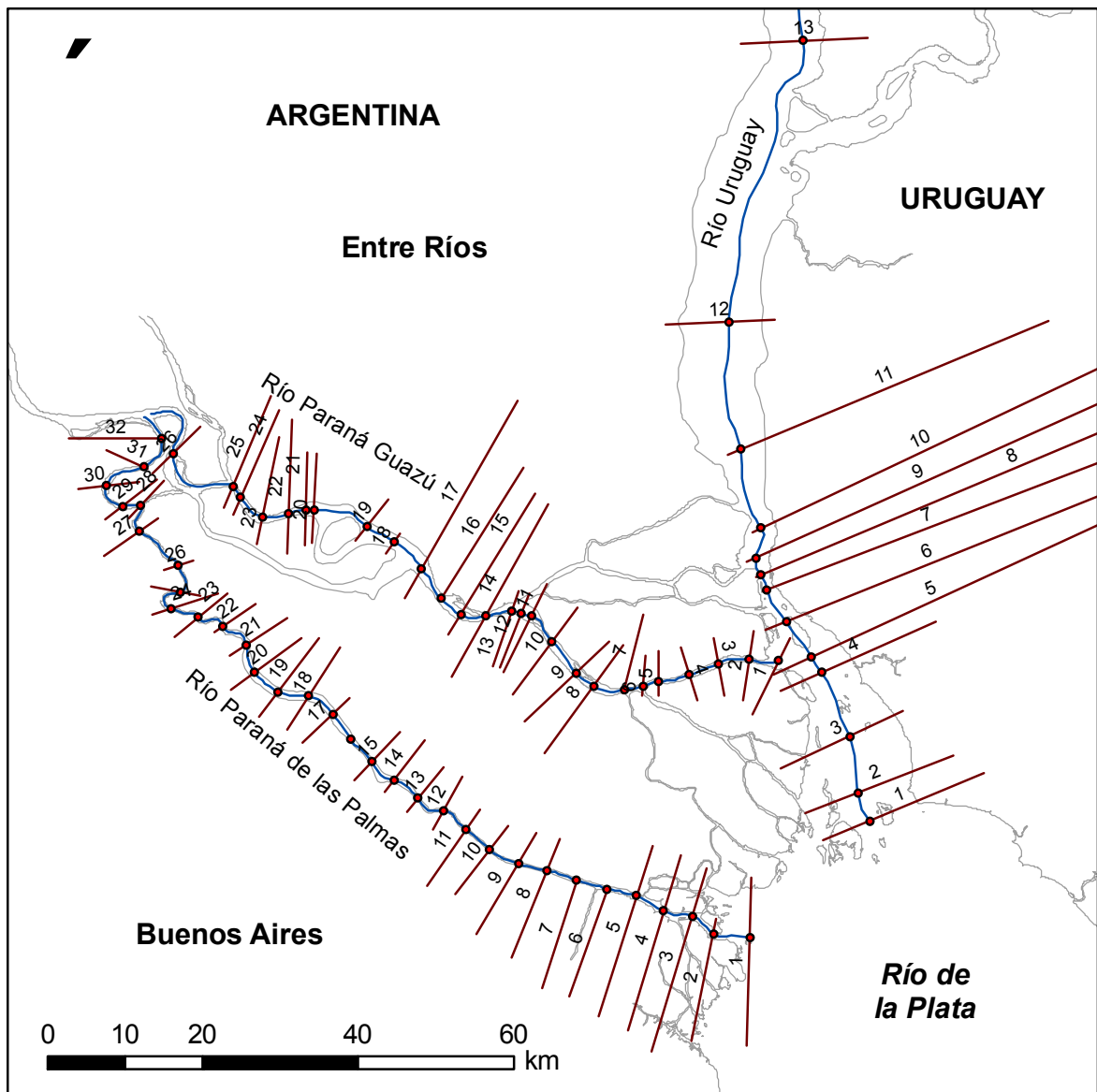


Figura 2.1.1. Secciones transversales volcadas en el GIS

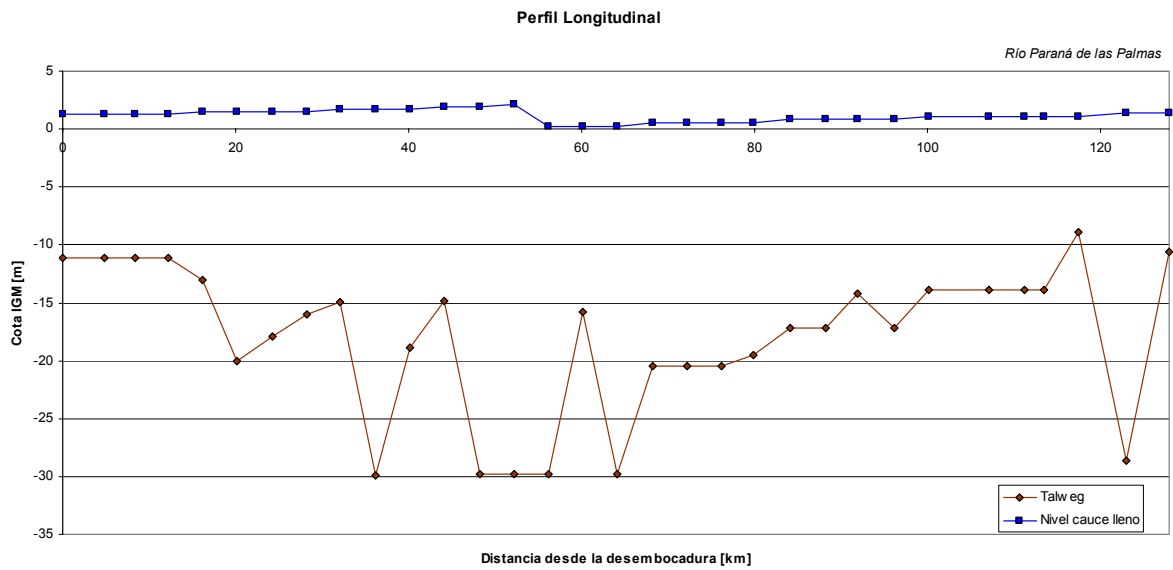
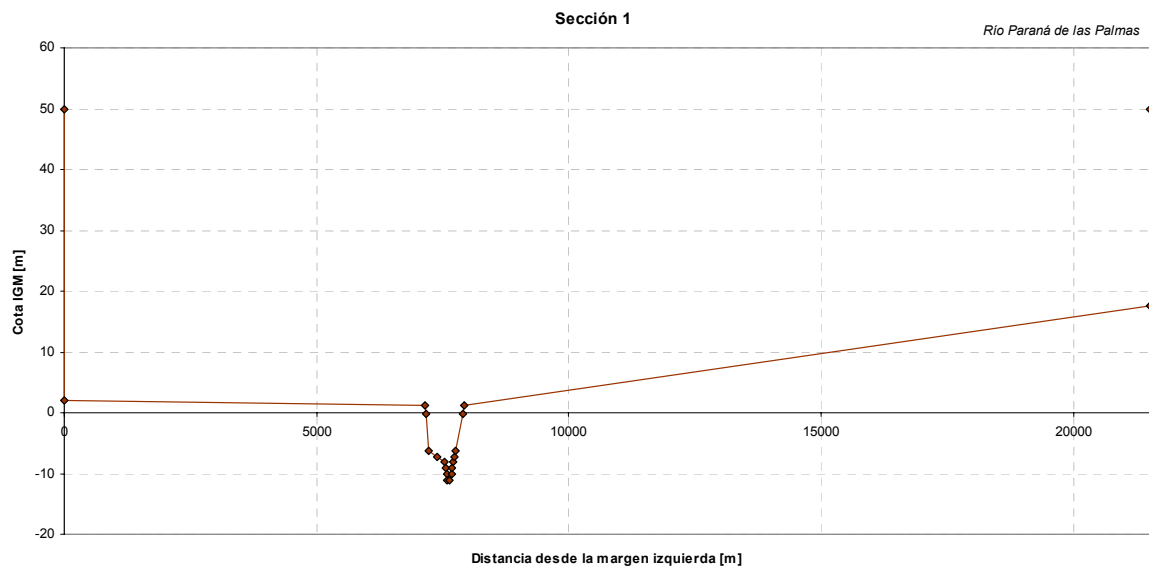
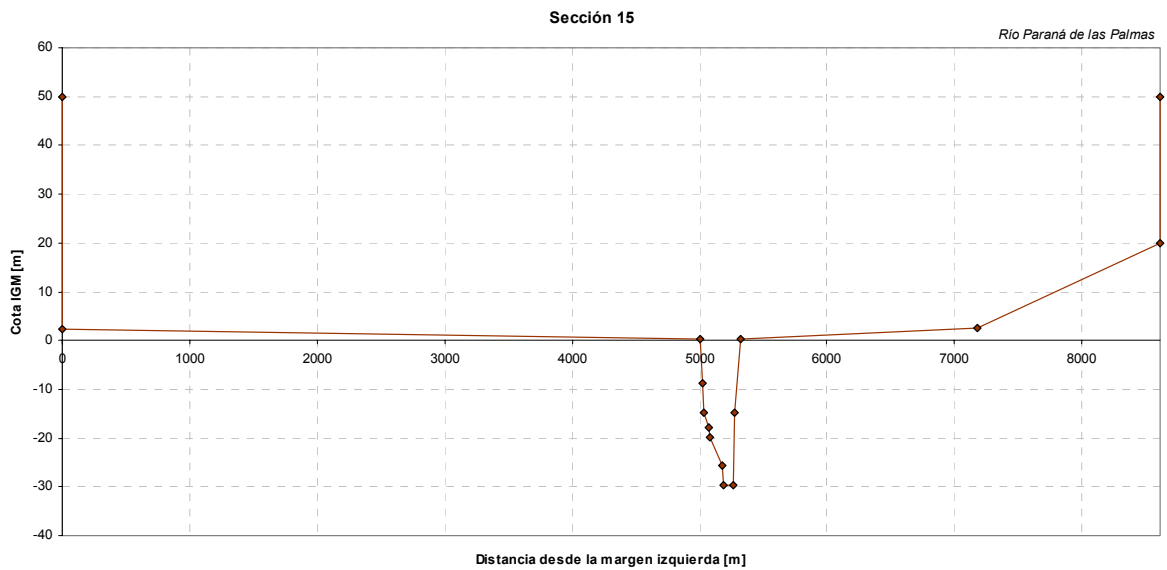


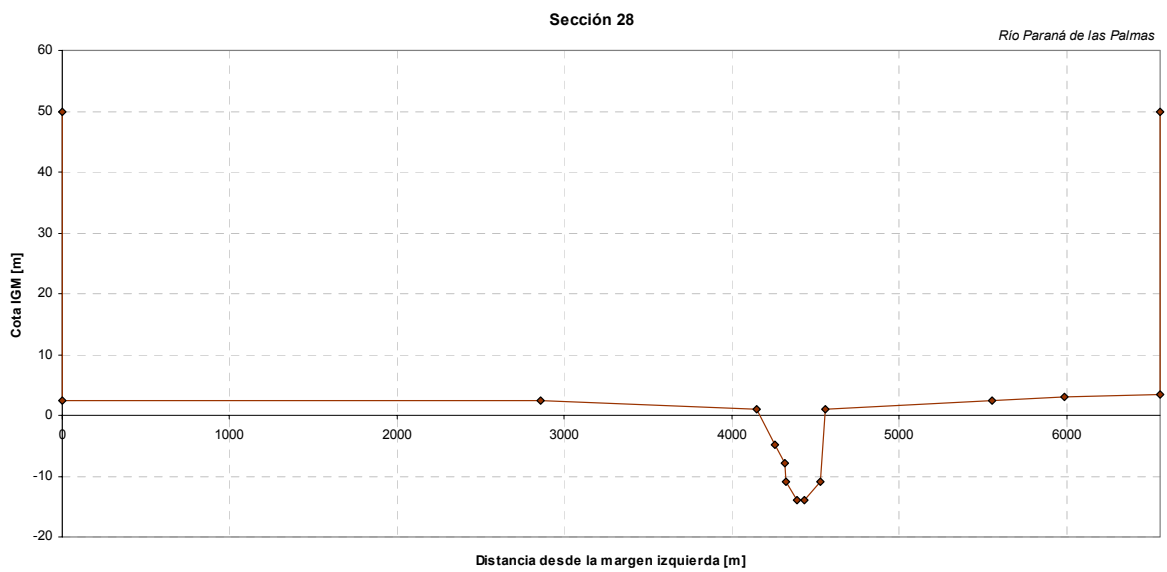
Figura 2.1.2. Perfil longitudinal del río Paraná de las Palmas
(las escalas en horizontal y vertical son distintas)



a) Sección 1 (progresiva 0 km)



b) Sección 15 (progresiva 56.2 km)



c) Sección 28 (progresiva 111.2 km)

Figura 2.1.3. Secciones transversales del río Paraná de las Palmas

En cuanto al río Paraná Guazú, el ancho del cauce principal varía entre los 500 y los 2000 m siendo el promedio de aproximadamente 900 m. Al igual que el Paraná de las Palmas, los valores máximos de profundidad en cada sección varían entre los 10 y 30 m, con un promedio de 20 m. Las mayores profundidades se dan a partir de la progresiva 35 km. En la Figura 2.1.4 se muestra el perfil longitudinal de la superficie libre a cauce lleno. Los perfiles transversales pueden observarse en la Figura 2.1.5.

