



Tesis de grado en Ingeniería Civil

FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES

Análisis del Avance del Frente del Delta del Río Paraná



ALEJO SARUBBI

Julio de 2007

Tesis de grado en Ingeniería Civil

**FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES**

*Análisis del Avance del Frente
del Delta del Río Paraná*

Tesista: **Sr. Alejo SARUBBI**

Tutor: **Dr. Ángel N. MENÉNDEZ (FIUBA)**

Fecha de Presentación: Julio de 2007

Tribunal Examinador:

Ing. José D. BREA (INA)

Dr. Jorge O. CODIGNOTTO (FCEyN UBA)

Dr. Alfonso PUJOL (FIUBA)

AGRADECIMIENTOS Y RECONOCIMIENTOS

Deseo expresar mi agradecimiento a todos aquellos que de distintas maneras colaboraron conmigo en la producción de esta Tesis. A Ángel Menéndez, por guiarme con sapiencia durante todo el trabajo, brindándome siempre su consejo y atención. A las autoridades del Instituto Nacional del Agua (INA), en particular a Julio De Lío, Director del Laboratorio de Hidráulica (LHA); a Marcos Pittau, con quien, gracias al Delta, me une una gran amistad; a Daniel Brea y Pablo Spalletti del LHA del INA, por los datos provistos sobre el Río Bermejo; a Adrián Silva y Sergio Amato de la Dirección de Servicios Hidrológicos (DSH) del INA, por sus aportes respecto a la geología del Delta; a Marcelo Uriburu Quirno de la Dirección de Sistemas de Información y Alerta Hidrológico (SiyAH) del INA, por los datos provistos sobre las presas brasileñas; a Jorge Codignotto y Rubén Medina de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (FCEyN) de la UBA, por su colaboración en la identificación de las fuentes de datos cartográficos. A los miembros del Tribunal Examinador, por su gran disposición y amabilidad.

En especial agradezco a mis viejos, Antonio y Ana María, por enseñarme, cada uno a su modo, que lo más importante en la vida no se ve con los simples ojos. A mis hermanas, Anabella y Marisol, por el apoyo y cariño brindado en todo momento. A toda mi familia! A mis amigos, en especial Fran, sencillamente por ser un tipazo, y Sebastián, o simplemente Johan, quien una vez me dijo que los amigos son hermanos que se eligen. A mis compañeros del trabajo, en particular a los integrantes del Programa de Hidráulica Computacional del INA, quienes me enseñaron muchísimo. A mis profesores y compañeros de la Facultad. Y muy especialmente, a mi querida escuela secundaria, la E.T. N° 14 “Libertad”, que me cobijó durante seis años de mi vida y me formó como persona. Gracias a todos!

La presente Tesis, se enmarca dentro del proyecto de investigación “Simulación y Predicción del Crecimiento del Frente del Delta del Río Paraná”, financiado por la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (SECYT) como PICT 9351 BID 1201/OC-AR. Fue llevada a cabo en las instalaciones del Laboratorio de Hidráulica (LHA) del Instituto Nacional del Agua (INA). El INA, además, aportó financiación para la finalización de este estudio.

I want to believe

RESUMEN

La desembocadura del Río Paraná en el Río de la Plata se da a través de un amplio delta originado por la deposición de sedimentos provenientes de toda la cuenca del Plata. Dichos sólidos, aportados principalmente por el Río Bermejo, hacen que el Delta del Río Paraná se encuentre en continuo crecimiento.

La presente tesis constituye un análisis de investigación del avance del Frente del Delta del Río Paraná de manera de comprender la dinámica de ese avance ya sea en cuanto a su causa (sedimentos transportados por el Río Paraná), como así también respecto a su condicionamiento (corrientes en el Río de la Plata).

El Capítulo 1 presenta una descripción general del Delta del Río Paraná.

En el Capítulo 2 se analiza el balance de sedimentos del sistema. Se realiza una descripción de todo el material recopilado, que incluye a los distintos trabajos, datos y antecedentes relacionados con la sedimentología del Río Paraná y sus principales tributarios. Dicha información es analizada, de manera de obtener una descripción compatibilizada y consistente que permita estimar el transporte actual de sedimentos del Río Paraná en su desembocadura.

El Capítulo 3 presenta un detallado análisis del crecimiento histórico del Delta basado en la cartografía recopilada de distintos establecimientos e instituciones, la cual cubre una extensión temporal de más de 300 años, desde el siglo XVIII hasta el siglo XX. Los mapas seleccionados, previamente digitalizados y escalados, son superpuestos y comparados de manera de obtener tasas de crecimiento areal y tasas de avance lineal del Frente del Delta.

En el Capítulo 4 se vincula el avance computado con el aporte sólido a través de la implementación de un modelo hidrodinámico y sedimentológico que simula el mecanismo de avance del Delta. Se muestra que el modelo resulta adecuado para representar las tendencias de avance del Frente del Delta durante todo el siglo XX. En base a éste, se especula sobre la tendencia de avance futura.

Por último, en el Capítulo 5, se describen los principales aportes de la tesis y las conclusiones del trabajo.

ABSTRACT

The mouth of the Paraná River into the Río de la Plata River takes place through a wide delta originated from the deposition of sediments coming from the whole Plata basin. These solids, mainly provided by the Bermejo River, make possible the continuous rising of the Paraná River Delta.

The present thesis constitutes a research of the Paraná Delta Front advancement, to understand the dynamics of this advance, not only its cause (sediments transported by the Paraná River), but also its conditioning (currents in the Río de la Plata River).

Chapter 1 presents a general description of the Paraná River Delta.

The balance of sediments of the system is analysed in Chapter 2. The whole material collected is described, which includes the different data, works and information related to the sedimentology of the Paraná River and its main tributaries. Such information is analysed to get a compatible and solid description that allows to estimate the current transport of sediments of the Paraná River.

Chapter 3 presents a detailed analysis of the historic rising of the Paraná Delta based on the cartography collected from different establishments and institutions, which covers a temporal extension over 300 years, from the XVIII century until the XX century. The selected maps, digitized and scaled, are compared in order to obtain areal rising rates and lineal advance rates of the Delta Front.

In Chapter 4 the computed advance is linked with the solid input through the implementation of a hydrodynamic and sedimentologic model that simulates the Delta Front advancement mechanism. It is shown that the tendencies of the Delta Front advancement during the XX century are represented appropriately. Based on such model, the tendency of future advance is speculated.

Finally, the main contributions of the thesis and conclusions of the work are described in Chapter 5.

ÍNDICE

Capítulo 1: INTRODUCCIÓN	1
Capítulo 2: APORTE SÓLIDO	5
2.1 ANTECEDENTES.....	5
2.1.1 El largo Camino de los Sedimentos: Consideraciones Previas	5
2.1.2 Río Bermejo: El Tributario de Mayor Incidencia	6
2.1.2.1 Caracterización.....	6
2.1.2.2 Carga Sólida.....	8
2.1.3 Río Paraguay: El Nexo entre el Bermejo y el Paraná	9
2.1.3.1 Caracterización.....	9
2.1.3.2 Carga Sólida.....	10
2.1.4 Río Paraná: El Gran Protagonista	11
2.1.4.1 Caracterización.....	11
2.1.4.2 Carga en Suspensión.....	12
2.1.4.2.1 Concentraciones	19
2.1.4.2.2 Granulometría	21
2.1.4.2.3 Mineralogía	24
2.1.4.3 Carga de Fondo.....	25
2.2 ANÁLISIS DE ANTECEDENTES	26
2.2.1 Influencia de los Tributarios del Río Paraná.....	26
2.2.2 Transporte de Sólidos del Río Paraná	32
2.2.2.1 Carga en Suspensión.....	32
2.2.2.2 Carga de Fondo.....	36
2.3 BALANCE DE SEDIMENTOS	36
2.3.1 Valores Representativos Adoptados	36
2.3.2 Representación Esquemática.....	38

Capítulo 3: AVANCE DEL FRENTE	41
3.1 CARTOGRAFÍA RECOPIADA	41
3.2 PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE LA CARTOGRAFÍA	42
3.2.1 Avance del Frente del Delta del Río Paraná	42
3.2.1.1 <i>Desarrollo</i>	42
3.2.1.2 <i>Resultados Obtenidos</i>	46
3.2.2 Incremento Areal del Delta del Río Paraná.....	48
3.2.2.1 <i>Desarrollo</i>	48
3.2.2.2 <i>Resultados Obtenidos</i>	51
 Capítulo 4: RELACIÓN ENTRE EL AVANCE DEL FRENTE Y EL APORTE SÓLIDO	 61
4.1 METODOLOGÍA	61
4.1.1 Modelo Hidrodinámico	63
4.1.1.1 <i>Implementación</i>	63
4.1.1.1.1 <i>Modelo Matemático</i>	63
4.1.1.1.2 <i>Dominio de Cálculo</i>	64
4.1.1.1.3 <i>Forzantes</i>	68
4.1.1.1.4 <i>Paso Temporal</i>	70
4.1.1.2 <i>Validación</i>	72
4.1.2 Modelo Sedimentológico	75
4.1.2.1 <i>Implementación</i>	75
4.1.2.1.1 <i>Modelo de Cálculo</i>	75
4.1.2.1.2 <i>Dominio de Cálculo y Área Sedimentable</i>	85
4.1.2.1.3 <i>Forzantes</i>	86
4.1.2.1.4 <i>Paso Temporal</i>	88
4.1.2.2 <i>Calibración</i>	88
4.2 CARGA SÓLIDA A LO LARGO DEL SIGLO XX.....	101
4.3 TENDENCIA DE AVANCE FUTURA	105

Capítulo 5: CONCLUSIONES.....	116
REFERENCIAS	121
Anexo 1: BASE DE DATOS CARTOGRÁFICOS	125
Anexo 2: GIS DEL DELTA DEL RÍO PARANÁ	134



Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

El Río Paraná es uno de los más caudalosos del mundo. Su caudal medio es actualmente de alrededor de $18.000 \text{ m}^3/\text{s}$, alcanzando valores pico, durante las crecidas extraordinarias, que superan los $50.000 \text{ m}^3/\text{s}$. La transición del Río Paraná al Río de la Plata, que actúa hidrodinámicamente como un estuario, se da a través de un amplio delta, que comienza aproximadamente a la altura de la localidad de Diamante, frente a la localidad de Puerto Gaboto en Santa Fe. Su extensión es de 320 km, presentando un ancho muy variable, que va desde 18 km frente a Baradero hasta más de 60 km sobre el frente de la desembocadura al Río de la Plata, desarrollando de esta manera una superficie de 14.000 km^2 (figura 1.1).



Figura 1.1: Delta del Río Paraná



El Frente del Delta del Paraná ha venido avanzando continuamente. El ritmo de avance actual, determinado a partir de la comparación de cartografías a lo largo del siglo XX, indica valores medios del orden de muchas decenas de metros por año. Este vertiginoso avance ha conducido, en particular, a la aparición durante ese siglo de todas las islas que actualmente enfrentan a la localidad de San Fernando.

El avance del Frente del Delta está alimentado por la provisión de sedimentos que se produce en la parte superior de la cuenca, que determina una carga en suspensión de más de 100 millones de toneladas por año. En particular, la fuente dominante de material fino (que es el tipo de material preponderante que conforma el Frente) es actualmente la alta cuenca del Río Bermejo, que tributa al Río Paraguay, el afluente principal del Río Paraná.

Dicha cuenca se trata de una zona geomorfológicamente joven, aún con una gran dinámica de transformación, es decir, con una gran capacidad potencial de aporte durante mucho tiempo por venir.

Esto indica que, inexorablemente, el Delta del Paraná continuará avanzando hasta alcanzar y superar, incluso, a la propia ciudad de Buenos Aires. A una tasa de 100 m/año, la distancia de 11 km en línea recta que separa el Frente del Delta (Tigre) de la Av. Gral. Paz, límite de la ciudad de Buenos Aires, será recorrida por el Frente en alrededor de 110 años (figura 1.2).



Figura 1.2: Vista área del extremo sur del Delta y la Capital Federal

Las consecuencias que este cambio morfológico tendrá sobre el entorno urbano pueden ser considerables, ya que entrarán en conflicto los diversos usos a los que hoy día se somete esa zona del Río de la Plata, y que están relacionados a la recepción de descargas, provisión de agua para consumo, navegación fluvial y de ultramar, recreación, etc. En particular, afectará el desarrollo del Canal Emilio Mitre, tramo fundamental de la vía navegable hacia el Océano.



Descripción general del Delta del Río Paraná

El Delta del Paraná presenta una superficie de 14.000 km² (1.400.000 ha) que lo ubica en Sudamérica como el tercer delta en importancia luego de los del Amazonas y del Orinoco (20.000 km²). Posee una longitud de 320 km y un ancho variable, que va desde 18 km frente a Baradero hasta más de 60 entre los ríos Luján (Buenos Aires) y Gutiérrez (Entre Ríos) (Chebez & Chiesa 1983, GENAN 1989).

Luego de recorrer en toda su longitud un terreno de suave pendiente, las aguas del Río Paraná se vuelcan a través de catorce bocas, entre las que se destacan, de norte a sur: río Paranacito, arroyo Martínez, arroyo de La Tinta, arroyo Brazo Largo, río Gutiérrez, río Paraná Bravo, río Sauce, Río Paraná Guazú, río Barca Grande, río Paraná Miní, Río Paraná de las Palmas y río Luján (Chebez & Chiesa 1983, GENAN 1989). En la figura 1.3 puede observarse la hidrografía correspondiente al Frente del Delta.

La compleja red hídrica definida por el Delta, está sometida a periódicas inundaciones, de mayor o menor magnitud, que tienen a veces graves consecuencias para la población, pero que funcionan como reguladores naturales de la vida silvestre (transportando nutrientes, semillas, plantas y animales) y como agente modelador del paisaje (Chebez & Chiesa 1983, GENAN 1989).

El Delta del Paraná se divide en tres grandes regiones:

- *Delta Superior* (desde Diamante, Entre Ríos, hasta Villa Constitución, Santa Fe)
- *Delta Medio* (desde Villa Constitución hasta Ibicuy, Entre Ríos)
- *Delta Inferior ó en formación* (desde Ibicuy hasta la desembocadura)

Cada una de estas regiones presenta diferencias basadas en su historia y evolución geológica, que se reflejan también en el tipo de vegetación que cada una sustenta. De esta forma, las islas del Delta Inferior son las más altas y poseen la forma de una “palangana” o “plato hondo”, con las márgenes elevadas (los albardones) cubiertas de bosques, sólo alcanzadas por las grandes y breves crecidas, y con un interior bajo, pantanoso, con aguas estancadas, ocupado mayormente por el pajonal (Chebez & Chiesa 1983, GENAN 1989).

En el Delta Medio y Superior, las islas son distintas, más planas y surcadas por madrejones, lagunas, albardones y médanos fijos, que tienen un sentido paralelo a los grandes cursos de agua (Chebez & Chiesa 1983, GENAN 1989).

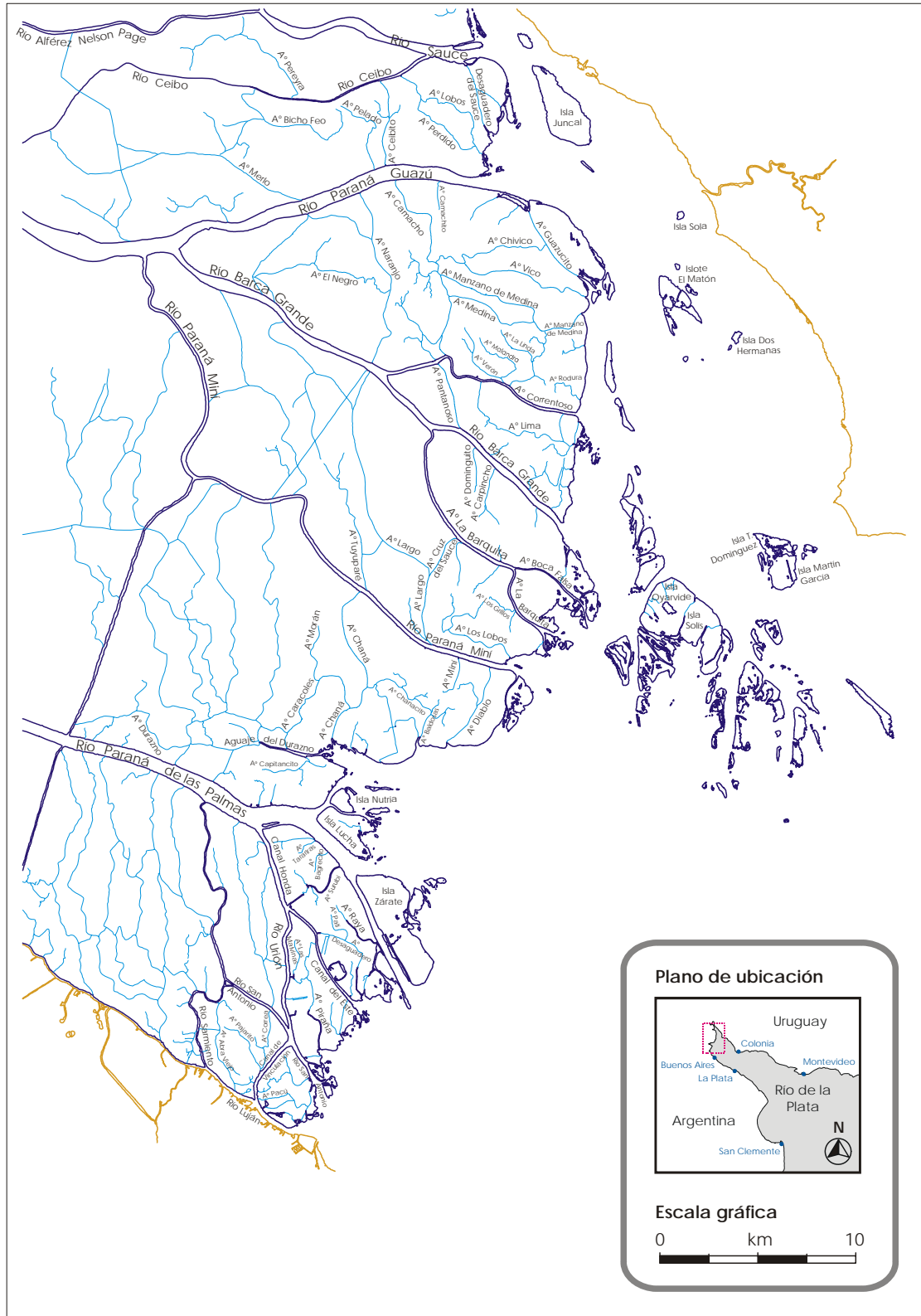


Figura 1.3: Hidrografía del Frente del Delta del Río Paraná



Capítulo 2

APORTE SÓLIDO

2.1 ANTECEDENTES

2.1.1 El largo Camino de los Sedimentos: Consideraciones Previas

Parte de los sedimentos transportados por el Paraná son depositados en el delta que el mencionado río forma en su desembocadura con el Río de la Plata. Dichos sólidos se depositan luego de haber recorrido los distintos caminos definidos por la gran cantidad de ríos que el Paraná recibe en todo su recorrido.

De todos estos afluentes, algunos de los más importantes son los siguientes: Río Paraguay, Iguazú, Salado del norte, Carcarañá, Arroyo del medio, Arrecifes, etc. Todos ellos, al desembocar en el Paraná, incorporan a éste el material sólido que transportaban desde sus orígenes. Sin embargo, de todos los tributarios mencionados, sólo uno de ellos puede considerarse de relevancia respecto al aporte sólido: el Río Paraguay. Este último recibe en su tramo final a dos ríos muy conocidos: el Pilcomayo y el Bermejo. De estos dos, el segundo, es el que tiene la mayor influencia en la carga sólida del Paraguay y consecuentemente en la del Río Paraná. Prácticamente se puede decir que los sólidos transportados por el Río Paraná provienen de su propio cauce y del aporte sedimentario del Río Paraguay. Como se dijo, la carga de este último viene dado en su gran mayoría por la del Bermejo. De esta forma quedan definidos los actores principales del sistema: el *Río Bermejo*, el *Río Paraguay*, y por supuesto, el *Río Paraná*.

La forma en que son transportados los sedimentos da lugar a que la carga sólida de un curso de agua pueda dividirse básicamente en dos partes, la carga de fondo y la carga en suspensión:

- a) La *carga de fondo ó de arrastre* está conformada por los granos que se desplazan en contacto permanente con el lecho. Dicho desplazamiento puede ser por deslizamiento, rodamiento o saltación. En general viene dada por las partículas más gruesas.
- b) La *carga en suspensión ó en suspensión total* está conformada por las partículas que no se desplazan en contacto permanente con el lecho. Puede subdividirse a su vez en carga de lavado y carga de material de fondo en suspensión.



- i) La *carga de material de fondo en suspensión* está conformada por los granos que se desplazan en el seno del flujo y que en ciertos instantes tienen contacto con el lecho. En general viene dada por las distintas variedades de arenas.
- ii) La *carga de lavado, foránea ó en suspensión prolongada* está conformada por los granos que se desplazan en el seno del flujo y que nunca tienen contacto con el lecho. Está formada por los materiales más finos (limos y arcillas) y su comportamiento responde a fuerzas electroquímicas.

Resumiendo se tiene que:

Carga Sólida Total = Carga de Fondo + Carga en Suspensión

Carga en Suspensión = Carga de Lavado + Material de Fondo en Suspensión

Las cargas de arrastre y de material de fondo en suspensión están formadas por el material del lecho ó cauce, mientras que la carga de lavado está formada por el material proveniente de la erosión de suelos, es decir que está dada como resultado de la erosión sobre la superficie de la cuenca imbrífera.

La concentración de la carga de lavado está determinada por la cantidad aportada a la corriente y no por la capacidad de esta para transportarla. En cambio la concentración del material del lecho que se transporta en suspensión está fijada por las fuerzas capaces de moverla.

2.1.2 Río Bermejo: El Tributario de Mayor Incidencia

2.1.2.1 Caracterización

El territorio cuyas aguas afluyen a un río determina la cuenca de este último. En particular, la cuenca del Río Bermejo abarca una superficie aproximada de 133.000 km² desarrollándose sus nacientes en las provincias argentinas de Salta y Jujuy y en el departamento de Tarija, en la República de Bolivia. En efecto, la cuenca tiene sus cabeceras en la cordillera oriental de Bolivia y los cauces que descienden de la sierra Santa Victoria, ocupando la porción NE del territorio argentino y SE boliviano (Brea et al. 1996).

De la superficie total, aproximadamente 50.000 km² constituyen la parte hidrológicamente activa, llamada alta cuenca o cuenca superior, con cursos de agua de características de montaña. Está situada en el extremo NO de Argentina y extremo SSE de Bolivia. Tiene forma de elipse orientada de norte a sur, de 430 km de largo y 170 km de ancho medido en la latitud de la junta de San Francisco. A continuación se desarrollan las cuencas media y baja (llamadas también en su conjunto cuenca inferior), en la zona limítrofe entre las provincias de Chaco y Formosa, como un corredor con dirección NO/SE de unos 90 km de ancho, con características de llanura hasta la desembocadura del Río Paraguay (Brea et al. 1996).

La alta cuenca es una zona montañosa con cauces y divisorias perfectamente definidas y de fuertes pendientes (puna, cordillera oriental y sierras subandinas). Los ríos corren entre barrancas altas, que en algunos casos pueden alcanzar los 60 m, de formación estratificada areno-arcillosa, asentadas sobre capas de arenisca poco compacta de fácil erosión (Brea et al. 1996).



Es en la alta cuenca donde el Bermejo posee dos grandes fuentes de aporte de sedimento (Brea et al. 1996):

- La Subcuenca Bermejo Superior, con los afluentes Iruya y Pescado, la cual aporta al Bermejo entre el 70-80% del material sólido que transporta aguas abajo.
- La Subcuenca San Francisco, con los grandes afluentes San Francisco y Grande de Tarija, que aportan el 20-30% restante del material sólido.

Las cuencas media y baja no constituyen áreas de aporte, sino por el contrario se producen pérdidas por infiltración, evaporación y desbordes en los picos de crecida hacia zonas bajas aledañas (Brea et al. 1996).

Desde el punto de vista hidrológico, puede decirse que la cuenca del Bermejo presenta un prolongado período de recesión y otro muy acotado de elevados caudales provenientes de las intensas lluvias del período estival. En efecto, el período de altos caudales para el Río Bermejo corresponde a los meses del verano, y culmina en febrero-marzo, cuando ocurren las máximas precipitaciones. El período de estiaje es de abril a octubre, con valores mínimos generalmente en este último mes (Brea et al. 1996).

Teniendo en cuenta los aforos disponibles resulta que el caudal medio anual aguas abajo de la confluencia con el San Francisco es de unos 400 m³/s, mientras que el caudal máximo supera los 500 m³/s. Para el período 1968-1977, en la sección “El Colorado”, el derrame anual medio se estimó en unos 11.000 hm³ (Orfeo 1995).

Desde el punto de vista de la identificación del riesgo hídrico superficial, puede decirse que en la cuenca media el río no recibe aportes laterales significativos, siendo en cambio frecuentes los desbordes del cauce principal en épocas de crecidas. En tiempos de estiaje el curso recibe aportes de aguas subterráneas. En la cuenca baja, el río corre entre altas barrancas, no verificándose en general desbordes laterales (Brea et al. 1996).

De acuerdo a los distintos antecedentes la pendiente media del cauce principal, que en la última parte de la cuenca alta es mayor a 1%, se reduce a menos del 0,24 ‰ en la cuenca inferior. Dicho cambio se da a lo largo de toda la longitud del Bermejo, la que se estima en aproximadamente 1.060 km. En particular para la zona de la confluencia con el Paraguay, el ancho medio del río es de unos 250 m, variando entre 150 y 400 m (Orfeo 1995).

El tamaño del material del lecho va disminuyendo a medida que el Bermejo se aproxima a la desembocadura con el Paraguay, pasando de arenas a arcillas y limos (en especial este último). En efecto, en base a mediciones realizadas, se observa que en la zona de “El algarrobal”, Chaco, el lecho está conformado por arenas, de diámetro medio (d_{50}) de 210 μm , con ausencia de limos y arcillas. Ya en “San Camilo”, Formosa, se observa la presencia de partes iguales de fracción fina y gruesa, ubicándose el d_{50} en 63 μm , prácticamente el límite entre limos y arenas. En “Lucio Mansilla” (Puerto Vélaz), Formosa, la muestra de fondo arrojó un d_{50} de 35 μm , conteniendo un 20% de arenas y un 80% de fracción fina (Brea et al. 1996).

En cuanto al material de las márgenes, las distintas muestras tomadas marcan un claro predominio de finos, con diámetros medios menores que los del lecho. Los d_{50} obtenidos fueron de 4,5 μm en “Fortín Belgrano”, Salta, 5 μm en “Puerto Lavalle”, Chaco y de 7,5 μm en “El Colorado”, Formosa (Brea et al. 1996).



Todo esto deja a la luz el tipo de material predominante que transporta el Bermejo: limos y arcillas (en particular el primero).

El comportamiento morfológico de un río con alta proporción de transporte de limos y arcillas, debe ser distinto a otro cuyo transporte este dado básicamente por partículas de arena y tamaños mayores, ya que ambos tipos de sedimento tienen diferencias significativas en sus propiedades. En general, la forma de los canales, está relacionada con el tamaño del sedimento transportado. Así, sedimentos gruesos producen canales con una relación ancho-profundidad grande, mientras que sedimentos finos, producen secciones transversales más angostas y profundas (Brea et al. 1996).

2.1.2.2 Carga Sólida

La mayor parte de los sedimentos del Río Bermejo son transportados en suspensión y es este tipo de carga la que tiene una significativa influencia con la correspondiente a la del Río Paraná. En cuanto a la carga de fondo ó arrastre, prácticamente no hay información alguna, aunque se puede afirmar que la misma es despreciable frente a la carga en suspensión.

Esta última está conformada en su gran mayoría por material fino. En efecto, desde que se computa la fracción fina y gruesa de los sedimentos suspendidos (1993), se observa en la estación “Pozo Sarmiento” una altísima variación de las proporciones de ambas fracciones. Para aguas altas (sobre 72 datos), se tiene en promedio un 77% de finos y un 23% de gruesos, mientras que para aguas bajas (22 datos), los porcentajes son del 73% y 27%, respectivamente. Pese a la dispersión, a partir de dichos promedios se observa un aumento del porcentaje de la fracción gruesa con respecto a la fina en aguas bajas, lo que indica la asociación directa entre la carga de lavado y la alta pluviosidad en la cuenca (Brea et al. 1999).

En la cuenca inferior del Río Bermejo, la única estación de aforos operativa es la ubicada en “El Colorado”, Formosa. Allí la proporción de arena en suspensión varía entre un 10 y un 20%, en promedio, de la carga total suspendida. La fracción fina está fundamentalmente compuesta por limos (Brea et al. 1999).

En correspondencia con la desembocadura del Río Bermejo en el Río Paraguay, la particulometría de los sólidos suspendidos viene dada en la siguiente proporción: limos 66%, arcillas 27% y arenas 7% (Orfeo 1995). En dicha zona se verifica la existencia de un banco de arena, que constituye un paso de navegación llamado Paso Desembocadura Río Bermejo.

De acuerdo a Halcrow & Partners (1973), si bien la concentración de arenas en suspensión en el Bermejo es muy reducida si se la compara con la de limos, no obstante constituye la mayor concentración de arena encontrada en cualquier estación del Río Paraguay hacia aguas arriba. Esto está indicando que la participación de la arena aportada por el Bermejo es altamente significativa en la sedimentación del citado paso. Como consecuencia, puede afirmarse que aguas abajo de dicho paso, de las arenas en suspensión aportadas por el Bermejo, sólo queda una pequeña proporción (Brea et al. 1996).

En referencia a la cuantificación de la carga suspendida, la misma varía principalmente según el período que comprendan los aforos líquidos y sólidos considerados. De esta forma, Brea et al. (1999) cuantificaron la carga en suspensión de tres maneras distintas:



1. Considerando toda la serie de datos disponibles (registro histórico).
2. Mediante la recopilación de aforos líquidos y sólidos provistos por EVARSA.
3. Utilizando las mediciones de caudales medios mensuales según el último anuario hidrológico de EVARSA (1994) y determinando el caudal sólido total en suspensión mediante las relaciones entre el caudal líquido (Ql) y el caudal sólido (Qs) obtenidas de los aforos.

En el primer caso la carga en suspensión del Bermejo resultó ser de aproximadamente 90.000.000 de toneladas anuales, de los cuales 70.000.000 de toneladas (75%) fueron aportados por la subcuenca Bermejo Superior (Iruya y Pescado) y los restantes 20.000.000 (25%) por la subcuenca San Francisco. En el segundo caso, donde los aforos sólidos contemplan el período 1993-1998, el valor resultante fue de unos 100.000.000 de toneladas anuales. De la última forma, donde se analizó el período 1969-1989, la carga suspendida resultó ser de unos 107.000.000 de toneladas anuales.

En la sección “Zanja del Tigre” (subcuenca Bermejo Superior), el valor de la carga en suspensión varió entre 15,1 y 175,7 millones de toneladas anuales. El valor medio fue de 71.000.000 de toneladas anuales (Orfeo 1995).

En época de crecida, la concentración de los sólidos suspendidos puede llegar a ser muy alta. En efecto, para el período Diciembre-Mayo de los años comprendidos entre 1971 y 1974, el valor de concentración promedio alcanzó los 6.500 mg/l (Drago & Amsler 1988).

La mineralogía de la fracción arcilla transportada por el Bermejo en las inmediaciones de su desembocadura con el Paraguay, presenta un marcado dominio de illita (60%) y en menor medida esmectitas (25%) y caolinita (15%) (Orfeo 1995). La predominancia de illita se atribuye a la erosión procedente de los terrenos áridos y semiáridos, típicos de los ambientes andinos (Bertoldi de Pomar 1984).

2.1.3 Río Paraguay: El Nexo entre el Bermejo y el Paraná

2.1.3.1 Caracterización

El Río Paraguay nace en la región central del Estado de Mato Grosso (Brasil) y desemboca en el Río Paraná, luego de recorrer unos 2.600 km.

Su cuenca, de 1.095.000 km² de superficie, corresponde en una tercera parte a Brasil, una fracción similar al Paraguay y el resto, en porciones aproximadamente iguales, a la Argentina y Bolivia (Orfeo 1995).

En la porción superior de la cuenca sus márgenes son bajas e inundables, presentando una zona de expansión denominada “Pantanal”. Se trata de un extenso lecho mayor de 60.000 km² de superficie, periódicamente cubierto por aguas. Entre el Pantanal y la desembocadura, la pendiente media es de 0,037 m/km (Orfeo 1995).

Una vez que recibe al Bermejo, el lecho del Río Paraguay se caracteriza por su movilidad. Esta es producida por la importante descarga sólida suspendida del mencionado afluente y pérdida de competencia del canal colector (Orfeo 1995).



Dicha disminución de la capacidad de carga del Río Paraguay, se debe al remanso hidrodinámico que producen los mayores caudales del Río Paraná, provocando reducción de velocidad desde la zona de confluencia hasta más de 340 km aguas arriba (Orfeo 1995).

De acuerdo a aforos líquidos del período 1910-1990, se obtuvo para la sección “Puerto Bermejo”, un caudal medio anual de $3.700 \text{ m}^3/\text{s}$. Para esa misma sección (es decir después de recibir al Bermejo), el caudal máximo mensual fue de $4.600 \text{ m}^3/\text{s}$, mientras que el derrame anual medio se acercó a los 118.000 Hm^3 (Orfeo 1995).

Según otras fuentes, para el período Diciembre-Mayo de los años comprendidos entre 1971 y 1974, el caudal del Río Paraguay, antes y después de recibir al Bermejo, alcanzó los siguientes valores: 3.721 y $4.186 \text{ m}^3/\text{s}$ respectivamente (Drago & Amsler 1988). Dichos valores contemplan al Río Bermejo en período de crecida.

El ciclo hidrológico del Río Paraguay se caracteriza por presentar crecidas en otoño-invierno y bajantes en primavera-verano, con régimen laminar y de variaciones lentas (Orfeo 1995).

Su tramo final, en correspondencia con la desembocadura en el Paraná, merece ser destacado debido a la interacción que se da con el Bermejo.

En dicha zona, la morfología del Río Paraguay presenta un aspecto meandroso. El ancho medio del río en esta zona es de unos $0,6 \text{ km}$, pudiendo variar entre $0,3$ y $1,4 \text{ km}$.

El material del lecho está compuesto por arenas medianas a muy finas (menores que las del Paraná) con un 5 a un 20% de limos y arcillas (Orfeo 1995).

En correspondencia con la citada desembocadura del Bermejo en el Paraguay, se verifica en este último la existencia de un banco de arena (Halcrow & Partners 1973). Si bien la concentración de arenas en suspensión en el Bermejo es muy reducida si se la compara con la de limos, no obstante constituye la mayor concentración de arena encontrada en cualquier estación del Río Paraguay hacia aguas arriba (Brea et al. 1999).

Las formas de fondo vienen dadas por ondulaciones simétricas (dunas con rizos superpuestos), y en cuanto a la profundidad, esta se estima en unos 10 m . En particular, en la zona de la confluencia con el Paraná puede llegar a los 43 m (Orfeo 1995).

2.1.3.2 Carga Sólida

El comportamiento de la carga sólida del Río Paraguay está vinculado íntimamente a la descarga que impone el Bermejo.

En efecto, para el período Diciembre-Mayo de los años comprendidos entre 1971 y 1974, la concentración de los sólidos en suspensión del Paraguay, aguas arriba de la confluencia con el Bermejo, resultó ser de 89 mg/l , mientras que luego de recibir al Bermejo ascendió a 576 mg/l (Drago & Amsler 1988).

Considerando el período 1910-1990, esa variación de concentraciones fue de 37 a 528 mg/l (Orfeo 1995). Para ese mismo período, en la sección “Puerto Bermejo”, la carga de lavado se computó en unos $60.000.000$ de toneladas anuales, mientras que la carga de material de fondo (arrastre y suspensión) fue de apenas $1.000.000$ de toneladas por año (Orfeo 1995).



A partir de aforos sólidos del período 1993-1998, se cuantificó la carga sólida en suspensión del Paraguay antes de recibir al Bermejo (sección “Puerto Pilcomayo”) en unos 8.000.000 de toneladas por año (251 kg/s) (Brea et al. 1999).

Según la misma fuente, pudo estimarse la carga sólida en suspensión del Paraguay, vinculando las mediciones de caudales medios mensuales con las relaciones entre caudal líquido y sólido obtenidas de los aforos. El valor obtenido para la sección “Puerto Pilcomayo” fue de 8.125.000 toneladas anuales. Luego de recibir al Bermejo dicho valor ascendió a unos 115.000.000 de toneladas.

En cuanto a la particulometría de los sólidos suspendidos, a la latitud de Formosa, predomina la fracción arcilla (>90%), mientras que a pocos kilómetros de confluir con el Paraná, la carga sólida está compuesta principalmente por limos (64%) y arcillas (29%), con presencia significativa de arenas (Orfeo 1995).

La mineralogía de la fracción arcilla a la latitud de Formosa está integrada por illita (40%) y proporciones semejantes de caolinita, clorita y esmectitas (Orfeo 1995).

2.1.4 Río Paraná: El Gran Protagonista

2.1.4.1 Caracterización

Su nombre de origen indígena significa “pariente del mar”, y desde su nacimiento en Brasil hasta su desembocadura mide 3.780 km. Su tramo argentino comienza en la desembocadura del río Iguazú y desde este punto hasta su desembocadura su longitud es de 1.710 km.

La cuenca del Río Paraná ocupa alrededor de 1.500.000 km² de superficie, distribuidos de la siguiente manera: 890.000 km² (59%) son de jurisdicción brasileña, 565.000 km² (37%) pertenecen a la Argentina y 55.000 km² (4%) al Paraguay.

El Paraná toma su nombre a partir de la confluencia de los ríos Paranaíba y Grande (Brasil), principales tributarios de la cuenca superior, de 1.200 km y 1.300 km de longitud, respectivamente. Ambos cursos delimitan una zona mesopotámica reconocida en Brasil como “Triángulo Mineiro”, aproximadamente a 1.900 metros sobre el nivel del mar, con numerosos rápidos y cascadas (Orfeo 1995).

Por más de 500 km aguas abajo de dicha confluencia, el Paraná recibe tributarios de importancia, destacándose el Tieté y el Paranapanema, también con gran cantidad de saltos en su recorrido. Aproximadamente 200 km después de recibir a este último, un salto de 40 m da lugar a la formación de las cataratas del Guayrá (conocidas en Brasil como “Salto das sete Quedas”) (Orfeo 1995).

Aguas abajo, el río fluye encajonado con rumbo general NNE-SSO de alta velocidad, que se mantiene hasta 140 km después de la desembocadura del Iguazú. A partir de este punto el curso toma dirección al oeste, cambiando también su fisonomía. Aumenta su ancho, y el thalweg adquiere una pendiente aproximadamente uniforme hasta llegar al Salto de Corpus (Orfeo 1995).

En el tramo Posadas-Ituzaingó el cauce aloja las extensas islas del Ibicuy, Talavera, Yacyretá y Apipé, entre otras menores, registrando un ancho de 25 km frente a Ituzaingó. En



los últimos 160 km de recorrido del alto Paraná (llamado así desde la desembocadura del Iguazú hasta la confluencia con el Paraguay), el cauce se estrecha aunque sin formar un lecho único, con un ancho variable entre 1,5 y 5 km, pendiente media que no supera 0,08 m/km y velocidad media entre 0,7 m/s en bajante y 2,1 m/s en crecida (Orfeo 1995).

La confluencia con el Río Paraguay marca un cambio importante para las características hidrodinámicas, hidrosedimentológicas y morfogenéticas del Paraná. Alrededor de esta zona, el Paraná presenta un ancho medio de 3,5 km, pudiendo variar entre 1 y 9 km. La pendiente disminuye hasta alcanzar aproximadamente un valor de 1×10^{-5} . En este sector, el río presenta un aspecto entrelazado con predominio de tramos rectos (Orfeo 1995).

El material del lecho está conformado por arena muy gruesa a fina, y las formas de fondo van desde ondas de arena a dunas y megaóndulas (las longitudes de onda llegan a superar los 120 m y las alturas de onda los 7 m) (Orfeo 1995).

Antes de recibir al Paraguay, la profundidad se estima en 15 a 20 m, y luego de recibirlo en 10 a 12 m (2 m en el tramo central). Particularmente en el lugar de la confluencia la profundidad puede llegar a los 43 m (Orfeo 1995).

Luego de recibir al Paraguay, el río continúa con rumbo dominante NNE-SSO. En todo este recorrido la margen izquierda es más elevada que la derecha, la cual es deprimida e inundable, desarrollándose allí la planicie aluvial cuyo ancho varía entre 10 y 40 km. Mientras que el ancho del canal de navegación disminuye desde Corrientes hacia Rosario, la llanura de inundación aumenta desde 13 km hasta 56 km en la sección Rosario-Victoria (Orfeo 1995).

El delta terminal del Paraná comienza aguas debajo de la localidad de Diamante, ocupando una superficie inundable de 14.000 km². Esta área deltaica tiene un avance variable hacia el Océano Atlántico, mencionándose entre 60 y 100 metros por año según la zona y el período que se considere. Ello implica el dragado de 21.000.000 m³ de sedimentos por año en el Paraná y canales de acceso en el Río de la Plata, para mantener la ruta de navegación en condiciones operables (Orfeo 1995).

Desde el punto de vista hidrológico puede distinguirse, una época de crecida que corresponde al verano, con niveles hidrométricos máximos entre Febrero y Marzo, debido a la acumulación de lluvias estivales. La bajante se inicia a fines del otoño, con niveles máximos en Agosto y Septiembre (pudiéndose prolongar hasta Noviembre-Diciembre) (Orfeo 1995).

En el período 1904-1990 el caudal medio anual del Paraná en Corrientes fue aproximadamente de 17.000 m³/s, con un mínimo de 10.785 m³/s y un máximo de 37.833 m³/s. En el mismo período el derrame anual medio fue calculado en 530.364 Hm³ (Orfeo 1995).

Para el período Diciembre-Mayo de los años comprendidos entre 1971 y 1974, el caudal del Río Paraná, antes y después de recibir al Paraguay, alcanzó los siguientes valores: 13.684 y 17.869 m³/s respectivamente (Drago & Amsler 1988). Dichos valores contemplan al Río Bermejo en período de crecida.

2.1.4.2 Carga en Suspensión

El establecimiento de concentraciones de carga de lavado representativas y la determinación de los caudales sólidos correspondientes que se verifican en el Río Paraná en



su desembocadura representa un inconveniente a pesar de la importancia del tema, pues no existen publicados resultados de estudios específicos basados en mediciones sistemáticas, confiables y durante períodos suficientemente prolongados.

La absoluta mayoría de las fuentes que evalúan concentraciones y transporte, lo hacen sin discriminar entre carga de lavado y material de fondo (arenas). Con relación a este último sedimento, los datos disponibles son todavía más escasos (Amsler 1995).

Los valores de carga sólida en suspensión varían según el período que se considere. No sólo porque tengan en cuenta o no la influencia de las grandes presas, las cuales actúan como grandes instrumentos de retención sedimentaria, sino también por el hecho de que algunos períodos se corresponden a las mínimas o máximas descargas sólidas del sistema fluvial.

La documentación existente en cuanto a la entrega de sedimento fluvial a los océanos a escala mundial provee algunas estimaciones históricas.

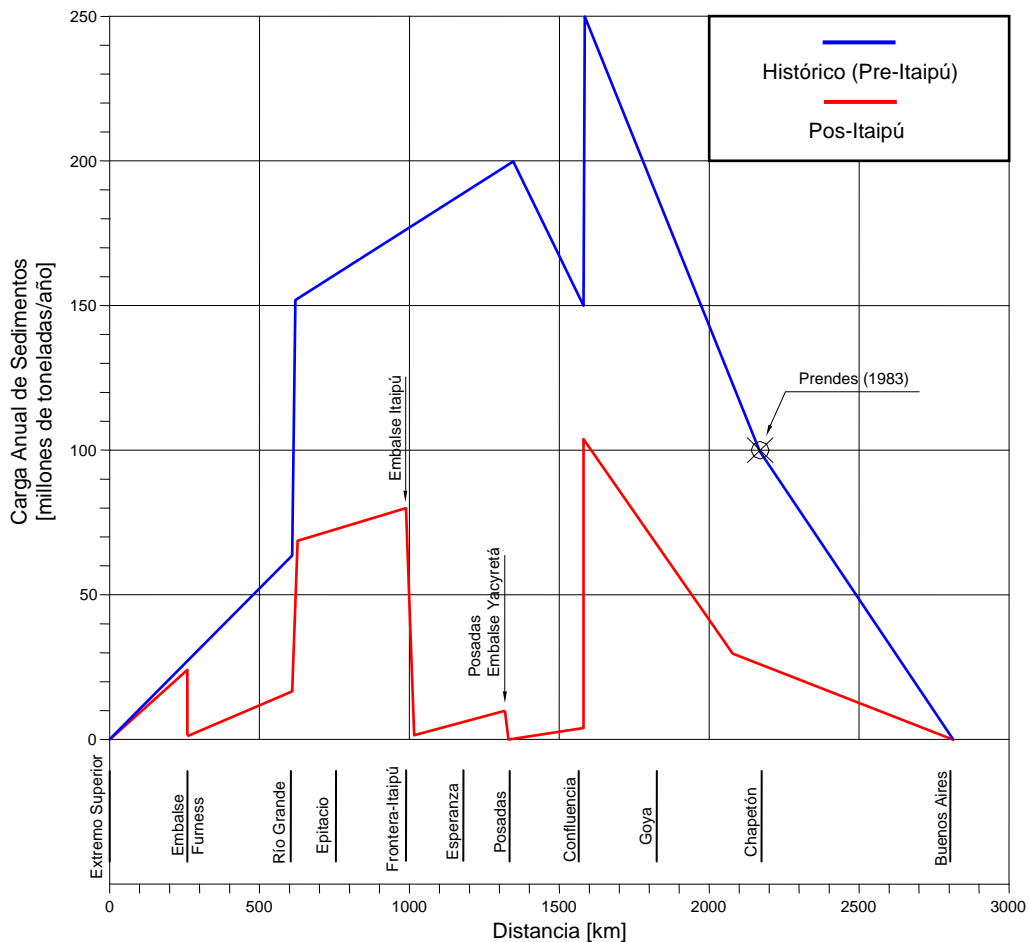


Figura 2.1: Carga suspendida anual del Río Paraná, antes y después de la construcción de la presa de Itaipú (EVARSA et al. 2002)



Holeman (1968) infirió que el rendimiento del Río Paraná en Argentina era de 82 millones de toneladas al año. Milliman & Meade (1983) aumentaron esa estimación a 96 millones de toneladas anuales. La estimación de Milliman & Meade estuvo basada en un estudio del estuario La Plata por Urien (1972). Prendes (1983) estimó la carga de sedimento suspendido en 109,5 millones de toneladas al año en el sitio propuesto de la presa Chapetón, localizada 600 km aguas abajo de la confluencia del Río Paraguay con el Río Paraná (EVARSA et al. 2002).

En la misma fuente puede observarse (figura 2.1) la variación de la carga suspendida total anual, antes y después de la construcción de la presa de Itaipú.

En dicha figura puede observarse que aguas abajo de la confluencia del Río Paraguay y el Río Paraná, ocurre una pérdida significativa de sedimentos, representada por la pendiente descendente de las líneas. Según la citada fuente, dicho tramo del río es considerado como un delta tierra adentro. Este comportamiento no es señalado en ninguno de los trabajos analizados, por lo que no será considerado, ya que resulta algo extraño.

Según Orfeo (1995), la carga de lavado del Río Paraná en el área de su confluencia con el Río Paraguay llega a los 120 millones de toneladas anuales.

Por su parte la carga de material de fondo (tanto por arrastre como suspensión) fue estimada en unos 40 millones de toneladas al año.

Mediciones realizadas por el Instituto Nacional de Limnología (INALI), en referencia al plan de estudios limnológicos llevado a cabo en la sección “Toma de Aguas Corrientes” en Paraná, Entre Ríos, concluyeron en los siguientes valores para la carga en suspensión:

Transporte de sedimentos suspendidos [t/año]				
Año	Río Bermejo Sección “Juntas de San Antonio”, Salta	Río Paraná medio + Río Colastiné Sección “Toma de Aguas Corrientes”, Entre Ríos		
		Período de Concentraciones Pico	Período Restante	Total
1976-1977	127.646.000	56.056.482	36.316.451	92.372.933
1977-1978	79.931.950	75.089.907	32.642.772	107.732.679
1978-1979	106.285.000	88.377.530	34.873.522	123.251.052
1979-1980	100.847.000	62.127.531	45.418.125	107.454.656
1980-1981	191.920.000	67.561.351	45.601.311	113.162.662

(*) El transporte sólido de la sección de estudio fue incrementado en un 9.3% para considerar los sedimentos transportados por el Río Colastiné (LHA-UNESCO 1974), el cual es el principal canal secundario del valle aluvial del Paraná en el área citada.

Tabla 2.1: Carga en suspensión del Río Paraná de acuerdo a mediciones realizadas por el INALI (Drago & Amsler 1988)



En el mismo cuadro puede apreciarse también el transporte anual de los sedimentos suspendidos del Río Bermejo para la sección “Juntas de San Antonio” en Salta, en base a información de Agua y Energía Eléctrica (1987) (Drago & Amsler 1988).

Si bien en este trabajo no es aclarado si los valores de la carga en suspensión corresponden sólo a la carga de lavado o a la carga suspendida total, en el mismo se concluye que los valores referidos a la magnitud de la carga suspendida se atribuyen esencialmente a la carga de lavado dado el gran porcentaje que esta representa (alrededor del 80% de la carga total suspendida). En efecto, el transporte en suspensión del material de fondo sólo es de importancia bajo ciertas condiciones del río como altos caudales y bajas cargas de lavado (Amsler & Drago 1984).

Amsler (1995), determinó en uno de sus trabajos, que el transporte total anual de sedimentos del Río Paraná en su desembocadura está conformado de la siguiente manera:

Carga de Lavado	130-160 millones t/año
Carga de Material de Fondo (arena en suspensión y arrastre)	25 millones t/año
Total	155-185 millones t/año

Dicha estimación se basó en las siguientes consideraciones:

Para la carga de lavado se analizaron las siguientes mediciones de concentraciones realizadas por el INALI:

Concentración de Carga de Lavado [mg/l]					
	1976-1977	1977-1978	1978-1979	1979-1980	1980-1981
Máxima	450	575	450	550	610
Mínima	60	60	70	90	100
Media Anual	185	215	285	230	220

Tabla 2.2: Concentración de carga de lavado del Río Paraná según mediciones realizadas por el INALI (Amsler 1995)

El valor promedio de las concentraciones medias anuales del cuadro anterior, que resultó de 230mg/l, se comparó con el valor de 250 mg/l determinado por Drago & Amsler (1988), para el período diciembre-mayo de 1971 a 1974.

Drago & Amsler llegaron a establecer, asimismo, que algunos de los valores máximos consignados en el cuadro anterior, probablemente estén subestimando a los reales ocurridos a raíz de una inadecuada frecuencia de muestreo durante los meses de mayores aportes sólidos. Ello tuvo un principio de verificación para el período 1976-1977, a partir de datos obtenidos en un tramo aguas abajo de Corrientes por el Centro de Ecología Aplicada del Litoral



(CECOAL). Durante la época de máximos aportes sólidos de 1976-1977 el CECOAL midió concentraciones de carga de lavado que alcanzaron los 1000-1500 mg/l.

Teniendo en cuenta todos estos elementos de juicio y reanalizando los datos del INALI, se llegó al valor de 130-160 millones t/año como referente a carga de lavado del Río Paraná en su desembocadura.

Para la carga de fondo, Amsler (1993) señala que Lelievre & Navntoft (1977), produjeron la serie de datos de arena en suspensión en el Paraná medio más confiables de entre los existentes disponibles. Resultaron de mediciones llevadas a cabo a la altura de la ciudad de Corrientes durante la creciente de 1977. De allí fue posible estimar un transporte anual de aproximadamente 30 millones de arena en suspensión, que podría considerarse un valor algo exagerado teniendo en cuenta que se calculó con concentraciones de un estado de aguas altas del río. En este sentido, la fórmula de Engelund-Hansen utilizada frecuentemente por los ingenieros fluviales dada su confiabilidad en el Río Paraná, predice transportes de arena totales (en suspensión más arrastre de fondo) de alrededor de 23 millones t/año, si se la aplica con parámetros medios del río.

En la misma fuente pudo estimarse también la distribución de caudales líquidos y sólidos del curso principal entre el Paraná Guazú y el Paraná de las Palmas, resultando:

	Paraná Guazú	Paraná de las Palmas
Caudal Líquido	79%	21%
(según datos informados por LHA -1991-)	(del caudal en Rosario)	(del caudal en Rosario)
Caudal Sólido	120-145 millones t/año	33-39 millones t/año
(considerando la misma proporción)		

Un dato puntual sobre la distribución de caudales sólidos entre los dos brazos principales del Delta del Paraná, fue presentado por Amsler (1993), en base a información de concentraciones totales de sedimento suspendido obtenidas por el INALI. Los registros se realizaron en los meses de noviembre-diciembre de 1990 para un estado de aguas altas del río.

	Paraná Guazú	Paraná de las Palmas
Caudal Sólido	320.000 t/día	47.000 t/día

Brea et al. (1999) determinaron el caudal sólido en suspensión mediante los caudales medios mensuales (EVARSA 1994) de acuerdo a la relación Ql-Qs obtenida de los aforos. Se analizó el período 1969-1989, obteniéndose los valores de gasto sólido en suspensión que se observan en la tabla 2.3.

Si se compara el total aportado por el Paraná superior y el Paraguay luego de recibir al Bermejo (123.043.000 t/año), con el resultado en la estación "Túnel Subfluvial" (99.477.000 t/año), la diferencia resulta del orden del 20%. En esta estación existen algunas dudas sobre los registros recopilados, en relación con saber si realmente representan el total del caudal pasante en la sección en épocas de crecida (parte del caudal se estima que pasa por el



Colastiné). Esto puede explicar la diferencia señalada, que de todos modos se ubica dentro de los márgenes de error esperables al tratar con aforos sólidos.

Río	Estación	QsT [1.000 t/año]
Bermejo superior	Z. del Tigre-P. Sarmiento	87.199
San Francisco	Caimancito	25.159
Bermejo inferior	El Colorado	106.913
Paraguay	Puerto Pilcomayo	8.125
Paraná superior	Itatí	8.005
Paraná	Túnel	99.477

Tabla 2.3: Gasto sólido en suspensión a lo largo de todo el sistema (Brea et al. 1999)

En la misma fuente se cuantificó también el gasto sólido suspendido de acuerdo a las estaciones de aforo para el período 1993-1998, obteniéndose para las distintas estaciones los siguientes valores:

“Puerto Pilcomayo” (Paraguay antes de recibir al Bermejo)	251 kg/s	8.000.000 t/año
“Itatí” (alto Paraná)	506 kg/s	16.000.000 t/año
“Túnel” (Paraná inferior)	3.150 kg/s	100.000.000 t/año

A modo de resumen, en la siguiente tabla, se presentan los valores de carga suspendida para las distintas secciones, ordenadas a medida que el río llega a su desembocadura.

Sección		Tipo de Carga Suspendida	Transporte Anual de Toneladas	Período Analizado	Observaciones
Localidad	km				
Itatí, Corrientes	1080	Total (*)	8.005.000	1969-1989	Valor obtenido con caudales medios mensuales según la relación Q1-Qs. Sólo los últimos años del período consideran la influencia de la presa de Itaipú
		Total (*)	16.000.000	1993-1998	Valor obtenido de aforos sólidos. El período contempla la influencia de las presas de Itaipú y Yacretá



Sección		Tipo de Carga Suspendida	Transporte Anual de Toneladas	Período Analizado	Observaciones
Localidad	km				
Aguas arriba de la confluencia con el Río Paraguay	-	Total (*)	5.000.000	-	Pos-Itaipú
Confluencia con el Río Paraguay	-	Carga de lavado	120.000.000	1984	Valor obtenido de acuerdo a la estimación de la concentración de carga de lavado. Pre-Itaipú
		Material de fondo	Menos de 40.000.000	-	Valor obtenido mediante gráficos empíricos
		Total (*)	105.000.000	-	Pos-Itaipú
Chapetón, Entre Ríos	635	Total (*)	109.500.000	1983	Pre-Itaipú
Aguas Corrientes, Entre Ríos	606	Carga de lavado (*)	110.000.000	1976-1981	Pre-Itaipú
Túnel Subfluvial, Paraná, Entre Ríos	600	Total (*)	99.477.000	1969-1989	Valor obtenido con caudales medios mensuales según la relación Q1-Qs. Sólo los últimos años del período consideran la influencia de la presa de Itaipú
		Total (*)	100.000.000	1993-1998	Valor obtenido de aforos sólidos. El período contempla la influencia de las presas de Itaipú y Yacyretá
Desembocadura	-	Total (*)	82.000.000	1968	Pre-Itaipú
		Total (*)	96.000.000	1972	Pre-Itaipú
		Carga de lavado	130.000.000 160.000.000	1971-1974 1976-1981	El período 1971-1974 considera sólo los meses de diciembre a mayo
		Material de fondo	Menos de 25.000.000	-	Valor obtenido según la fórmula de transporte de Engelund-Hansen

(*) Si bien en los respectivos trabajos no es aclarado a que tipo de carga suspendida se hace referencia, se infiere de los mismos, que se trata del tipo de carga señalado en el presente cuadro.

Tabla 2.4: Carga suspendida del Paraná para distintas secciones a lo largo del río



2.1.4.2.1 Concentraciones

Como se indicó en el punto anterior, el establecimiento de concentraciones representativas de la carga suspendida del Río Paraná resulta de significativa complejidad. Pese a esto, pueden encontrarse diversos trabajos relacionados con el tema.

En uno de ellos, el Instituto Nacional de Limnología (INALI) desarrolló el plan “Estudios limnológicos en el cauce principal del Río Paraná Medio - Plan Perfil Toma de Aguas Corrientes (Paraná, Entre Ríos)”, cuyo objetivo era conocer el probable impacto ambiental que tendría la construcción de grandes presas en la zona.

Los trabajos se llevaron a cabo durante cinco años (octubre 1976 - octubre 1981) y la sección de estudio correspondió al mencionado perfil “Toma de Aguas Corrientes” en Paraná, Entre Ríos.

Durante ese lapso de tiempo se realizaron varias series de muestras paralelas. En una de ellas, llevada a cabo por Hetty Bertoldi de Pomar, se muestrearon tres puntos del cauce: ribera izquierda, centro y ribera derecha. En dicho muestreo, el rango de concentraciones de los sólidos suspendidos totales para las distintas situaciones del ciclo hidrológico quedó comprendido entre 33,7 y 893 mg/l. Vale decir que en dicho estudio no se evaluó la incidencia de otros factores ambientales como clima, topografía, geología, etc., si bien ha sido demostrado que las cantidades de sólidos transportados en suspensión por los ríos varían ampliamente en el mundo en función de aquellos.

Los promedios de concentraciones de sedimentos suspendidos obtenidos en cada ciclo hidrológico del período 1976-1981, pueden resumirse en la siguiente tabla:

Concentración Promedio de Sedimentos Suspendidos Totales [mg/l]						
	1976-1977	1977-1978	1978-1979	1979-1980	1980-1981	Promedio
Ribera Izquierda	150,90	174,10	180,45	182,25	157,90	169,10
Centro	185,60	216,90	240,15	226,40	217,75	217,35
Ribera Derecha	168,50	189,44	221,60	195,15	195,05	193,95
Promedio en la sección	168,35	193,50	214,05	201,25	190,25	193,50

Tabla 2.5: Concentración de sedimentos suspendidos en la sección “Toma de Aguas Corrientes” Paraná, Entre Ríos (Bertoldi de Pomar 1984)

El material suspendido presentó una distribución vertical desigual, preferentemente con incrementos de la concentración total hacia el fondo.

En otra de las series de mediciones realizadas por el INALI, se determinaron las concentraciones de carga de lavado que se muestran en la tabla 2.6 (Amsler 1995).



Amsler & Drago llegaron a establecer, asimismo, que algunos de los valores máximos consignados en la tabla 2.6, probablemente estén subestimando a los reales ocurridos a raíz de una inadecuada frecuencia de muestreo durante los meses de mayores aportes sólidos. Ello tuvo un principio de verificación para el período 1976-1977, a partir de datos obtenidos en un tramo aguas abajo de Corrientes por el Centro de Ecología Aplicada del Litoral (CECOAL). Durante la época de máximos aportes sólidos de 1976-1977 el CECOAL midió concentraciones de carga de lavado que alcanzaron los 1000-1500 mg/l.

Concentración de Carga de Lavado [mg/l]					
	1976-1977	1977-1978	1978-1979	1979-1980	1980-1981
Máxima	450	575	450	550	610
Mínima	60	60	70	90	100
Media Anual	185	215	285	230	220

Tabla 2.6: Concentración de carga de lavado en la sección “Toma de Aguas Corrientes” Paraná, Entre Ríos (Amsler 1995)

Precisamente Amsler (1995), considerando lo dicho en el párrafo anterior y reanalizando esos datos del INALI, concluye en una de sus publicaciones, que la concentración media anual de carga de lavado del Río Paraná en su desembocadura está comprendida entre 250 y 300 mg/l.

En otro de sus trabajos, el mismo autor, junto a Drago, determinó también la concentración de la carga suspendida del Paraná para el período diciembre-mayo de 1971 a 1974. Antes de recibir al Paraguay, en correspondencia con la sección “Candelaria” la concentración promedio de sólidos suspendidos fue estimada en 93 mg/l. Luego de confluir con el Paraguay (sección “Corrientes”) dicho valor asciende a 250 mg/l. En dicho trabajo no se aclaró si los valores de las concentraciones se corresponden sólo a la carga de lavado o la carga suspendida total. Sin embargo, en el mismo se concluye que los valores referidos a la magnitud de la carga suspendida se atribuyen esencialmente a la carga de lavado dado el gran porcentaje que esta representa (alrededor del 80% de la carga total suspendida).

La concentración de carga de lavado para la sección Corrientes-Resistencia, fue estimada según Bonetto & Orfeo (1984) en 224 mg/l.

En uno de los trabajos referentes al Río de la Plata, se menciona que a partir de ciertas muestras de sedimento suspendido en “Paso Alvear” (Rosario), sobre el Río Paraná, el limo surge como componente principal, con una concentración media de alrededor de 300 mg/l, siguiéndolo la arcilla, con una concentración apenas superior a 100 mg/l, y finalmente, la arena con valores que pueden alcanzar hasta 50 mg/l, pero que también pueden caer prácticamente a cero (Menéndez 2001). Esto estaría diciendo que la concentración de sólidos suspendidos totales está entre 400 y 450 mg/l.

Nuevamente, a modo de resumen, se presentan en el siguiente cuadro los valores de concentraciones de la carga suspendida para las distintas secciones a lo largo del río.



Sección		Tipo de Carga Suspendida	Concentración [mg/l]	Período Analizado	Observaciones
Localidad	km				
Candelaria, Misiones	1105	Carga de lavado	93	1971-1974	El período analizado considera sólo los meses de diciembre a mayo
Corrientes, Corrientes	1040	Carga de lavado	224	1984	Pre-Itaipú
		Carga de lavado	250	1971-1974	El período analizado considera sólo los meses de diciembre a mayo
Aguas Corrientes, Entre Ríos	606	Total	194	1976-1981	Pre-Itaipú
		Carga de lavado	230	1976-1981	Pre-Itaipú
Rosario, Santa Fe	300	Total	400-450	-	-
Desembocadura	-	Carga de lavado	250-300	1971-1974 1976-1981	El período 1971-1974 considera sólo los meses de diciembre a mayo

Tabla 2.7: Concentración de carga suspendida del Paraná para distintas secciones a lo largo del río

2.1.4.2.2 Granulometría

Conocer la granulometría de la carga sólida de un río nos brinda gran información sobre su comportamiento. En la tabla 2.8 se muestra la denominación de las distintas partículas que transporta un río según el tamaño de las mismas.

La composición de la carga suspendida del Río Paraná varía notablemente luego de recibir al Paraguay. Aguas arriba de la mencionada confluencia, los sólidos suspendidos del Paraná son muy homogéneos y están compuestos por altos porcentajes de arcillas (82%) y menor proporción de limos (18%). Aguas abajo de la confluencia, en su margen izquierda se mantienen las mismas proporciones, mientras que en margen derecha se observa un notable incremento de los limos (63%) y disminución de las arcillas (32%), destacándose la presencia de arenas (5%) (Orfeo 1995). Todo esto puede apreciarse en la tabla 2.9, extraída de la citada referencia.



Denominación		Rango de Tamaños	
		mm	µm
GRAVA	muy gruesa	64-32	64.000-32.000
	gruesa	32-16	32.000-16.000
	mediana	16-8	16.000-8.000
	fina	8-4	8.000-4.000
	muy fina	4-2	4.000-2.000
ARENA	muy gruesa	2-1	2.000-1.000
	gruesa	1-0,500	1.000-500
	mediana	0,500-0,250	500-250
	fina	0,250-0,125	250-125
	muy fina	0,125-0,062	125-62
LIMO	Grueso	0,062-0,031	62-31
	mediano	0,031-0,016	31-16
	fino	0,016-0,008	16-8
	muy fino	0,008-0,004	8-4
ARCILLA	gruesa	0,004-0,002	4-2
	mediana	0,002-0,001	2-1
	fina	0,001-0,0005	1-0,5
	muy fina	0,0005-0,00025	0,5-0,25

Tabla 2.8: Clasificación granulométrica de los sedimentos que transporta un río

Lugar	% Arenas	% Limos	% Arcillas
Itatí	0	15	85
Paso de la Patria ⁽¹⁾	0	22	78
Paso de la Patria ⁽²⁾	5	63	32
Corrientes	4	66	30
Empedrado	3	67	30

⁽¹⁾ Aguas arriba de la confluencia Paraguay-Paraná

⁽²⁾ Aguas abajo de la confluencia Paraguay-Paraná

Tabla 2.9: Composición granulométrica de la carga suspendida del Paraná (Orfeo 1995)



Amsler & Drago realizaron una de las series de mediciones llevadas a cabo por el INALI, en el marco del plan “Estudios limnológicos en el cauce principal del Río Paraná Medio - Plan Perfil Toma de Aguas Corrientes” en Paraná, Entre Ríos.

En dicho trabajo, durante el período octubre 1976 - diciembre 1977, se tomaron 169 muestras que fueron utilizadas para el estudio de las características y variaciones de la granometría de los sedimentos suspendidos.

Los porcentajes medios de la carga de lavado y de la fracción arcilla obtenidos en las verticales muestreadas del perfil investigado pueden observarse en la siguiente tabla:

Porcentajes medios de carga de lavado y fracción arcilla						
Fecha	Ribera Izquierda		Centro del Cauce		Ribera Derecha	
	Carga de Lavado	Arcilla	Carga de Lavado	Arcilla	Carga de Lavado	Arcilla
28/10/76	63	28	66	22	83	15
22/01/77	84	49	73	36	70	33
01/03/77	73	48	66	31	64	36
28/03/77	97	59	97	55	90	47
13/04/77	97	51	93	51	97	51
25/04/77	95	57	92	51	88	49
09/05/77	95	54	92	49	92	53
23/05/77	96	51	94	47	95	50
06/06/77	94	48	92	47	98	52
25/07/77	83	37	77	31	74	30
08/08/77	83	37	73	23	72	20
31/10/77	77	29	67	22	64	18
14/11/77	73	17	81	26	88	40
Promedio	85	43	82	38	83	38

Tabla 2.10: Porcentajes medios de carga de lavado y fracción arcilla en la sección “Toma de Aguas Corrientes” Paraná, Entre Ríos (Amsler & Drago 1984)

A partir de dichas mediciones pudieron obtenerse los siguientes resultados:

La mayor proporción de los diámetros medios de las distribuciones analizadas, se halló comprendida dentro de los rangos de los limos finos y muy finos, indicando que la carga de lavado (constituida por partículas menores de 31 μm para el perfil investigado) es preponderante en el sedimento suspendido transportado por el río en esta sección.



En efecto, tomando el promedio de todo el período considerado resulta que la carga foránea constituye alrededor del 80% de la carga total suspendida, mientras que la fracción arcilla se encuentra en una proporción del 40%.

Cuando pasaron por la zona los picos de concentración provenientes del Río Bermejo, con altos porcentajes de arcilla, se detectaron los diámetros medios más pequeños.

Durante el resto del período examinado, los diámetros medios del material transportado en suspensión se desplazaron hacia el rango de limos finos.

Los diferentes tipos de material en suspensión que se incorporan al cauce principal del Paraná en su tramo medio, son mezclados por el río de una manera tal, que conforman un sedimento suspendido pobremente seleccionado salvo, cuando se transportan los picos de concentraciones aportados por el Río Bermejo.

2.1.4.2.3 Mineralogía

El análisis mineralógico de los componentes más finos de la carga suspendida resulta de gran importancia para el conocimiento de la incidencia que presentan los distintos tributarios en el Río Paraná.

De los dos componentes más finos, es decir limos y arcillas, resulta más usual encontrar estudios sobre estas últimas.

Según Orfeo (1995), en la zona de la confluencia con el Río Paraguay, se identificaron para las arcillas los siguientes argilominerales: illita, caolinita, clorita y esmectitas, variando la proporción de cada uno de ellos según la ubicación del sitio de muestreo.