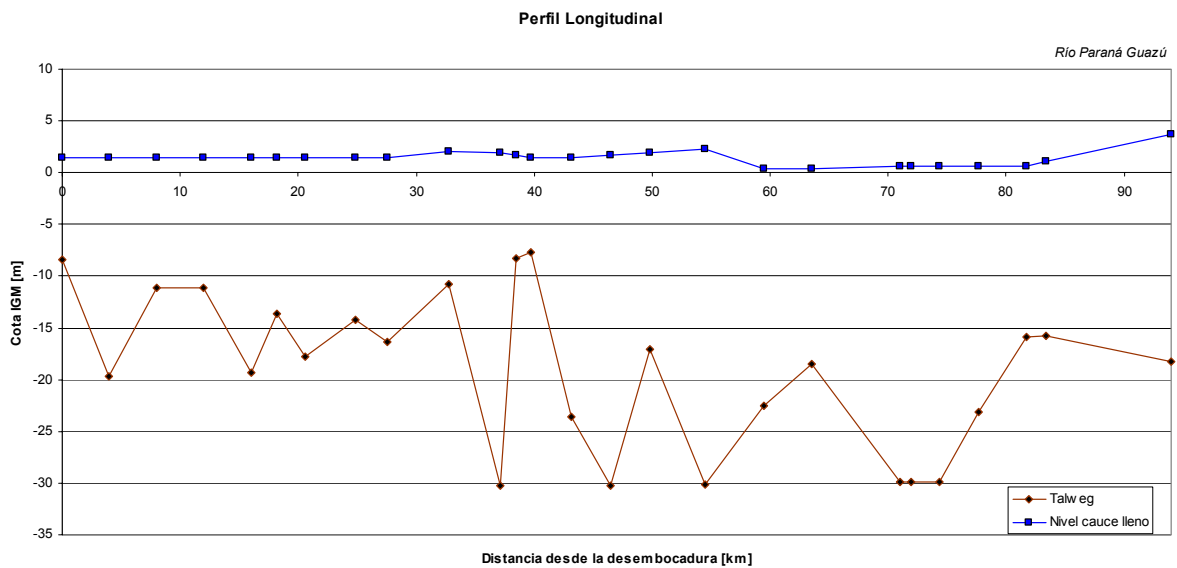
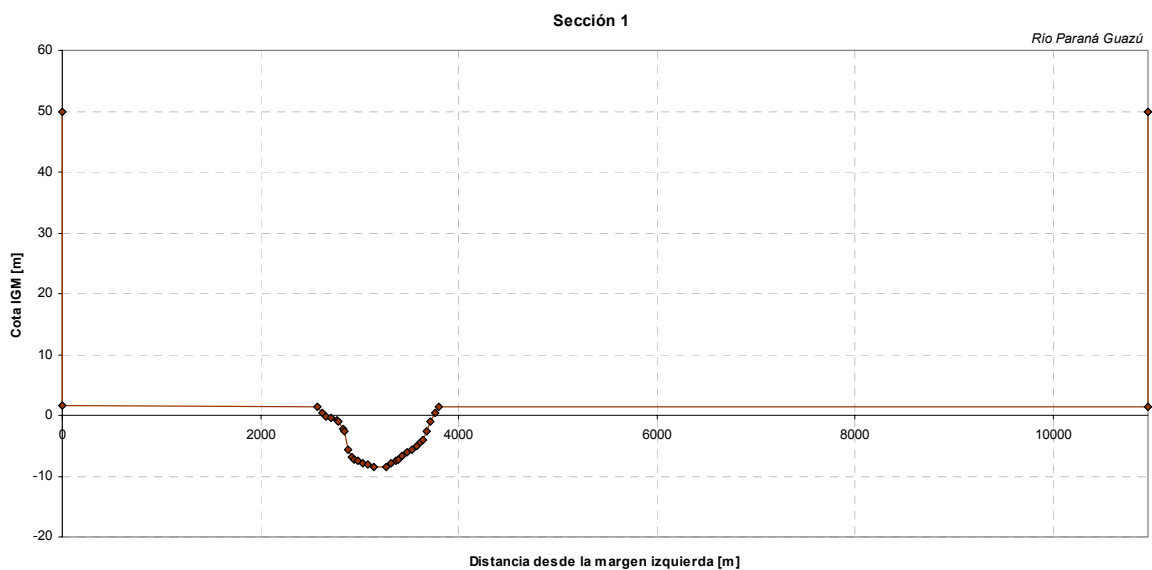
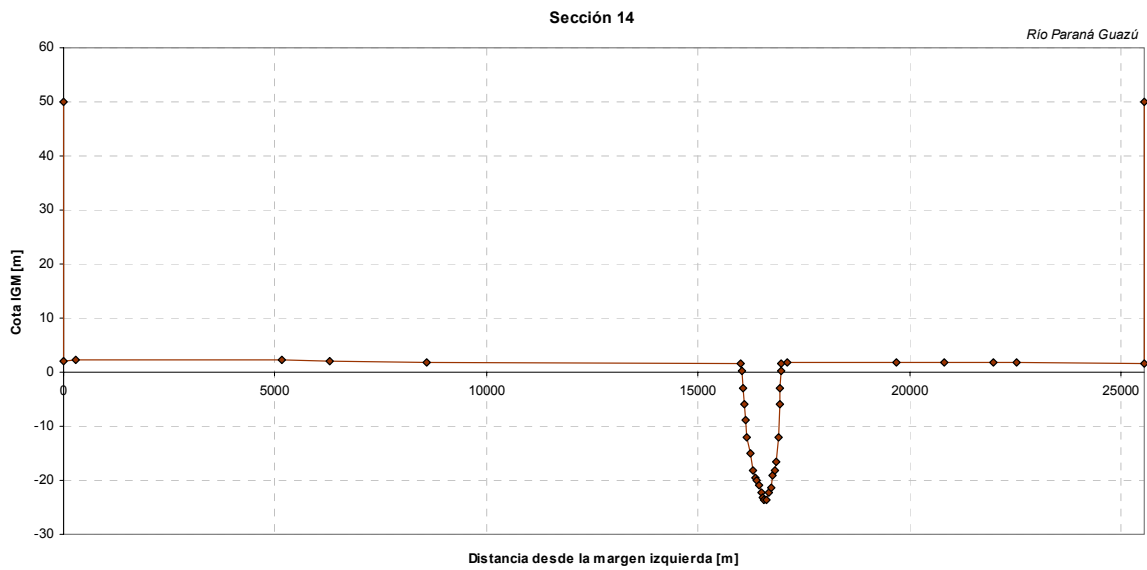


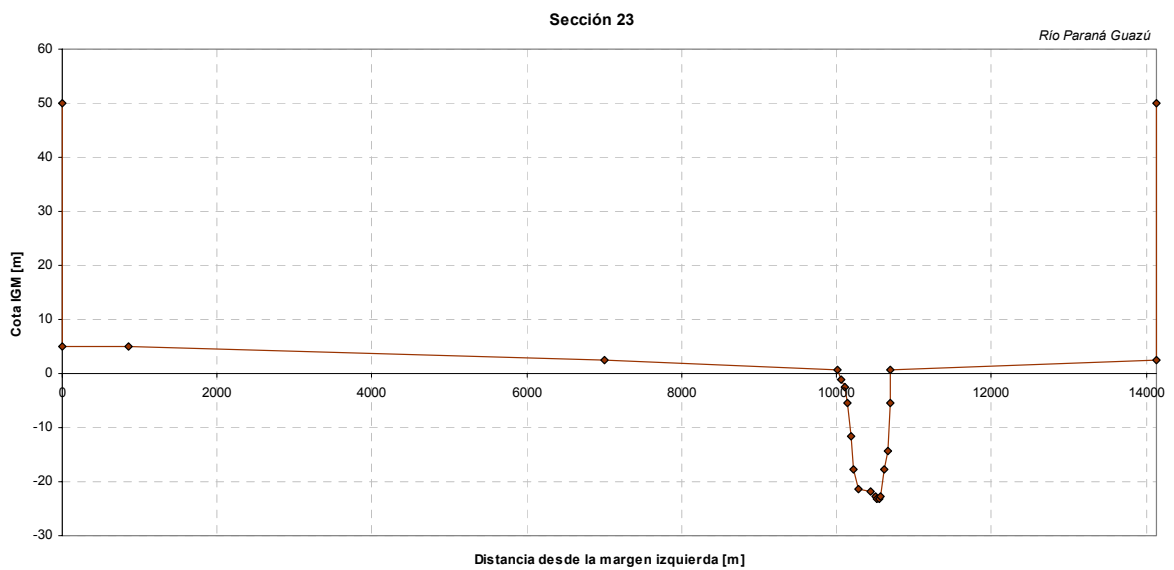
Figura 2.1.4. Perfil longitudinal del río Paraná Guazú
(las escalas en horizontal y vertical son distintas)



a) Sección 1 (progresiva 0 km)



b) Sección 14 (progresiva 43.2 km)



c) Sección 23 (progresiva 77.7 km)

Figura 2.1.5. Secciones transversales del río Paraná Guazú

Para el río Uruguay, el ancho del cauce principal varía entre los 1500 y los 14000 m siendo el promedio de aproximadamente 5500 m. Respecto a la profundidad, los valores máximos en cada sección varían entre los 10 y 40 m, con un promedio de 20 m. Las mayores profundidades se dan a partir de la progresiva 140 km. En la Figura 2.1.6 se muestra el perfil longitudinal de la superficie libre a cauce lleno. Los perfiles transversales pueden observarse en la Figura 2.1.7.

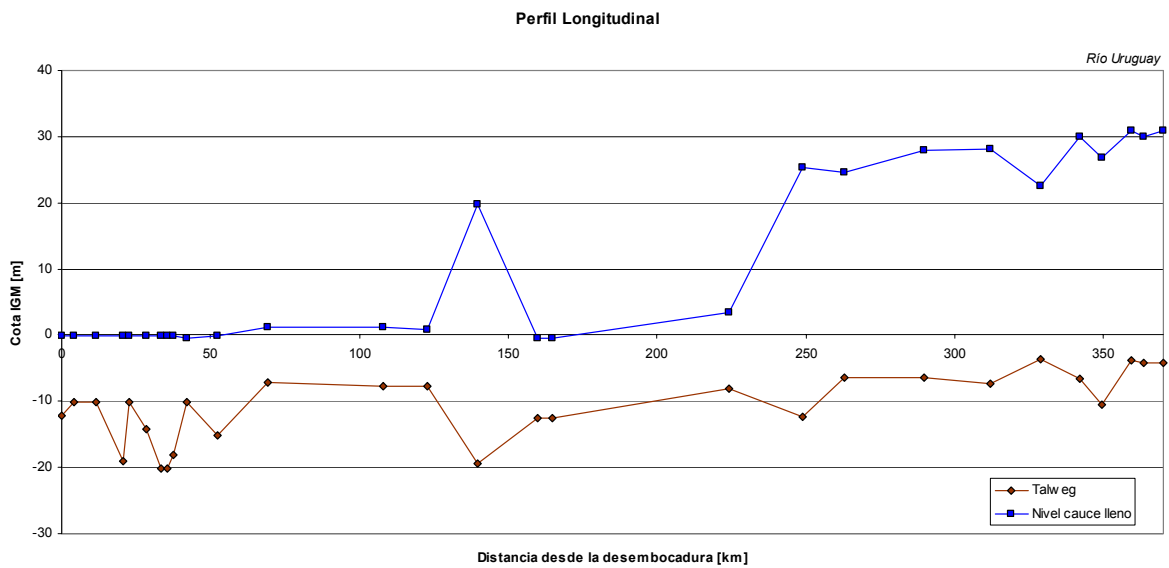
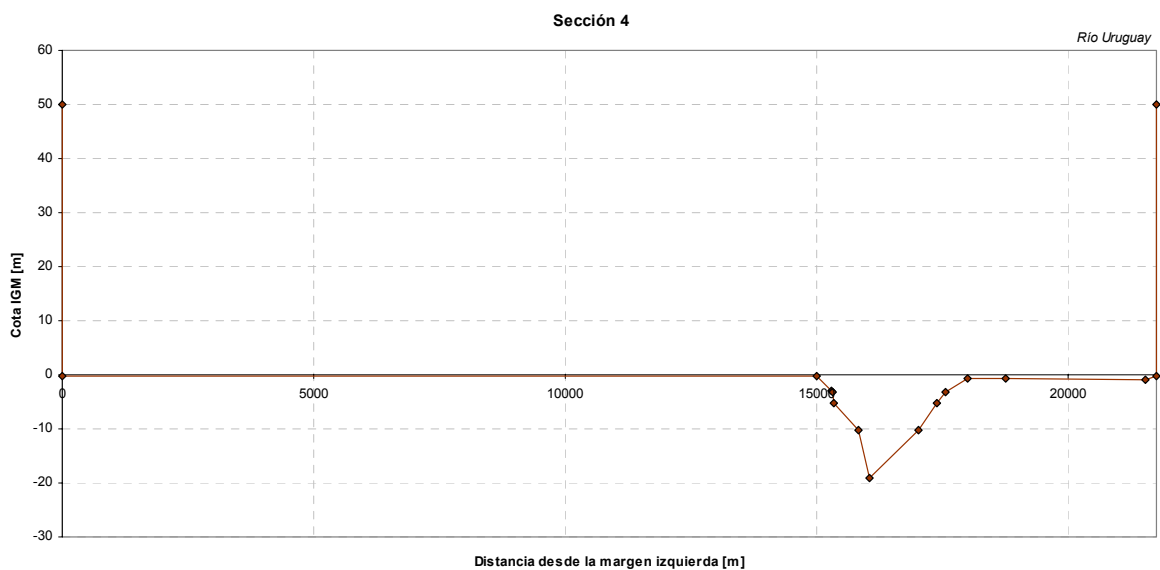
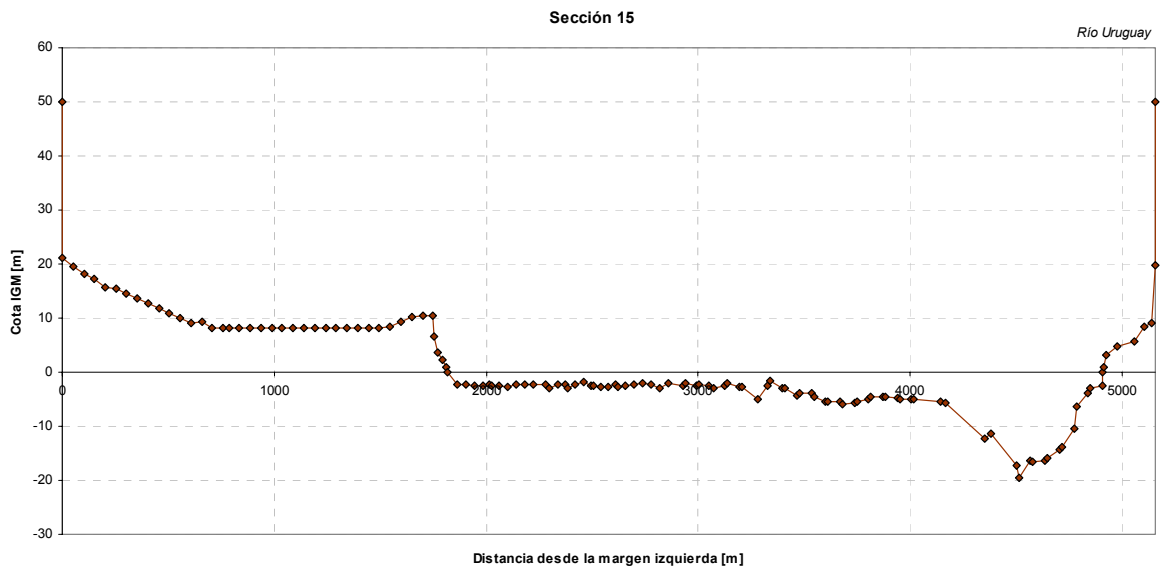