Antes de recibir al Paraguay los minerales dominantes son clorita y caolinita en proporciones semejantes (80 a 90%). El resto corresponde a illita (20%) sobre margen derecha y esmectitas (10%) sobre la margen izquierda.

Luego de la confluencia, sobre la margen derecha se presenta predominio de illita (con algo de caolinita) y sobre la margen opuesta caolinita (con algo de clorita).

De acuerdo a Depetris (1968), las arcillas suspendidas del alto Paraná, aguas abajo de la confluencia con el Paraguay, presentan abundante cantidad de illita y montmorillonita, con menores proporciones de caolinita y clorita. Mientras que la montmorillonita y la caolinita provienen de la región tropical (escudo brasileño), la illita y la clorita son suministradas por el Río Bermejo.

El predominio de illita (60%) constituye una característica distintiva, ya que dicho componente, ausente en los sedimentos suspendidos aguas arriba de la confluencia Paraná-Paraguay, tiene sus orígenes en la erosión de terrenos áridos y semiáridos típicos de regiones andinas, lo que indica su procedencia.

Las características mencionadas se mantienen por el río, hacia aguas abajo. A la altura de la ciudad de Paraná, se encuentran los mismos componentes en las arcillas en suspensión: illita, caolinita, montmorillonita y clorita (Amsler & Drago 1984, Bertoldi de Pomar 1984). Se observa el mismo porcentaje de illita (60%), correspondiendo el resto a las otras componentes.



En efecto, en uno de los trabajos realizados por el INALI en el Paraná medio (1976-1981), a cargo de Bertoldi de Pomar, se determinaron los componentes minerales tanto de las arcillas como de los limos suspendidos.

Para los últimos se encontraron, dentro de los minerales de origen ígneo, cuarzo, micas y feldespatos. En cuanto a los de origen netamente metamórfico se pueden citar, anfíboles y clorita.

En cuanto a los componentes arcillosos, se encontró un predominio de illita y caolinita, acompañado por cantidades variables de montmorillonita y clorita.

Como se mencionó anteriormente, a predominancia de illita puede atribuirse al hecho de que a través de los Ríos Pilcomayo y Bermejo, se produce un aporte suplementario procedente de la erosión de terrenos áridos y semiáridos típicos de los ambientes andinos, recordando que el Paraná superior proporciona esencialmente caolinita.

Por su parte, la presencia de montmorillonita puede atribuirse a aportes producidos por degradación de barrancas y aún de los suelos de la región misionera por efecto de lavado por lluvias intensas.

Al llegar al Río de la Plata, las muestras de sedimentos suspendidos y de fondos oceánicos adyacentes, muestran también predominio de illita (44%), seguida por la montmorillonita (30%), quedando el resto conformado por caolinita y clorita (Depetris 1968). En muestras de lecho del Río de la Plata exterior se encuentran partes iguales de illita, caolinita y montmorillonita, por influencia de corrientes oceánicas (Siegel et al. 1968).

En base a todo lo dicho, y si se tiene en cuenta que del total de illita aportada al Río de la Plata el 95% proviene del Río Paraná y el 5% restante del río Uruguay, y que, el 100% de la clorita que llega al Río de la Plata proviene también del Paraná (Depetris 1968), se puede concluir que la mayor parte de estos materiales son aportados por el Río Bermejo (Brea et al. 1996).

2.1.4.3 Carga de Fondo

La información existente sobre la carga de arrastre ó de fondo del Río Paraná es prácticamente nula. Pese a esto, se puede mencionar lo siguiente:

El lecho del Río Paraná está formado casi en su totalidad por arena, correspondiendo menos del 5% a limos y arcillas. Esto implica que todo el material que es transportado por arrastre sea prácticamente arena.

La fórmula de transporte de Engelund-Hansen, utilizada frecuentemente por los ingenieros fluviales dada su confiabilidad en el Río Paraná, predice transportes de arena totales (en suspensión más arrastre de fondo) de alrededor de 23 millones t/año, si se la aplica con parámetros medios del río.

Según Orfeo (1995), mediante la utilización de gráficos empíricos, dicho valor asciende a unos 40.000.000 de toneladas anuales.

Según el mismo autor, estos valores, que consideran la arena transportada tanto por arrastre como suspensión, representan una proporción mayor del 11% respecto de la carga total, dada la modalidad tractiva que presenta el transporte del Río Paraná.



En efecto, son las corrientes de esta naturaleza las responsables de la génesis y distribución de las barras que presenta el Paraná a lo largo de su curso, las que a su vez le dan la característica forma entrelazada.

2.2 ANÁLISIS DE ANTECEDENTES

2.2.1 Influencia de los Tributarios del Río Paraná

Como pudo verse hasta el momento, el Río Bermejo aporta una gran cantidad de sedimentos suspendidos al Paraguay inferior, y a través de este al Paraná medio, ejerciendo así, una gran influencia en las características de la carga sólida transportada por el último río.

En efecto, las copiosas lluvias orográficas que se producen en el período estival (de octubre a abril) sobre la alta cuenca del Bermejo en las sierras subandinas, originan una intensa erosión hídrica de donde proviene la mayor parte del limo y la arcilla que es aportada luego al Paraná a través de la vía Bermejo-Paraguay.

Observando el comportamiento sedimentológico del Río Bermejo, puede notarse que las máximas descargas sólidas aportadas por su cuenca superior coinciden con los picos de caudales del mencionado río.

A su vez, análisis granulométricos de los sedimentos suspendidos del Río Bermejo muestran que cuando ocurren las máximas descargas sólidas, los porcentajes de la fracción fina suspendida se incrementan notablemente.

La diferencia de caudales entre los ríos Paraguay y Bermejo llevan a una importante dilución de las concentraciones de los sedimentos suspendidos del Bermejo.

Con lo que respecta al comportamiento sedimentológico del alto Paraná, Scartascini (1971) demostró, para el período abril 1970 - Marzo 1971, que las máximas concentraciones coinciden con los picos de caudal.

Las altas concentraciones del bajo Paraguay caen notablemente al confluir con el alto Paraná debido a las diferencias de caudal entre ambos ríos.

Drago & Amsler analizaron durante 1976-1981 la relación de las características hidrosedimentológicas del régimen del Río Bermejo con el período de ocurrencia de las máximas concentraciones de carga de lavado en el tramo medio del Paraná.

Una de las características encontradas fue el retraso de los picos de concentración con respecto a los máximos caudales. Este comportamiento puede explicarse debido a lo siguiente:

El movimiento medio anual de alturas hidrométricas del Río Bermejo en Presidencia Roca, 254 km. antes de la desembocadura en el Paraguay, muestra que los niveles máximos ocurren en el mes de marzo y los mínimos en septiembre-octubre.

Cuando los máximos caudales del alto Paraná llegan a la sección “Corrientes”, los picos de descarga líquida del Bermejo todavía no llegan a la citada sección de “Presidencia Roca”.

Como en el Río Bermejo, los picos de concentración y máximos caudales, son prácticamente eventos simultáneos, es esperable que en el Río Paraná las concentraciones más



grandes de carga de lavado ocurran normalmente un cierto tiempo después de fines de marzo o abril, produciéndose así, el retraso mencionado anteriormente. Este último fue cuantificado en 22 días para dos de los ciclos muestreados.

Las concentraciones de carga de lavado en el resto del año alcanzan valores mínimos, puesto que el Río Bermejo fuera del período de crecidas, transporta cargas de sedimento muy reducidas (AyEE 1987). Por otra parte, los aportes del Alto Paraná y del Paraguay aguas arriba de la desembocadura del Bermejo, no alcanzan en ningún momento la significación de los de este último (Drago & Amsler 1988).

La concentración de los sedimentos suspendidos del Río Paraná sufre un notorio incremento aguas abajo de la confluencia con el Paraguay. Como este río no tiene un transporte en suspensión significativo antes de recibir al Bermejo, se verifica que es este último es el causante de esta situación (Orfeo 1995).

Según mediciones de Drago & Amsler (1988) y de otras fuentes, pudo cuantificarse la influencia del Río Bermejo sobre la carga sólida del Río Paraná en su tramo medio: 60-65% de la carga de lavado del Río Paraná está dada por la del Bermejo.

Desde el punto de vista granulométrico, en una de las series de mediciones realizadas por el INALI, Drago & Amsler estudiaron la granometría de los sedimentos suspendidos del Paraná medio.

Allí determinaron que la mayor proporción de los diámetros medios de las distribuciones analizadas, se halló comprendida dentro de los rangos de los limos finos y muy finos, indicando que la carga de lavado (constituida por partículas menores de 31 μm para el perfil investigado) es preponderante en el sedimento suspendido transportado por el río en esta sección.

En efecto, los porcentajes medios de la carga de lavado y de la fracción arcilla obtenidos en las verticales muestreadas para todo el período considerado (octubre 1976-diciembre 1977), determinaron que la carga foránea constituye alrededor del 80% de la carga total suspendida. A su vez la fracción arcilla se encuentra en una proporción del 40% (tabla 2.11).

Porcentajes medios de carga de lavado y fracción arcilla						
	Ribera Izquierda		Centro del Cauce		Ribera Derecha	
	Carga de Lavado	Arcilla	Carga de Lavado	Arcilla	Carga de Lavado	Arcilla
Promedio del período	85	43	82	38	83	38

Tabla 2.11: Porcentajes medios de carga de lavado y fracción arcilla del Paraná medio para el período octubre 1976 - diciembre 1977 (Amsler & Drago 1984)

Los diámetros medios comprendidos en un entorno de ϕ 7,5 -grados phi- (5,5 μm) reflejan el tamaño modal del material aportado por el Río Bermejo, compuesto en gran



medida por partículas inferiores a $4 \mu\text{m}$ ($\phi 8$), dado los marcados incrementos en la fracción arcilla detectados en el período en que pasan por la sección los picos de concentración suministrados por aquel río (segunda quincena de marzo-primer mitad de junio, 1977). Es durante este evento cuando el sedimento en suspensión presenta la mejor selección.

Exceptuando el período anterior con neta influencia del Río Bermejo, el sedimento en suspensión se presenta pobremente seleccionando al ser el resultado de la mezcla del material originado en el propio cauce del río, en su llanura aluvial y en los Ríos alto Paraná y Paraguay. La moda principal en la distribución de los diámetros medios, se desplaza hacia el rango de los limos finos, indicando una granometría más gruesa.

Resumiendo, los diferentes tipos de material en suspensión que se incorporan al cauce principal del Paraná en su tramo medio, son mezclados por el río de una manera tal, que conforman un sedimento suspendido polimodal, pobremente seleccionado salvo, cuando se transportan los picos de concentraciones aportados por el Río Bermejo.

Según Orfeo (1995), aguas arriba de la confluencia con el Paraguay, los sólidos suspendidos del Paraná son muy homogéneos y están compuestos por altos porcentajes de arcillas (82%) y menor proporción de limos (18%). Aguas abajo de la confluencia, en margen izquierda se mantienen las mismas proporciones, mientras que en margen derecha se observa un importante incremento de los limos (63%), disminuyendo las arcillas (32%), con un 5% de arenas.

La relación porcentual de tamaños que presentan los sólidos suspendidos del Bermejo puede ser adecuadamente reconocida en el Paraná, permitiendo identificar su incidencia sobre este último, hasta la localidad de Empedrado (Corrientes), como puede apreciarse en el siguiente cuadro, extraído de la citada referencia:

Lugar	% Arenas	% Limos	% Arcillas
Itatí	0	15	85
Paso de la Patria ⁽¹⁾	0	22	78
Paso de la Patria ⁽²⁾	5	63	32
Corrientes	4	66	30
Empedrado	3	67	30

(1) Aguas arriba de la confluencia Paraguay-Paraná

(2) Aguas abajo de la confluencia Paraguay-Paraná

Tabla 2.12: Composición granulométrica de la carga suspendida del Paraná (Orfeo 1995)

Como se mencionó anteriormente, los diferentes tipos de material en suspensión que se incorporan al cauce principal del Paraná en su tramo medio, son mezclados por el río de una manera tal que conforman un sedimento suspendido polimodal, pobremente seleccionado, excepto cuando se transportan los picos de concentración aportados por el Bermejo.



Los sedimentos finos transportados en suspensión por el Paraná, salvo situaciones particulares, sólo encuentran condiciones favorables de deposición al llegar al Río de la Plata y sus canales de navegación (Hopwood et al. 1991).

Muestras del lecho extraídas de los pasos de navegación del Paraná inferior demuestran una existencia preponderante de arenas, arrojando un diámetro medio de aproximadamente 250 μm (Brea et al. 1996).

Recién en los canales de navegación del Río de la Plata se encuentran altas proporciones de limos en las muestras del lecho, que demuestran que recién en estas zonas las condiciones de velocidad de la corriente son tales que permiten la depositación de los sólidos suspendidos. Los diámetros medios de las muestras de lecho extraídas del canal Mitre (19 μm), canal de acceso (10 μm) y canal Punta Indio (10 μm) confirman lo expresado (Brea et al. 1996).

De esta manera, en base al análisis de concentraciones y granulometrías, queda reflejado el hecho que los sedimentos del Bermejo son en gran medida los que se depositan en los canales de navegación del Río de la Plata, demostrándose así, la gran incidencia de este tributario en la carga suspendida del Paraná.

Un análisis complementario de lo anterior, resulta de estudiar la composición mineralógica de la fracción arcilla de los sedimentos suspendidos en una corriente fluvial, que proporciona información sobre el origen de las mismas.

El sedimento suspendido del Bermejo, muestreado en Puerto Vélaz, presenta una composición mineralógica de la fracción arcilla con marcado dominio de illita (60%), con presencia de esmectitas (25%) y caolinita (15%) (Orfeo 1995).

De acuerdo a Depetris (1968), las arcillas suspendidas del alto Paraná, aguas abajo de la confluencia con el Paraguay, presentan abundante cantidad de illita y montmorillonita, con menores proporciones de caolinita y clorita. Como se ha dicho, la montmorillonita y caolinita provienen de la región tropical (escudo brasileño), mientras que la illita y la clorita son suministradas por el Río Bermejo.

El predominio de illita (60%) constituye una característica distintiva, ya que dicho componente, ausente en los sedimentos suspendidos aguas arriba de la confluencia Paraná-Paraguay, tiene sus orígenes en la erosión de terrenos áridos y semiáridos típicos de regiones andinas, lo que indica su procedencia.

Las características mencionadas se mantienen por el río, hacia aguas abajo. A la altura de la ciudad de Paraná, se encuentran los mismos componentes en las arcillas en suspensión: illita, caolinita, montmorillonita y clorita (Amsler & Drago 1984). Se observa el mismo porcentaje de illita (60%), correspondiendo el resto a las otras componentes.

Al llegar al Río de la Plata, las muestras de sedimentos suspendidos y de fondos oceánicos adyacentes, muestran también predominio de illita (44%), seguida por la montmorillonita (30%), quedando el resto conformado por caolinita y clorita (Depetris 1968). En muestras de lecho del Río de la Plata exterior se encuentran partes iguales de illita, caolinita y montmorillonita, por influencia de corrientes oceánicas (Siegel et al. 1968).

En base al análisis efectuado, y si se tiene en cuenta que del total de illita aportada al Río de la Plata el 95% proviene del Río Paraná y el 5% restante del río Uruguay, y que, el



100% de la clorita que llega al Río de la Plata proviene también del Paraná (Depetris 1968), se puede concluir que la mayor parte de estos materiales son aportados por el Río Bermejo.

La conclusión surgida acerca de que los sedimentos del Bermejo son en gran parte los que se depositan en los canales del Río de la Plata, basada en las granulometrías y concentraciones, se ve reforzada por el análisis de la composición mineralógica de las arcillas, que arroja una conclusión en el mismo sentido.

En efecto, Brea et al. (1999), determinaron la incidencia del Río Bermejo en la carga de sólidos suspendidos totales del Río Paraná, de tres maneras distintas:

1. Considerando toda la serie de datos disponibles (registro histórico).
2. Mediante la recopilación de aforos líquidos y sólidos provistos por EVARSA.
3. Utilizando las mediciones de caudales medios mensuales según el último anuario hidrológico (EVARSA; 1994) y determinando el caudal sólido total en suspensión mediante las relaciones entre el caudal líquido (Ql) y el caudal sólido (Qs) obtenidas de los aforos.

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

1. La carga sólida total en suspensión del Paraná en Corrientes se corresponde en un 70% a la del Bermejo (90.000.000 de toneladas anuales), 24% a la del alto Paraná y el 6% restante a la del Paraguay.

El período de tiempo considerado, tiene tanto en cuenta como no, la incidencia de las presas en los ríos alto Paraná e Iguazú.

2. Para las secciones “Puerto Pilcomayo”, “Ita Cuá”, “Itatí” y “Túnel” se utilizó la serie de aforos líquidos y sólidos dada por EVARSA. El período contemplado por los aforos sólidos fue 1993-1998, es decir considerando la existencia de las presas de Itaipú y Yacyretá.

La proporción de los aportes sólidos en suspensión en este caso fue del 81% para el Bermejo (100.000.000 de toneladas anuales), 13% para el alto Paraná y 6% para el Paraguay.

Estos se obtuvieron considerando los valores medios registrados en los aforos, a saber:

“Puerto Pilcomayo” (Paraguay antes de recibir al Bermejo)	251 kg/s	8.000.000 t/año
“Itatí” (alto Paraná)	506 kg/s	16.000.000 t/año
“Túnel” (Paraná inferior)	3.150 kg/s	100.000.000 t/año

El efecto de Itaipú y Yacyretá se refleja en la disminución de participación del alto Paraná.

3. Estimando la relación Ql-Qs de los aforos, se determinó el caudal sólido en suspensión mediante los caudales medios mensuales. Estos últimos se obtuvieron a partir del último anuario hidrológico (EVARSA 1994).



El período de análisis fue 1969-1989, es decir que prácticamente una mitad de él contempla la influencia de las grandes presas en el alto Paraná, mientras que la otra no lo hace.

Las proporciones de los aportes sólidos totales en suspensión en este caso fueron del 87% para el Bermejo (107.000.000 de toneladas anuales), 6% para el alto Paraná y 7% para el Paraguay. Aquí disminuyó aún más la participación del Alto Paraná.

Se obtuvieron los siguientes valores de gasto sólido en suspensión:

Río	Estación	QsT [1.000 t/año]
Bermejo superior	Z. del Tigre-P. Sarmiento	87.199
San Francisco	Caimancito	25.159
Bermejo inferior	El Colorado	106.913
Paraguay	Puerto Pilcomayo	8.125
Paraná	Itatí	8.005
Paraná	Túnel	99.477

Tabla 2.13: Gasto sólido en suspensión a lo largo de todo el sistema (Brea et al. 1999)

Al comparar los puntos **2** y **3** debe tenerse en cuenta que los valores obtenidos en **2** deberían ser los más cercanos a los actuales, ya que los mismos fueron obtenidos de mediciones directas de caudales sólidos y el período analizado fue 1993-1998, es decir contemplando la influencia de las presas Itaipú y Yacyretá.

Por lo tanto el punto **3** que considera el período 1969-1989, debería concluir con aportes del alto Paraná algo mayores que los obtenidos en **2**. Sin embargo, como se vio anteriormente no fue así, aunque es oportuno señalar que en **3** el período considerado fue más extenso y las características de las variables analizadas (en especial, la alta dispersión de los aforos sólidos), y la metodología empleada (determinación de relaciones entre caudales líquidos y sólidos aforados y su aplicación con caudales medios mensuales) hacen que los resultados obtenidos no puedan considerarse numéricamente exactos, aunque sí absolutamente válidos para el análisis llevado a cabo en el trabajo.

A pesar de todo esto, puede verse que los porcentajes de aporte son del mismo orden de magnitud. Por lo tanto, es razonable considerar al aporte del Bermejo comprendido entre los valores de 90.000.000 y 110.000.000 de toneladas anuales, siendo el material prácticamente todo fino.

De la misma forma, el aporte del Paraguay estaría dado por unos 8.000.000 de toneladas al año y el del alto Paraná comprendido entre 8.000.000 y 16.000.000 de toneladas anuales.

Sobre la incidencia en el Delta del Paraná en particular, puede mencionarse lo siguiente:

La carga de sedimentos finos inyectada por los tributarios en la cabecera del Río de la Plata conduce a un proceso de sedimentación aguas abajo del Frente del Delta, debido a que la



brusca expansión del ancho produce una drástica reducción de la capacidad del flujo a transportar sedimento en suspensión (Menéndez 2001).

Toda la zona del Delta del Paraná se encuentra afectada por la onda de marea que penetra en el Río de la Plata. Dicha onda está alterada, entre otros factores, por la descarga fluvial, la resistencia al escurrimiento por la baja profundidad, la morfología del estuario, y la configuración de la red de canales que conforma el delta. Hacia aguas arriba, la onda de marea remonta los brazos del delta y el Río Paraná, considerándose que su efecto es totalmente despreciable recién a la altura de la ciudad de Rosario (Brea et al. 1999).

Vale mencionar que, en términos generales, las corrientes del Río de la Plata no tienen capacidad de arrastre suficiente para el transporte de arenas, lo que implica que las arenas que ingresan al delta por transporte fluvial son depositadas en esa zona, pudiendo ser redistribuidos en algunos casos por acción del viento y/o por procesos litorales (acción del oleaje sobre playas) (Brea et al. 1999).

En cuanto a la deposición de limos y arcillas, resulta conveniente caracterizar el comportamiento del sistema en aguas bajas y en aguas altas.

En el caso de aguas bajas, los limos son transportados como carga de lavado junto con la corriente de agua. En esta condición, las aguas fluyen por los cursos del sistema en forma encauzada, existiendo algunas pérdidas del material de la carga de lavado en brazos transversales y cuerpos de agua laterales, tales como lagunas y dársenas portuarias, donde se dan las condiciones de velocidad de la corriente que permitan su deposición. Consecuentemente, puede decirse que el limo es conducido con una eficiencia alta a la desembocadura de los cauces fluviales en el Río de la Plata.

En el caso de aguas altas, se produce un intercambio entre el agua de los cauces y las masas de agua que inundan las planicies e islas del delta. Cuando una masa de agua con carga de lavado ingresa en zonas inundadas de muy baja velocidad, se produce la deposición de dichos materiales, contribuyendo así al crecimiento del Delta (Brea et al. 1999).

Resumiendo, el Delta es una geoforma que crece continuamente tanto en longitud como en cota. Con respecto al primero las arenas son las que tienen más influencia, mientras que los limos tienen mayor peso en el crecimiento en cota (emergencia de bancos que se transforman en islas).

2.2.2 Transporte de Sólidos del Río Paraná

2.2.2.1 Carga en Suspensión

En uno de los puntos anteriores se expuso toda la información, existente en las distintas publicaciones y trabajos, que hace referencia a la carga sólida del Río Paraná.

En particular, en esta sección, se analizará dicha información, de manera que el estudio de las compatibilidades y contradicciones que existen en las distintas fuentes, permita llegar a conclusiones satisfactorias.

Si bien todos los valores de carga suspendida que se presentaron anteriormente están dentro del mismo orden de magnitud, no hay que dejar de mencionar lo siguiente:



El promedio de las distintas concentraciones medidas por Bertoldi de Pomar (1984), para el período 1976-1981 en la sección “Toma de Aguas Corrientes” en Paraná, Entre Ríos, puede verse en el siguiente cuadro:

Concentración Promedio de Sedimentos Suspendedos Totales [mg/l]						
	1976-1977	1977-1978	1978-1979	1979-1980	1980-1981	Promedio
Ribera Izquierda	150,90	174,10	180,45	182,25	157,90	169,10
Centro	185,60	216,90	240,15	226,40	217,75	217,35
Ribera Derecha	168,50	189,44	221,60	195,15	195,05	193,95
Promedio en la sección	168,35	193,50	214,05	201,25	190,25	193,50

Tabla 2.14: Concentración promedio de sedimentos suspendedos totales en la sección “Toma de Aguas Corrientes” Paraná, Entre Ríos (Bertoldi de Pomar 1984)

Con los distintos promedios de las concentraciones se estimará el transporte en suspensión total para los distintos ciclos hidrológicos. El transporte anual está dado por la siguiente expresión:

$$Q_{sólido} = C \cdot Q_{líquido} \cdot 31,536 \quad (2.1)$$

donde $Q_{sólido}$ es el transporte en suspensión total (carga de lavado y material de fondo en suspensión) en t/año, C la concentración promedio de sedimentos suspendedos totales en mg/l y $Q_{líquido}$ el caudal líquido en m³/s.

Tomando un caudal módulo de 17.000 m³/s, resulta:

Transporte en Suspensión Total [t/año]					
Ciclo Hidrológico					Promedio
1976-1977	1977-1978	1978-1979	1979-1980	1980-1981	
90.254.455	103.737.672	114.754.774	107.892.540	101.995.308	103.737.672

Tabla 2.15: Transporte de sedimentos suspendedos totales en la sección “Toma de Aguas Corrientes” Paraná, Entre Ríos (Bertoldi de Pomar 1984)



Puede observarse que el transporte anual de los sólidos suspendidos totales varió entre 90 y 115 millones de toneladas, siendo el promedio de alrededor de 105 millones.

Ahora bien, el promedio del transporte de sedimentos suspendidos determinado por Amsler & Drago (1988) para el mismo período y en la misma sección que el muestreo anterior, resulta de:

Transporte de sedimentos suspendidos [t/año]				
Año	Río Bermejo Sección "Juntas de San Antonio", Salta	Río Paraná medio + Río Colastiné Sección "Toma de Aguas Corrientes", Entre Ríos		
		Período de Concentraciones Pico	Período Restante	Total
1976-1977	127.646.000	56.056.482	36.316.451	92.372.933
1977-1978	79.931.950	75.089.907	32.642.772	107.732.679
1978-1979	106.285.000	88.377.530	34.873.522	123.251.052
1979-1980	100.847.000	62.127.531	45.418.125	107.454.656
1980-1981	191.920.000	67.561.351	45.601.311	113.162.662
Promedio	121.325.990	69.842.560	38.970.436	108.794.796

Tabla 2.16: Transporte de sedimentos suspendidos totales en la sección "Toma de Aguas Corrientes" Paraná, Entre Ríos (Amsler & Drago 1988)

Es decir que durante 1976-1981 el transporte total anual promedio fue de aproximadamente 110 millones de toneladas, de las cuales 70 millones corresponden a los meses pico de concentración (diciembre-mayo) y 40 millones al período restante del año.

Lo primero que se puede observar es que el valor promedio total difiere en menos del 5% con respecto al obtenido según la serie de muestras analizadas por H. Bertoldi de Pomar. Dicho valor era de 103.737.672 millones de toneladas.

Aunque debemos mencionar que el segundo valor fue determinado para sólidos suspendidos totales (carga de lavado más material de fondo en suspensión), mientras que el primero, si bien no es aclarado, parecería ser tratado como valor de carga de lavado, debido al gran porcentaje que esta representa (alrededor del 80% de la carga total suspendida).

Analizando el valor promedio obtenido anteriormente de 110 millones de toneladas y considerando un caudal módulo entre 16.000 y 17.000 m³/s, el valor de concentración media que se desprende es de aproximadamente 215 mg/l.

En el trabajo realizado por Amsler & Drago (1988) se señaló que cuando ocurrieron las máximas descargas sólidas, el transporte sedimentario medido había sido significativamente menor que el aportado por el Río Bermejo. Esto implicó que la frecuencia de muestreo en la



sección de estudio no fue completamente adecuada y, más aún, que los picos de máximas concentraciones no fueron muestreados. Es decir que la mayoría de los valores obtenidos en dicho trabajo están subestimados.

Por lo tanto, la concentración media debería estar entre 215 mg/l y un valor algo mayor a 250 mg/l, ya que este último fue obtenido, según los mismos autores, en la sección “Corrientes” para períodos pico de concentración.

En otra de las series de mediciones realizadas por el INALI, se determinaron las siguientes concentraciones de carga de lavado:

Concentración de Carga de Lavado [mg/l]					
	1976-1977	1977-1978	1978-1979	1979-1980	1980-1981
Máxima	450	575	450	550	610
Mínima	60	60	70	90	100
Media Anual	185	215	285	230	220

Tabla 2.17: Concentración de carga de lavado en la sección “Toma de Aguas Corrientes” Paraná, Entre Ríos (Amsler 1995)

Amsler (1995) comparó, en otro de sus trabajos, al valor medio anual del cuadro anterior (230 mg/l) con el obtenido por él y Drago para el período diciembre-mayo de 1971 a 1974. Aquí es donde debe considerarse que ese último valor (250 mg/l) fue determinado para los períodos de máxima descarga líquida y sólida del sistema fluvial.

Las consideraciones hechas por Drago & Amsler en la probable subestimación de algunos de los valores máximos recabados por el INALI, implican que el valor medio de la concentración de la carga de lavado sería mayor de 230 mg/l. Sin embargo, el rango de concentraciones de 250-300 mg/l estimado por los autores, es considerado algo excesivo teniendo en cuenta lo dicho en los párrafos anteriores.

Por todo lo expuesto se cree más oportuno tomar un rango de variación de 230-270 mg/l para la concentración de la carga de lavado del Río Paraná en su desembocadura.

En uno de los apartados anteriores se mencionó que a partir de ciertas muestras de sedimento suspendido obtenidas en “Paso Alvear” (Rosario), la concentración de sólidos suspendidos totales estaría entre 400 y 450 mg/l (Menéndez 2001).

Si bien no es aclarado a que período de tiempo corresponden dichas muestras, se infiere dado sus valores, que las mismas corresponden a períodos de máxima concentración.

En efecto, el valor medio de la carga de lavado estaría dando unos 400 mg/l, el cual según lo visto hasta el momento, resultaría excesivo para tomarse como un valor medio representativo de la concentración anual.



2.2.2.2 Carga de Fondo

Como se mencionó en el apartado correspondiente, el transporte de arenas en el Paraná, tanto en suspensión como por arrastre de fondo, se produce a una tasa que es la correspondiente a la capacidad de saturación, razón por la cual puede computarse a partir de fórmulas tales como la de Engelund-Hansen, que arroja, para condiciones medias del río, un valor del transporte total de arenas del orden de 25 millones de toneladas al año.

Según Orfeo (1995), dicho valor asciende a unos 40 millones de toneladas anuales. Este último fue obtenido mediante la utilización de gráficos empíricos (Colby 1964), los cuales relacionan velocidad media de flujo, tamaño de grano, profundidad del canal y temperatura del agua.

Se eligieron dos métodos gráficos para comparar resultados obtenidos mediante distintos procedimientos.

En uno de ellos se interceptó la velocidad media con una de las curvas de carga de fondo por unidad de ancho, de acuerdo al tamaño de grano. Por la semejanza encontrada con caudales y rango de diámetro de los sedimentos del lecho del Río Paraná, se seleccionó la curva correspondiente al Río Mississippi (cuyo gasto sólido es de aproximadamente 500 millones de toneladas por año).

El ancho del río se estimó en 1778 metros, obteniéndose 39,7 millones t/año de transporte de material de fondo.

El otro método es semejante al anterior pero discrimina diferentes profundidades del canal. Tomando un valor medio de 13 m de profundidad y considerando el mismo ancho que el anterior, se llegó a determinar al transporte de material de fondo en 38,0 millones t/año.

Si bien las cifras obtenidas por los dos métodos son semejantes, deben tomarse con cierto cuidado debido a la cantidad de aproximaciones que se tomaron para el cálculo.

2.3 BALANCE DE SEDIMENTOS

2.3.1 Valores Representativos Adoptados

En esta sección se expondrán los valores que se tomaron como representativos del transporte sólido anual del Río Paraná en su desembocadura.

Carga en Suspensión

Según lo discutido anteriormente, en la sección “Aguas Corrientes” de Paraná, Entre Ríos (km 606), la concentración promedio de carga suspendida total estimada para el período 1976-1981 varió, según las distintas series de muestras realizadas por el INALI, entre 194, 215 y 230 mg/l. Estos valores deberán ser mayores si se tiene en cuenta lo expresado por Amsler (1995) sobre la posible subestimación de alguno de ellos.

Sin embargo, según se mencionó en una de las secciones anteriores, el rango de 250-300 mg/l adoptado por Amsler para la concentración de carga de lavado del Río Paraná en su desembocadura, es considerado algo excesivo. Es por ello que se tomó un rango de variación de 230-270 mg/l.



Es aquí donde hay que considerar que todos los valores presentados hasta el momento se corresponden a períodos de tiempo en los cuales la presa de Itaipú estaba en construcción y la presa de Yacyretá (1983-1994) en proyecto. La presa de Itaipú comenzó a construirse en 1975 y recién a fines de 1982 se llenó por primera vez el embalse. Es decir que fue a partir de esa fecha cuando comenzó a retener sedimentos.

Esta consideración implicaría que los valores manejados hasta el momento deberían ser aún algo menores. Sin embargo, no habría problemas en seguir trabajando con el rango anterior de concentraciones dado la relativamente poca importancia que tiene la cantidad de finos transportada por el Paraná en comparación con la del Bermejo.

De esta manera, resultaría una concentración media de unos 250 mg/l, la cual implicaría a su vez, un transporte de carga de lavado de unos 135.000.000 de toneladas anuales.

De acuerdo a Amsler & Drago (1984), la carga de lavado, constituida a partir de las partículas menores a 31 μm (arcillas; limos finos y medianos), representa el 80-85% de la carga total suspendida. Si por motivos prácticos, consideramos que la carga de lavado viene dada por las arcillas y los limos en su totalidad, entonces, podría afirmarse que la misma representa por lo menos el 90% de la carga suspendida total.

Esto estaría indicando que la carga sólida total en suspensión sería de alrededor de 145 millones de toneladas anuales. Según el tamaño de las distintas partículas, dicha carga sólida, vendría dada de la siguiente manera:

	Proporción respecto a la carga total suspendida	Transporte en suspensión anual en millones de toneladas
Arcillas	30%	45
Limos	60-65%	90
Arenas	5-10%	10

Tabla 2.18: Carga total en suspensión del Río Paraná de acuerdo al tamaño de las partículas

Carga de Fondo

Como se vio anteriormente, la fórmula de Engelund-Hansen, predice un transporte de arena, tanto por arrastre como suspensión, de unos 25 millones de toneladas al año. De esta forma, la carga de fondo sería de unos 15 millones de toneladas anuales (tabla 2.19).

Carga Total

Por todo lo visto, se concluye que al presente, el transporte total anual de sedimentos del Río Paraná en su desembocadura es de unos 160 millones de toneladas. En la tabla 2.20, se muestra el transporte sólido total según el distinto tamaño de partículas.



	Por deslizamiento, rodamiento y saltación	En suspensión
Transporte de Arenas en millones de toneladas anuales	15	10

Tabla 2.19: Transporte de arenas del Río Paraná

	Proporción respecto a la carga total	Transporte total anual en millones de toneladas
Arcillas	25%	45
Limos	60%	90
Arenas	15%	25

Tabla 2.20: Transporte de sedimentos del Río Paraná de acuerdo al tamaño de las partículas

Deposición de Sedimentos en el Delta del Paraná y Río de la Plata

Las arenas que ingresan al Delta por transporte fluvial se depositan en su totalidad en dicha zona. Sólo para el período de aguas altas se deposita una parte de los limos en el Delta.

En los canales navegables del Río de la Plata se depositan aproximadamente 23.000.000 de toneladas anuales de sedimentos (finos, preponderantemente limos). El resto del material se deposita en el lecho del Río de la Plata fuera de la zona de canales y en el Océano (Brea et al. 1999).

2.3.2 Representación Esquemática

Teniendo en cuenta todas las consideraciones hechas anteriormente, se concluye que al presente, el transporte total anual de sedimentos del Río Paraná en su desembocadura está conformado de la siguiente manera:



Carga Total

	Rango de variación en millones de toneladas anuales	Valor medio en millones de toneladas anuales	Proporción respecto a la carga total
Arcillas	40-50	45	25%
Limos	80-100	90	60%
Arenas	20-30	25	15%
Total	140-180	160	100%

Tabla 2.21: Composición de la carga sólida del Río Paraná

Carga Suspendida Total

	Rango de variación en millones de toneladas anuales	Valor medio en millones de toneladas anuales	Proporción respecto a la carga suspendida total
Arcillas	40-50	45	30%
Limos	80-100	90	60-65%
Arenas	5-15	10	5-10%
Total	125-165	145	100%

Tabla 2.22: Composición de la carga suspendida total del Río Paraná

Carga de Lavado (se considera por motivos prácticos que la misma está conformada por las arcillas y los limos en su totalidad)

	Rango de variación	Valor medio	Proporción respecto a la carga suspendida total
Concentración en mg/l	230-270	250	-
Transporte anual en millones de toneladas	115-145	135	90%

Tabla 2.23: Carga de lavado del Río Paraná



Carga de Fondo

La carga de fondo está dada por la arena transportada principalmente por arrastre y su valor es de unos 15 millones de toneladas anuales.

Teniendo en cuenta valores medios, el balance de los sólidos totales en suspensión puede verse en la siguiente figura:

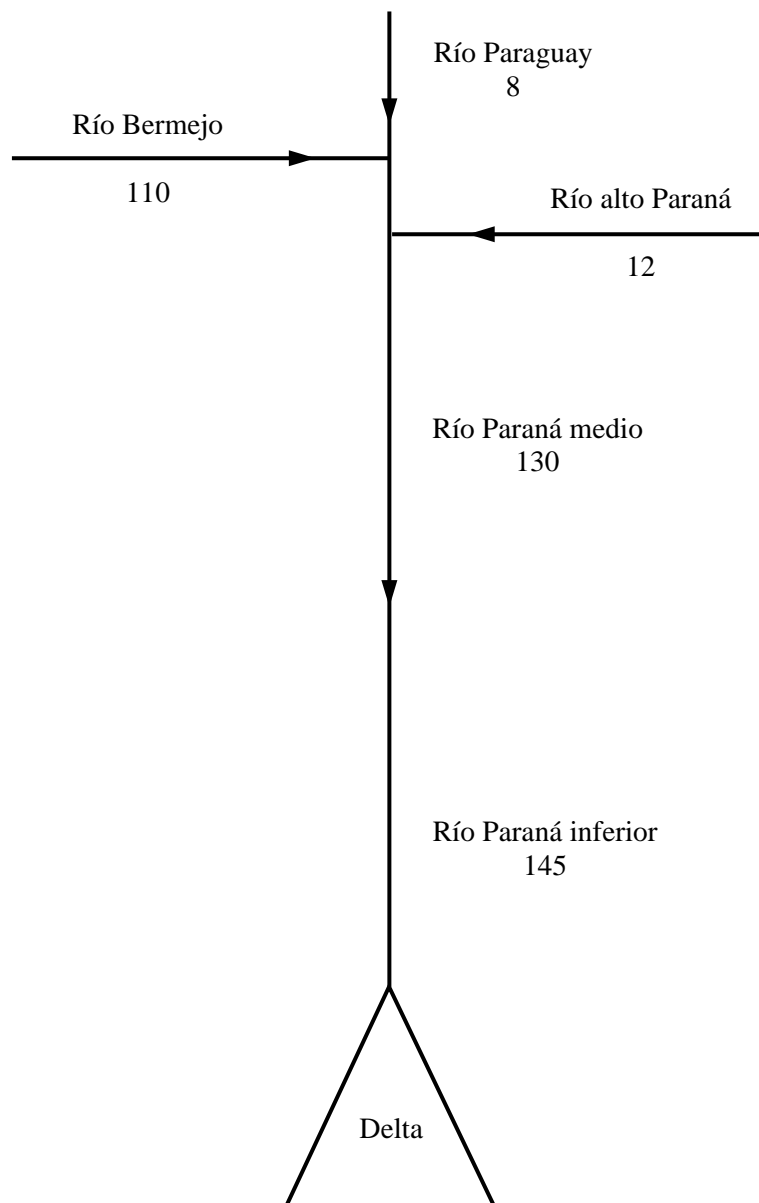


Figura 2.2: Balance de sólidos totales en suspensión (valores en millones de toneladas anuales)



Capítulo 3

AVANCE DEL FRENTE

3.1 CARTOGRAFÍA RECOPIADA

La cartografía recopilada con la que se contó para desarrollar el análisis del avance del Frente del Delta fue obtenida de las siguientes instituciones:

- Academia Nacional de Historia
- Archivo General de la Nación
- Biblioteca del Congreso
- Biblioteca del Museo de Ciencias Naturales de La Plata
- Departamento de Geodesia de La Plata
- Instituto Geográfico Militar

El material recopilado comprende 53 mapas que cubren una extensión temporal de 400 años, desde el siglo XVI hasta el siglo XX. Dicho material fue seleccionado priorizando la información que se brindaba sobre la posición del Frente del Delta, y teniendo en cuenta además, la información adicional que podían proveer, tal como latitud y longitud, escala gráfica del plano, localización de ciudades importantes, etc. Esto último fue de gran importancia para el posterior procesamiento de los distintos planos.

En la tabla 3.1, se presenta el material recabado a modo de resumen. Para mayor detalle se recomienda dirigirse al Anexo 1: “Base de Datos Cartográficos”.

Además de tener esta cartografía de base se contó con un plano de avance del Frente del Delta confeccionado por la Comisión Administradora del Río de la Plata (representando al Frente en los años 1896, 1905, 1926, 1969 y 1984) y con imágenes satelitales del Instituto Geográfico Militar (IGM) y de la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE). Estas imágenes corresponden a los años 1994 (IGM), 2000 y 2002 (CONAE).



Origen	Fuente	Autor	Período Contemplado
Academia Nacional de Historia	Cartografía y relaciones históricas de ultramar Tomo VII - Río de la Plata	Servicio Histórico Militar - Servicio Geográfico del Ejército	Siglos XVII a XIX
Archivo General de la Nación	Mapoteca	-	Años 1788 a 1874
Biblioteca del Congreso	Mapas y planos referentes al Virreynato del Plata	José Torre Revelio	Siglo XVIII
Biblioteca del Museo de Ciencias Naturales de La Plata	América: Prehistoria y Geopolítica	María Amanda Caggiano María Carlota Sempé	Años 1534 a 1618
Biblioteca del Museo de Ciencias Naturales de La Plata	Viaje al Río de la Plata (1534-1554)	Ulrich Schmidel	Siglo XVI
Departamento de Geodesia de La Plata	Catálogo General de Mensuras de la Provincia de Buenos Aires 1824-1944	Ministerio de Obras Públicas de la Provincia de Buenos Aires	Año 1900
Instituto Geográfico Militar	Cuenca del Río de la Plata Estudio para su planificación y desarrollo	Organización de los Estados Americanos	Año 1961
Instituto Geográfico Militar	La Argentina Suma de Geografía Tomos I y II	Francisco de Aparicio Horacio A. Difrieri	Siglo XVI Años 1732 y 1825
Instituto Geográfico Militar	Cartografía Jesuítica del Río de la Plata	Guillermo Furlong	Siglo XVIII

Tabla 3.1: Cartografía de base recopilada

3.2 PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE LA CARTOGRAFÍA

3.2.1 Avance del Frente del Delta del Río Paraná

3.2.1.1 Desarrollo

Del análisis de cada una de las cartas colectadas, cabe mencionar que las correspondientes al período comprendido entre los siglos XVI y XVIII, presentan un aspecto más “artístico” en su confección, de manera que su grado de precisión en la representación del Frente del Delta carece de confiabilidad suficiente como para ser utilizadas en un análisis posterior, razón por la cual estos mapas fueron descartados para un estudio comparativo (figura 3.1). Sin embargo, es importante destacar que un gran porcentaje de estos mapas cuenta con relatos de la época, donde señalan datos puntuales sobre el Delta, los cuales pueden ser importantes para identificar la posición del Frente en ese momento de la historia.



Desde fines del siglo XVIII los mapas muestran una representación más precisa del Delta y su Frente de avance, con lo cual se procedió a la selección de diferentes cartas lo más equidistantes posibles en el tiempo, con el fin de poder representar la secuencia temporal de avance del Frente hasta el presente (figura 3.1).

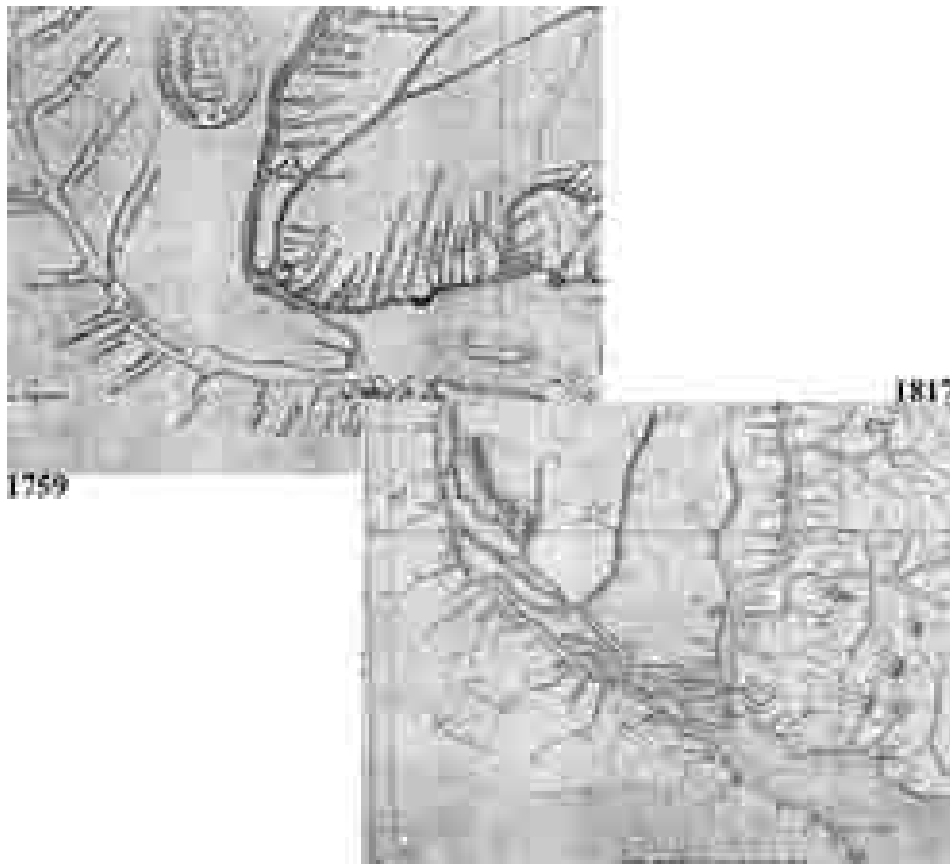


Figura 3.1: Delta del Río Paraná en los años 1759 y 1817

Las cartas seleccionadas fueron las correspondientes a los siguientes años: 1778, 1790, 1794, 1817, 1824, 1826, 1845, 1896, 1905, 1926, 1969, 1984 y 2000, abarcándose de esta forma un período de más de 200 años.

Se procedió a la digitalización de cada una de estas cartas, dando un especial énfasis al Frente, márgenes, principales tributarios y ciudades importantes, de modo de tener referencias a la hora de la superposición. Una vez digitalizadas, las cartas se superpusieron y compararon tomando como referencia principal la margen uruguaya, dado que por su naturaleza rocosa no ha sufrido modificaciones significativas a lo largo de este tiempo. De este análisis, se concluyó que las cartas más fieles para realizar un análisis comparativo posterior eran las correspondientes a los años 1778, 1845, 1896, 1969 y 2000, dado que su equidistancia es de aproximadamente 50 años y que en la superposición guardaban una gran coherencia en sus trazas, puntos de referencia, etc.



Una vez definida la cartografía de base, se procedió a la digitalización de una línea envolvente que, conteniendo principalmente la costa uruguaya, la bonaerense y el Frente del Delta, pudiera reflejar la posición del mismo en su respectivo momento histórico. Estos nuevos planos se construyeron con la finalidad de poder analizar y entender mediante la superposición y comparación, las características de la forma de avance del Frente del Delta y obtener tasas representativas de ese crecimiento (figura 3.2).

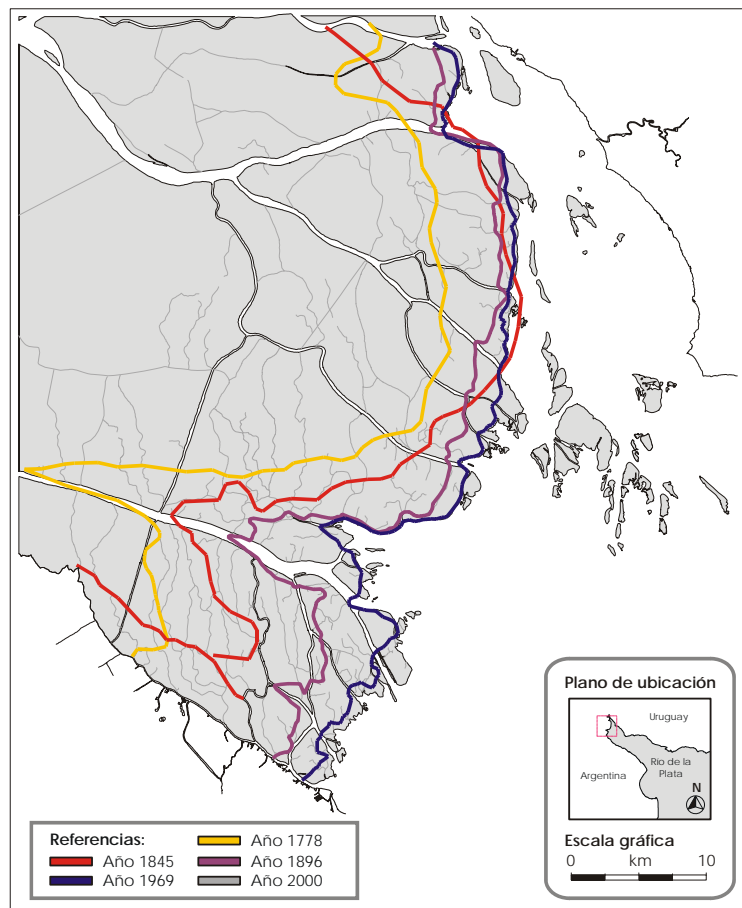


Figura 3.2: Frentes digitalizados para los años 1778, 1845, 1896, 1969 y 2000

Luego, sobre la imagen satelital del año 2000 se superpusieron las cartas correspondientes a los años 1778, 1845 y 1896 (figura 3.3), donde se pudo comprobar que algunos cursos de agua activos y no activos (paleocauces) seguían con cierta precisión la traza de la envolvente en la zona comprendida entre la margen derecha del Río Paraná de las Palmas y la costa bonaerense. Esta gran coincidencia en las trazas se da en esta zona debido a que esta porción del Frente es generada en su totalidad por la carga de sedimentos aportados por el Río Paraná de las Palmas. En cambio, sobre su margen izquierda los procesos formativos son compartidos entre este último y el Paraná Guazú, por lo que las trazas están más distorsionadas y casi no es posible atribuir un cauce a la traza de la carta (figura 3.4).



Figura 3.3: Superposición de las cartas correspondientes a los años 1778, 1845 y 1896 con la imagen satelital del año 2000

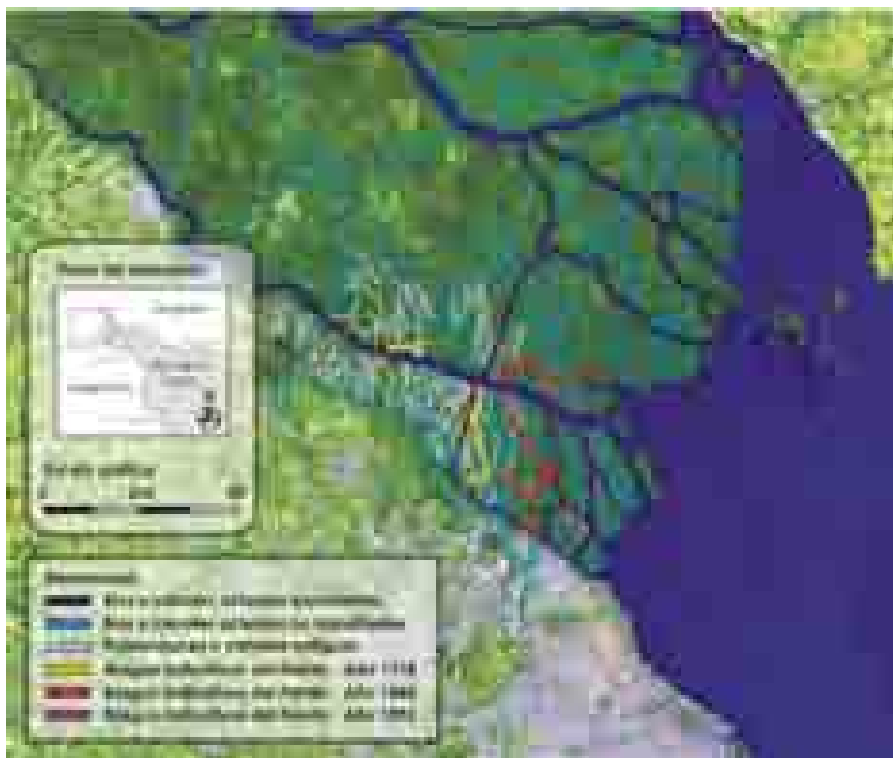


Figura 3.4: Rasgos coincidentes con las trazas de los Frentes digitalizados



3.2.1.2 Resultados Obtenidos

Del análisis de la información generada a través de la superposición y comparación de la cartografía digitalizada, pudo generarse una descripción tanto en forma cualitativa como cuantitativa que se desarrolla a continuación.

Pueden distinguirse dos frentes, uno asociado al Paraná Guazú y otro al Paraná de las Palmas. A su vez, en el Frente del Paraná Guazú se pueden discriminar dos subfrentes: uno al Norte (Sf N PG), enfrentando a la costa uruguaya, y otro al Sur (Sf S PG), avanzando sobre la cabecera del Río de la Plata (figura 3.5).

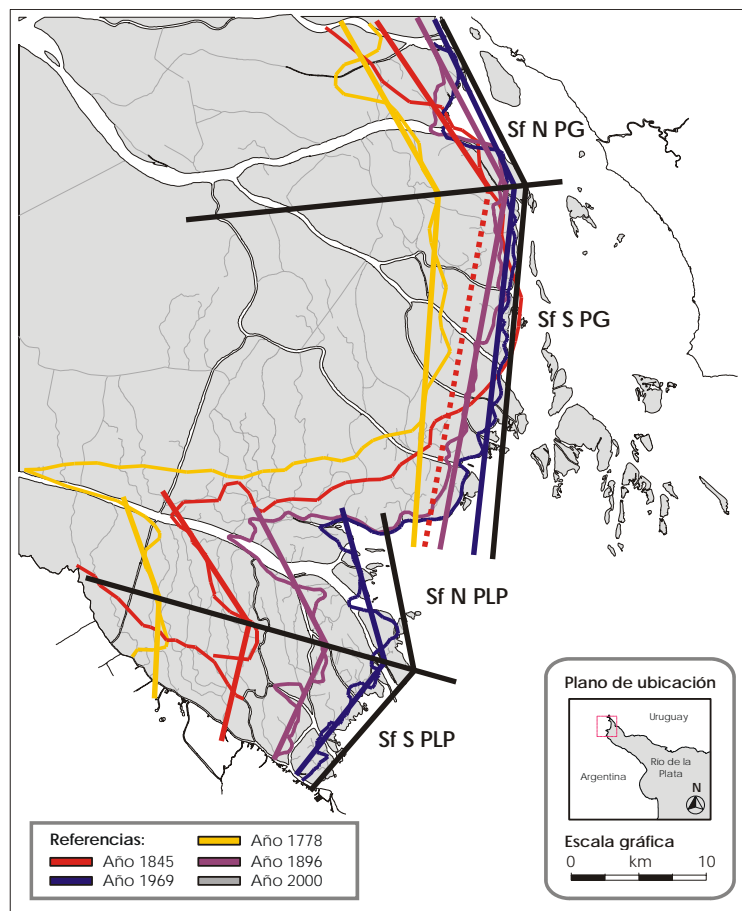


Figura 3.5: Trazas generales de avance del Frente del Delta

A partir del siglo XIX, debido a la limitación impuesta por la costa uruguaya y la corriente del río Uruguay, el avance del subfrente Norte comenzó a frenarse. Su tasa media de avance, que era de alrededor de 50 m/año hasta fines del siglo XIX, actualmente se ha reducido prácticamente a cero. Esto se debe al incremento de las corrientes, que impiden la sedimentación en esa zona; en cambio, estos sedimentos son transportados hacia aguas abajo de la desembocadura y se depositan donde se produce la expansión del Río de la Plata y la



corriente pierde capacidad de transporte, manifestándose en un notable crecimiento de bancos e islas (figura 3.6 y tabla 3.2).

Por su parte, el subfrente Sur ha tenido una tasa media de avance de unos 35 m/año durante el siglo XIX, pero esta se ha reducido a 25 m/año en el presente siglo, seguramente por el efecto pantalla que ejerce el conglomerado de islas (figura 3.6 y tabla 3.2).

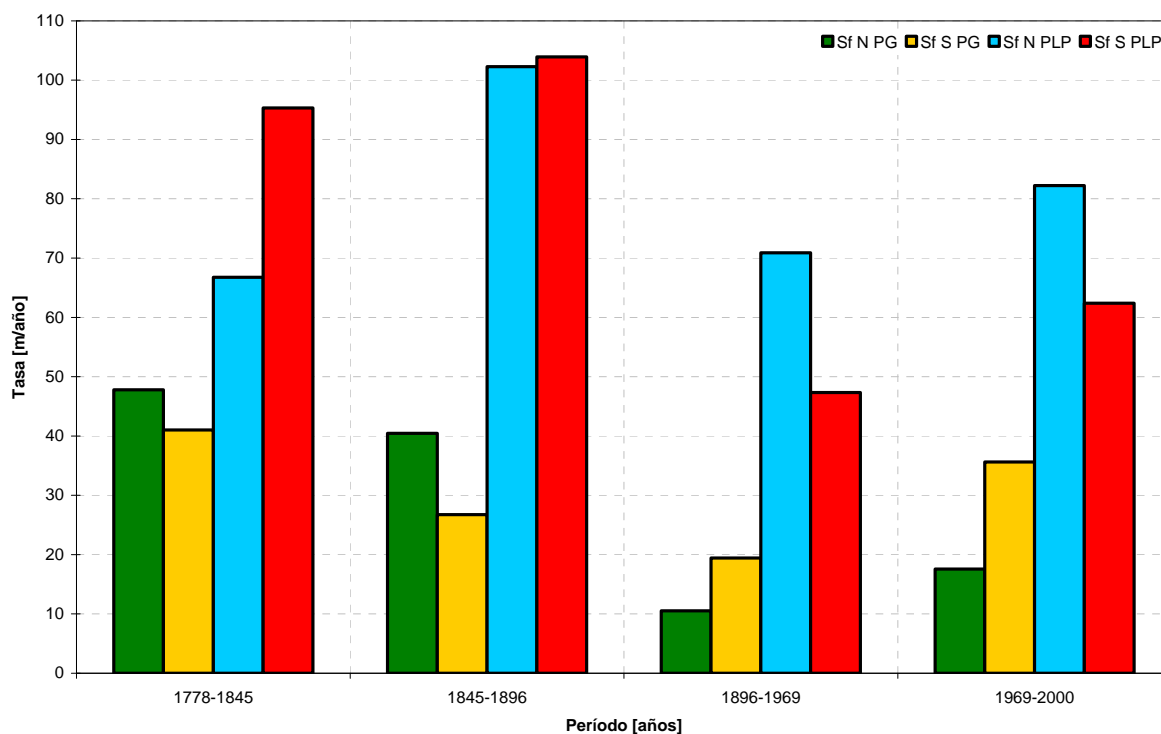


Figura 3.6: Tasas medias de avance de los distintos subfrentes

Subfrente	Tasa Media de Avance [m/año]			
	1778-1845	1845-1896	1896-1969	1969-2000
Sf N PG	48	40	11	18
Sf S PG	41	27	19	36
Sf N PLP	67	102	71	82
Sf S PLP	95	104	47	62

Tabla 3.2: Tasas medias de avance de los distintos subfrentes

El Frente del Paraná de las Palmas vuelca la mayor parte de sus sedimentos hacia la costa argentina. Aquí también pueden distinguirse un subfrente Norte (Sf N PLP) y otro Sur (Sf S PLP) (figura 3.5). Las tasas promedio de avance de esos subfrentes era de alrededor de 100 m/año durante el siglo XIX, pero el subfrente Sur ha disminuido esa tasa a la mitad



durante el siglo XX, seguramente debido al aumento en la extensión del Frente. Por su parte, el subfrente Norte redujo su tasa de avance a unos 75 m/año (figura 3.6 y tabla 3.2).

3.2.2 Incremento Areal del Delta del Río Paraná

3.2.2.1 Desarrollo

Para el análisis del incremento superficial del Delta se contó, al igual que en el estudio anterior, con la disponibilidad de planos recopilados para los siguientes años: 1896, 1905, 1926, 1969 y 1984 e imágenes satelitales para los años 1994 y 2002. Una vez establecida la cartografía e imágenes a utilizar, se procedió a su digitalización y superposición de la misma forma que para el estudio anterior de avance lineal.

Vale mencionar que los planos correspondientes a los años 1896, 1905, 1926, 1969 y 1984 provienen todos de la misma fuente, siendo esta la Comisión Administradora del Río de la Plata (CARP). Es por esto que se contrastó el plano del año 1896 con el mapa del 1900 obtenido en el Departamento de Geodesia de La Plata (DGLP), dado que este último presentaba un gran detalle en su confección. En dicha comparación, se destacó la gran similitud entre los dos planos, coincidiendo prácticamente en escala y referencias, lo cual denotó la precisión de ambos y permitió utilizar al mapa de la CARP con plena confianza (figura 3.7).

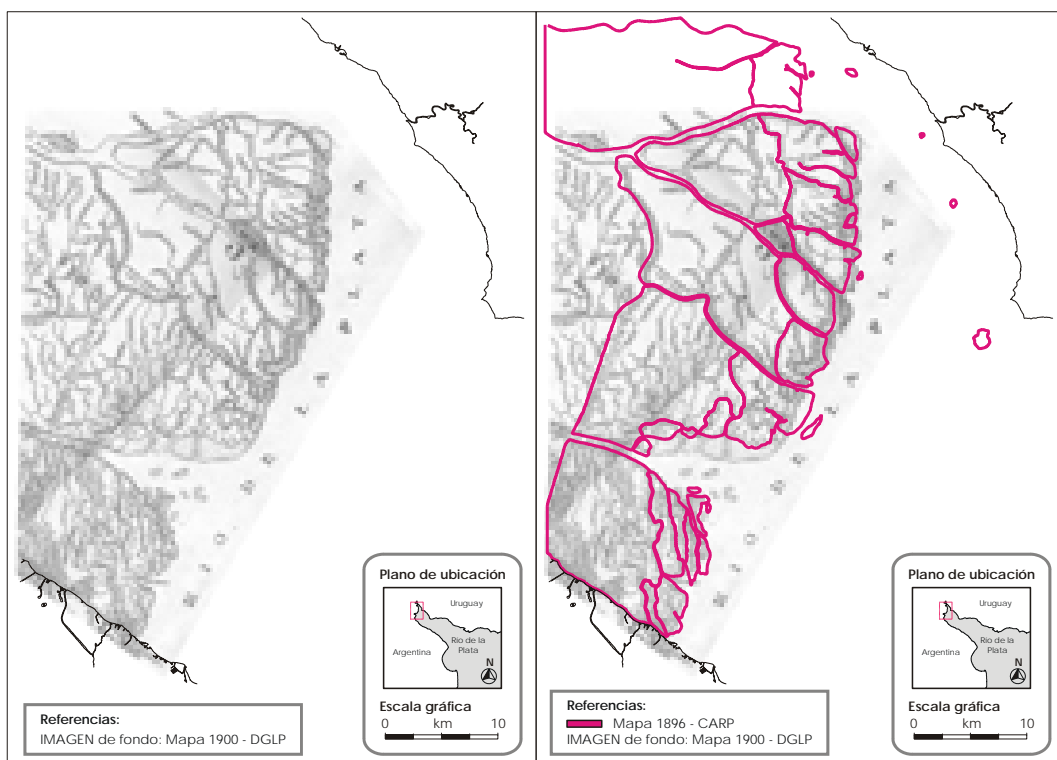


Figura 3.7: Comparación entre los mapas de la Comisión Administradora del Río de la Plata (1896) y del Departamento de Geodesia de La Plata (1900)



Una vez procesados los planos se obtuvieron las áreas generadas durante los períodos de tiempo citados.

Para el análisis del incremento areal se establecieron tres formas de estudio:

1. *Crecimiento del Frente*
2. *Crecimiento de Subfrentes* (Subfrentes Norte y Sur del Paraná Guazú y Subfrentes Norte y Sur del Paraná de las Palmas)
3. *Crecimiento de Islas*

Para la primera forma de estudio se obtuvieron las áreas diferenciales entre dos frentes sucesivos, desde el río Sauce, ubicado al Norte del Río Paraná Guazú, hasta el río Luján al Sur del Río Paraná de las Palmas. A su vez, para este análisis del Frente, se consideraron dos casos, en función de incluir o no a las islas del Delta. Esta región de análisis puede observarse en la figura 3.8.

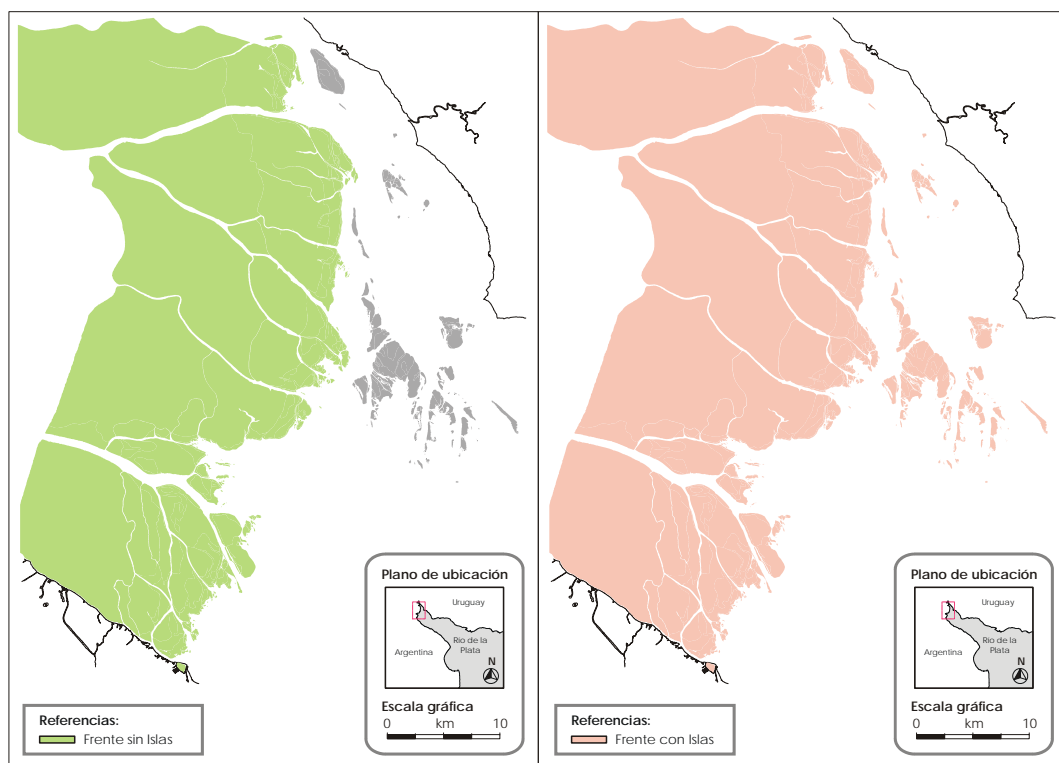


Figura 3.8: Región de análisis para el crecimiento del Frente, excluyendo islas (izq.) e incluyendo islas (der.)

En la segunda forma de análisis, se tomaron en cuenta los subfrentes de avance generados por los Ríos Paraná Guazú y Paraná de las Palmas, es decir, considerando los subfrentes de avance al Norte y al Sur de cada uno de estos ríos. Los mismos pueden observarse en la figura 3.9. Para un mayor detalle el subfrente Sur del Paraná Guazú se



subdividió en dos zonas de estudio en función del río Barca Grande (figura 3.9). De esta forma la región de análisis quedó compuesta por las siguientes zonas:

- *Subfrente Norte del Paraná Guazú:* Entre los ríos Sauce y Paraná Guazú.
- *Subfrente Sur del Paraná Guazú (a):* Entre los ríos Paraná Guazú y Barca Grande.
- *Subfrente Sur del Paraná Guazú (b):* Entre el río Barca Grande y el aguaje del Durazno.
- *Subfrente Norte del Paraná de las Palmas:* Entre el aguaje del Durazno y el Río Paraná de las Palmas.
- *Subfrente Sur del Paraná de las Palmas:* Entre los ríos Paraná de las Palmas y Luján.