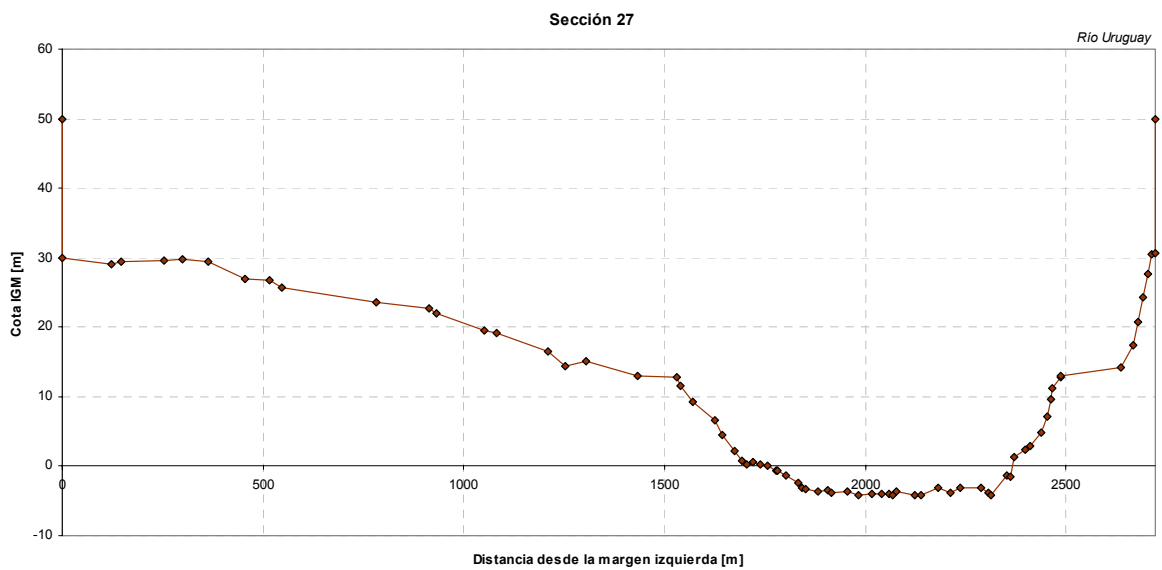
Figura 2.1.6. Perfil longitudinal del río Uruguay (las escalas en horizontal y vertical son distintas)



a) Sección 4 (progresiva 20.4 km)



b) Sección 15 (progresiva 139.6 km)



c) Sección 27 (progresiva 363.6 km)

Figura 2.1.7. Secciones transversales del río Uruguay

Para todas las secciones de los tributarios se obtuvieron las secciones rectangulares equivalentes. Para ello, se utilizó la siguiente metodología: Para cada sección se determinó el nivel correspondiente a cauce lleno y se calculó la sección hidráulica para esa situación. Se impuso que el ancho de la sección rectangular equivalente sea igual al ancho efectivo de la situación a cauce lleno (el ancho efectivo es el ancho de la sección sin considerar las islas intermedias que pudiera haber). De esta forma, la profundidad del canal rectangular se obtuvo dividiendo la sección hidráulica a cauce lleno y el ancho efectivo asociado. Por último, el nivel de fondo del canal rectangular quedó definido como el nivel correspondiente a cauce lleno menos la profundidad del canal (es decir que las secciones rectangulares se "colgaron" de la superficie libre a cauce lleno).

2.2 APORTE DE SEDIMENTOS

2.2.1 Río Paraná

Se dispuso de las mediciones de caudal sólido (discriminado en fracción gruesa y fracción fina) en las tres estaciones activas sobre el río Paraná de la Subsecretaría de Recursos Hídricos (SSRH). La ubicación de las estaciones puede observarse en la Figura 2.2.4. Para la estación "Posadas (Ita Cuá)", se contó con aforos sólidos para el período Agosto 1993 - Noviembre 2007, resultando, para la fracción fina, un caudal sólido medio de 131 kg/s (los valores variaron entre 16 y 638 kg/s). Para la fracción gruesa el caudal sólido medio fue de 61 kg/s, con un mínimo de 3 kg/s y un máximo de 751 kg/s. En la Figura 2.2.1 se muestran los datos aforados en dicha estación, y además se incluyen los valores de caudal líquido para el período citado.

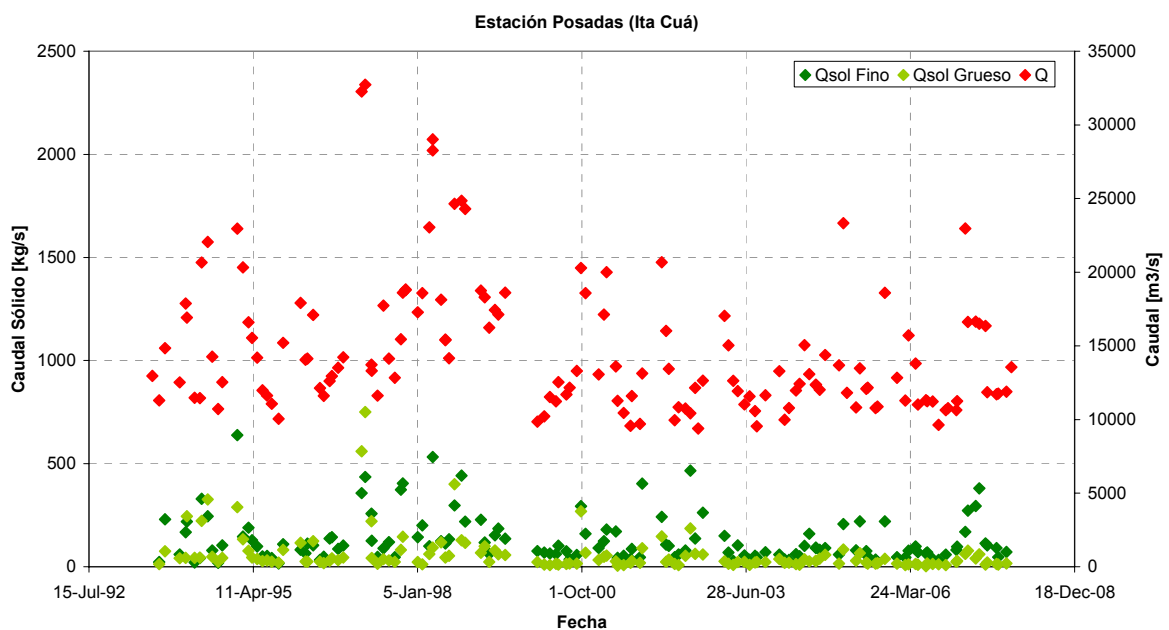


Figura 2.2.1. Datos aforados en la estación Posadas (Ita Cuá).

Aguas arriba de la confluencia del Paraná con el río Paraguay, se encuentra la estación "Itatí". En dicha estación, los aforos sólidos corresponden al período Noviembre 1993 - Noviembre 2007. Para la fracción fina se registró un caudal sólido medio de 139 kg/s (los valores variaron entre 29 y 598 kg/s). Por su parte, para la fracción gruesa el caudal sólido medio fue de 95 kg/s, con un mínimo de 6 kg/s y un máximo de 1005 kg/s. En la Figura 2.2.2 se muestran los datos aforados en dicha estación.

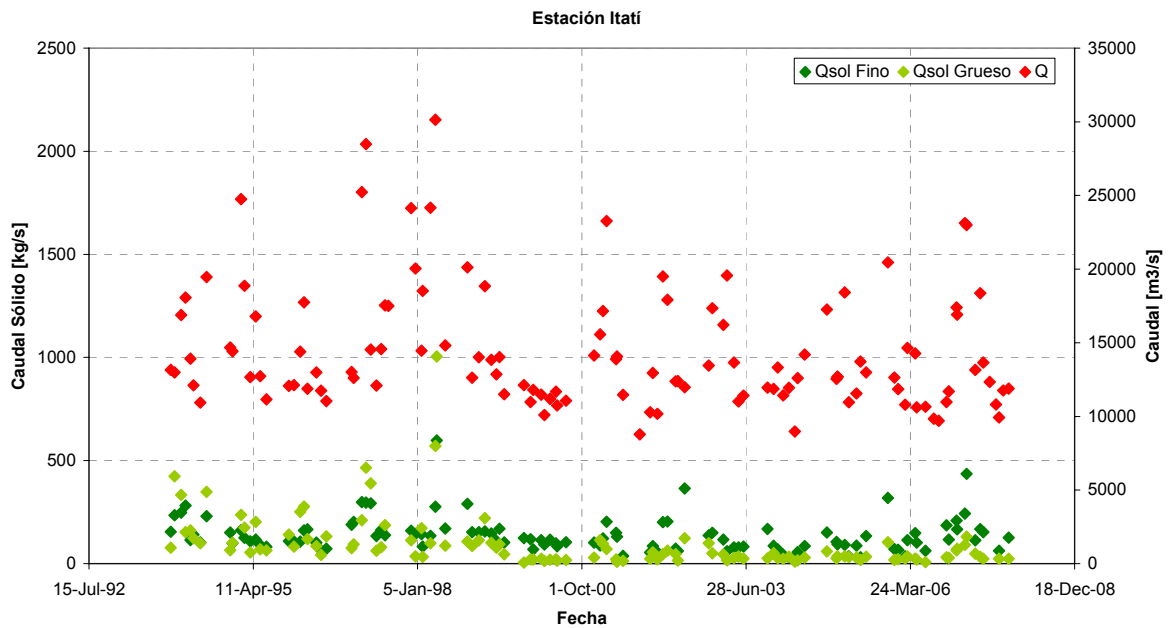


Figura 2.2.2. Datos aforados en la estación Itatí.

Por último, a la altura de las ciudades de Santa Fe y Paraná, se encuentra la estación "Túnel Subfluvial". En dicha estación, los aforos sólidos corresponden al período Septiembre 1993 - Diciembre 2007, registrándose para la fracción fina un caudal sólido medio de 3029 kg/s (con valores máximos superiores a 20000 kg/s). Por su parte, para la fracción gruesa el caudal sólido medio fue de 550 kg/s, con un máximo de 6539 kg/s. En la Figura 2.2.3 se muestran los datos aforados en dicha estación.

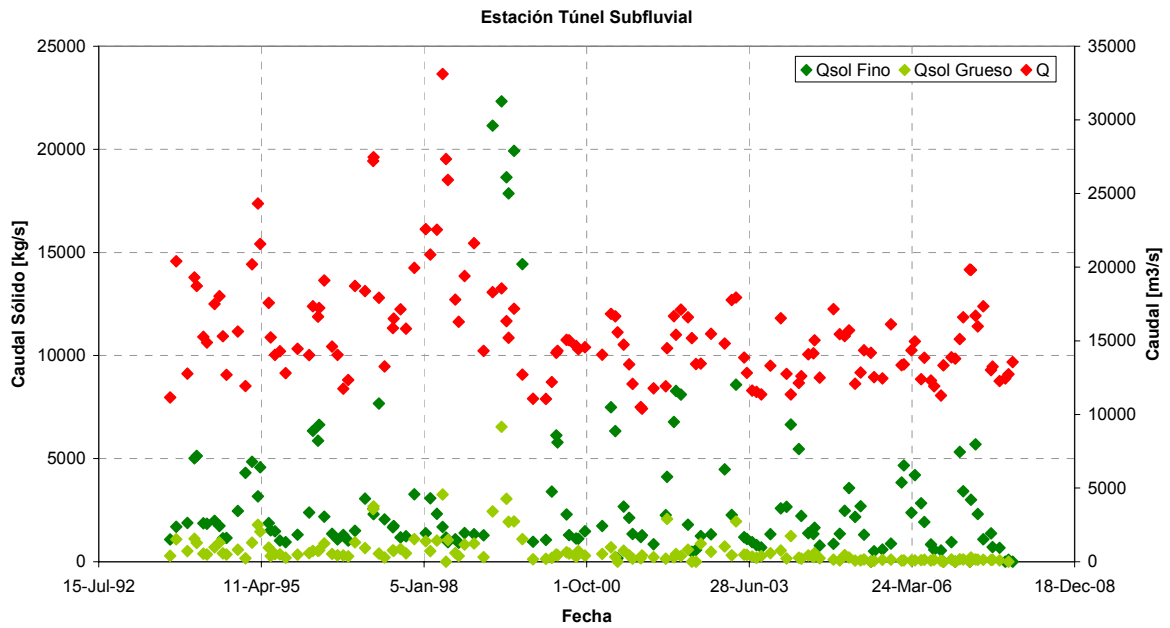


Figura 2.2.3. Datos aforados en la estación Túnel Subfluvial.



Figura 2.2.4. Ubicación de las estaciones de aforo de la Subsecretaría de Recursos Hídricos (SSRH).

Un análisis más detallado del transporte sólido del río Paraná se presenta en la tesis de grado de Alejo Sarubbi, "Análisis del avance del Frente del Delta del Río Paraná" (2007).

2.2.2 Río Uruguay

Al igual que para el río Paraná, se dispuso de las mediciones de caudal sólido en las tres estaciones de la SSRH que se mantienen activas sobre el río Uruguay. La ubicación de las estaciones puede observarse en la Figura 2.2.4. Para la estación "El Soberbio", se contó con aforos sólidos para el período Mayo 1993 - Noviembre 2007, resultando, para la fracción fina, un caudal sólido medio de 110 kg/s (con un valor máximo de 2283 kg/s). Para la fracción gruesa el caudal sólido medio fue de 25 kg/s, con un máximo de 580 kg/s. En la Figura 2.2.5 se muestran los datos aforados en dicha estación, y además se incluyen los valores de caudal líquido para el período citado.

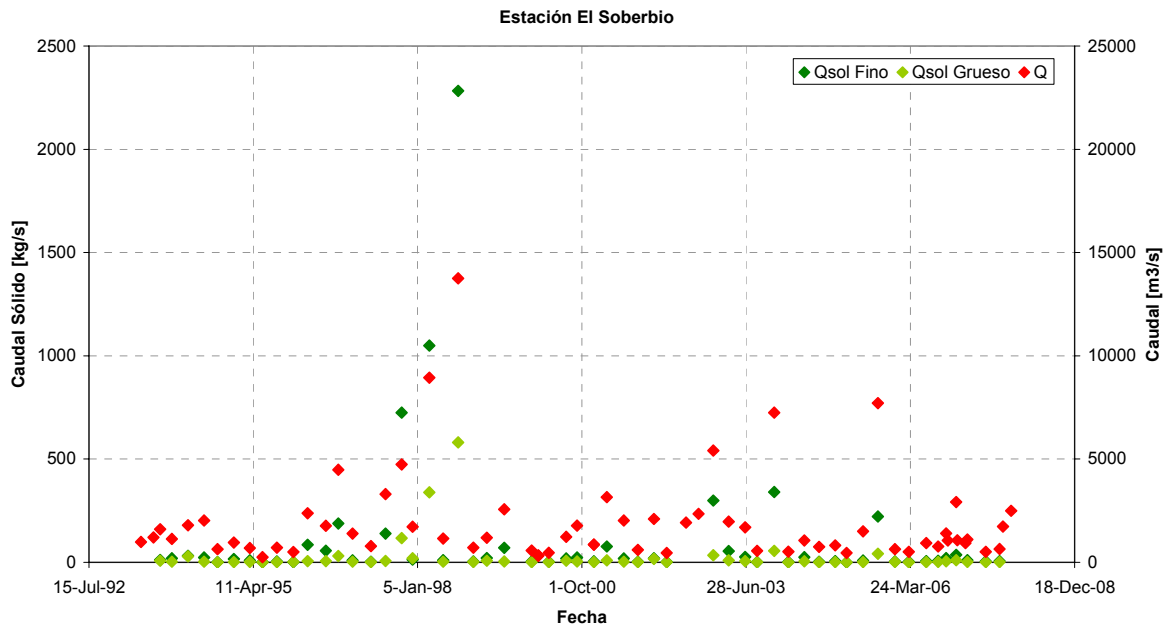


Figura 2.2.5. Datos aforados en la estación El Soberbio.