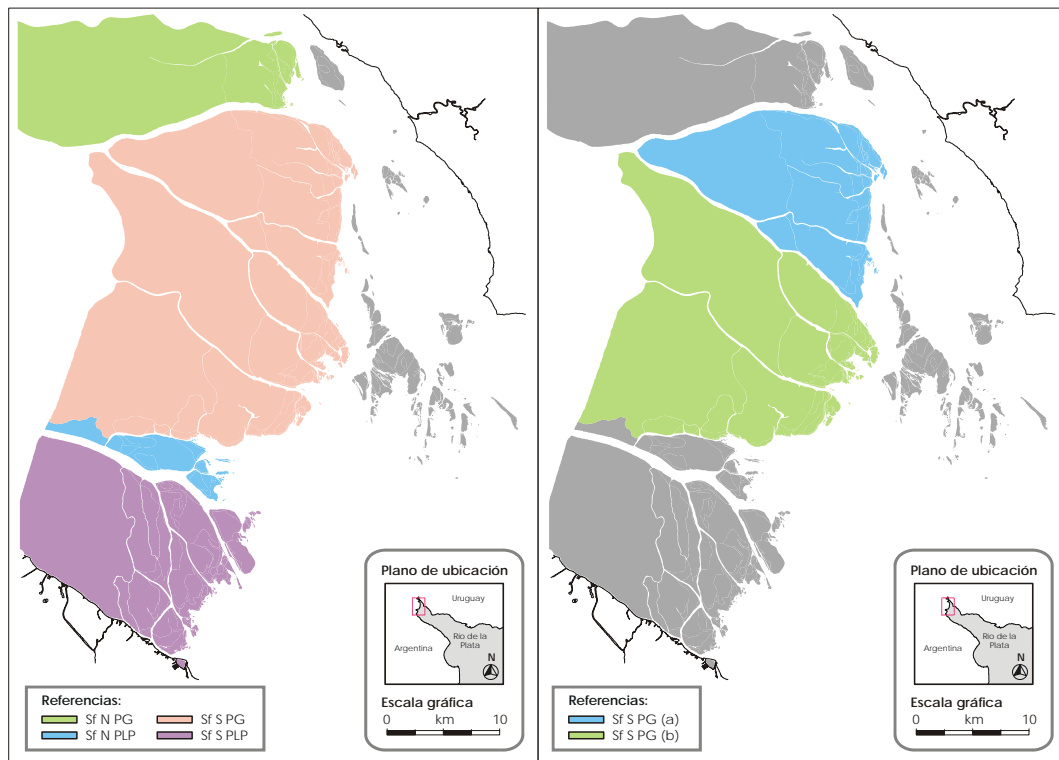


Figura 3.9: Región de análisis para los distintos subfrentes (izq.) y discriminación del subfrente Sur del Paraná Guazú (der.)

Finalmente la tercera forma de estudio considera las islas ubicadas entre el Frente del Delta y la costa Uruguaya, incluyendo las cuatro más importantes: islas Juncal, El Matón, Oyarvide y Martín García (figura 3.10).

De esta manera se obtuvieron las áreas diferenciales entre cada frente de avance sucesivo. Volcando estos datos en una planilla de cálculo se realizaron gráficos del tipo Área-Años y se obtuvieron comportamientos particulares en cada uno de los ploteos.

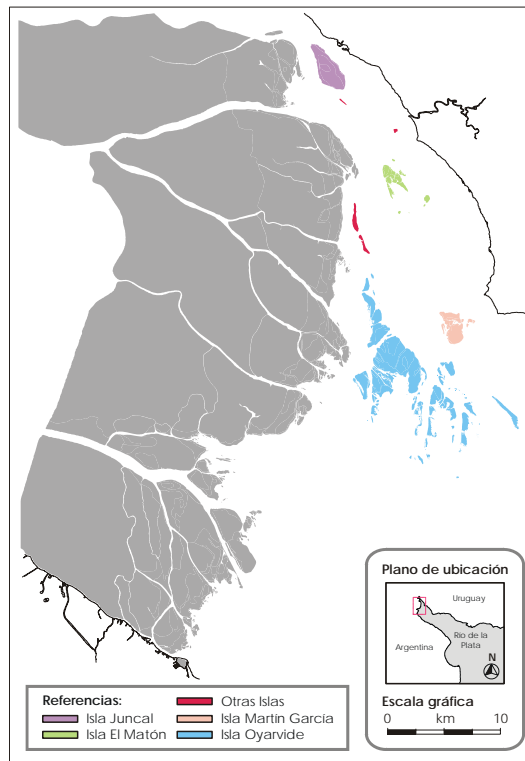


Figura 3.10: Región de análisis para el crecimiento de islas

3.2.2.2 Resultados Obtenidos

De la observación de los gráficos obtenidos de incremento areal, se destaca un rasgo muy importante que se presenta en la mayoría de ellos: el quiebre de curvatura presentado en el año 1984, año de registro cartográfico. Esto se manifiesta en el notable aumento de la tasa de crecimiento que se da desde ese año.

A partir de 1896 y hasta el año 1984, las curvas denotan inicialmente un considerable incremento de las áreas que luego va disminuyendo hacia el año 1984. A partir de este último, las áreas aumentan notablemente marcando una nueva tendencia de crecimiento hacia el presente. Este comportamiento puede observarse en las figuras 3.11 y 3.16 y en la tabla 3.3.

Además del quiebre notorio de 1984, de acuerdo a la figura 3.11, se destacan otros picos en las tasas de crecimiento aproximadamente en los años 1896 y 1925, observándose también algunos saltos en los años 1990 y 1995. Para el caso del Frente incluyendo islas se distingue también un pequeño salto en el año 1905.

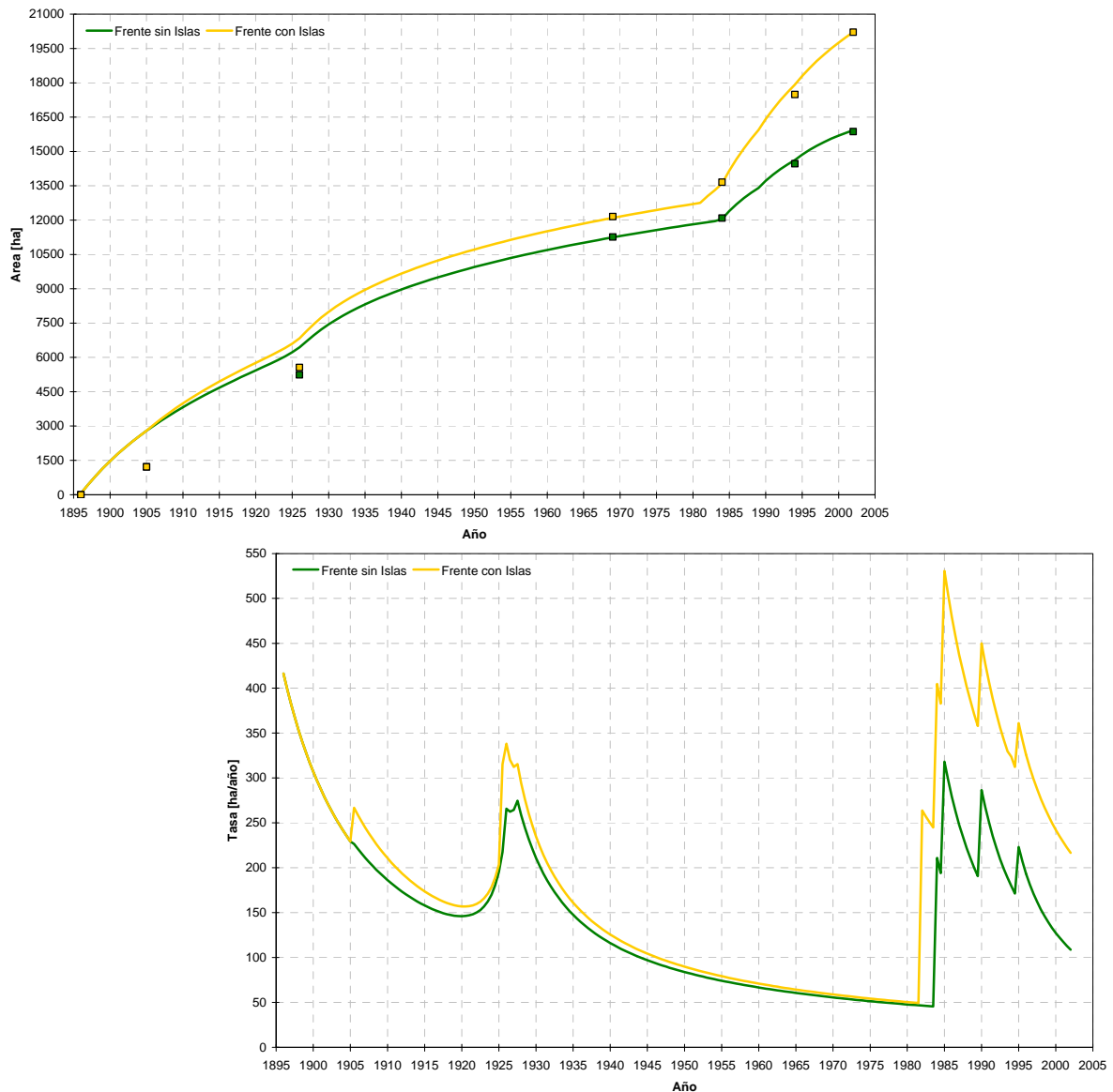


Figura 3.11: Curvas de incremento areal (arriba) y tasas de crecimiento (abajo) de todo el Frente

Frente	Dato	Área [ha]						
		1896	1905	1926	1969	1984	1994	2002
Sin Islas	Parcial	0.0	1219.9	4021.9	6024.6	821.1	2376.3	1402.3
	Acumulado	0.0	1219.9	5241.8	11266.4	12087.5	14463.8	15866.1
Con Islas	Parcial	0.0	1219.9	4342.9	6590.7	1506.3	3830.9	2723.1
	Acumulado	0.0	1219.9	5562.8	12153.5	13659.8	17490.7	20213.9

Tabla 3.3: Valores de incremento areal de todo el Frente



En la figura 3.12, se muestran los máximos y medios anuales de los caudales diarios del Río Paraná en la sección Paraná-Santa Fe para el período 1902-2004, en base a los datos provistos por el Sistema de Información y Alerta Hidrológico del INA. En la misma puede observarse que las crecidas con mayores caudales pico se produjeron en los años 1905, 1966, 1983, 1992 y 1998. De todos ellos, en particular los picos correspondientes a los años 1905, 1983 y 1998 tienen asociado un caudal medio claramente superior a la tendencia de dicha serie. Esto indica que las crecidas de dichos años tuvieron una duración significativa. En particular, observando la relativamente pequeña diferencia entre los caudales máximos y medios para el año 83, se pone de manifiesto la extraordinaria duración de dicha crecida.

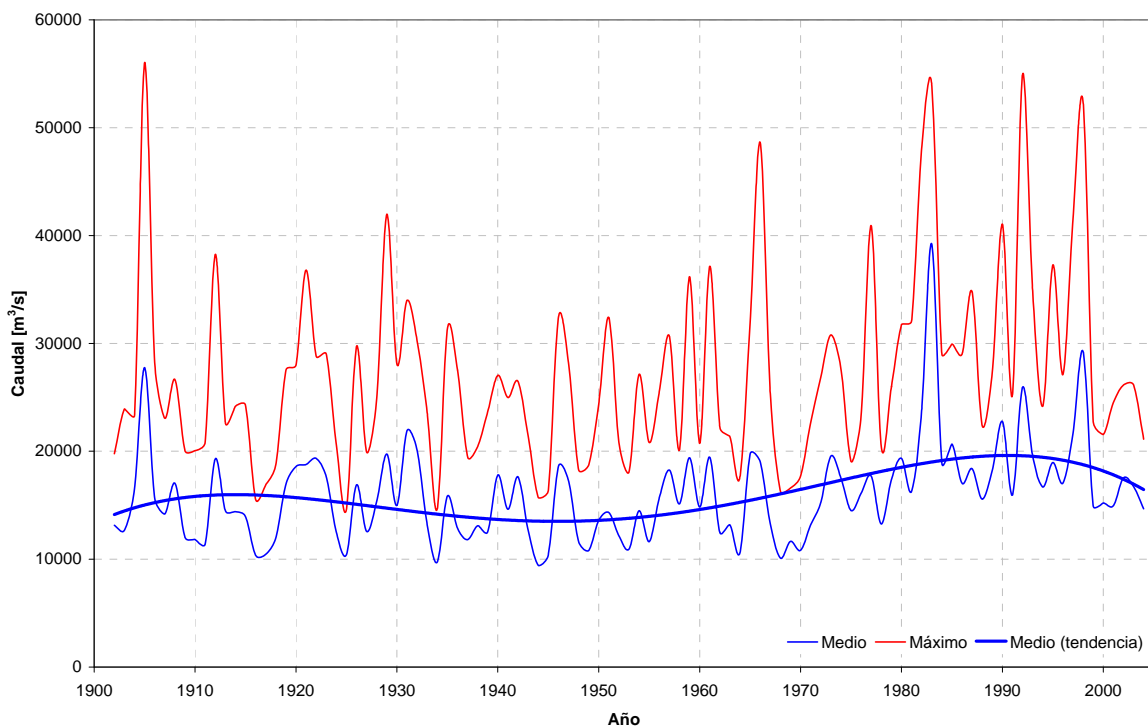


Figura 3.12: Máximos y medios anuales de los caudales diarios del Río Paraná en la sección Paraná-Santa Fe para el período 1902-2004

Por lo tanto, de las crecidas con mayores caudales pico, la de los años 1905, 1983 y 1998 fueron las que tuvieron mayor permanencia. El efecto de las mismas en el sistema se ve reflejado en los picos de las tasas de crecimiento areal que se indicaron anteriormente. La crecida del año 1921, si bien no tuvo la magnitud de las anteriores, se manifiesta en el pico del año 1926 de las tasas de crecimiento areal, seguramente debido a la duración de la misma.

En particular, el pico de 1984, reflejaría los efectos producidos por la aparición del Mega-Niño de 1983, que generó un notable aumento de las precipitaciones sobre la alta cuenca del Plata. Esto último se vio reflejado primariamente en caudales extraordinarios sobre las cuencas de los ríos Paraguay y Paraná, que se montaron sobre la crecida del año 1982, y



que produjo a su vez un gran lavado de la cuenca imbrífera que incrementó la carga sedimentaria disponible.

En las tasas de crecimiento de la figura 3.11, puede observarse también el *tiempo de respuesta* del sistema asociado a las crecidas de 1921 y 1983, el cual es de aproximadamente 20 años. Esto indica que la carga sedimentaria del sistema puesta en juego por esas crecidas ha sido transportada hacia aguas abajo a lo largo de las dos décadas siguientes (figura 3.13).

Dicho período de tiempo concuerda con lo indicado por los geomorfólogos en que los sedimentos más finos (limos y arcillas) requieren décadas para ser transportados fuera de la cuenca de aporte. Una clara muestra de ello es que, por lo menos hasta 1996, en Norteamérica se seguían encontrando aún muestras de DDT en sedimentos cuando dicho pesticida ya había dejado de utilizarse hacía casi dos décadas (Ongley 1996).

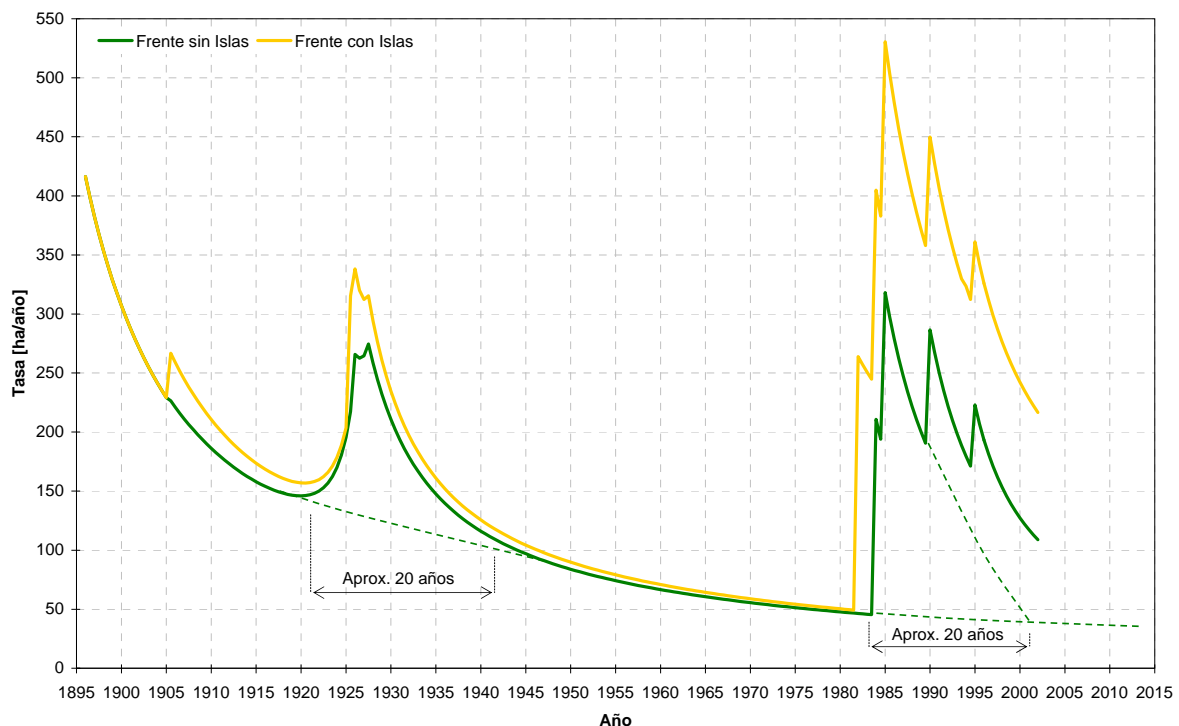


Figura 3.13: Tiempo de respuesta del sistema asociado a las crecidas de 1921 y 1983

Del análisis de los distintos subfrentes puede mencionarse que el subfrente Sur del Río Paraná Guazú es el que manifiesta una mayor reacción a la singularidad de 1983, luego en menor magnitud lo siguen los subfrentes del Río Paraná de las Palmas y por último, con muy poca reacción, el subfrente Norte del Río Paraná Guazú (figuras 3.14 y 3.16 y tabla 3.4).

En particular, el subfrente Norte del Paraná Guazú presenta un gran aumento areal durante los años 1926 y 1969 y luego prácticamente no varía su superficie. Por su parte, en el subfrente Sur del Paraná Guazú, puede notarse claramente en la zona (a) el cambio de tendencia del crecimiento a partir de 1983. Este comportamiento se acentúa en las zonas que



están enfrentadas a la Isla Oyarvide, y al igual que dicha isla, manifiestan con mayor contundencia, los efectos causados por la crecida extraordinaria del 83. La zona (b) de este subfrente presenta un comportamiento similar.

El subfrente Norte del Paraná de las Palmas presenta una reacción de escasa magnitud al evento de 1983. Vale mencionar que el incremento areal a partir de ese año se da más claramente en las islas Nutria y Lucha y en las pequeñas islas de sus cercanías. Por último, y al igual que el anterior, el subfrente Sur del Río Paraná de las Palmas demuestra poca reacción a la crecida del año 83.

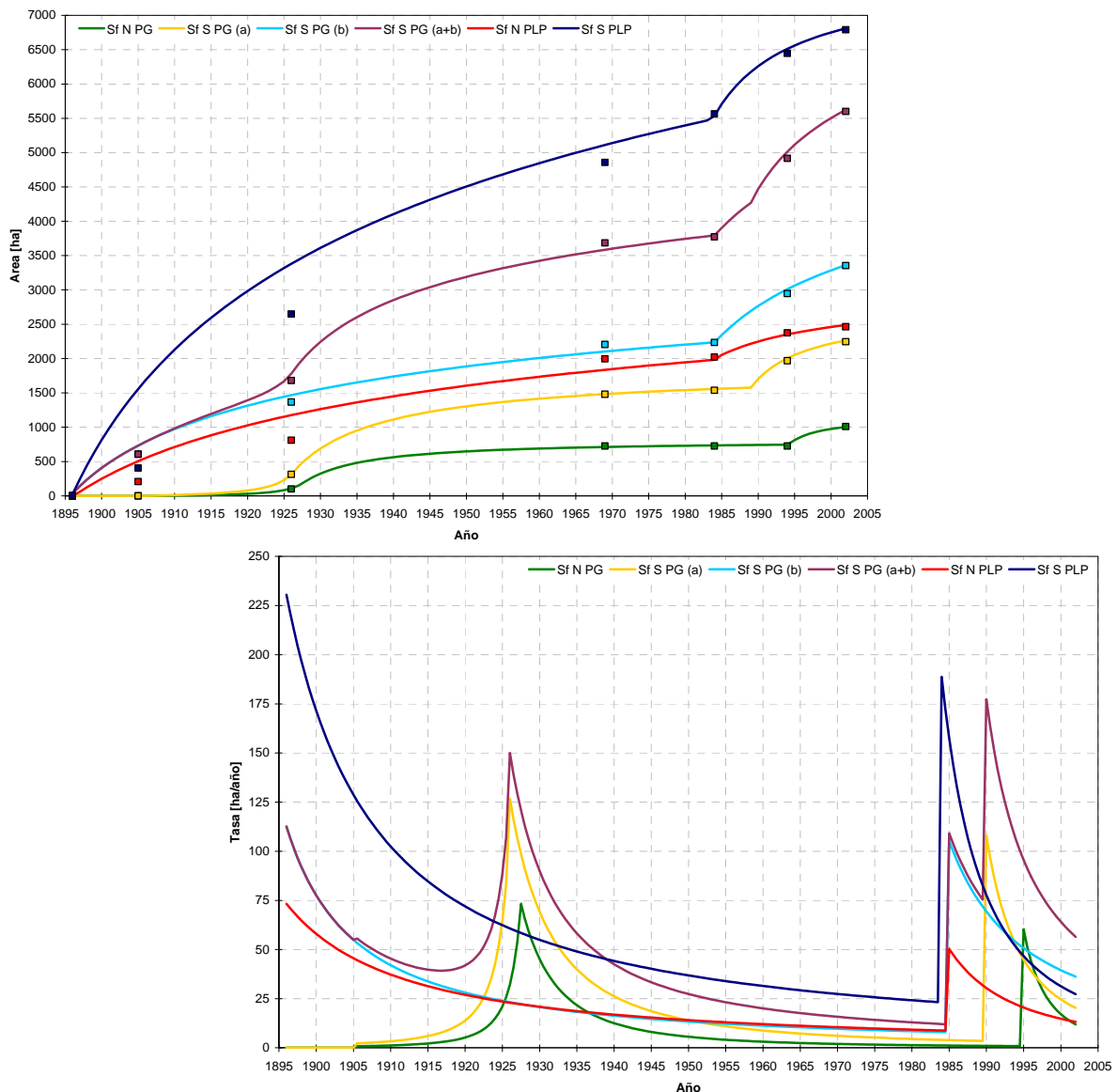


Figura 3.14: Curvas de incremento areal (arriba) y tasas de crecimiento (abajo) de los distintos subfrentes



Subfrente	Dato	Área [ha]						
		1896	1905	1926	1969	1984	1994	2002
Sf N PG	Parcial	0.0	0.0	100.5	625.8	0.0	0.0	285.1
	Acumulado	0.0	0.0	100.5	726.3	726.3	726.3	1011.3
Sf S PG (a)	Parcial	0.0	0.0	313.6	1166.5	57.9	430.5	277.6
	Acumulado	0.0	0.0	313.6	1480.1	1538.0	1968.5	2246.1
Sf S PG (b)	Parcial	0.0	607.0	759.5	839.1	29.9	711.8	406.7
	Acumulado	0.0	607.0	1366.4	2205.5	2235.4	2947.3	3354.0
Sf S PG (a+b)	Parcial	0.0	607.0	1073.1	2005.5	87.9	1142.3	684.3
	Acumulado	0.0	607.0	1680.0	3685.6	3773.4	4915.8	5600.1
Sf N PLP	Parcial	0.0	207.3	604.1	1185.6	26.4	351.6	88.9
	Acumulado	0.0	207.3	811.4	1996.9	2023.3	2374.9	2463.8
Sf S PLP	Parcial	0.0	405.6	2244.3	2207.7	706.9	882.5	344.0
	Acumulado	0.0	405.6	2649.9	4857.6	5564.5	6447.0	6790.9

Tabla 3.4: Valores de incremento areal de los distintos subfrentes

Puede observarse, que en el período 1926-1969 tres islas importantes comienzan a surgir, la isla Oyarvide, el islote El Matón y la isla Timoteo Domínguez en las cercanías de la isla Martín García. De estas tres islas, la isla Oyarvide es la más clara manifestación del fenómeno 1982-1983, ya que a partir de este, experimenta un incremento abismal de su superficie. Esto último se ve reflejado en la figuras 3.15 y 3.16 y en la tabla 3.5.

Isla	Dato	Área [ha]						
		1896	1905	1926	1969	1984	1994	2002
Juncal	Parcial	0.0	0.0	321.0	241.6	0.0	0.0	32.3
	Acumulado	0.0	0.0	321.0	562.6	562.6	562.6	594.9
El Matón	Parcial	0.0	0.0	0.0	47.8	40.3	54.7	106.6
	Acumulado	0.0	0.0	0.0	47.8	88.2	142.8	249.5
Martín García	Parcial	0.0	0.0	0.0	71.1	0.0	95.6	64.9
	Acumulado	0.0	0.0	0.0	71.1	71.1	166.7	231.6
Oyarvide	Parcial	0.0	0.0	0.0	205.5	644.9	1229.9	1068.8
	Acumulado	0.0	0.0	0.0	205.5	850.4	2080.3	3149.1
Otras Islas	Parcial	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	74.4	48.2
	Acumulado	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	74.4	122.6

Tabla 3.5: Valores de incremento areal de las islas

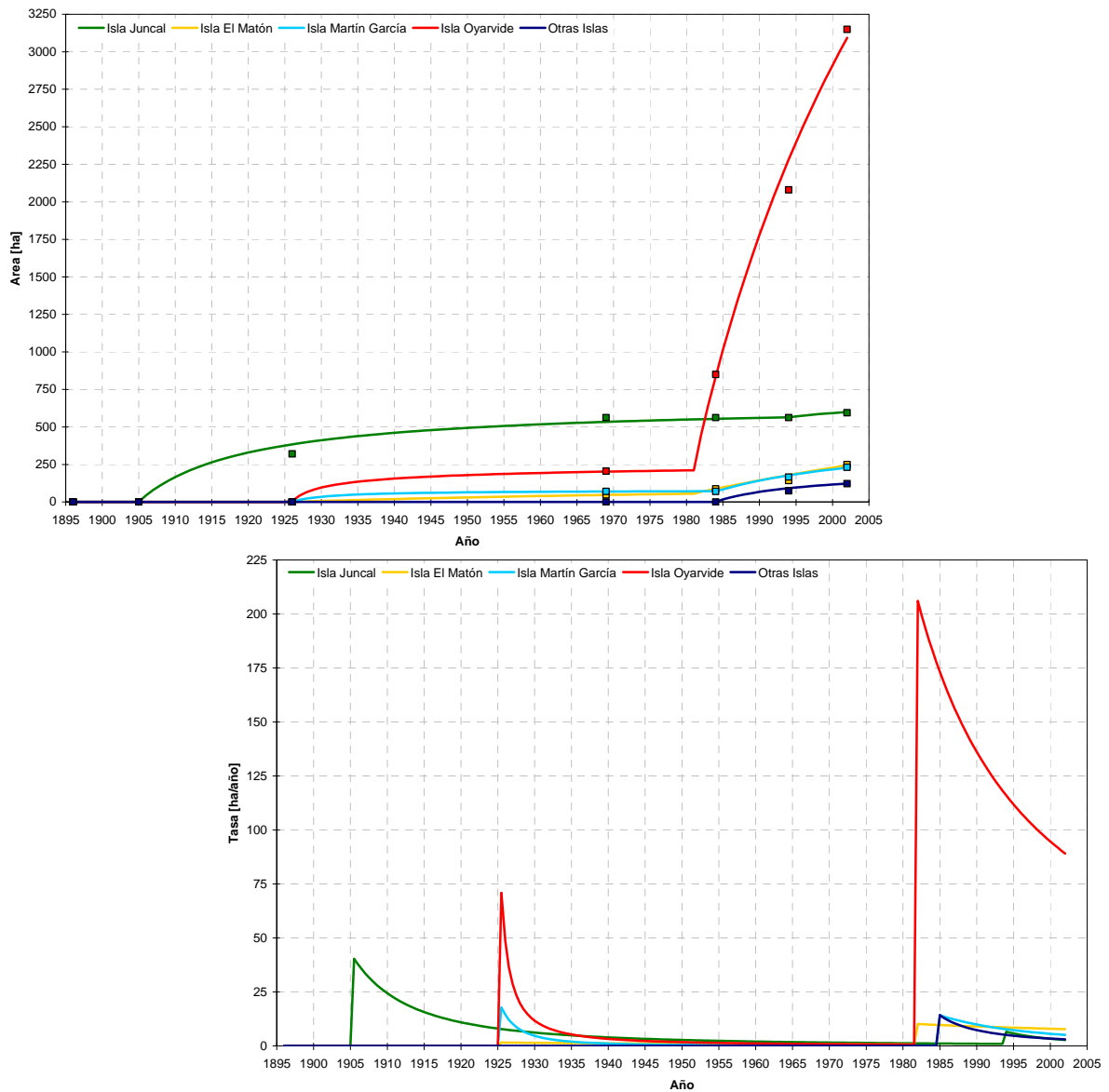


Figura 3.15: Curvas de incremento areal (arriba) y tasas de crecimiento (abajo) de las islas

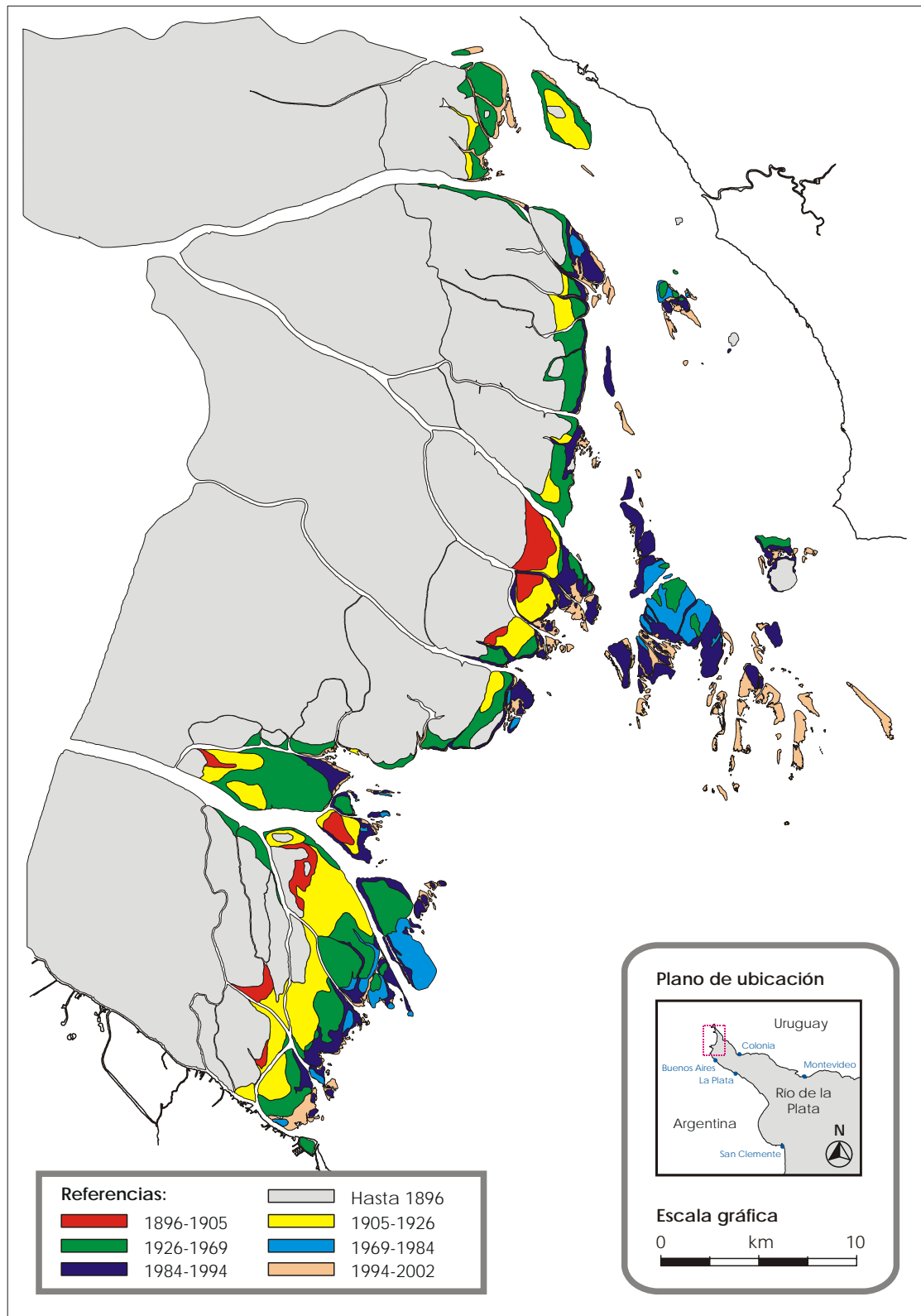


Figura 3.16: Incremento areal del Delta del Río Paraná



Dirección y Sentido de Avance del Frente

Analizando el crecimiento areal en las diferentes zonas del Frente del Delta, pueden distinguirse distintas direcciones en el avance del Frente.

El subfrente Norte del Paraná Guazú presenta un crecimiento reducido en sentido S, S-E causado por sus condicionantes cercanos, el río Sauce al Norte, la unión de éste con el río Uruguay y el Paraná Guazú al Sur. Actualmente esta zona está tendiendo a la estacionalidad en su superficie.

De la misma manera, la dirección de avance de la zona (a) del subfrente Sur del Paraná Guazú es en el sentido S, S-E, debido a la dirección del escurrimiento conjunto del Paraná Guazú y del Uruguay. Antiguamente el sentido de avance de esta zona era E, pero actualmente este avance es cada vez más pequeño, tendiendo a estacionarse por encontrar en su ambiente, condiciones desfavorables de depositación, debido al aumento de las velocidades locales causado por el estrechamiento de la sección entre las márgenes del Uruguay y la de este sector. De esta manera, la nueva dirección de avance predominante, S, S-E, tiende a favorecer la formación de islas y bancos en el sector, que en un futuro no muy lejano pasarán a formar parte del Frente.

La zona (b) del subfrente Sur del Paraná Guazú presenta en su totalidad un sentido predominante de avance S, S-E. En este aspecto, la zona esta tendiendo a agruparse con los bancos ubicados al sur de la isla Oyarvide y a seguir proyectando el límite superior del subfrente Norte del Paraná de las Palmas.

Este último, presenta una dirección de avance hacia la zona central del Frente, en dirección a las islas, con sentido E.

Por su parte, el subfrente Sur del Paraná de las Palmas presenta una dirección de avance paralela a la costa bonaerense, con sentido predominante E, S-E. Este crecimiento se desarrolla entre límites bien marcados, como ser, la costa bonaerense al Sur y las aguas del Paraná de las Palmas al Norte. Cabe mencionar que es el mismo Paraná de las Palmas el que provee de sedimentos a las zonas correspondientes a sus dos subfrentes.

Debido a las condiciones generadas por el efecto conjunto de los ríos Paraná Guazú y Uruguay, los sedimentos que no son depositados en el Frente son llevados aguas abajo del mismo, para depositarse en forma de bancos e islas. Es por esto que sobre el Frente del Delta puede observarse un notable incremento de áreas emergidas. Son de especial atención, las principales islas como Oyarvide, Martín García, Timoteo Domínguez, El Matón y Juncal, las cuales presentan comportamientos distintos respecto a su aumento superficial.