Para la estación "Garabí", los aforos sólidos corresponden al período Agosto 1993 - Noviembre 2007, registrándose para la fracción fina un caudal sólido medio de 165 kg/s (con un valor máximo de 2212 kg/s). Por su parte, para la fracción gruesa el caudal sólido medio fue de 30 kg/s, con un máximo de 317 kg/s. En la Figura 2.2.6 se muestran los datos aforados en dicha estación.

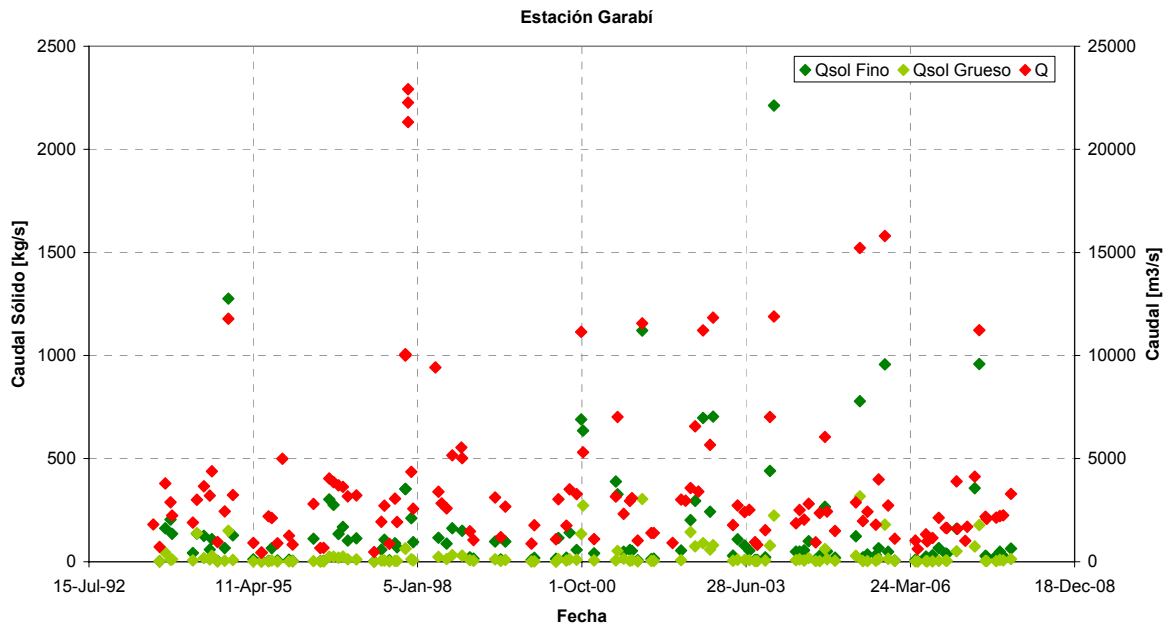


Figura 2.2.6. Datos aforados en la estación Garabí.

Por último, a la altura de la ciudad de Concepción del Uruguay, se encuentra la estación del mismo nombre. En la misma, los aforos sólidos corresponden al período Febrero 1993 - Diciembre 2007, registrándose para la fracción fina un caudal sólido medio de 123 kg/s (con un máximo de 1081 kg/s). Por su parte, para la fracción gruesa el caudal sólido medio fue de 24 kg/s, con un máximo de 265 kg/s. En la Figura 2.2.7 se muestran los datos aforados en dicha estación.

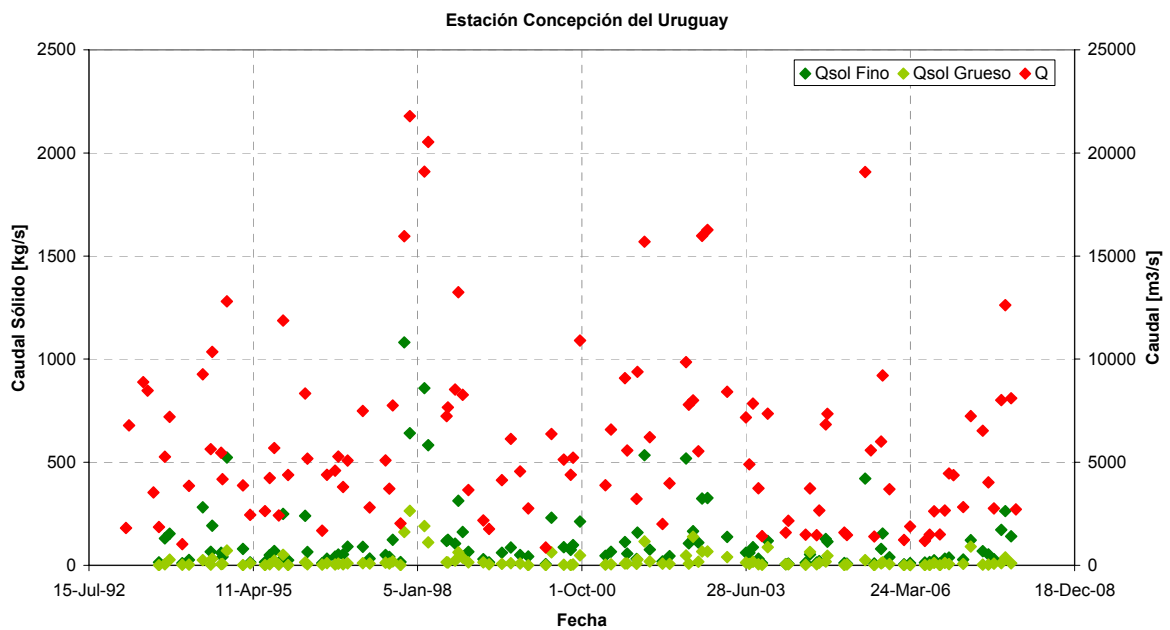


Figura 2.2.7. Datos aforados en la estación Concepción del Uruguay.

3 SEDIMENTOS EN EL RIO DE LA PLATA

Se recopiló toda la información disponible concerniente a sedimentos en el Río de la Plata. Los datos fueron procesados y georeferenciados de manera de poder incorporarlos a un Sistema de Información Geográfica (GIS). De esta forma, se logró facilitar la administración y el análisis de todos los datos recabados. A continuación se describe toda esta información, indicando las distintas fuentes.

3.1 SEDIMENTOS EN SUSPENSIÓN

Los datos de base con los que se contó fueron obtenidos de las siguientes fuentes:

- Ottmann y Urien (1966)
- Royal Boskalis & Ballast Ham
- Dredging (1992)
- Ezcurra & Schmidt (1999)

3.1.1 *Río de la Plata Interior*

En el Río de la Plata Superior, se han observado valores medios de concentración de sedimentos en suspensión que oscilan entre 60 y 100 mg/l, aunque se han detectado valores de hasta 600 mg/l (Halcrow and Partners, 1975; EIH, 1985).

En los cortes transversales de material en suspensión presentados por Ottmann y Urien (1966), se observan valores que se mantienen prácticamente en un mismo orden de magnitud (Figuras 3.1.1 y 3.1.2). Es de destacar que el material en suspensión toma valores decrecientes desde la costa argentina hacia la uruguayaya y que la mezcla vertical se puede asumir como completa.

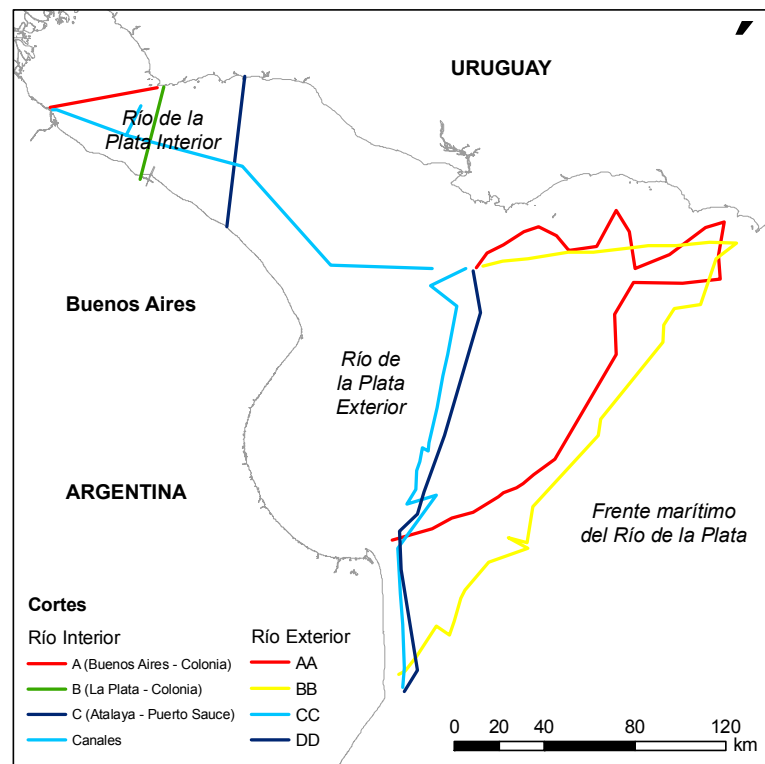
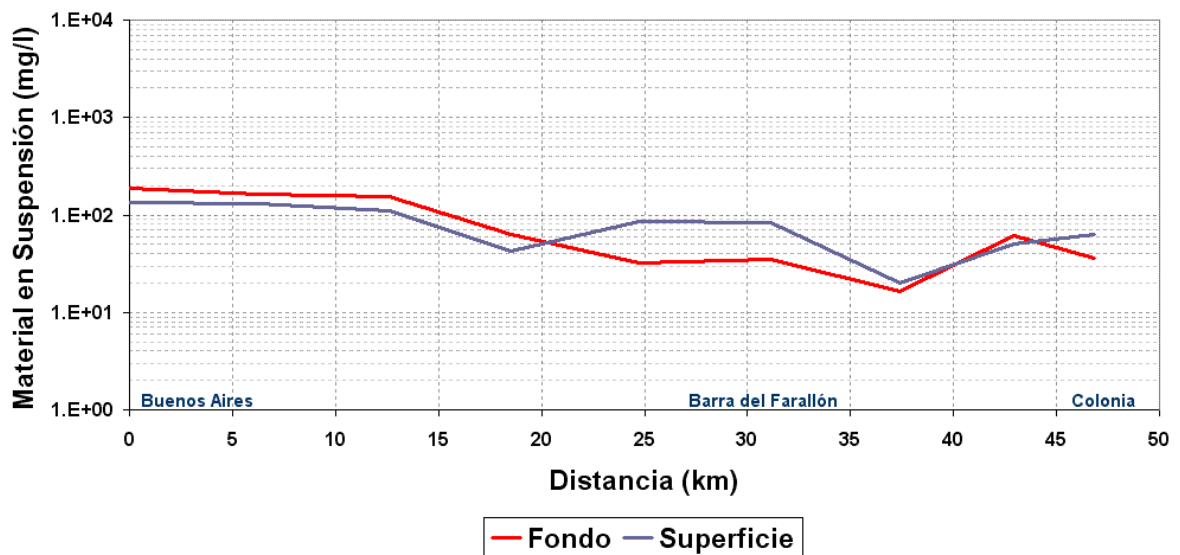
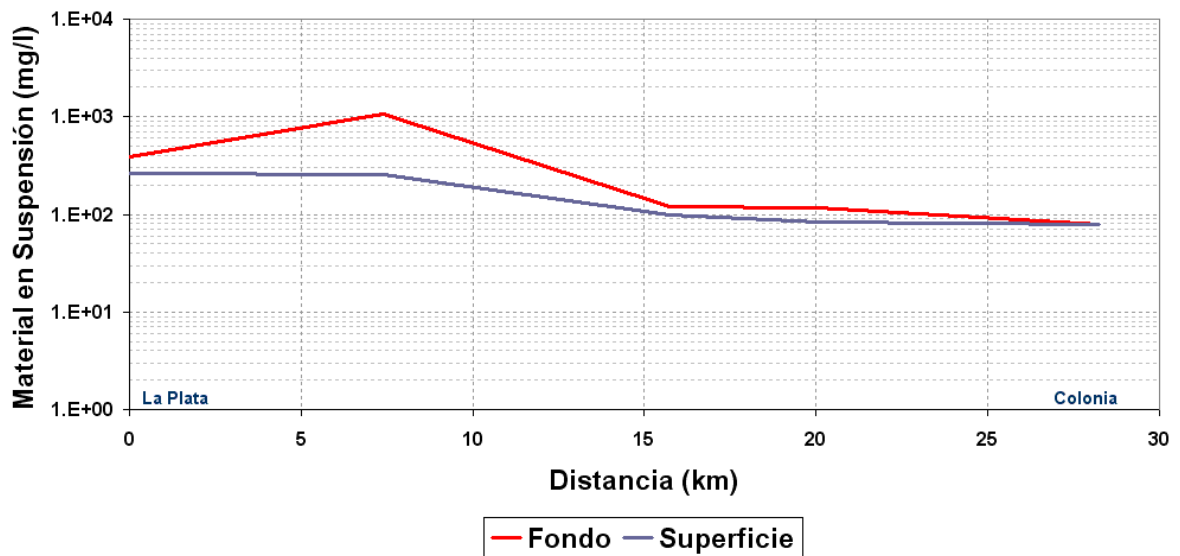


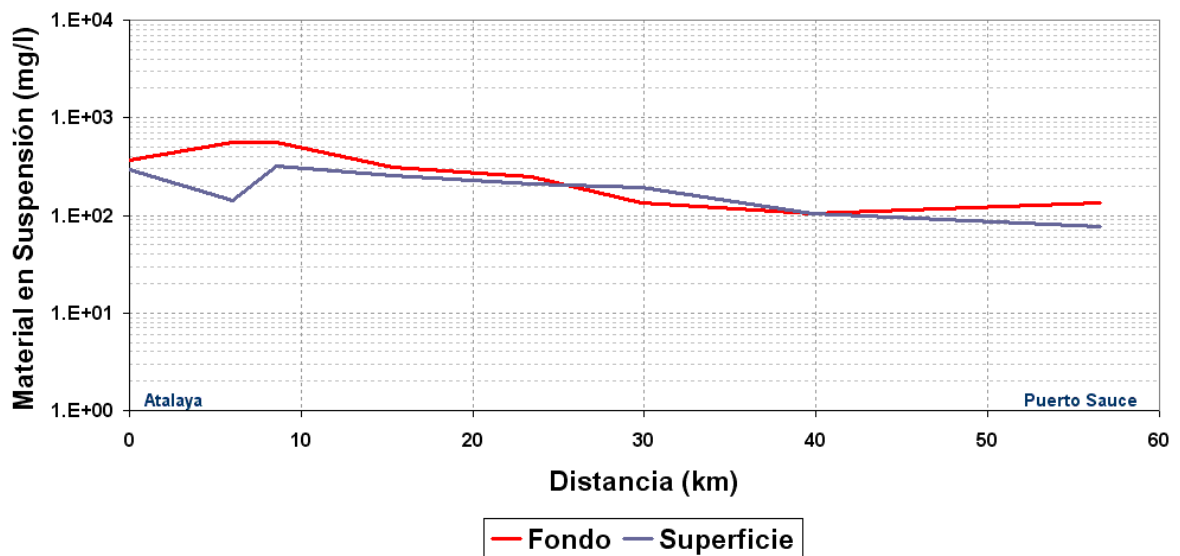
Figura 3.1.1. Ubicación de los cortes transversales de material en suspensión presentados por Ottmann y Urien (1966).