La isla Oyarvide es la que presenta un desarrollo distintivo frente a las demás por su gran crecimiento en los últimos años. Esta isla nació en el período 1926-1969 y a partir de ahí comenzó un notable incremento de su superficie en tres sentidos diferentes: N, S y S-E. El crecimiento en sentido N, se inició en el período 1969-1984 y se desarrolló principalmente durante 1984-1994, provocando así, la separación de los flujos de agua del Canal Buenos Aires del de los Pozos del Barca Grande. El crecimiento en sentido S, se dio primero en una unión con la isla Solís para luego desarrollarse en forma de herradura y avanzar hacia la zona de influencia del Paraná de las Palmas. Finalmente en sentido S-E se dio un crecimiento



ganando terreno al Río de la Plata y formando una especie de límite que alarga el embudo de salida de las corrientes del Guazú y Uruguay.

En el mismo aspecto, vale mencionar que en este último período de tiempo, muchas de las islas que se encontraban muy cercanas ya se han unido formando una sola como es el caso de la isla Martín García y Timoteo Domínguez.

El islote El Matón surgió en el mismo período que la isla Oyarvide y su gran desarrollo se da hacia el presente. Al igual que en la isla Oyarvide, el desarrollo de este islote se da en forma de herradura.

La isla Juncal desarrolló su superficie principalmente hacia el año 1969, estancándose su crecimiento hacia el presente. Es de resaltar que esta isla provoca la separación del flujo conjunto de los ríos Uruguay y Sauce, causando el frenado del avance del subfrente Norte del Paraná Guazú. De esta manera, todos los sedimentos que deberían depositarse en esa zona son llevados aguas abajo a la zona de bancos e islas.



Capítulo 4

RELACIÓN ENTRE EL AVANCE DEL FRENTE Y EL APORTE SÓLIDO

4.1 METODOLOGÍA

Para vincular el avance del Frente con el aporte continuo de sedimentos se implementó un modelo hidrodinámico y sedimentológico que simula el mecanismo de avance del Delta. El mismo fue desarrollado con el objetivo de representar las tendencias de avance del Frente del Delta a gran escala durante todo el siglo XX.

El modelo está constituido por un módulo hidrodinámico, basado en el software *HIDROBID II* (*modelo mecánico*), y un módulo sedimentológico para determinar la depositación de sedimentos sobre el Frente del Delta (*modelo conceptual*).

El modelo trabaja dinámicamente con los dos módulos, es decir que a partir de los datos de entrada requeridos se procesan primero con el módulo hidrodinámico y luego con el módulo sedimentológico. De esta forma se obtienen, en cada paso de cálculo, los datos de salida del modelo (figura 4.1).

Considerando que los datos de entrada están asociados a un tiempo t_e , los resultados obtenidos en cada paso de cálculo se corresponderán a un tiempo $t_s = t_e + \Delta t$.

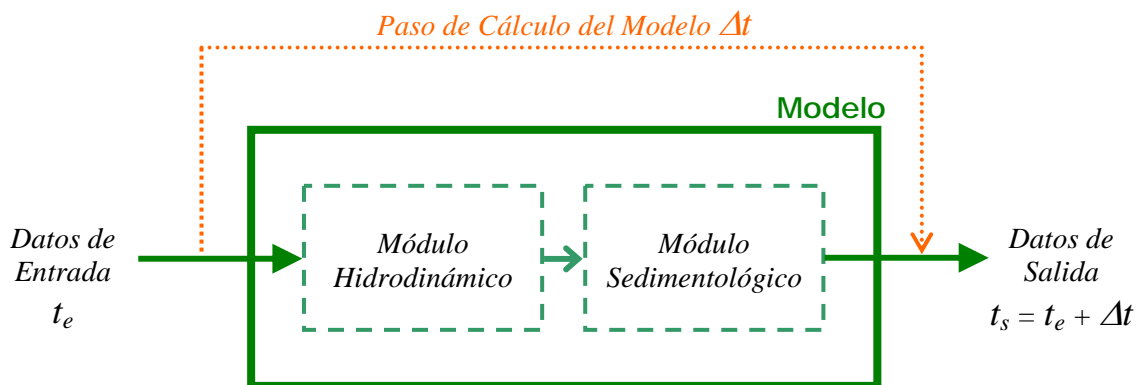


Figura 4.1: Modelo implementado



Los principales datos de entrada y salida del modelo se muestran en la figura 4.2.

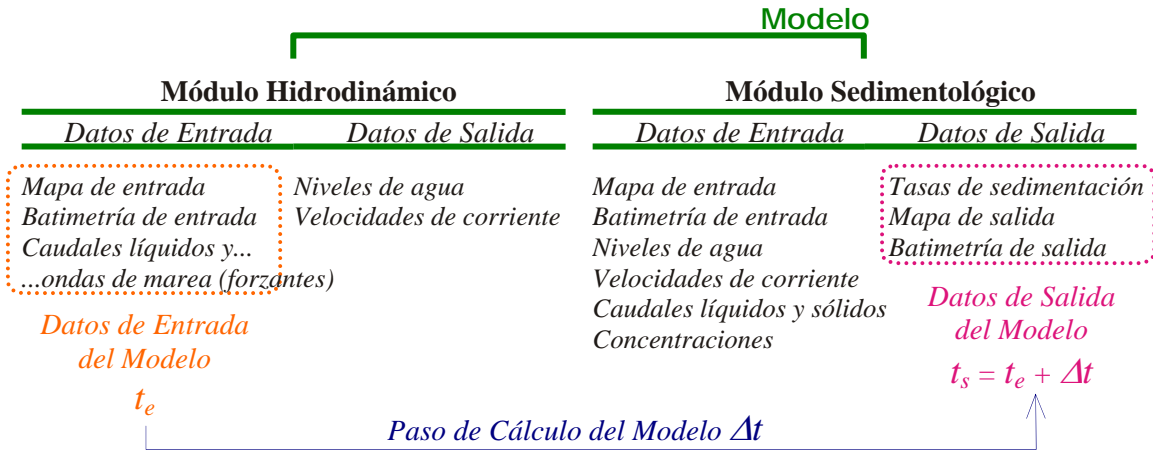


Figura 4.2: Datos de entrada y salida del modelo

El funcionamiento del modelo se puede explicar de la siguiente manera: supóngase que se quiera simular el avance del Delta desde un tiempo inicial t_i hasta un tiempo final t_f . A partir de las condiciones iniciales, se definen los datos de entrada correspondientes al inicio de la simulación, es decir, para un tiempo $t_e = t_i$. Dichos datos son procesados con el módulo hidrodinámico, obteniendo así los niveles de agua y las velocidades de corriente resultantes (respuestas del sistema a los forzantes ingresados). Dichos resultados se obtienen para un período de tiempo correspondiente a un ciclo de marea completo (12 horas) y para una marea media normal. El paso temporal con el que se corre el módulo hidrodinámico es de 30 segundos (ver sección 4.1.1.1.4).

El mapa y la batimetría de entrada, más los resultados obtenidos con el módulo hidrodinámico (niveles de agua y velocidades de corriente), son procesados luego con el módulo sedimentológico. Aquí se obtienen las tasas de sedimentación promedio correspondientes al período de 12 horas anterior (un ciclo de marea completo). Posteriormente, en función del caudal sólido y del paso temporal del modelo Δt , que es mucho más grande que el paso temporal del módulo hidrodinámico ($\Delta t = 5$ años, ver sección 4.1.2.1.4), se obtiene el volumen de sedimento disponible para ese período de tiempo. Este volumen de sedimentos se va distribuyendo en las distintas celdas, tomando como criterio de repartición las tasas de sedimentación calculadas, de modo que las celdas con mayor tasa de sedimentación sean las primeras en colmatarse. Todas las celdas que se llegan a colmatar en el período de tiempo Δt , representan en definitiva, el nuevo frente generado. A partir de ello, se actualizan el mapa y la batimetría de entrada, obteniéndose, de esta manera, el mapa y la batimetría de salida, que corresponden a un tiempo $t_s = t_e + \Delta t$.

Luego, el mapa y la batimetría de salida son utilizados, en un nuevo paso de cálculo, como datos de entrada del módulo hidrodinámico. De esta forma, repitiendo el tratamiento anterior, se genera un ciclo continuo de cálculo que finaliza cuando el tiempo correspondiente a los datos de salida sea igual al tiempo final de simulación ($t_s = t_f$).



El esquema de funcionamiento del modelo puede observarse en la siguiente figura:

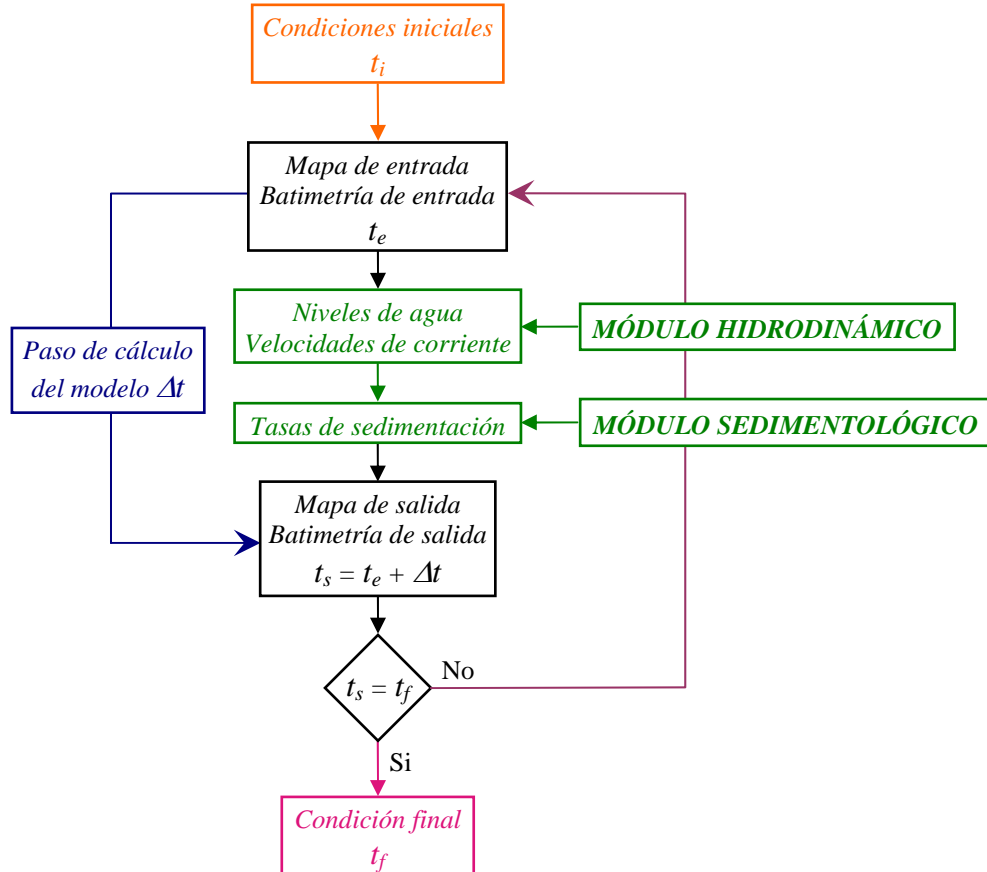


Figura 4.3: Esquema de funcionamiento del modelo implementado

4.1.1 Modelo Hidrodinámico

4.1.1.1 Implementación

4.1.1.1.1 Modelo Matemático

El software *HIDROBID II* (Menéndez 1985, Menéndez 1990) es el utilizado para la implementación del módulo hidrodinámico. Este software simula numéricamente flujos cuasi-bidimensionales (en el plano horizontal) a superficie libre. Está basado en la resolución numérica de las ecuaciones para aguas poco profundas (shallow water equations).

El modelo teórico considera como fuerzas motrices a la gravedad, a la aceleración de Coriolis (fuerza de inercia debida a la rotación de la Tierra) y a las tensiones superficiales debidas a la acción del viento. Por otro lado, tiene en cuenta la resistencia al movimiento proveniente de la generación de turbulencia en el fondo (históricamente denominada “fricción”) (Ré & Menéndez 2003).



Supone que la forma del fondo es arbitraria, pero sin variación en el tiempo (fondo fijo) y sin cambios bruscos. Sin embargo, es capaz de asimilar cambios bruscos de profundidad a través de tratamientos especiales (Menéndez 1987). Considera que la pendiente del fondo es pequeña (Ré & Menéndez 2003).

La hipótesis de flujo cuasi-bidimensional significa que el movimiento es esencialmente bidireccional y la velocidad es prácticamente uniforme a lo largo de la dirección vertical y que, en consecuencia, la aceleración vertical es despreciable frente a la de la gravedad, resultando entonces una distribución hidrostática de presiones (Ré & Menéndez 2003).

Las ecuaciones para aguas poco profundas provienen del filtrado sobre el ensamble estadístico de las ecuaciones de Navier-Stokes (ecuaciones de Reynolds), seguido de la integración vertical y de la aplicación de las hipótesis simplificadoras del modelo teórico, resultando (Abbott 1979):

$$\begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x}(hu) + v \frac{\partial}{\partial y}(hv) &= 0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - f_g v + g \frac{\partial(h+z_0)}{\partial x} + \frac{\tau_{fx}}{\rho h} - \frac{\tau_{sx}}{\rho h} - \frac{1}{\rho h} \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xx}) - \frac{1}{\rho h} \frac{\partial}{\partial y}(hT_{xy}) &= 0 \quad (4.1) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + f_g u + g \frac{\partial(h+z_0)}{\partial y} + \frac{\tau_{fy}}{\rho h} - \frac{\tau_{sy}}{\rho h} - \frac{1}{\rho h} \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xy}) - \frac{1}{\rho h} \frac{\partial}{\partial y}(hT_{yy}) &= 0 \end{aligned}$$

donde x e y son las coordenadas espaciales, u y v las velocidades medias verticales en esas direcciones, respectivamente, f_g el factor geotrófico, τ_{sx} y τ_{sy} las componentes de la tensión de corte sobre la superficie del agua debida al viento, τ_{fx} y τ_{fy} las componentes de la tensión de corte sobre el fondo y T el tensor de las tensiones efectivas (Ré & Menéndez 2003).

El esquema numérico de resolución de estas ecuaciones utilizado en el software *HIDROBID II* se basa en el método de las diferencias finitas. La malla de discretización es del tipo alternada (las dos componentes de la velocidad y el nivel de agua están todos centrados en nodos diferentes) y el método es del tipo implícito de direcciones alternadas (Menéndez 1990, Ré & Menéndez 2003).

El software *HIDROBID II* ya ha sido implementado en algunos de los modelos desarrollados en el Laboratorio de Hidráulica del Instituto Nacional del Agua, en particular los modelos *RP2000* (Modelo Hidrodinámico del Río de la Plata) y *RPP-2D* (Modelo Hidrodinámico del Río de la Plata y su Frente Marítimo) (Jaime & Menéndez 1999, Ré & Menéndez 2003).

4.1.1.1.2 Dominio de Cálculo

El modelo se enmarca dentro de la zona correspondiente al Río de la Plata Superior. El dominio considerado está definido por el área comprendida entre los paralelos 33,9°S al Norte y 34,8°S al Sur, y los meridianos 58,6°W al Oeste y 57,8°W al Este. En coordenadas Gauss-Krüger los límites del dominio resultan ser 6.248.499,8 m al Norte, 6.143.949,8 m al Sur,



6.353.178,7 m al Oeste y 6.422.878,7 m al Este. El mismo puede observarse en la siguiente figura:



Figura 4.4: Dominio de cálculo del modelo

Para la aplicación del sistema computacional *HIDROBID II* fue necesario discretizar el dominio espacial de cálculo. Para ello se definió una grilla de cálculo compuesta por nodos equiespaciados en cada dirección, en donde se especifican los datos y se evalúan los resultados del modelo.

El sistema de coordenadas de la grilla quedó orientado según las direcciones cardinales (dirección X en el sentido Este-Oeste y dirección Y en el sentido Norte-Sur). El paso de discretización adoptado fue de 205 m en la dirección X (Δx) y de 255 m en la dirección Y



(Δy). De este modo, la malla de cálculo resultó ser de 340×410 nodos (340 nodos en la dirección X y 410 nodos en la dirección Y).

Los nodos donde se realizan los cálculos, los cuales definen la región de cálculo del modelo, son aquellos que caen sobre el Río de la Plata. De esta manera, dado que el Frente del Delta (definido en el mapa de entrada) se modifica en cada paso de cálculo, variarán los nodos que caen sobre el Río de la Plata. Es decir que, mientras que el dominio se mantiene constante durante toda la simulación, la región de cálculo varía en cada paso temporal del modelo. En la siguiente figura se muestra la región de cálculo para el año 1900:

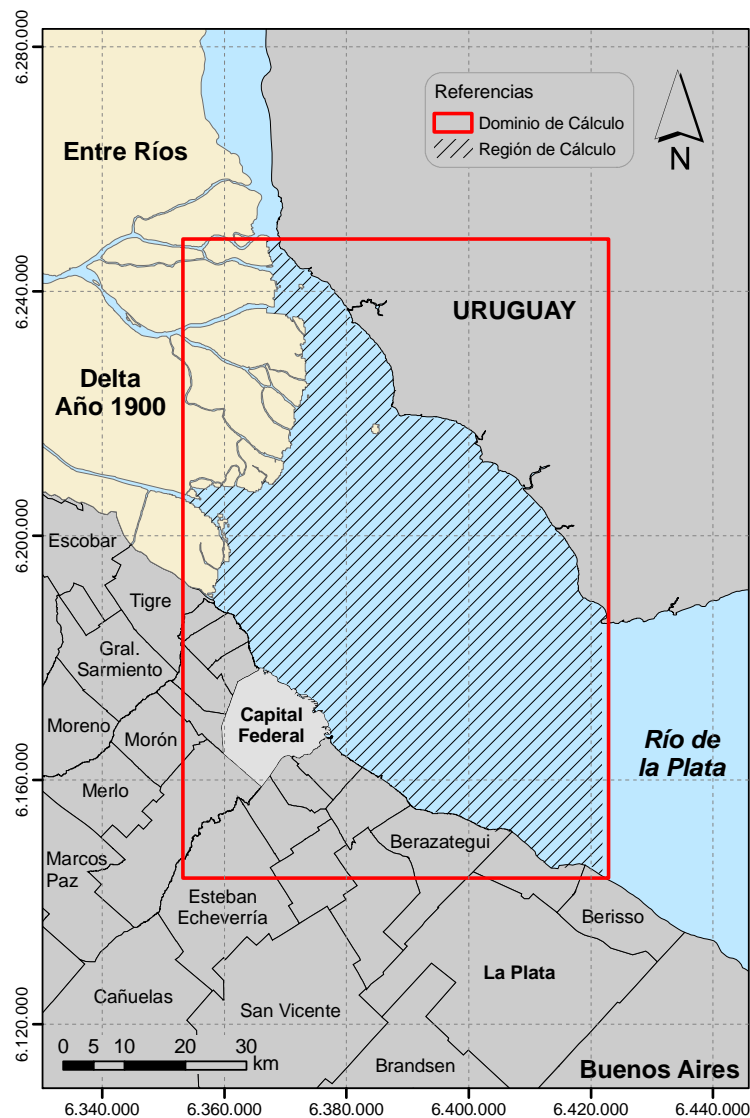


Figura 4.5: Región de cálculo para el año 1900
(región de cálculo inicial)



La batimetría de la zona de interés se obtuvo a partir de la digitalización de las líneas de nivel de la carta náutica “H118 - Río de la Plata Superior” confeccionada por el Servicio de Hidrografía Naval (SHN), la cual se encuentra referida al sistema de coordenadas ortogonales Gauss-Krüger.

Ahora bien, los datos batimétricos corresponden a la situación presente, incluyendo la posición actual del Frente. Para generar la batimetría correspondiente a las condiciones iniciales de la simulación, que corresponden al año 1900, se realizó lo siguiente: en relación a la figura 4.6, a la zona comprendida entre el Frente del año 1900 y el fin de la Zona B (ubicado a aproximadamente el doble de la distancia desde aquel frente al actual, es decir, el espesor de la zona A), se le asignaron los valores actuales de profundidad de la zona B “estirados” en direcciones normales al Frente (es decir, se efectuó una transformación lineal desde la zona B a la zona A+B). Sobre todo el resto del Río de la Plata se mantuvo la batimetría actual (carta del SHN). El Frente cartográfico del año 1896 se tomó como representativo del Frente para el año 1900.

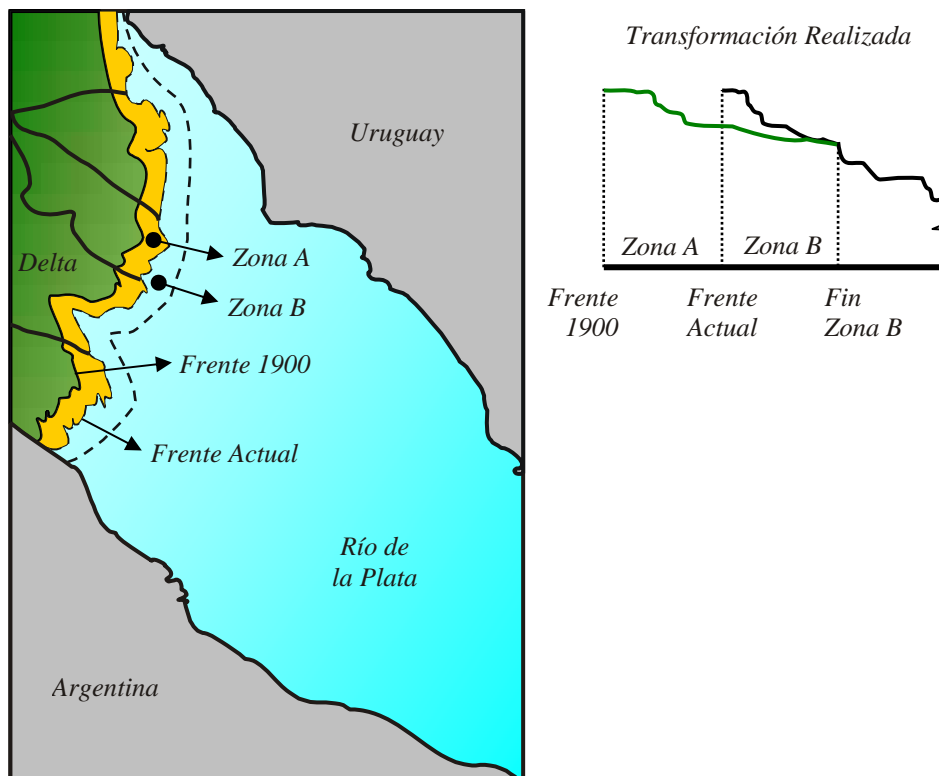


Figura 4.6: Tratamiento de la batimetría para generar los datos correspondientes al año 1900 a partir de los actuales

A partir de estos datos batimétricos, se asignaron valores de profundidad a cada uno de los nodos de la malla mediante un proceso de interpolación con la técnica de kriging (método geoestadístico), construyéndose así el modelo digital del terreno (MDT), el cual fue levemente ajustado a posteriori, durante la calibración del modelo (ver sección 4.1.2.2). El



MDT resultante se muestra en la figura 4.7. Las profundidades están dadas en metros con respecto al plano de reducción (límite inferior de la media de todas las bajamares).

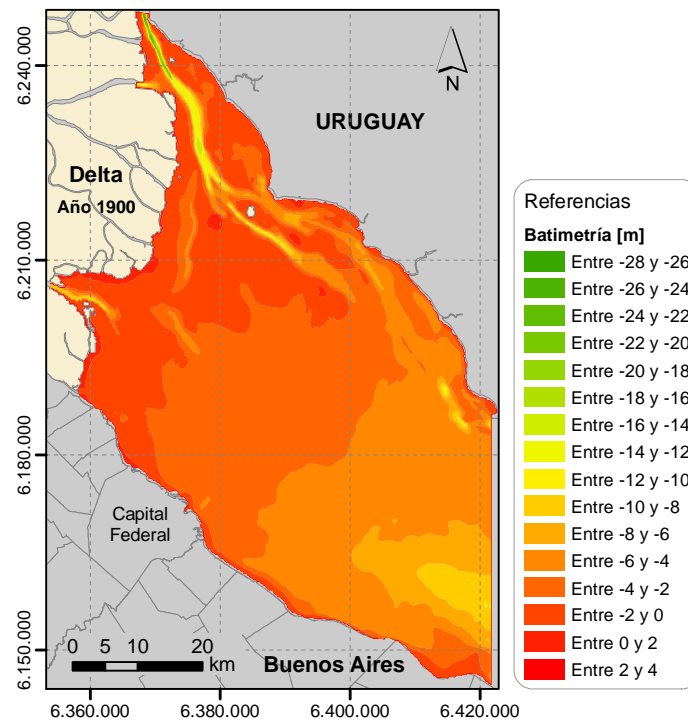


Figura 4.7: Modelo digital del terreno para el año 1900 (batimetría inicial)

4.1.1.1.3 Forzantes

Los forzantes determinantes de la hidrodinámica del sistema, a la escala de análisis, son los caudales líquidos de los tributarios que desembocan sobre el Frente del Delta y la onda de marea que se propaga aguas arriba a lo largo del Río de la Plata (figura 4.8). Ambos forzantes fueron representados como solicitaciones representativas de condiciones medias anuales.

Los forzantes de caudal corresponden al río Uruguay y a los siguientes brazos del Río Paraná: Paraná Bravo, Paraná Guazú, Barca Grande, Paraná Miní y Paraná de las Palmas. Los caudales líquidos adoptados corresponden a valores medios anuales: 5200 m³/s para el río Uruguay y 18.000 m³/s para el Río Paraná. Este último se distribuyó entre los distintos brazos de la siguiente manera: 37% Paraná Bravo, 23% Paraná Guazú, 4.5% Barca Grande, 2.5% Paraná Miní y 33% Paraná de las Palmas (Bombardelli et al. 1995). Los caudales resultantes se detallan en la tabla 4.1.



Figura 4.8: Forzantes del modelo hidrodinámico

Río	Caudal [m ³ /s]
Uruguay	5200
Paraná Bravo	6660
Paraná Guazú	4140
Barca Grande	810
Paraná Miní	450
Paraná de las Palmas	5940

Tabla 4.1: Caudales medios anuales de los ríos considerados

La onda de marea se especificó en la línea imaginaria La Plata-Colonia (borde Este del dominio). Se consideró como representativa una onda sinusoidal con amplitudes compatibles con la marea astronómica media en ambos extremos, dato obtenido de la tabla de mareas del SHN. Se construyó, entonces, la serie temporal de niveles en ambos extremos del borde del



modelo (figura 4.9), y se interpoló linealmente para completar los datos a lo largo de todo el borde.

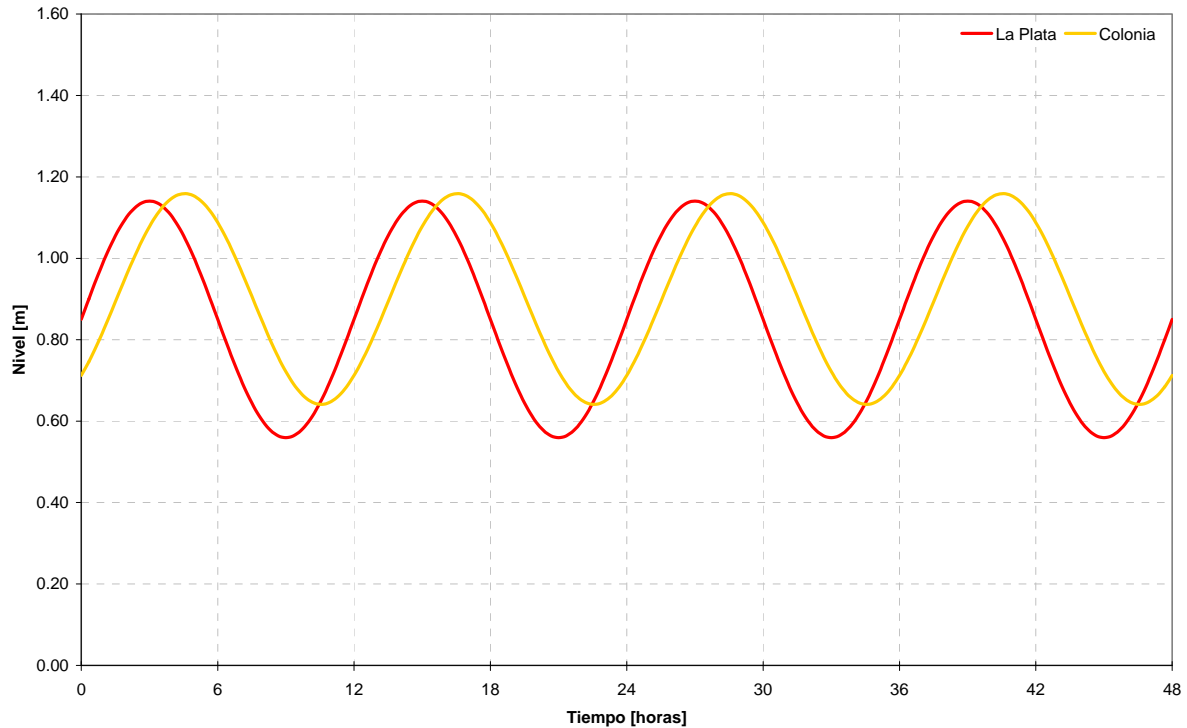


Figura 4.9: Ondas de marea en La Plata y Colonia

Con estos forzantes se corre el modelo hidrodinámico para un ciclo completo de mareas, es decir, 12 horas (en la práctica, las corridas se efectúan para un período de tiempo de 48 horas, descartándose las primeras 36 horas de modo de asegurar la entrada en régimen del sistema, es decir, la independencia de las condiciones iniciales). Se obtienen, así, la distribución de niveles de agua y de las dos componentes de la velocidad de corriente (figura 4.10) sobre todo el dominio para un ciclo completo de mareas, que constituyen forzantes del módulo sedimentológico.

4.1.1.1.4 Paso Temporal

Como el software *HIDROBID II* está basado en un esquema implícito de diferencias finitas, no impone limitaciones numéricas al valor del paso temporal de cálculo para evitar problemas de estabilidad numérica. La limitación proviene, entonces, exclusivamente de requerimientos de precisión.

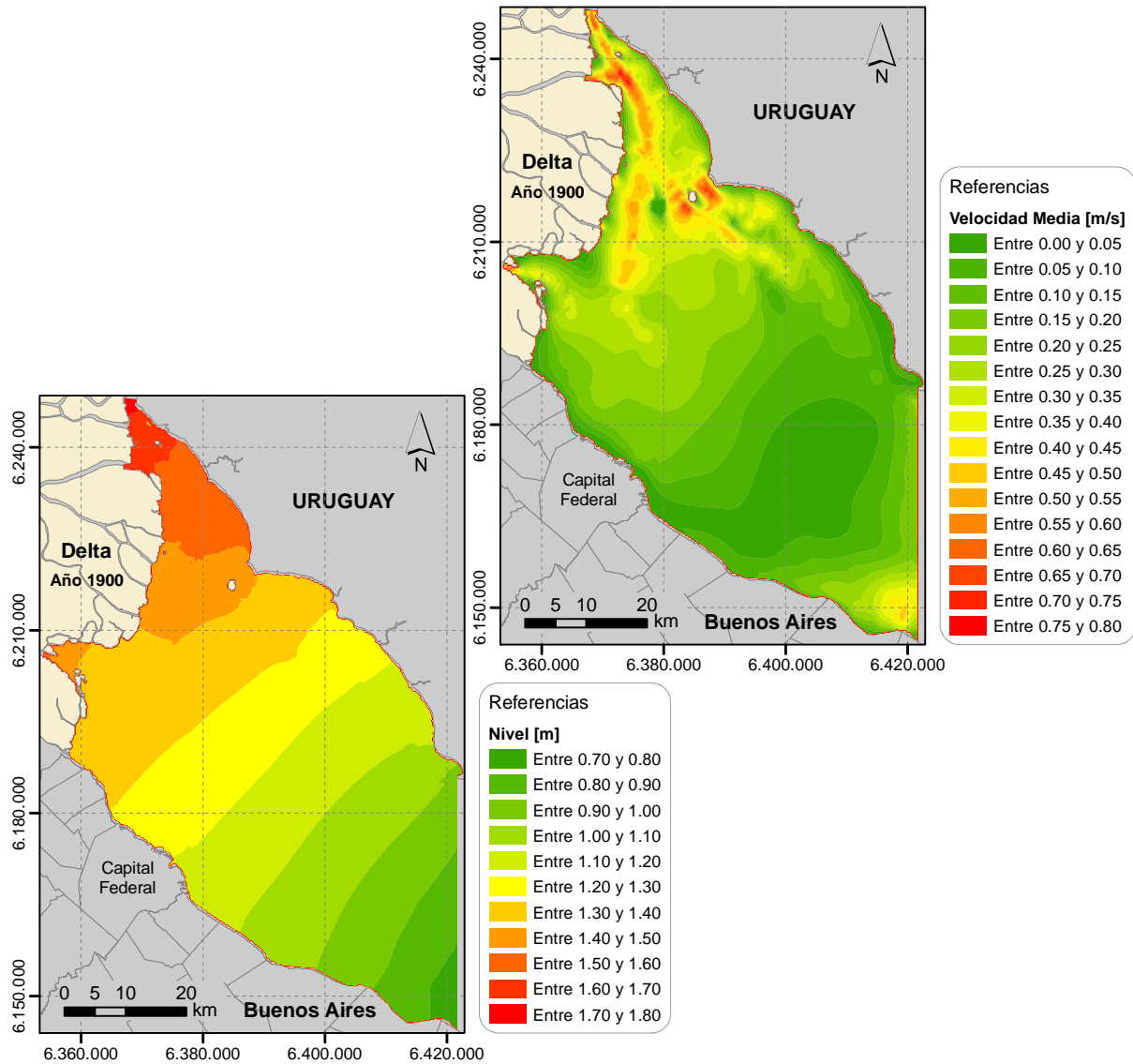


Figura 4.10: Resultados que se obtienen con el módulo hidrodinámico: Niveles de agua (izq.) y Velocidades de corriente (der.)

Específicamente, es necesario que el paso temporal sea del orden del tiempo que tarda la onda de marea en recorrer una celda. Es decir:

$$\Delta t \sim \frac{\Delta x}{c} \tag{4.2}$$

donde Δt es el paso temporal de cálculo, Δx el paso espacial en la dirección X y c la celeridad de la onda de marea.



La celeridad con la que se propaga la onda de marea para el caso de aguas poco profundas viene dada por la siguiente expresión:

$$c = \sqrt{g \cdot h} \quad (4.3)$$

donde g es la aceleración de la gravedad y h la profundidad media.