a) Corte Buenos Aires (ARG) – Colonia (URU)



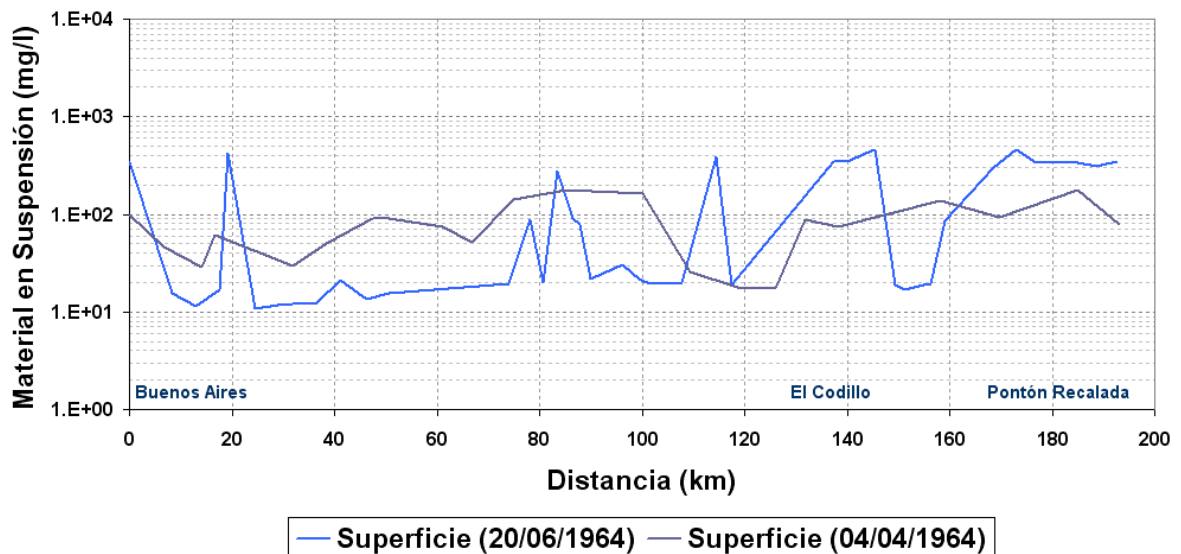
b) Corte La Plata (ARG) – Colonia (URU)



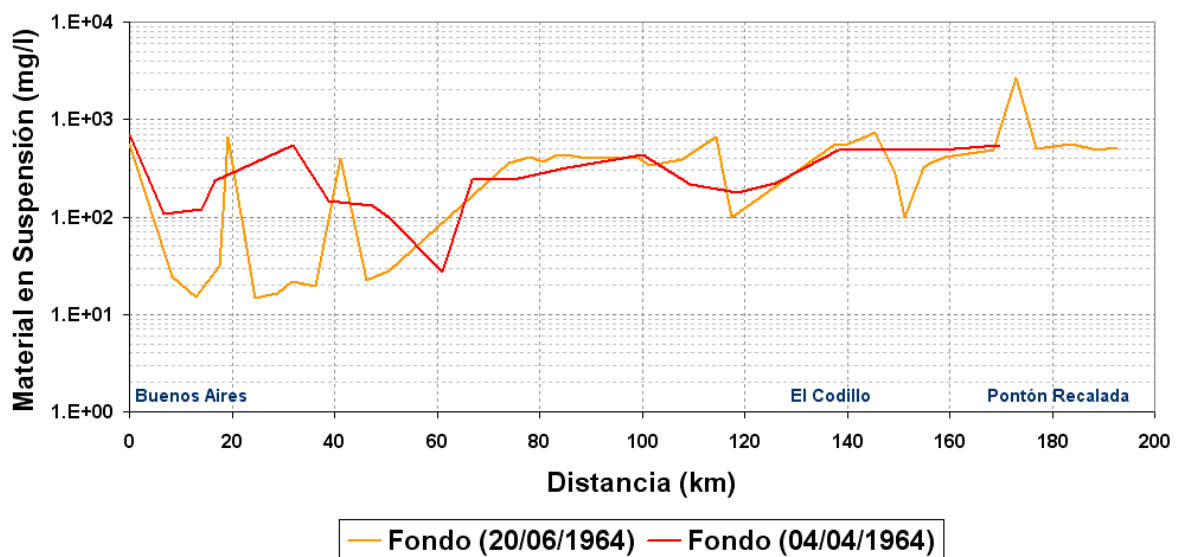
c) Corte Atalaya (ARG) – Puerto Sauce (URU)

Figura 3.1.2. Variación de material en suspensión. Cortes transversales en el Río de la Plata Interior (Ottmann y Urien, 1966).

Ottmann y Urien (1966) también presentan en su trabajo cortes longitudinales de observaciones de material en suspensión realizadas en dos fechas diferentes. Esos resultados se muestran en la Figura 3.1.3, distinguiéndose aquellos valores referidos al fondo de aquellos superficiales. Los valores medidos son del mismo orden de magnitud que los de los cortes transversales. Hacia aguas abajo, en términos generales, las diferencias entre el fondo y la superficie son mayores mostrando una mezcla menor.



a) Superficie



b) Fondo

Figura 3.1.3. Variación de material en suspensión. Cortes longitudinales en el Río de la Plata Interior (Ottmann y Urien, 1966).

También se contó con las mediciones realizadas a lo largo de los canales de navegación (Figura 3.1.4) por las empresas de dragado Royal Boskalis y Ballast Ham Dredging durante Marzo y Abril de 1992. Dichas mediciones incluyen concentración total de sedimentos en suspensión y diámetro medio (d_{50}), tal como se muestra en las Figura 3.1.5 y 3.1.6. Los valores de concentración de sedimentos en suspensión variaron entre 10 y 1000 mg/l, aumentando sobre el canal Punta Indio a medida que se acerca al río exterior.

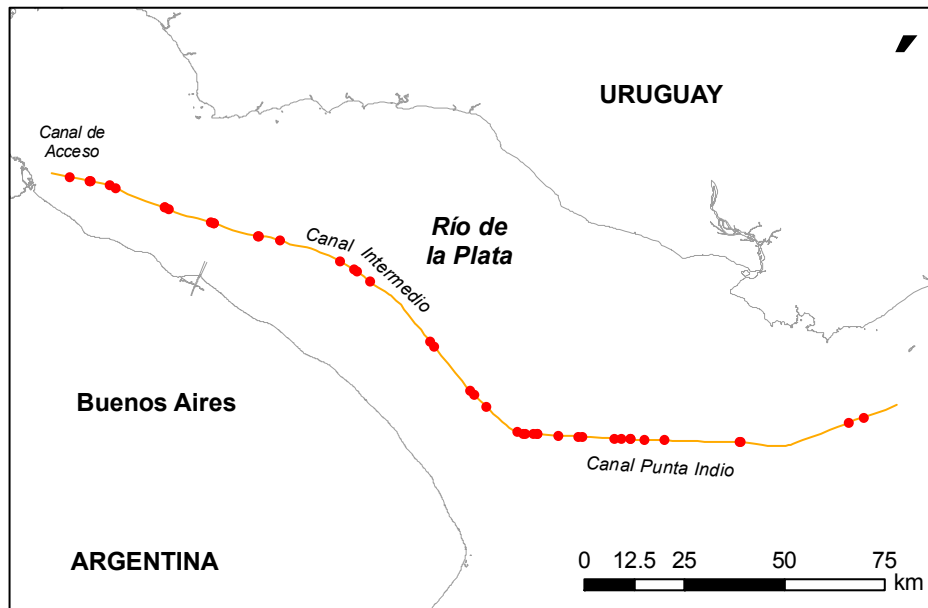


Figura 3.1.4. Ubicación de los puntos relevados por Royal Boskalis y Ballast Ham Dredging en 1992

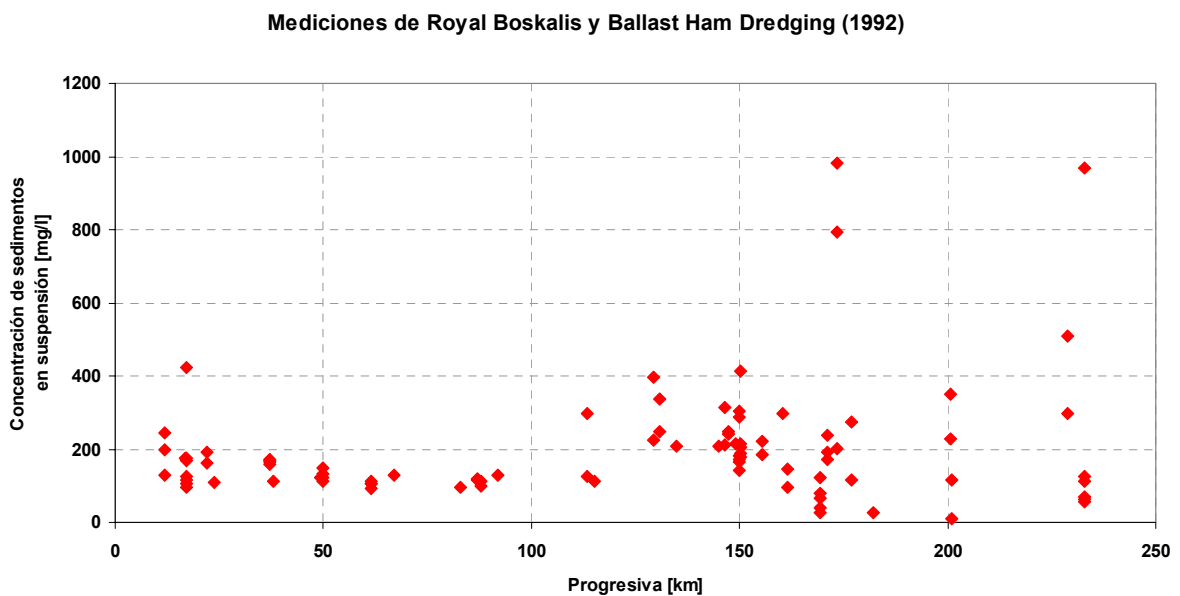


Figura 3.1.5. Mediciones de concentración de sedimento en suspensión realizadas por Royal Boskalis y Ballast Ham Dredging en 1992

Mediciones de Royal Boskalis y Ballast Ham Dredging (1992)

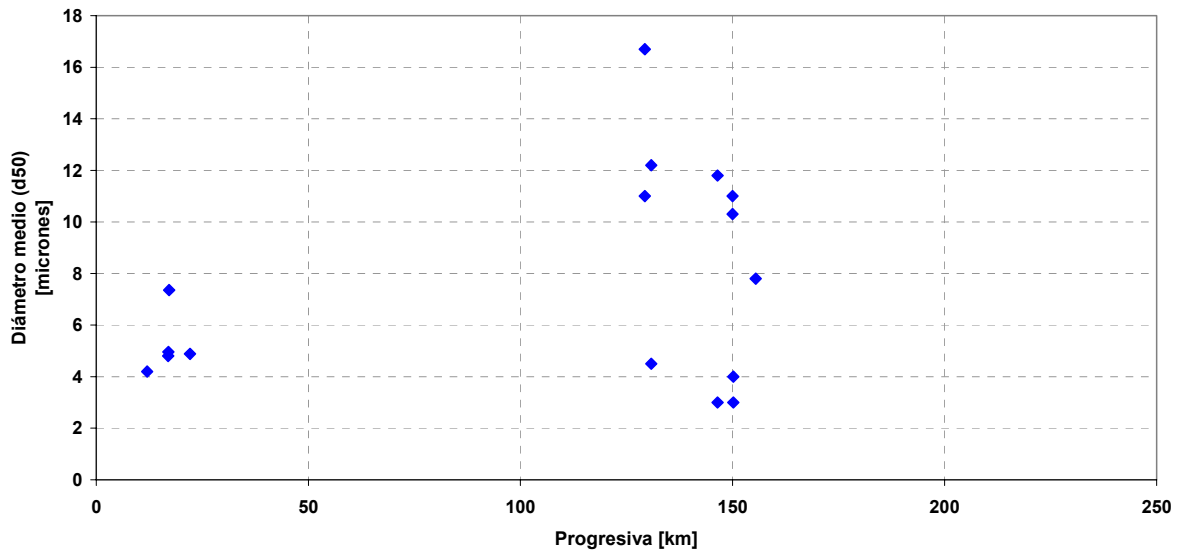


Figura 3.1.6. Mediciones de diámetro medio de sedimento en suspensión realizadas por Royal Boskalis y Ballast Ham Dredging en 1992

En la Tabla 3.1.1 se presentan los valores de concentración de sedimentos en suspensión para distintas muestras tomadas sobre la traza del puente Buenos Aires – Colonia (Ezcurra y Schmidt, 1999). La ubicación de las mismas se indica en la Figura 3.1.7.

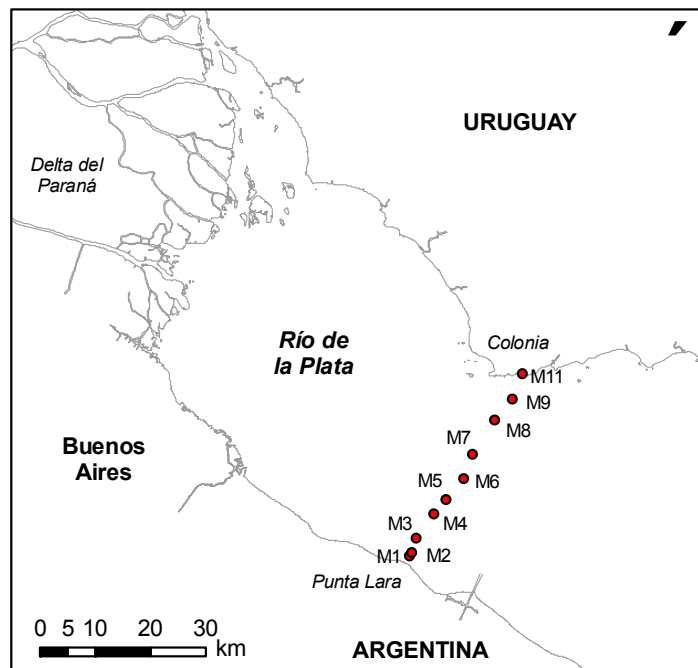


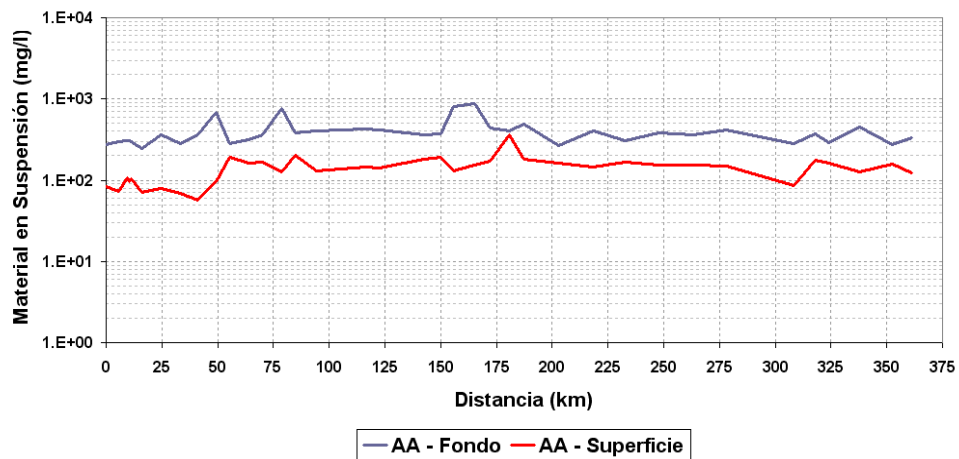
Figura 3.1.7. Ubicación de las muestras de sedimento en suspensión sobre la traza del puente Buenos Aires – Colonia (Ezcurra y Schmidt, 1999)

Tabla 3.1.1. Muestras de sedimento en suspensión sobre la traza del puente Buenos Aires – Colonia (Ezcurra y Schmidt, 1999)

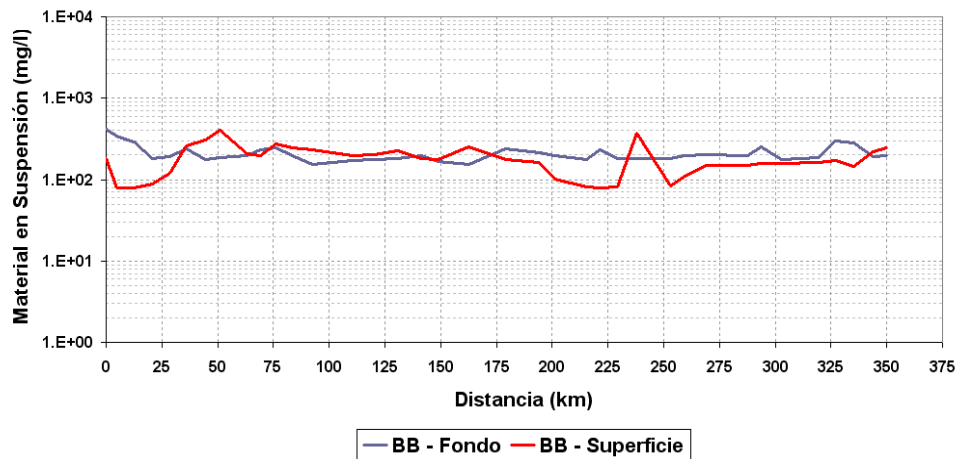
Muestra	Concentración de sedimentos en suspensión [gr/m ³]	Fecha
M1	500	31 Julio 1999
M2	400	31 Julio 1999
M3	500	31 Julio 1999
M4	500	31 Julio 1999
M5	400	31 Julio 1999
M6	500	31 Julio 1999
M7	400	31 Julio 1999
M8	200	31 Julio 1999
M9	400	26 Julio 1999
M11	500	26 Julio 1999

3.1.2 Río de la Plata Exterior

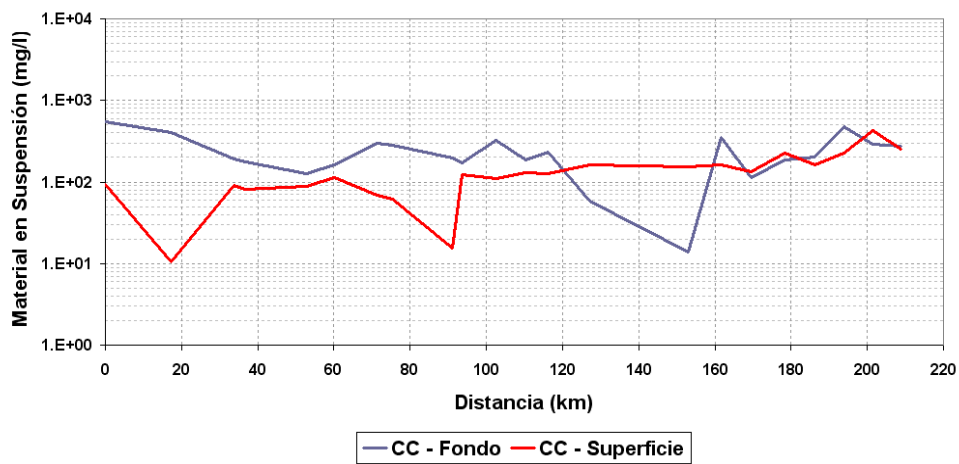
Los cortes de la Figura 3.1.8 muestran concentraciones de material en suspensión en el denominado Frente de Turbidez del Río de la Plata, observándose valores algo mayores a los del Río de la Plata Interior. La ubicación de estos cortes puede observarse en la Figura 3.1.1.



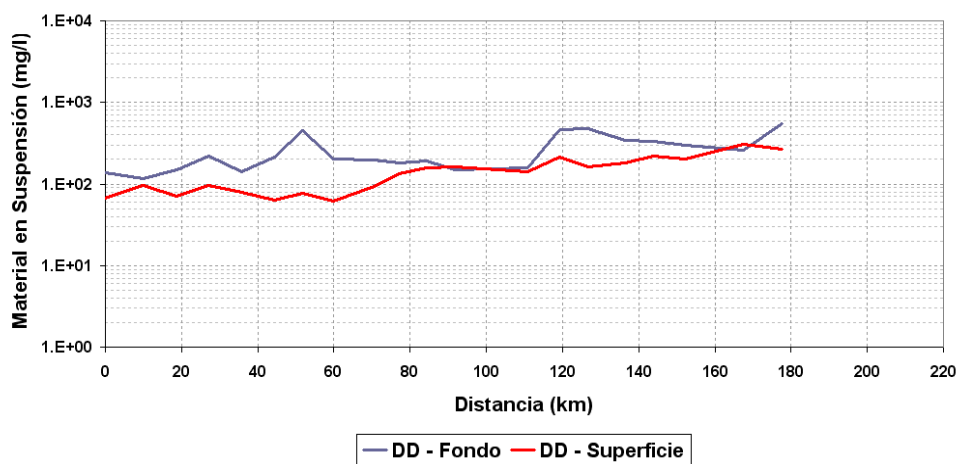
a) Corte AA



b) Corte BB



c) Corte CC



d) Corte DD

Figura 3.1.8. Variación de material en suspensión. Cortes en el Río de la Plata Exterior (Ottmann y Urien, 1966).

El material en suspensión observado en la zona exterior del río, se puede decir que es de origen fluvial ya que el aporte marino puede considerarse despreciable.

3.1.3 Dinámica general de los sedimentos en suspensión

La provisión de sedimentos en suspensión al Río de la Plata básicamente está dada por los aportes de sus tributarios. Otras fuentes tienen que ver con los aportes de material de fondo resuspendido de zonas de rompiente durante eventos de tormenta y con las operaciones de dragado. En situaciones hidrometeorológicas normales, el material en suspensión en el Río de la Plata es limo-arcilloso.

Dada la granulometría fina de este sedimento, la velocidad de caída es pequeña, determinando que la concentración de sedimento en suspensión tenga una respuesta lenta a los cambios en la velocidad del flujo o en la batimetría (Bombardelli et al., 1995)

En términos generales, se observan valores medios de sedimentos en suspensión iguales o apenas mayores en el Río de la Plata Exterior a los del Río de la Plata Interior. Son varias las causas que explican esta diferencia, destacándose la disminución de las velocidades de escurrimiento de la descarga fluvial, la floculación de las arcillas ante la presencia del frente salino y la resuspensión de sedimentos de fondo debido a la acción de olas más importantes y de las corrientes en las zonas poco profundas.

Además, se observa una mayor variabilidad en los valores del Río de la Plata Interior (Figura 3.1.9). Concentraciones marcadamente diferentes entre en la superficie y el fondo se observan en el Río de la Plata Interior.

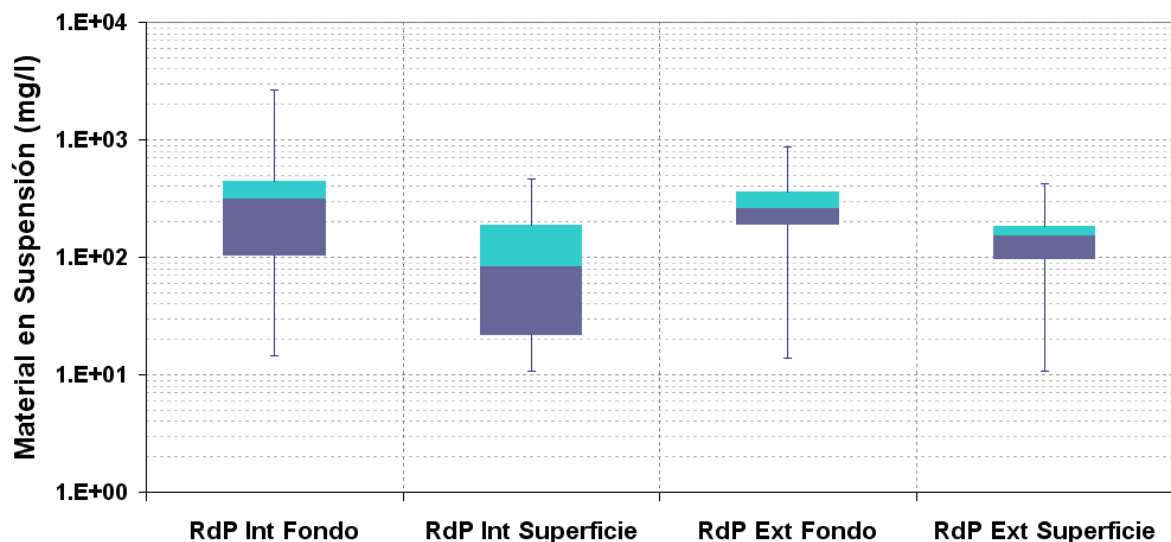


Figura 3.1.9. Diagramas de cajas de material en suspensión. Datos de Ottmann y Urien (1966).

Según Guarga et al. (1991), sobre la costa sur del Río de la Plata Superior existen mejores condiciones para mantener el sedimento en suspensión y sobre la costa norte para el transporte neto de sedimentos hacia la zona intermedia.

3.2 SEDIMENTOS DE FONDO

Los datos de base con los que se contó fueron obtenidos de las siguientes fuentes:

- Ottmann y Urien (1965)
- Ottmann y Urien (1966)
- Urien (1966)
- Parker et al. (1987)
- Laborde y Nagy (1999)
- Base de datos del SOHMA

3.2.1 Río de la Plata Interior

Según Urien (1966), existen en el Río de la Plata Superior tres áreas destacables sobre la base de sedimentos que la caracterizan: arenas, limos y fangos (Figura 3.2.1).

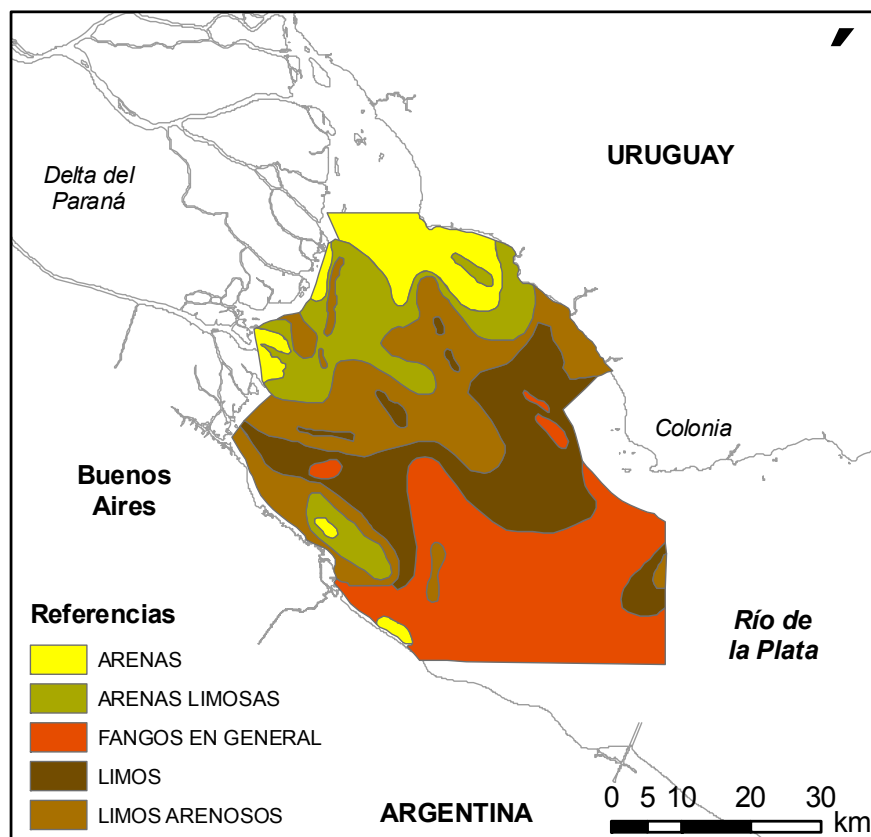


Figura 3.2.1. Río de la Plata Superior (Urien, 1966).

Área de arenas

Urien (1966) propone que las arenas se distribuyen en la zona de descarga de los ríos (el material de fondo es casi exclusivamente arena con 95% a 60% de fracción gruesa, con diámetros medios de 0.4 a 0.1 mm). Además, afirma que los mayores contenidos de arena (75% y 90%) corresponden al sector de Martín García y las barras del canal Norte, que la otra gran concentración de arena (superior al 85%) en la desembocadura del Paraná de las Palmas inmediatamente decrece al extenderse sobre los bancos frente al mismo, y que sobre la costa uruguaya se extiende una larga franja arenosa producto del transporte fluvial (arenas uniformes y desprovistas de limos o arcillas). Hacia el norte, en las playas a lo largo de la costa uruguaya, aparecen bancos de arena debido a la erosión del macizo cristalino de las costas (Ottmann y Urien, 1966).