Teniendo en cuenta que la profundidad media del río en la zona de modelación es de 5 m, surge una celeridad de Lagrange c de 7 m/s. Entonces, el paso de tiempo debe ser del orden de 29 segundos. Se adoptó un paso temporal de 30 segundos.

4.1.1.2 Validación

La validación del módulo hidrodinámico se realizó a partir de dos series de mediciones de corriente que se detallan a continuación:

- **Rosa de corrientes en Estación Punta Memoria:** Mediciones de corriente realizadas por el INA (ex INCyTH) entre el 24/10/87 y el 26/10/87. Ubicación del correntógrafo: 34°42'49.83" de latitud Sur y 58°01'54.64" de longitud Oeste (Berazategui).
- **Rosa de corrientes en Estación La Plata:** Mediciones de corriente realizadas por el Servicio de Hidrografía Naval durante 20 días, entre el 5 y el 25 de junio de 1985. Ubicación del correntógrafo (en coordenadas Gauss-Krugër): X = 6.420.928 m e Y = 6.150.918 m (La Plata).

Dicha información puede verse representada en las figuras 4.11, 4.12 y 4.13.

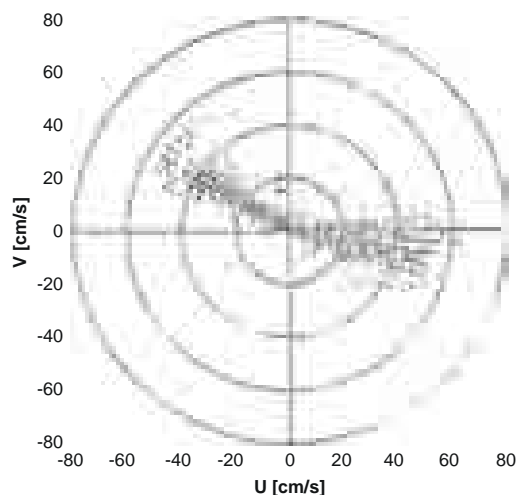


Figura 4.11: Velocidades de corriente medidas en la estación La Plata

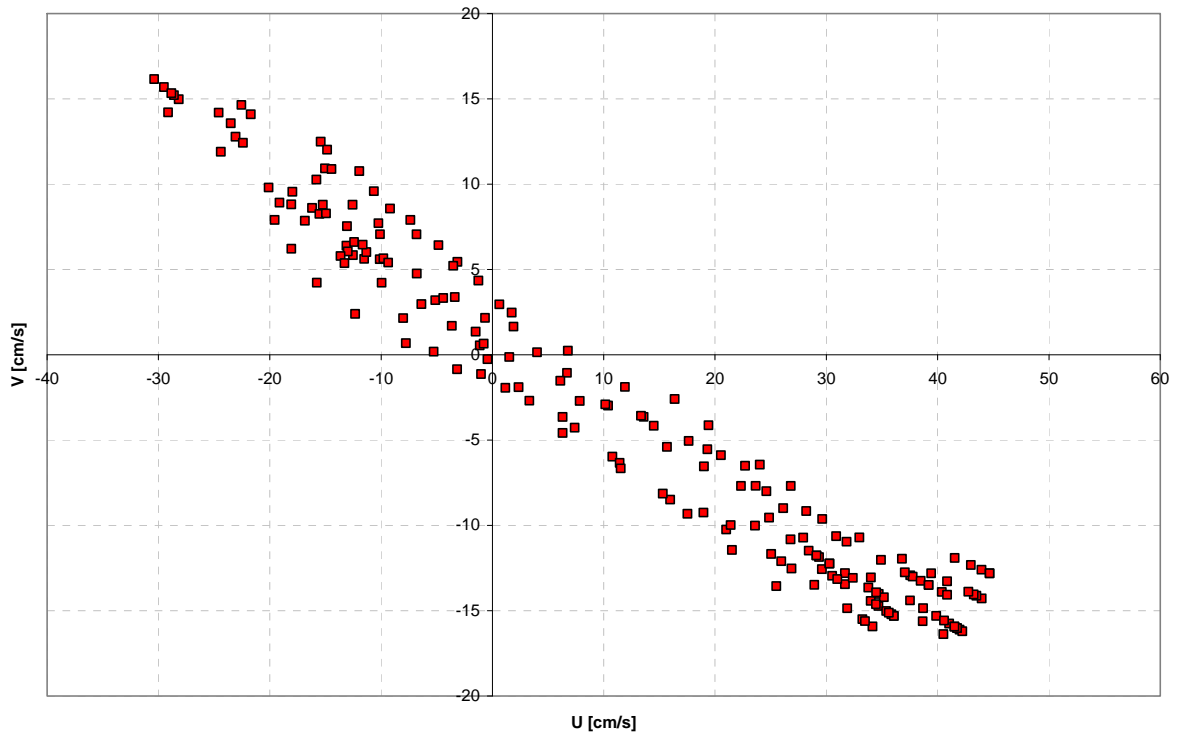


Figura 4.12: Velocidades de corriente medidas en la estación Punta Memoria



Figura 4.13: Ubicación de las estaciones Punta Memoria y La Plata



La comparación entre las velocidades de corriente obtenidas con el modelo y las provistas por las series de mediciones se exhibe en la figura 4.14. El grado de acuerdo se considera satisfactorio para Punta Memoria, tanto en magnitud como en dirección. En La Plata se representa bien la magnitud; la desviación observada entre las direcciones es producto de que la estación se encuentra demasiado cerca del borde del modelo, donde se impone el forzante. En consecuencia, el modelo hidrodinámico se considera validado.

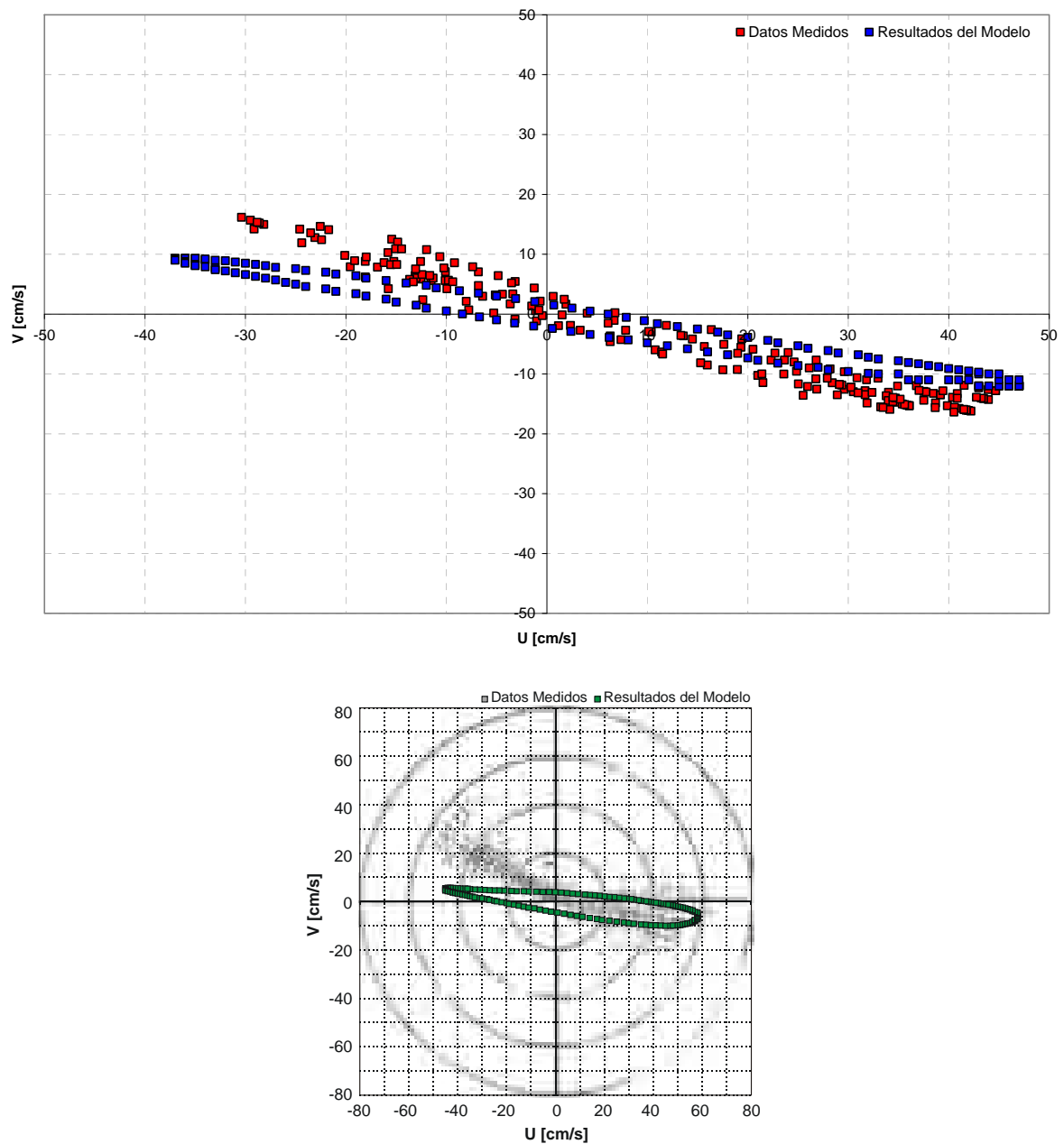


Figura 4.14: Comparación entre las velocidades de corriente medidas y las obtenidas con el modelo (estación Punta Memoria arriba y La Plata abajo)



4.1.2 Modelo Sedimentológico

4.1.2.1 Implementación

4.1.2.1.1 Modelo de Cálculo

Antes de explicar el modelo de cálculo implementado se desarrollarán algunos conceptos de hidráulica fluvial utilizados en el mismo.

Tensión de Corte: Tensiones de Corte Críticas de Erosión y Deposición

Si consideramos el tramo de un canal como el de la figura 4.15, la fuerza que ejerce el agua sobre el cauce del canal (fuerza activa F_A) previo a la iniciación del movimiento, genera como reacción una fuerza de sentido contrario, que no es más que la resistencia al escurrimiento debido a la “rugosidad” del cauce (que depende de la resistencia superficial, denominada “de grano” y la resistencia “por formas” constituida por las eventuales formas de fondo). La tensión de corte τ es la fuerza aplicada por el agua, F_A , por la unidad de superficie del cauce, la cual se equilibra con la resistencia de ese mismo cauce.

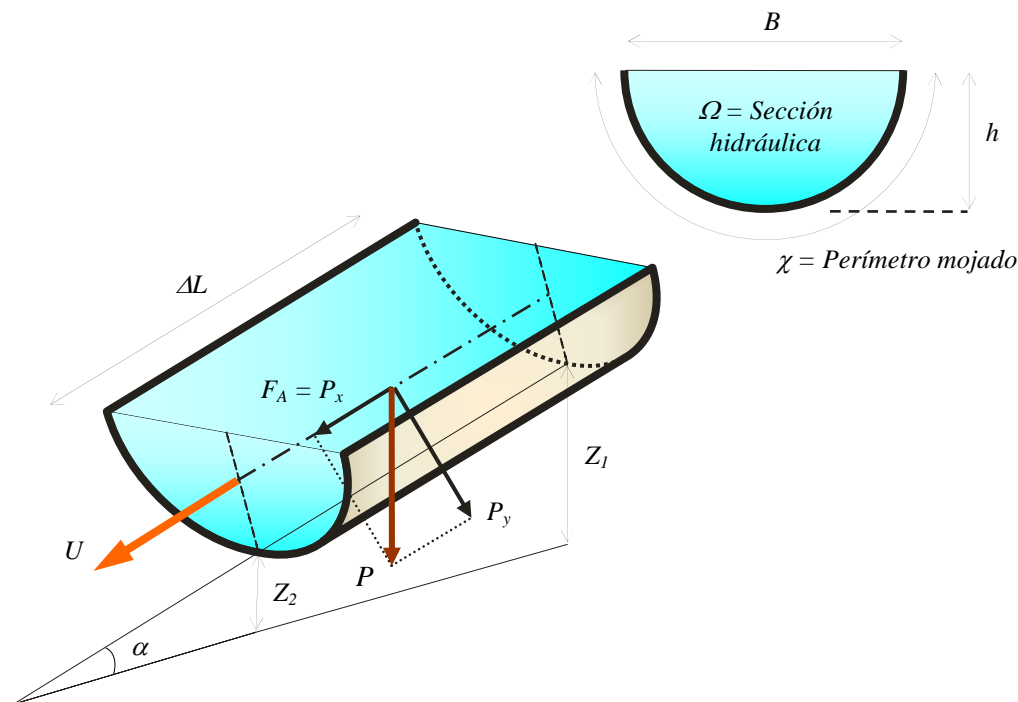


Figura 4.15: Tramo longitudinal (izq.) y sección transversal (der.) del canal considerado



De esta forma la fuerza resistiva F_R queda expresada de la siguiente manera:

$$F_R = \Delta L \cdot \chi \cdot \tau \quad (4.4)$$

donde ΔL es la longitud del tramo del canal analizado, χ el perímetro mojado de la sección transversal del canal y τ la tensión de corte.

La tensión de corte τ representa también la fuerza por unidad de superficie que ejerce el agua sobre el cauce del canal, razón por la cual recibe también la denominación de *tensión de corte del escurrimiento*.

El científico alemán Albert Brahms (1754) determinó que la tensión de corte puede expresarse de forma proporcional a la velocidad media del escurrimiento al cuadrado, es decir:

$$\tau = k \cdot U^2 \quad (4.5)$$

donde k es un coeficiente dimensional y U la velocidad media del escurrimiento.

Alternativamente, la relación anterior puede expresarse de la siguiente manera (Chézy 1769):

$$\tau = \frac{\gamma_w}{C^2} \cdot U^2 \quad (4.6)$$

donde γ_w es el peso específico del agua y C el coeficiente de Chézy.

Una expresión para determinar el coeficiente de Chézy fue dada por el ingeniero irlandés Robert Manning en 1891:

$$C = \frac{1}{n} \cdot R^{\frac{1}{6}} \quad (4.7)$$

donde R es el radio hidráulico y n un coeficiente que depende de la rugosidad del cauce.

Vale mencionar que en la expresión (4.7), R puede aproximarse al tirante h siempre y cuando el ancho del canal B sea mucho mayor que h .

De acuerdo con los razonamientos anteriores, el movimiento del agua genera, entonces, una tensión de deslizamiento sobre el cauce del canal que se denomina tensión de corte del escurrimiento. Mientras que las partículas que forman el cauce no sean removidas del contorno, su superficie opondrá una resistencia de igual magnitud y sentido contrario a τ .



Sin embargo, puede darse el caso que τ alcance un valor crítico por arriba del cual supere la resistencia dada por las partículas del cauce, momento a partir del cual las mismas se pondrán en movimiento. La tensión de corte correspondiente al valor de inicio del movimiento de las partículas es denominada *tensión de corte crítica de erosión* τ_e . Es decir que para valores de τ menores o iguales a τ_e el material del cauce se mantendrá inmóvil. En cambio, para valores de τ mayores a τ_e el material que conforma el cauce se pondrá en movimiento; desplazamiento que podrá ser por deslizamiento, rodamiento o saltación. Si el valor de τ es lo suficientemente grande, parte del material del cauce podrá transportarse en suspensión.

A continuación se presentan algunas expresiones originadas en la hidráulica de sedimentos cohesivos, que serán aplicadas para material no cohesivo.

Considérese un conjunto de partículas sumergidas en agua en reposo. En ese caso, la tasa de sedimentación de las partículas puede expresarse de la siguiente manera:

$$T_s = w_s \cdot C \quad (4.8)$$

donde w_s es la velocidad de caída para el diámetro medio de las partículas y C la concentración de sedimentos.

La tasa de sedimentación T_s representa la cantidad de sedimentos que se depositan en la unidad de tiempo sobre una región de área unitaria.

La generalización de la expresión anterior para el caso de agua en movimiento y partículas finas se logra considerando una función de probabilidad de deposición ψ , de forma que la expresión (4.8) resulta (Krone 1962):

$$T_s = w_s \cdot C \cdot \psi\left(\frac{\tau}{\tau_d}\right) \quad (4.9)$$

con

$$\psi\left(\frac{\tau}{\tau_d}\right) = \begin{cases} 0 & \text{si } \tau \geq \tau_d \\ 1 - \frac{\tau}{\tau_d} & \text{si } \tau < \tau_d \end{cases} \quad (4.10)$$

donde τ es la tensión de corte del escurrimiento y τ_d la tensión de corte crítica de deposición.

La *tensión de corte crítica de deposición* τ_d es el valor de tensión de corte por debajo del cual se produce depositación. Es decir que sólo para valores de τ menores a τ_d habrá depositación de sedimentos. Por el contrario, para valores de τ mayores o iguales a τ_d no habrá depositación.



Recordando la definición de la velocidad de corte:

$$U_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho_w}} \quad (4.11)$$

donde $\rho_w = \gamma_w/g$ es la densidad del agua (masa específica), entonces, las expresiones (4.9) y (4.10) pueden escribirse también de la siguiente manera:

$$T_s = w_s \cdot C \cdot \psi \left(\frac{U_*^2}{U_{*d}^2} \right) \quad (4.12)$$

con

$$\psi \left(\frac{U_*^2}{U_{*d}^2} \right) = \begin{cases} 0 & \text{si } U_* \geq U_{*d} \\ 1 - \frac{U_*^2}{U_{*d}^2} & \text{si } U_* < U_{*d} \end{cases} \quad (4.13)$$

siendo, U_{*d} la velocidad de corte crítica de deposición, cuya expresión es:

$$U_{*d} = \sqrt{\frac{\tau_d}{\rho_w}} \quad (4.14)$$

Los efectos erosivos pueden ser considerados en las expresiones (4.9) y (4.10) de una manera similar, incorporando en las mismas una función de probabilidad de erosión ϕ que depende de la relación entre τ y τ_c (Partheniades 1962).

Planteo del Modelo

El avance del Frente del Delta debe su origen a la deposición de sedimentos transportados por el Río Paraná. Entonces, el mecanismo principal de ese avance está regido por efectos de sedimentación, los cuales prevalecen por sobre los de erosión. A los efectos prácticos se considera, entonces, que, mientras los primeros son los que determinan la forma general y dimensión de ese avance, los efectos erosivos (en los cuales puede jugar un rol importante el oleaje, generado por la acción del viento) se manifiestan, a lo sumo, a una escala menor, condicionando sólo el detalle morfológico.

En función de lo dicho anteriormente, y dado que el modelo fue desarrollado con el objetivo de representar sólo las tendencias de la forma de avance del Frente, los efectos de erosión no fueron tenidos explícitamente en cuenta.



De acuerdo al balance sólido expuesto en la sección 2.3, la cantidad de arenas transportadas por el Río Paraná al llegar al Delta es de 25 millones de toneladas anuales, de las cuales 10 millones se transportan en suspensión. En la figura 4.16, se muestran las curvas envolventes de la distribución granulométrica de sedimento suspendido del Río Bermejo. Suponiendo, por simplicidad, que la envolvente inferior representa la curva granulométrica del Río Paraná (Menéndez 2001), la fracción gruesa de la carga en suspensión estaría compuesta por arenas finas.

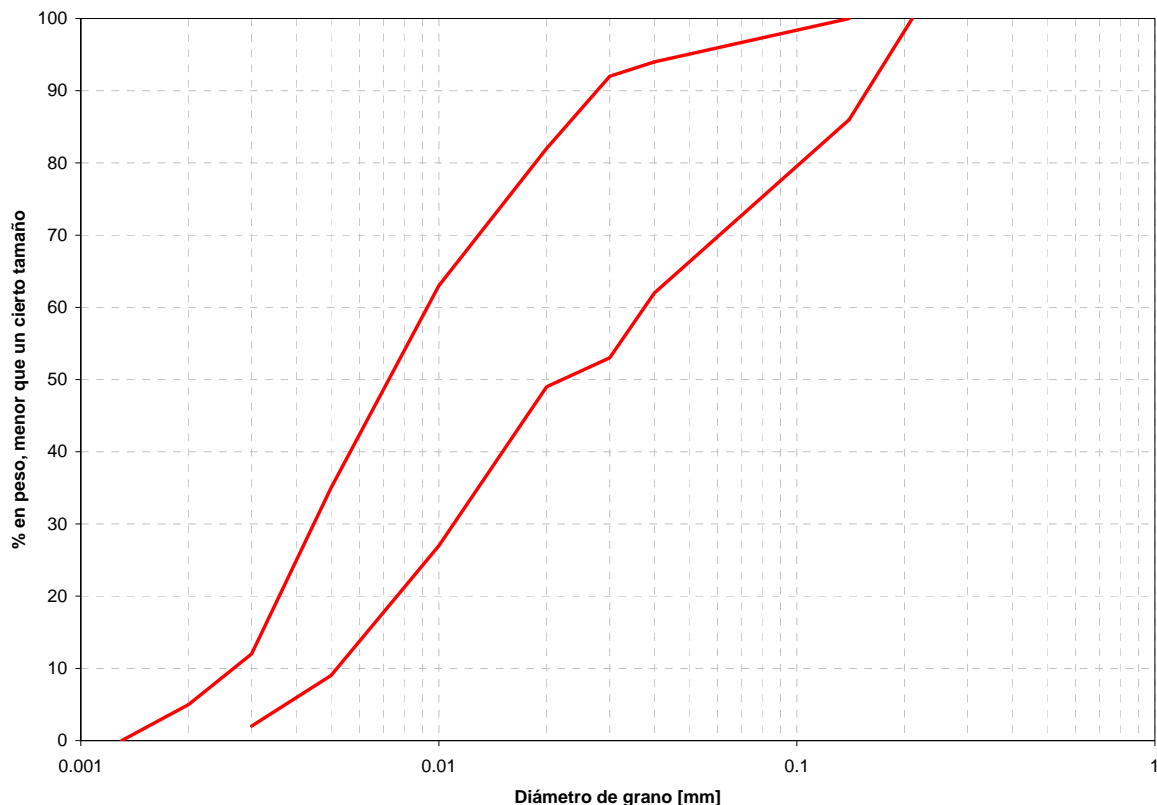


Figura 4.16: Envolventes de la distribución granulométrica de sedimento suspendido del Río Bermejo (Menéndez 2001)

De esta forma, si el total de arenas finas se transportara en suspensión, los sedimentos acarreados por el Río Paraná al llegar al Delta, clasificados según la forma de transporte, resultarían ser los expuestos en la figura 4.17.

Como bien se dijo en el Capítulo 2, cuando el Río Paraná llega a su desembocadura sobre el Río de la Plata, la brusca expansión del ancho produce una drástica reducción de la capacidad del flujo a transportar sedimento en suspensión. En términos generales, las corrientes del Río de la Plata no tienen capacidad de arrastre suficiente para el transporte de arenas. Esto implica que las arenas que egresan del Delta se depositan en su totalidad en su frente.



Respecto a los limos y arcillas, sólo para el período de inundaciones una parte se deposita sobre las islas del Delta. Entonces, estos últimos influyen principalmente en el crecimiento en cota de las islas, y no así en el avance del Delta (crecimiento en longitud). Por esta razón, no se consideraron limos ni arcillas en el mecanismo de avance del Frente.

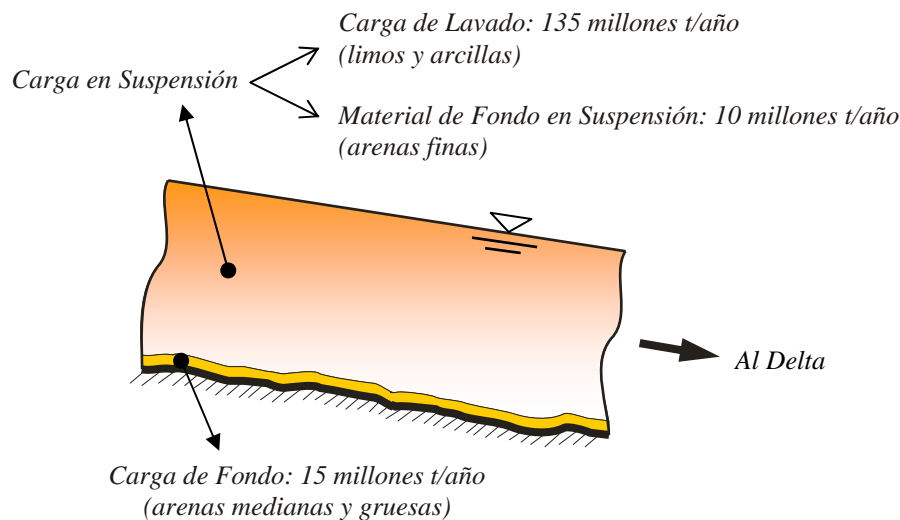


Figura 4.17: Sedimentos transportados por el Río Paraná al llegar al Delta clasificados según la forma de transporte

Asumiendo, entonces, que el avance del Frente se debe principalmente a la deposición de arenas, se consideró luego que las más pesadas (arenas medianas y gruesas) se van depositando sobre toda el área ya existente del Delta, mientras que las arenas finas son las que efectivamente generan el afloramiento del nuevo Frente.

Esto último se ve reflejado en el perfil estratigráfico de la figura 4.18, construido a partir de las perforaciones de distintos estudios geotécnicos realizados en la zona del Delta (Rinaldi et al. 2006). En dicha figura se observa que el manto superior, de unos 5 m de profundidad, está compuesto por arenas y fangos aluvionales.

Por otro lado, en las perforaciones de suelo mostradas en las figuras 4.20 y 4.21, cuyas ubicaciones en planta se muestran en la figura 4.19, se observa, a partir de los 1-2 m de profundidad, un manto de limos arcillosos y arenas finas, que va aumentando de espesor a medida que se acerca al Frente del Delta (Amato & Silva Busso 2007). Allí se los identifica como limos arcillosos y arenas finas de planicie costera mareal, ya que siendo de origen fluvial, ese es el mecanismo de deposición.

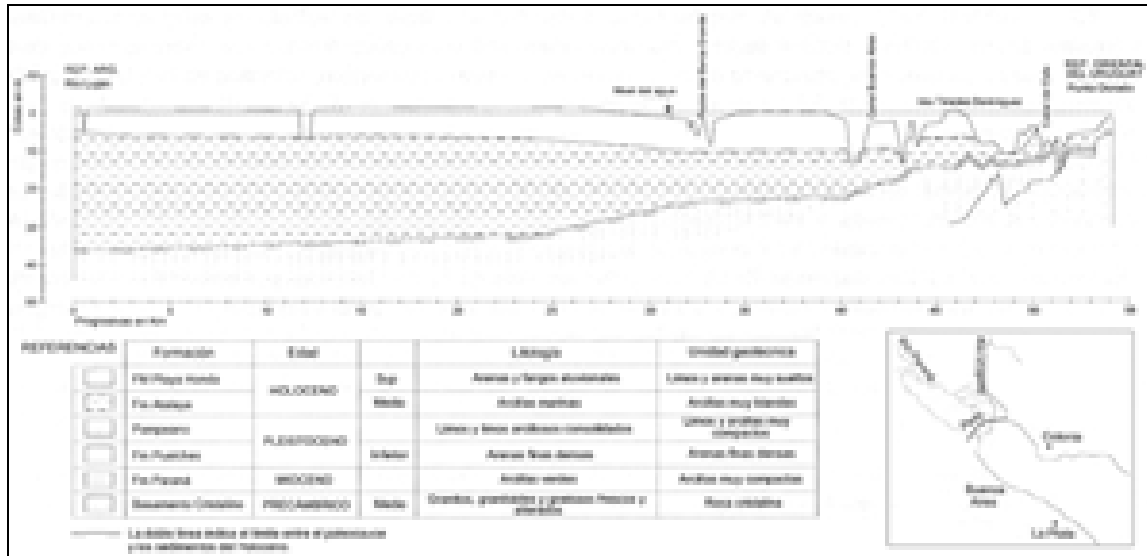


Figura 4.18: Perfil estratigráfico sobre el Delta del Río Paraná (Rinaldi et al. 2006)

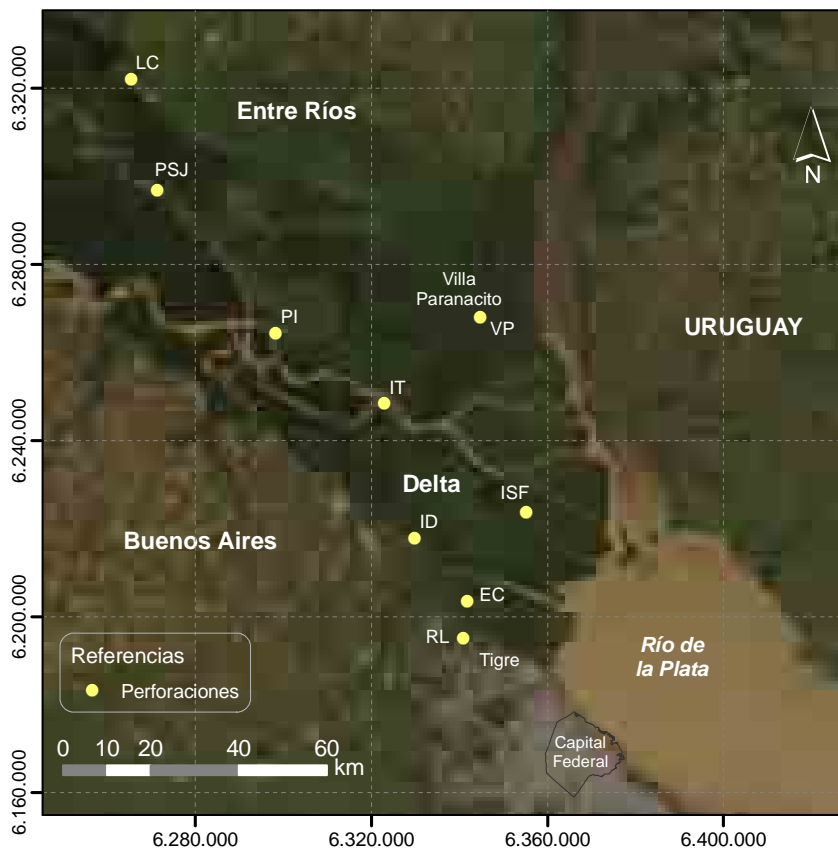


Figura 4.19: Ubicación en planta de las perforaciones mostradas en las figuras 4.20 y 4.21 (Amato & Silva Busso 2007)

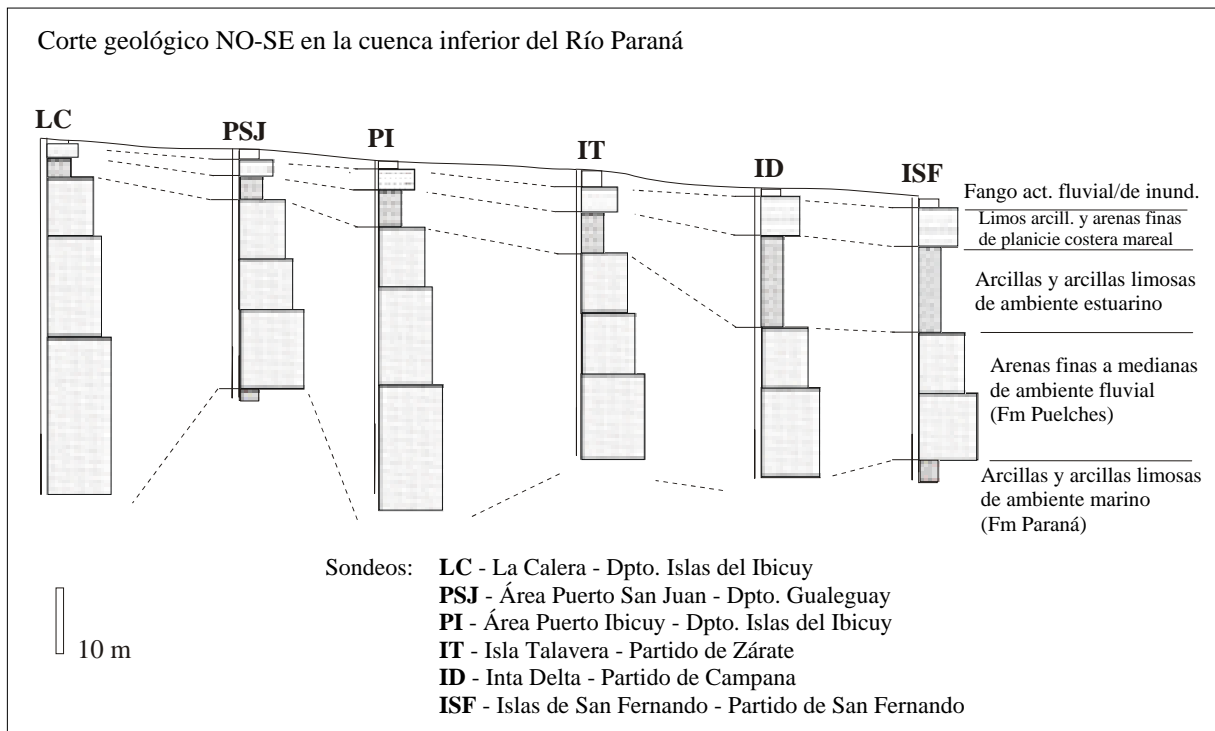


Figura 4.20: Perfil estratigráfico longitudinal (dirección NO-SE) del Delta del Río Paraná (Amato & Silva Busso 2007)

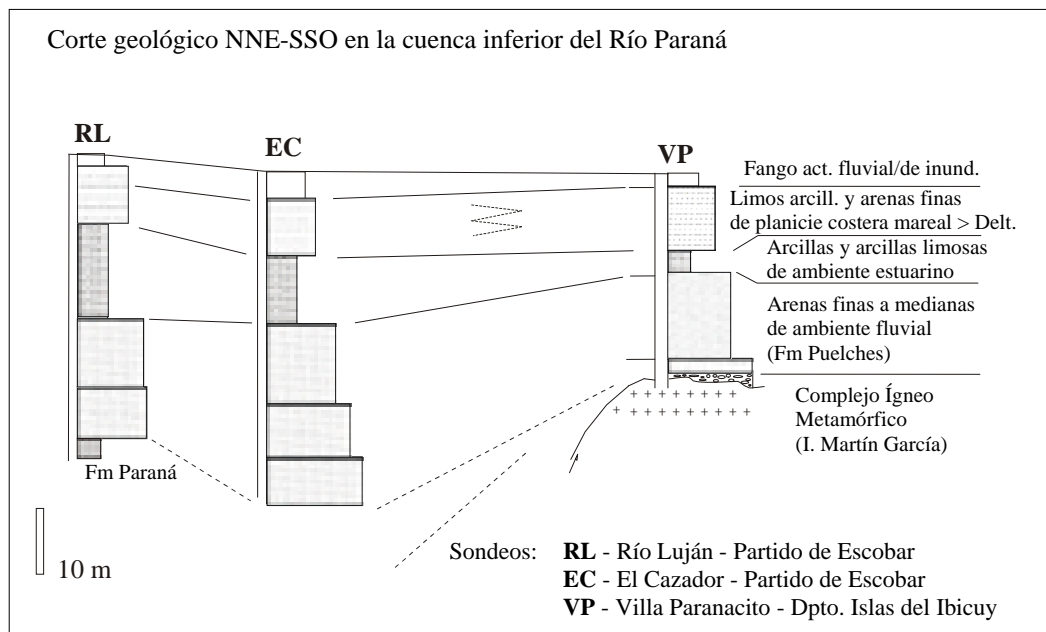


Figura 4.21: Perfil estratigráfico transversal (dirección NNE-SSO) del Delta del Río Paraná (Amato & Silva Busso 2007)



En definitiva, se consideró que todo el material depositado se reparte en la región de acuerdo a la siguiente figura:



Figura 4.22: Distribución del material depositado en la región del Delta

El modelo de cálculo implementado se basa en la determinación de las tasas de sedimentación de acuerdo a la expresión (4.9), extrapolada para representar la deposición de arenas finas. Dicha expresión se repite a continuación:

$$T_s = w_s \cdot C \cdot \psi \left(\frac{\tau}{\tau_d} \right) \quad (4.15)$$

Obviamente, para aplicar (4.15), además de la probabilidad de deposición, que puede calcularse a partir de los resultados del modelo hidrodinámico, es necesario especificar la velocidad de caída y la concentración de sedimentos sobre toda la zona de deposición (ver sección 4.1.2.1.3).