Debido las características dinámicas, en esta zona se depositan los sedimentos más gruesos aportados por los ríos Paraná y Uruguay generalmente transportado como carga de fondo y excepcionalmente en períodos de crecida como material en suspensión. La deposición de las arenas en esta zona del río se ilustra en la Figura 3.2.2, observándose la evolución de las islas Oyarvide (aparición de las islas Lucía) y Martín García (isla Timoteo Domínguez incorporada a la misma) en el último siglo (Figura 3.2.2.a) y costa arenosa de la isla Timoteo Domínguez (Figura 3.2.2.b)

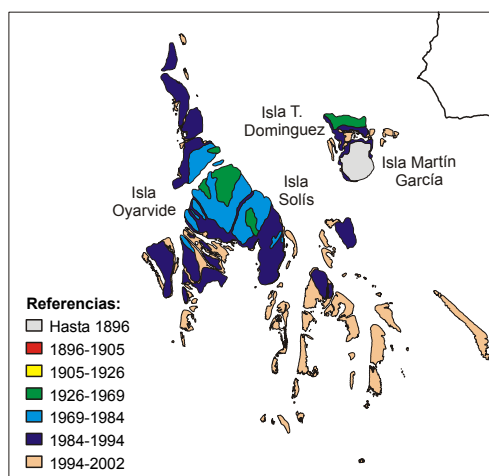


Figura 3.2.2. Islas del Río de la Plata Superior: a) Evolución areal (Sarubbi, 2007), b) Costa arenosa de la isla Timoteo Domínguez.

Área de limos

Urien (1966) observa que la zona de limos en el Río de la Plata Superior se extiende hacia el sur y el este de la zona de arenas: frente del delta subfluvial y zona de Playa Honda, detectándose dos subzonas: limos arenosos (entre un 25% y 50% de arena) y limos con arena (entre un 10% y 25% de arena, con escasa arcilla debido a la importante corriente fluvial). Según Toman y Urien (1966), pasando el eje Colonia - La Plata hasta Pontón Recalada (Río de la Plata Medio) solo se encuentran limos y limos arcillosos donde las partículas más gruesas no pasan de 0.1 mm.

Área de fangos

El área de fangos (sedimentos predominantemente limosos, sin arena y con poco contenido de arcilla) se extiende hacia la costa de Buenos Aires (Urien, 1966). *En esta zona el río no puede transportar más que limos, manteniendo las arcillas en suspensión.*

Dinámica General

Las principales conclusiones de Urien (1966) son las siguientes: a) El delta subfluvial del Paraná se extiende en forma de lóbulos hacia el SE con dos aportadores de sedimentos. b) La sedimentación en el prodelta es, en general, de arena mediana a fina, y arena fina a limosa. c) El material arcilloso se presenta en el Río de la Plata Medio.

Los sedimentos no consolidados provienen, básicamente, de los ríos afluentes. Con la expansión del flujo al penetrar en el Río de la Plata, y la disminución progresiva de transporte neto, al aumentar la componente de corriente mareográfica y disminuir la fluvial, las fracciones más gruesas de la carga de sedimento en suspensión se depositan primero, mientras que las finas son transportadas una distancia mayor.

En la Tabla 3.2.1 se muestran valores representativos de granulometría de muestras de fondo tomadas en canales de navegación y bancos adyacentes, y la profundidad asociada (Wallingford, 1967). Se observa que, en general, la granulometría del material sedimentado en los canales es más fina que la de los bancos adyacentes.

Tabla 3.2.1. Muestras de fondo tomadas en canales de navegación y bancos adyacentes.

Toma	Profundidad [m]	D50 [μ]
Canal de Acceso	8.84 (29 pies)	25
Canal Norte (Acceso)	9.14 (30 pies)	20
Canal Sur (Acceso, Km. 3)	7.92 (26 pies)	20
Canal Costanero (Km. 19)	3.35 (11 pies)	30
Entre Canal Norte y Sur	2.74 (9 pies)	60
SE Canal Sur	2.44 (8 pies)	90
E Canal Costanero	1.52 (5 pies)	50
Playa Honda	1.52 (5 pies)	70

3.2.2 Río de la Plata Exterior

En la Figura 3.2.3, se muestra la distribución de sedimentos de fondo del Río de la Plata exterior según mediciones realizadas por Ottmann y Urien en 1965.

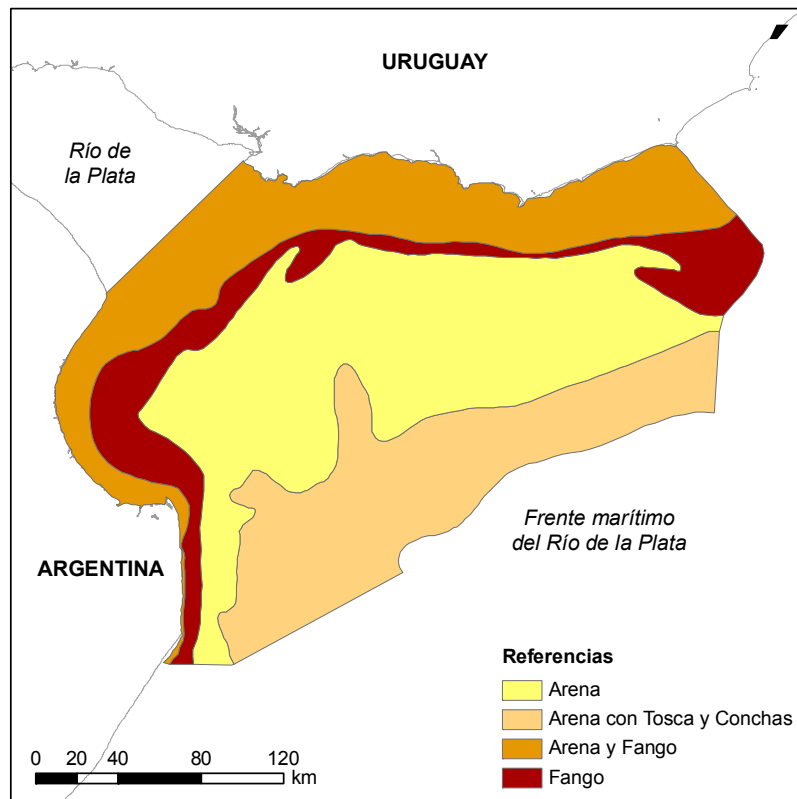


Figura 3.2.3. Sedimentos de fondo en el Río de la Plata Exterior (Ottmann y Urien, 1965).

De acuerdo a Ottmann y Urien (1966), los Bancos Arquímedes, Inglés y Rouen están formados por arena pura, algo conchífera, que se extiende hacia el sudeste en gran arco. Su granulometría muestra curvas regulares, muy bien clasificadas. Bordeando la costa uruguaya existe una franja de arena de playa (sumamente re trabajada y su paragénesis es en general diferente al de las depositadas en el sudeste del río). Estas arenas corresponden al material arenoso que constituye en gran parte el pampeano uruguayo (son expulsadas al Río de la Plata por los numerosos ríos que desaguan en sus costas). La distribución de los sedimentos de fondo puede observarse en la Figura 3.2.4.

En la parte externa de las arenas que se encuentran distribuidas al SE de los bancos Ingles y Rouen, se nota que estas se tornan mas gruesas. Las medianas de estas arenas dan valores que van de 0.15 a 0.33 mm. Las más elevadas se encuentran hacia el exterior (mar afuera y al sur en dirección punta médanos). Estas medianas son más elevadas que las de los sedimentos del río interior, concluyéndose que no fueron aportadas por el Río de la Plata. Son arenas transportadas por el mar desde el sur. La distribución de medianas granulométricas se muestra en la Figura 3.2.5.

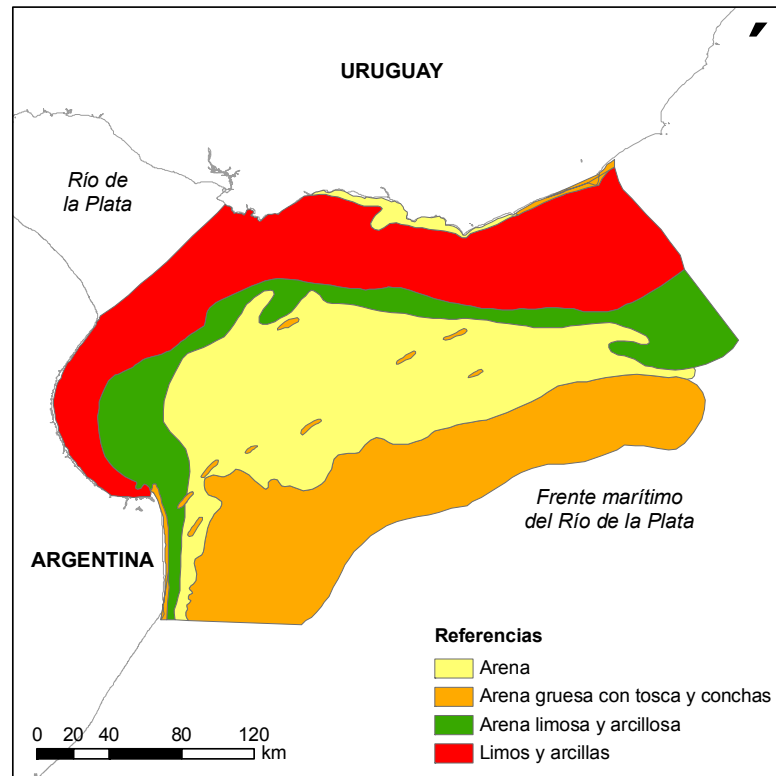


Figura 3.2.4. Sedimentos de fondo en el Río de la Plata Exterior (Ottmann y Urien, 1966).

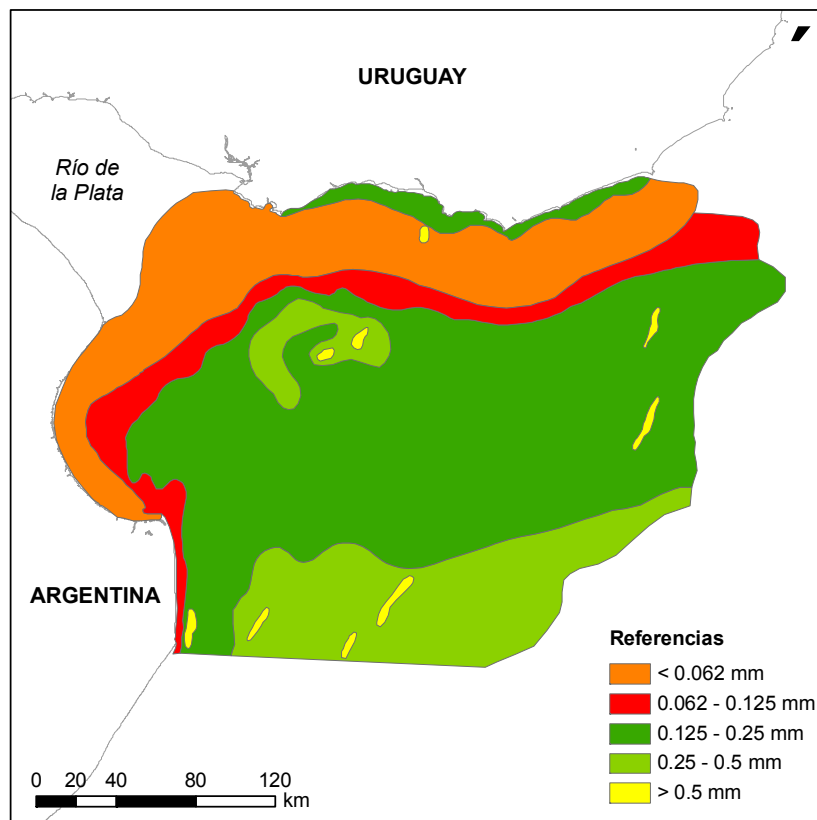


Figura 3.2.5. Medianas granulométricas en el Río de la Plata Exterior (Ottmann y Urien, 1966).

En la Figura 3.2.6, se muestra la asociación genética de sedimentos para todo el Río de la Plata según Parker et al. (1987).

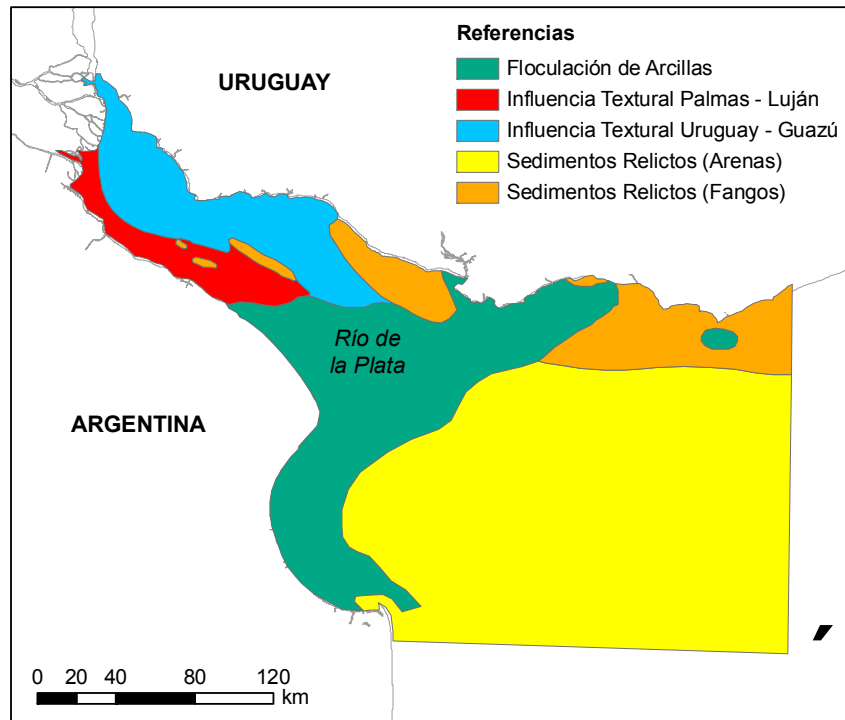


Figura 3.2.6. Asociación genética de sedimentos según Parker et al. (1987).

Por su parte, en la Figura 3.2.7, se muestra la distribución de sedimentos de fondo en todo el Río de la Plata según el diagrama de Shepard (Laborde y Nagy, 1999).

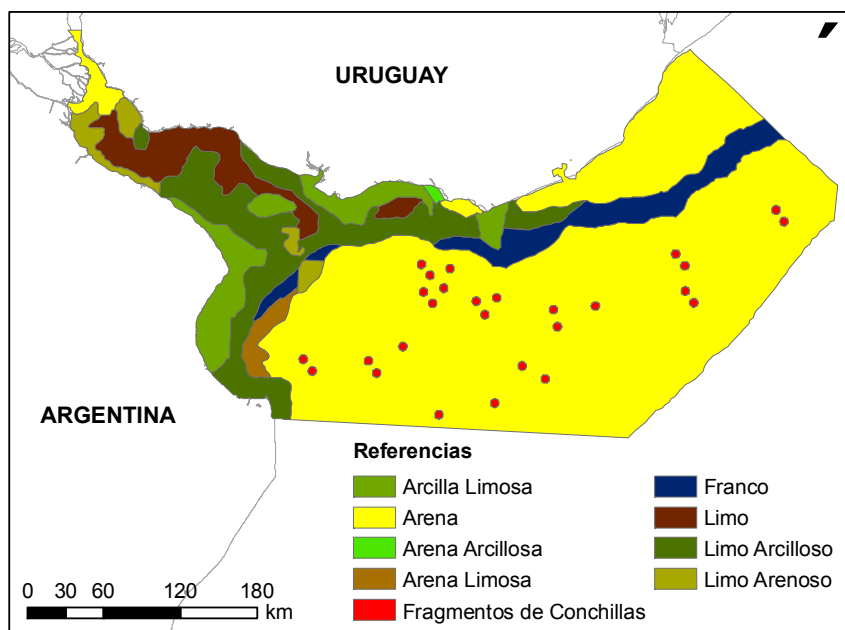


Figura 3.2.7. Distribución de sedimentos de fondo según Laborde y Nagy (1999).

También se contó con la información de composición de sedimentos de fondo de la base de datos del Servicio de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología de la Armada de la República Oriental del Uruguay (SOHMA). La misma incluye mediciones llevadas a cabo por dicha institución y datos recopilados de otras fuentes. En la Figura 3.2.8 se observa la ubicación de los distintos datos de la base, los cuales se extienden por todo el Río de la Plata y su frente marítimo.

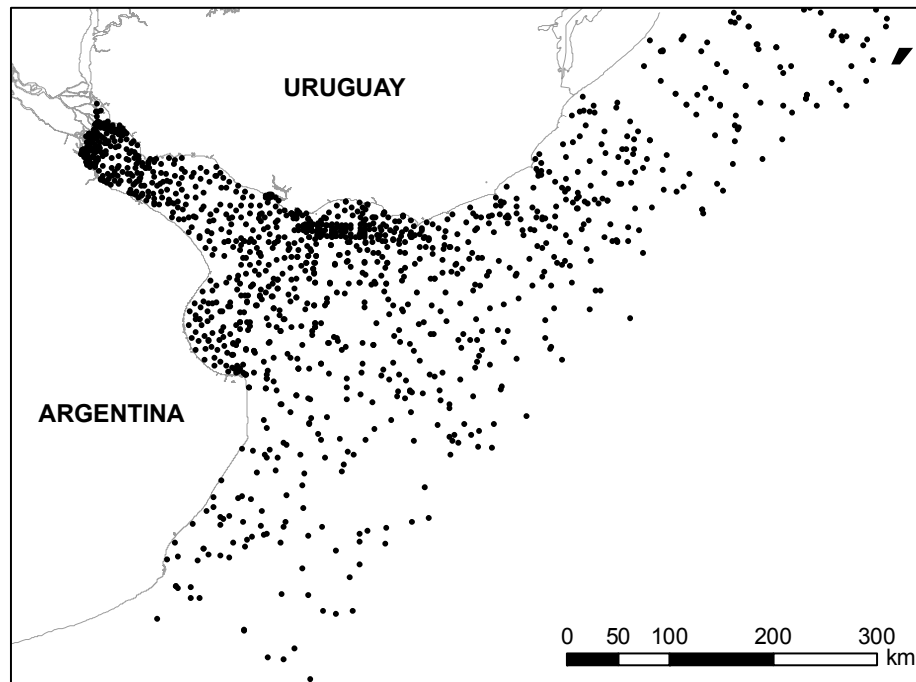


Figura 3.2.8. Ubicación de la información de la base de datos del SOHMA.

3.3 ESQUEMA GENERAL DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Un primer esquema de la dinámica de sedimentos fue propuesto por Ottmann y Urien (1966), Figura 3.3.1, mostrando un esquema simplificado de los fenómenos dinámicos que se dan en el Río de la Plata Exterior (descarga fluvial, componentes de marea astronómica, deriva litoral).

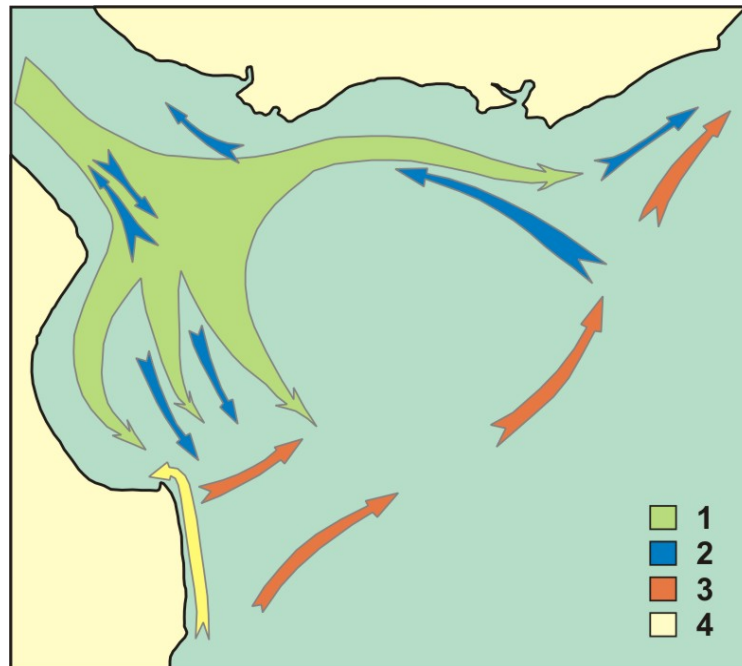


Figura 3.3.1. Esquema de fenómenos dinámicos en el Río de la Plata Exterior (1: Descarga de agua dulce, 2: Movimiento de la marea, 3: Desplazamiento de arenas por deriva litoral, 4: Desplazamiento probable de arenas) (Ottmann y Urien, 1966).

Un modelo sedimentario más completo fue planteado por Parker et al. (1987), Figura 3.3.2, basándose en las siguientes consideraciones:

- En el río Superior y Medio, la dispersión de los sedimentos está determinada por la pérdida de competencia de sus grandes afluentes, la ola y la marea proveniente del este dando origen al delta que se extiende hacia el sureste en forma de lóbulos formados por arenas medianas a finas y limos, sin elementos arcillosos.
- Entre La Plata y El Códillo, las arcillas aumentan su concentración, por la remoción sobre el fondo, que ejerce la cuña salina asociada a la alta marea.
- Hacia la costa sur se da un transporte de sedimentos característicos del Paraná y Pampeanos de zona costera central, y aportes desde el sur.
- En el río Exterior, la descarga fluvial solo tiene influencia a lo largo de la costa. El grueso de la descarga de sedimentos en suspensión ocurre a través del canal del Norte, alcanzando los pozos de fango mientras que por la Bahía de Samborombón, más protegida, se favorece la precipitación de finos. Las diferencias de la composición de las arcillas en ambas costas fueron atribuidas a aportes del escudo brasileño-uruguayo.

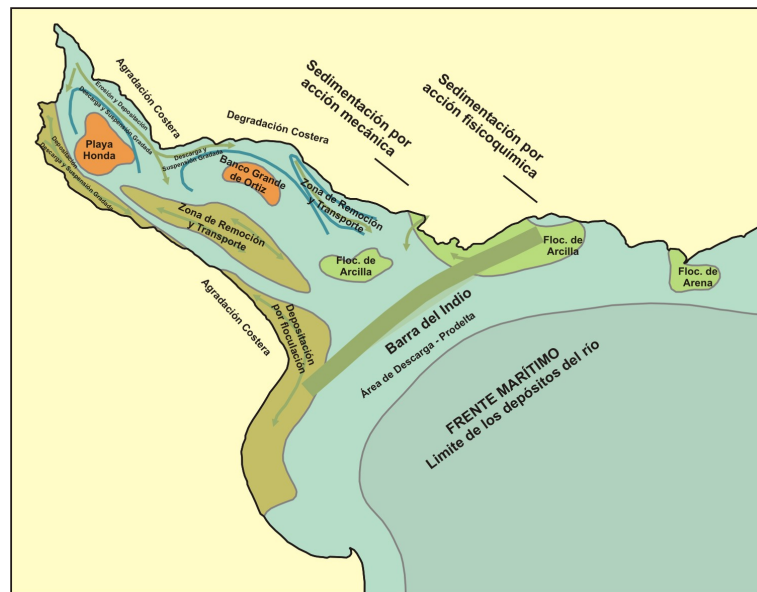


Figura 3.3.2. Modelo esquemático del transporte y dispersión de sedimentos en el Río de la Plata (Parker et al., 1987).

Otra conceptualización de la dinámica de sedimentos en el Río de la Plata fue presentada por Nagy et al. (1987). En este caso se mostró un modelo conceptual morfodinámico (Figura 3.3.3) donde la morfología del fondo interactúa con las descargas de agua dulce, la intrusión marina y las características de la marea astronómica y meteorológica, determinando patrones de circulación y distribuciones de sedimentos.

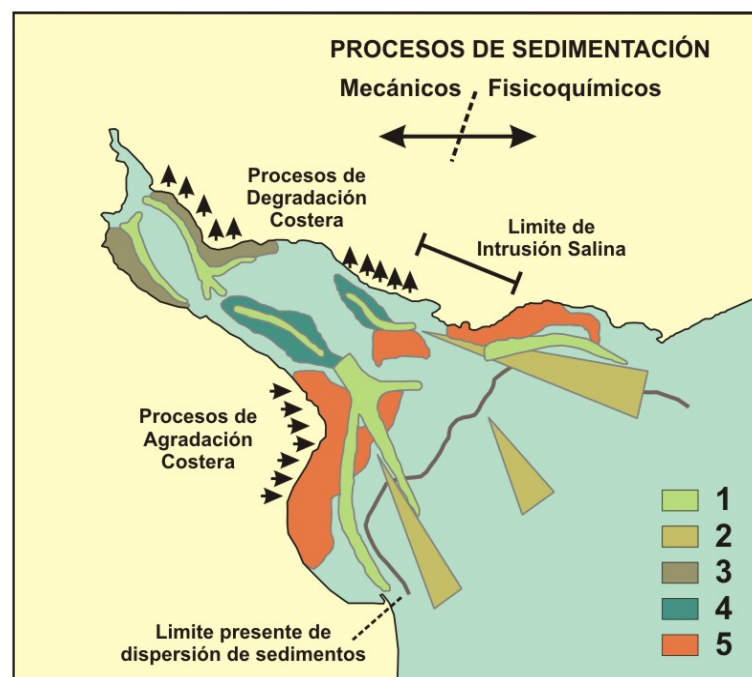


Figura 3.3.3. Modelo conceptual morfodinámico (1: Descarga de agua dulce, 2: Intrusión salina, 3: Áreas de deposición, 4: Áreas de transporte y erosión, 5: áreas de deposición y floculación) (Nagy, Laborde y Anastasia, 1987).

REFERENCIAS

- Alarcón, J.J., Szupiany, R., Montagnini, M.D., Gaudin, H., Prendes, H.H. y Amsler, M.L., 2003, Evaluación del Transporte de Sedimentos en el Tramo Medio del río Paraná, 2003, Primer Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos.
- Bombardelli, F.A., Menéndez, A.N., Lapetina, M.R., Montalvo, J.L., Estudio del impacto hidráulico del puente Buenos Aires – Colonia, Informe LHA-INCYTH 141-01-95.
- D'Onofrio, E.E, Fiore, M.E., Romero, S.I., 1999, Return periods of extreme water levels estimated for some vulnerable areas of Buenos Aires, *Continental Shelf Research*, 19, pp. 1681-1693.
- Dragani, W.C. y Romero, S.I., 2004, Impact of a possible local wind change on the wave climate in the upper Río de la Plata, *International Journal of Climatology*, 24(9), 1149-1157.
- EIH, 1985, Estudio de antecedentes del Canal Ingeniero Emilio Mitre, Informe Final, CEDEPORMAR.
- Ezcurra & Schmidt, 1999, Muestreos de Suelos en el Río de la Plata, Informe Final, Comisión Binacional Puente Buenos Aires-Colonia.
- Garrido, M.I., 1968, El lecho del Río de la Plata, *Boletín SHN*, v.5 (3), 220-224, Buenos Aires.
- Guarga, R., Vinzón, S., Rodríguez, H., Piedra-Cueva, I., Kaplan, E., 1991, Corrientes y sedimentos en el Río de la Plata, IMFIA, Montevideo, Uruguay.
- Halcrow and Partners, 1969, Estudio y proyecto del canal de vinculación entre el Puerto de Buenos Aires y el Río Paraná de las Palmas, Informe Final, DNCPyVN.
- Jaime, P.R., Menéndez, A.N., 2002, Análisis del régimen hidrológico de los ríos Paraná y Uruguay, Informe LHA-05-216-02, INA, Ezeiza, Comitente. Proyecto FREPLATA.
- López Laborde, J., 1987. Distribución de sedimentos superficiales de fondo del Río de la Plata Exterior y Plataforma adyacente, *Invest. Oceanológicas*, Vol. 1(1), pp. 19-30.
- López Laborde, J., 1997, Marco geomorfológico y geológico del Río de la Plata, en *The Río de la Plata: an Environmental Review*, Wells and Daborn (Eds.), An ECOPLATA project Background Report, Dalhousie University, 248 p.
- López Laborde, J. y Nagy, G.J., 1999, Hydrography and sediment transport characteristics of the Río de la Plata: a review. En: Perillo, G. M. E.; Piccolo, M. C. y Pino, M. (Eds.) *Estuaries of South America: Their geomorphology and dynamics*. Springer, pgs. 133 - 160

- Molinari, G. Castellano, R.D., 1990, Estudio de la Costanera Sur de la Ciudad de Buenos Aires – Determinación de las condiciones hidrodinámicas, Informe LHA-INCYTH 059-09-90.
- Nagy, G.J., López Laborde, J, Anastasía, L.H., 1987, Caracterización de ambientes del Río de la Plata Exterior (salinidad y turbiedad óptica), Invest. Oceanológ. 1 (1), 31:56.
- Parker, G., Marcolini, J., Cavalloto, J., Violante, R., 1987, Modelo esquemático de dispersión de sedimentos en el Río de la Plata, Ciencia y Tecnología del Agua, Vol. 1, No. 4, pp. 68-80.
- Ottmann, F., Urien, C.M., 1965, Observaciones preliminares sobre la distribución de los sedimentos en la zona externa del Río de la Plata, Separata, v.37 (2), Anais da Academia Brasileira de Ciencias, Río de Janeiro.
- Ottmann, F., Urien, C.M., 1966, Sur quelques problèmes sédimentologiques dans le Rio de la Plata, Revue de Géographie Physique et de Géologie Dynamique (2), Vol. VIII, Fasc. 3, pp. 209-224, Paris.
- Royal Boskalis & Ballast Ham Dredging, 1992, Ruta de Navegación de Ultramar San Martín - Océano, Informe para la licitación del dragado de la vía navegable, Dirección de Vías Navegables.
- Sarubbi, A., 2007, Análisis del avance del Frente del Delta del Río Paraná, Tesis de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires, 145 p.
- Silva Busso, A., Amato, S., Seoane, N., Pittau, M., 2004, Aportes al conocimiento de la geología del subsuelo del delta del río Paraná, Informe LHA 03-235-04, INA, Ezeiza.
- Urien, C.M., 1966, Distribución de los sedimentos en el Río de la Plata Superior, Tirada Aparte del Boletín del Servicio de Hidrografía Naval, Volumen III (3), 197-203.
- Wallingford, 1967, Sediment movement on the Playa Honda River Plate, Report EX 374, Hydraulics Research Station, October.