En primer lugar, se fija el paso de tiempo de evolución morfológica (ver sección 4.1.2.1.4). Con el caudal sólido aportado por los tributarios se obtiene entonces el volumen de sedimento disponible para la sedimentación (V_{total}) que corresponde a arenas finas. El mismo queda definido por la siguiente expresión:

$$V_{total} = \frac{Q_{sólido} \cdot \Delta t}{\gamma_s \cdot (1 - p)} \quad (4.16)$$

donde $Q_{sólido}$ es el caudal sólido aportado por el tributario, Δt el paso de tiempo del modelo, γ_s el peso específico del sedimento (2650 kg/m^3) y p la porosidad (40 %). Este volumen se va distribuyendo entre las celdas adyacentes al Frente. El criterio de distribución utilizado



consiste en asignar volumen de sedimentos sucesivamente a celdas de acuerdo al ranking de tasa de sedimentación promedio (sobre el ciclo de marea completo), hasta completar el total del volumen disponible (figura 4.23).

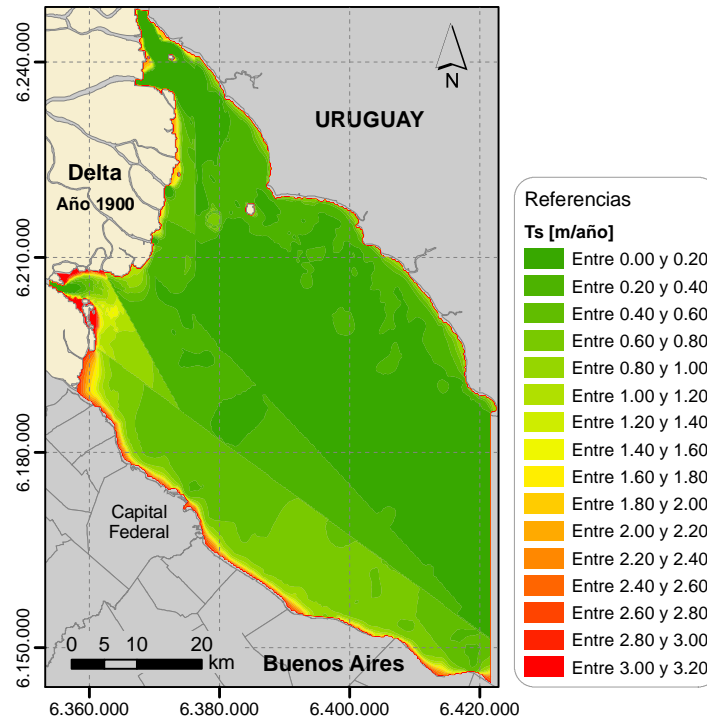


Figura 4.23: Tasas de sedimentación promedio obtenidas con el módulo sedimentológico

El volumen depositado en cada celda está definido por el producto entre el área de la misma y la altura de la columna de sólidos depositados, es decir:

$$V_{dep} = A \cdot H_{dep} \quad (4.17)$$

donde H_{dep} es la altura de depositación y $A = \Delta x \cdot \Delta y$ el área de una celda, siendo Δx y Δy los pasos espaciales de cálculo en las direcciones X e Y respectivamente.

La altura máxima de depositación en cada celda ($H_{m\acute{a}x}$) fue adoptada como el tirante de agua promedio a lo largo del ciclo de 12 horas (un ciclo de marea completo), obtenido en los cálculos del módulo hidrodinámico.

Cuando la altura de depositación en una celda es igual a $H_{m\acute{a}x}$ se considera que la misma está llena ó colmatada. De esta forma, las celdas con mayor T_s se van colmatando en la medida que haya material disponible. Cuando la sumatoria de los volúmenes de sedimentos depositados en todas las celdas sea igual al volumen total disponible, es decir:

$$\sum V_{dep} = V_{total} \quad (4.18)$$



el material sólido se habrá consumido, y, por lo tanto, no habrá más deposición en las celdas y los cálculos sedimentológicos para ese paso de tiempo habrán terminado.

Todas las celdas colmatadas representan, así, las zonas de crecimiento del Delta. A partir de las mismas se generan el mapa y la batimetría de salida, que son utilizados, posteriormente, en un nuevo paso de cálculo, como datos de entrada del módulo hidrodinámico.

4.1.2.1.2 Dominio de Cálculo y Área Sedimentable

El dominio y la grilla de cálculo son los mismos que se definieron para el módulo hidrodinámico.

Como se supuso que el material sólido no puede alcanzar las zonas costeras, se definió un área de deposición en las adyacencias del Frente que excluyera a las mismas. De esta manera, se circunscribió la sedimentación sólo a aquellas celdas ubicadas sobre el Frente del Delta y sus inmediaciones.

Esta zona de deposición, que se define en cada paso temporal del modelo, se denominó *área sedimentable*. Vale aclarar que la misma está incluida dentro de la región de cálculo del módulo hidrodinámico, es decir, el área sedimentable está determinada por algunos de los nodos que caen sobre el Río de la Plata (figura 4.24).

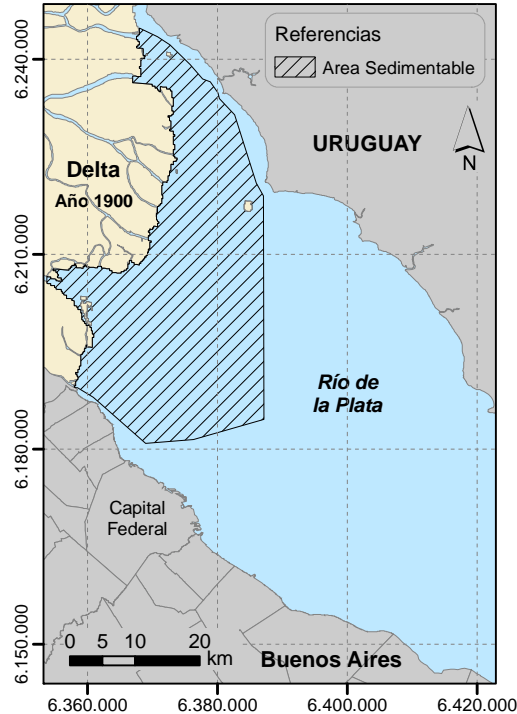


Figura 4.24: Área sedimentable para el año 1900



4.1.2.1.3 Forzantes

Los forzantes son los caudales sólidos aportados por los tributarios, que se traducen en concentraciones de sedimentos.

Como se dijo anteriormente, el material considerado en la generación del nuevo Frente son las arenas finas. Del total transportado, se tomó un 65% (6.500.000 t/año) como valor de referencia de la carga que llega al Frente al Delta. De todos modos, la carga de arenas finas efectivamente aportada a lo largo del tiempo se dedujo durante el proceso de calibración (ver sección 4.1.2.2).

Al igual que para el caudal líquido, la carga de arenas finas se repartió en los brazos del Paraná Guazú y Paraná de las Palmas. Al no contarse con información disponible sobre la distribución de esta carga sólida en ambos brazos, la misma fue utilizada como parámetro de calibración (ver sección 4.1.2.2).

El sedimento se caracterizó mediante la especificación de los siguientes parámetros: diámetro medio (d_{50}), velocidad de caída (w_s) y velocidad de corte crítica de deposición (U_{*d}). Se adoptó como diámetro medio representativo de arenas finas un valor de 150 μm (ver tabla 2.8), al cual le corresponde una velocidad de caída de 0,015 m/s. Como velocidad de corte crítica de deposición se utilizó la correspondiente a sedimento fino para el Río de la Plata cuyo valor es de 0,008 m/s (Harrison & Owen 1971, Menéndez & Castellano 2000).

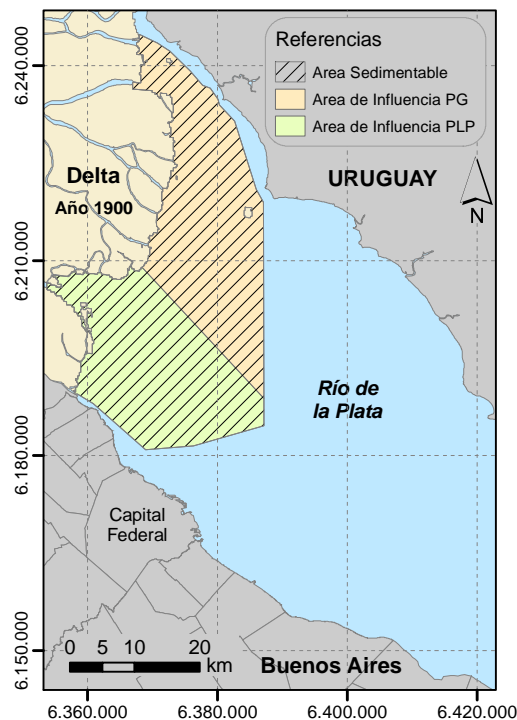


Figura 4.25: Áreas de influencia de los ríos Paraná Guazú y Paraná de las Palmas para el año 1900



El área sedimentable se dividió en dos regiones, denominadas *áreas de influencia*. Cada una de ellas se asoció a uno de los brazos considerados, de manera que el material sólido transportado por cada uno de ellos sólo pueda depositarse en su respectiva área de influencia (figura 4.25).

En cuanto a la concentración de arenas finas, se consideraron distintos valores a lo largo de todo el área sedimentable. Para ello se dividió a cada una de las áreas de influencia en tres regiones donde se discriminó el valor de la concentración. Dichas regiones ó *zonas de concentración* pueden observarse en la figura 4.26. Esto constituye una suerte de discretización de la distribución de concentraciones dentro del área sedimentable. El criterio con que se hizo esta distribución fue la de considerar que las mayores concentraciones se dan en las inmediaciones de las desembocaduras de los dos brazos considerados, disminuyendo a medida que se aleja de las mismos. A su vez, en función de la cartografía recopilada, se determinaron las zonas que presentaron menor actividad sedimentológica durante el último siglo (zona B PLP y aproximadamente hasta 1960 la zona C PG). En cuanto a los valores de concentración de cada zona, los mismos fueron utilizados como parámetros de calibración (ver sección 4.1.2.2).

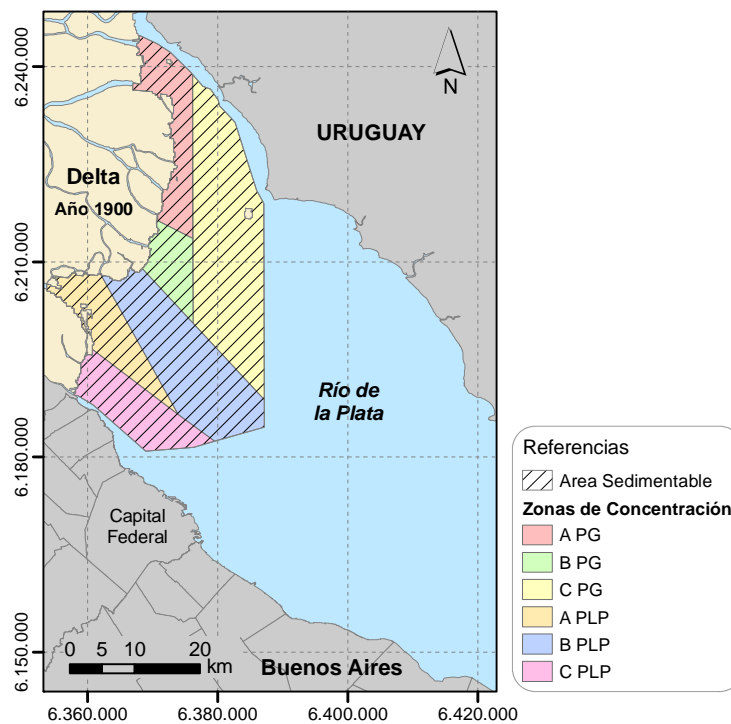


Figura 4.26: Zonas de concentración de los ríos Paraná Guazú y Paraná de las Palmas para el año 1900



4.1.2.1.4 Paso Temporal

El paso temporal del módulo sedimentológico, el cual define el paso de cálculo del modelo Δt , se adoptó en función de la escala de análisis espacial definida por las distancias de avance del Frente del Delta durante todo el siglo XX. Se adoptó un paso de cálculo de 5 años.

4.1.2.2 Calibración

La calibración del módulo sedimentológico se realizó mediante la comparación de los Frentes cartográficos con los obtenidos mediante la simulación. Los primeros corresponden a los años 1905, 1926, 1969, 1984, 1994 y 2002, mientras que los Frentes simulados se obtuvieron cada 5 años (de acuerdo al paso de cálculo adoptado) a partir del año 1900 y hasta el año 2005. En la figura 4.27 se muestran los Frentes cartográficos utilizados.

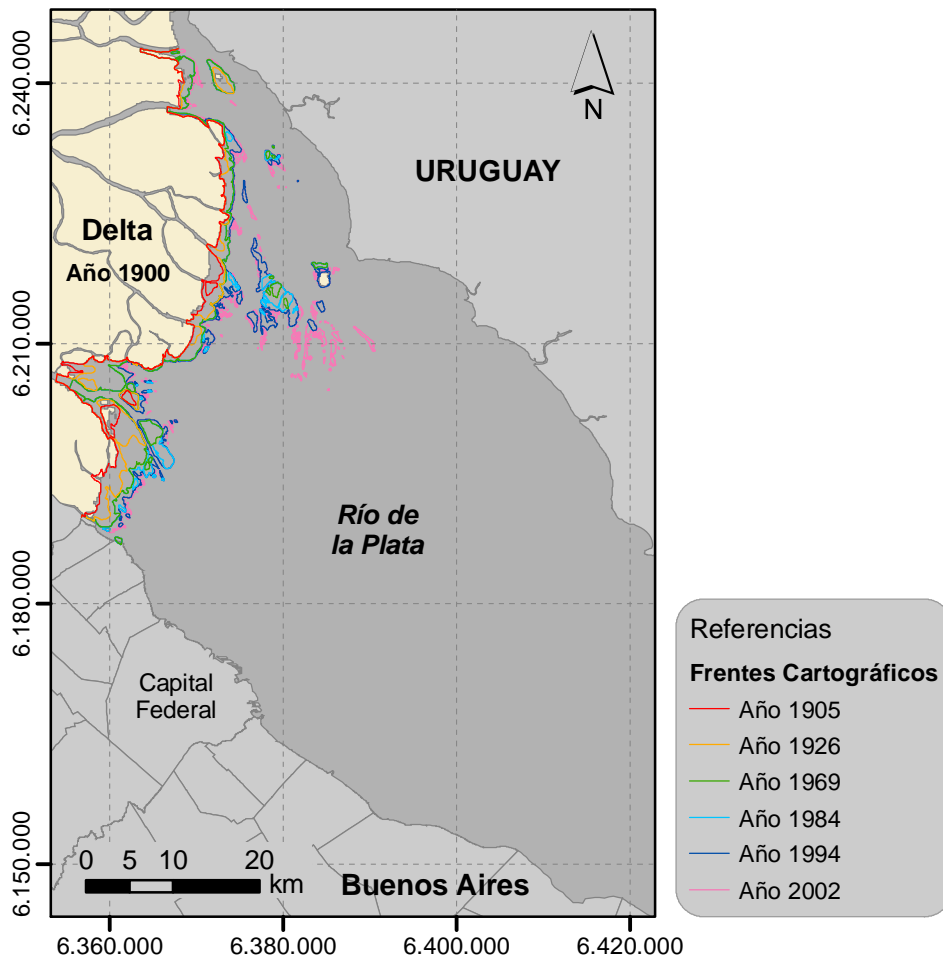


Figura 4.27: Frentes cartográficos utilizados en la calibración



Para calibrar el modelo se dispuso de los siguientes parámetros:

- Batimetría inicial (correspondiente al año 1900)
- Distribución del caudal sólido entre los ríos Paraná Guazú y Paraná de las Palmas
- Concentración de arenas finas (zonificada según la figura 4.26)

El ajuste de la batimetría inicial permite modificar la hidrodinámica del sistema, y, consecuentemente, la tensión de corte del escurrimiento. Esto implica la variación de las tasas de sedimentación, las cuales regulan la distribución de sedimentos en las zonas de deposición.

La distribución de caudales sólidos entre los ríos Paraná Guazú y Paraná de las Palmas define el volumen de arenas finas disponible para la sedimentación en las áreas de influencia respectivas (figura 4.25). De esta forma, se puede regular la velocidad de avance del Frente en dichas áreas.

Por su parte, variando la concentración de sedimentos, pueden controlarse las tasas de sedimentación en las distintas zonas de la figura 4.26, regulando así, la sedimentación en dichas zonas. Para las dos áreas de influencia se consideró un valor máximo de concentración definido por la siguiente expresión:

$$C_{m\acute{a}x} = \frac{Q_{s\acute{o}lido}}{Q_{l\acute{i}quido}} \quad (4.19)$$

donde $Q_{s\acute{o}lido}$ y $Q_{l\acute{i}quido}$ son, respectivamente, los caudales sólido y líquido del área de influencia considerada.

El proceso de calibración se realizó con un ajuste simultáneo y progresivo de los parámetros involucrados. Como resultado de la misma, se adoptó una distribución de caudales sólidos de 50% para los dos brazos considerados, el Paraná Guazú y el Paraná de las Palmas. Esta carga sólida equivalente, a pesar de las diferentes descargas líquidas, se justificaría por el hecho de que el Paraná en la bifurcación puede aún retener la “memoria” de que la carga sedimentaria fina ha sido aportada principalmente sobre margen derecha, desde el Río Paraguay (es decir, no se ha llegado todavía a una mezcla total en el sentido transversal). En la tabla 4.2 se muestran las concentraciones finales de arenas finas para las distintas zonas consideradas.

En cuanto a la batimetría inicial, se “embancaron” levemente las zonas adyacentes al Frente del área de influencia del Paraná de las Palmas y se demarcó el canal de salida de dicho río. También se embancó la zona correspondiente a la isla Oyarvide para representar, a partir de 1960, el afloramiento de dicha isla. Debido a la escala de trabajo considerada, no se tuvieron en cuenta los efectos del canal Emilio Mitre en torno a la isla Zárate. La batimetría resultante se muestra en la figura 4.7.



Concentración de arenas finas [mg/l]		
Zona	Área de influencia	
	Paraná Guazú $C_{m\acute{a}x} = 9 \text{ mg/l}$	Paraná de las Palmas $C_{m\acute{a}x} = 17 \text{ mg/l}$
A	9	17
B	6	5
C	4 ^(a) y 17 ^(b)	12

^(a) Hasta el año de simulación 1955

^(b) A partir del año de simulación 1960

Tabla 4.2: Concentraciones resultantes de la calibración

Durante todo el proceso de calibración se observó que las tasas de sedimentación consideradas en el cálculo sedimentológico, las cuales corresponden al promedio de un ciclo de marea completo, prácticamente coincidían con las tasas correspondientes a la situación de bajamar (figura 4.28). Por lo tanto, estas últimas podrían considerarse como representativas de todo el ciclo de marea. No obstante, todos los cálculos sedimentológicos se realizaron tomando las tasas de sedimentación promedio. †

† Para visualizar los datos de salida del modelo se construyó un Sistema de Información Geográfica, ó GIS (por sus siglas en inglés), de toda la zona de estudio. De esta manera, se logró facilitar la administración, el análisis y la presentación de todos los datos obtenidos. Las figuras que aquí se muestran fueron obtenidas del mencionado GIS. Para mayor detalle se recomienda dirigirse al Anexo 2: “GIS del Delta del Río Paraná”.

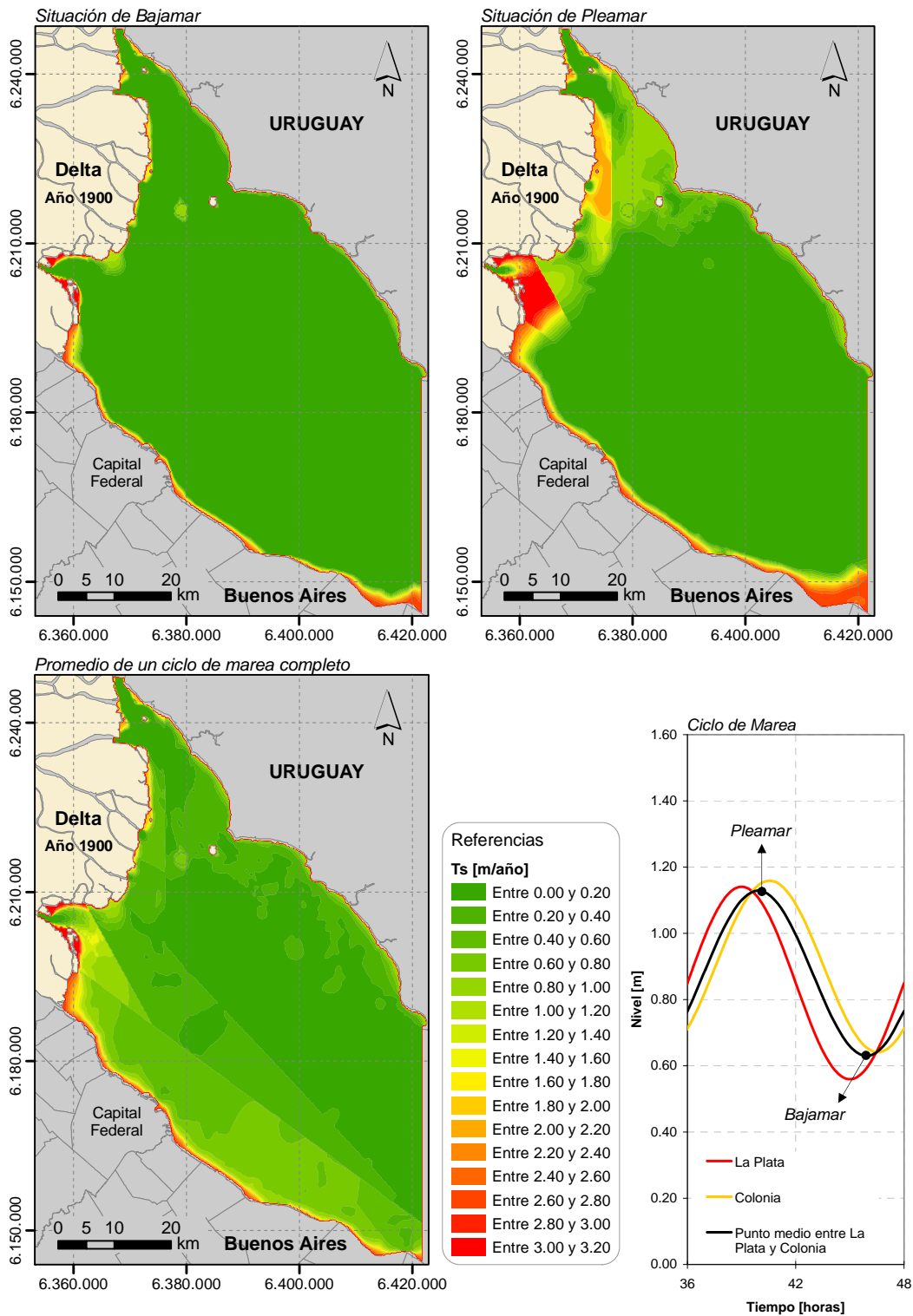


Figura 4.28: Comparación de las tasas de sedimentación promedio con las correspondientes a las situaciones de bajamar y pleamar



La comparación entre los Frentes cartográficos y los obtenidos en la simulación (dados cada 10 años para mayor claridad del gráfico) se muestra en la figura 4.29.

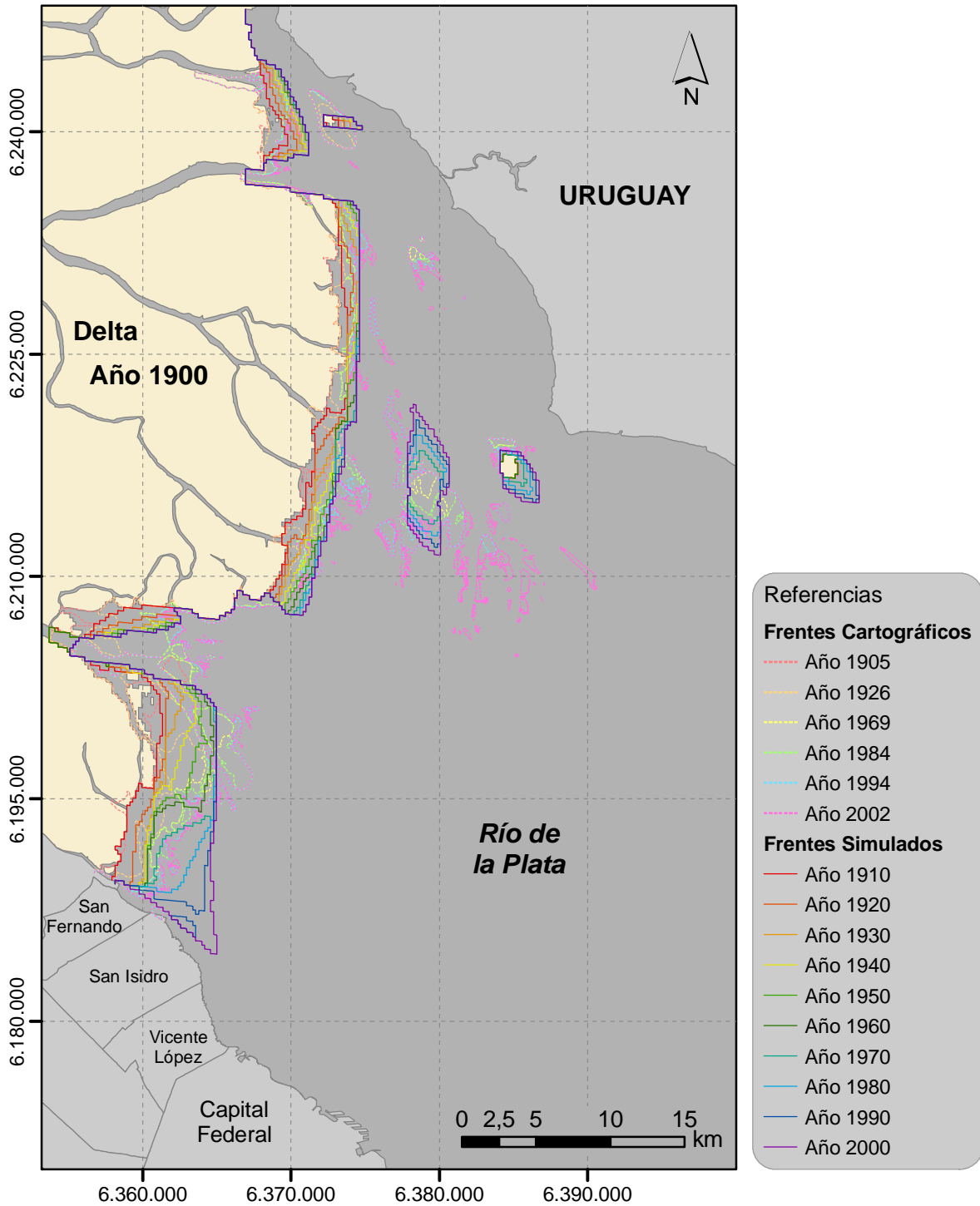


Figura 4.29: Frentes obtenidos en la simulación comparados con los Frentes cartográficos



En términos generales se observa un buen acuerdo; sin embargo, se nota que algunos de los Frentes simulados están desfasados en el tiempo respecto a los cartográficos.

Analizando la zona correspondiente a todo el Frente de avance del Paraná de las Palmas y el subfrente Sur del Paraná Guazú, se observa que el Frente simulado del año 1925 está algo atrasado respecto al cartográfico de 1926 (figura 4.30).

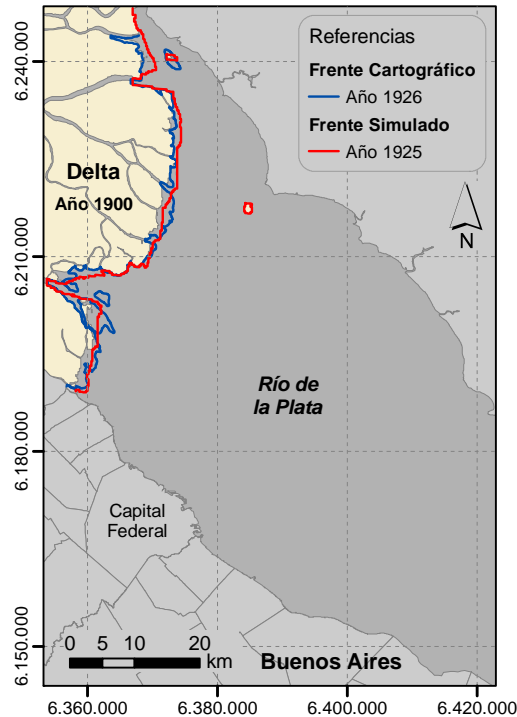


Figura 4.30: Comparación entre el Frente simulado del año 1925 y el Frente cartográfico del año 1926

Por su parte, comparando los Frentes simulados de los años 1970, 1985, 1995 y 2000 con sus pares cartográficos (Frentes de los años 1969, 1984, 1994 y 2002 respectivamente), se observa que los primeros están adelantados respecto a los segundos (figura 4.31). Esto se ve especialmente en el subfrente Sur del Paraná de las Palmas de los Frentes simulados de 1985, 1995 y 2000.

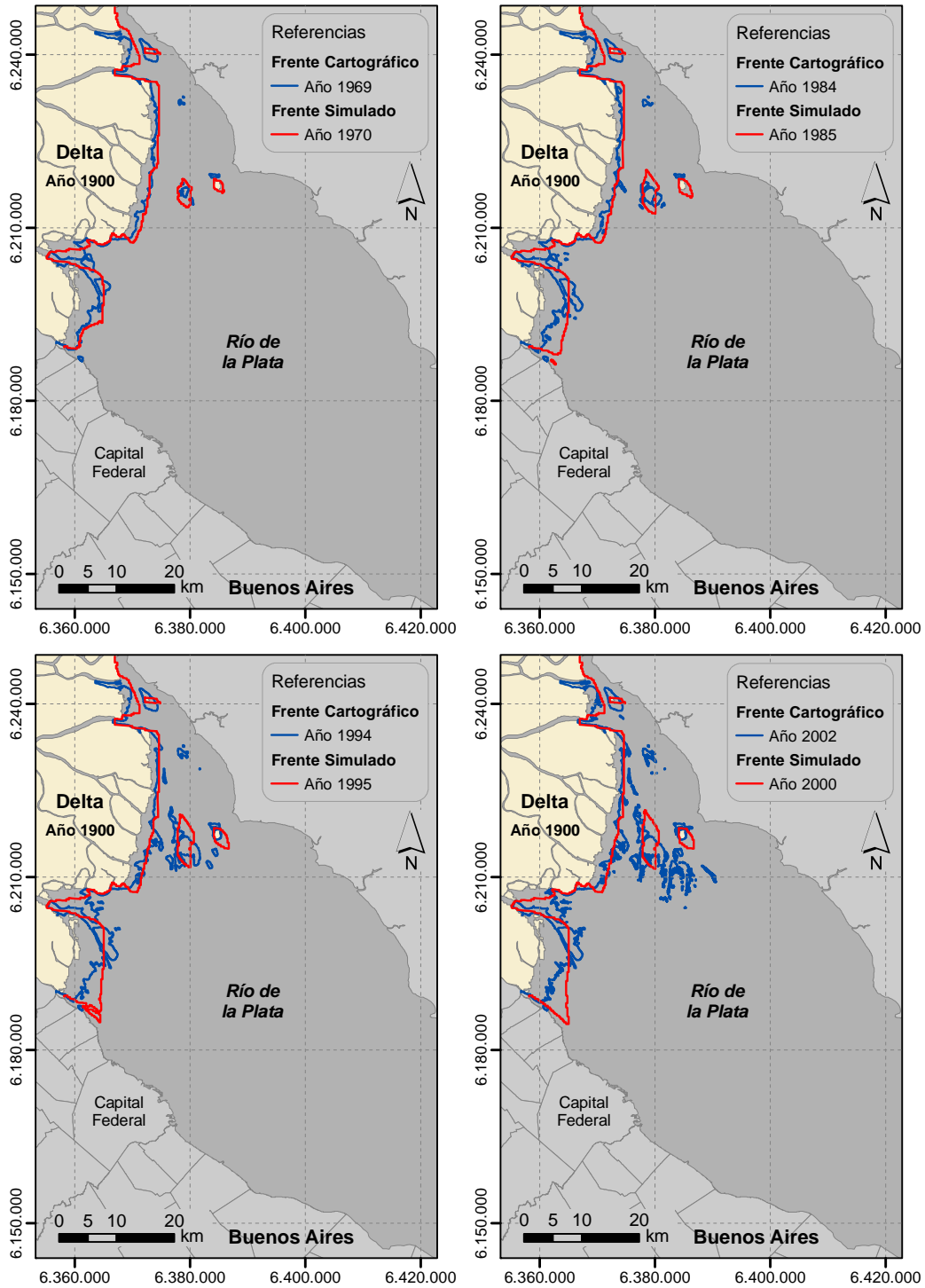


Figura 4.31: Comparación entre los Frentes simulados de 1970, 1985, 1995 y 2000 y sus pares cartográficos de 1969, 1984, 1994 y 2002



Los desfases señalados se deben básicamente a que el caudal sólido de arenas finas, que constituye la variable primaria del crecimiento del Delta, se mantuvo constante durante toda la simulación. Por lo tanto, dichos desfases estarían reflejando que el caudal sólido debió variar a lo largo del período de tiempo simulado. Debido a esto, se buscaron los Frentes simulados que más se asemejaban a los seis Frentes cartográficos, resultando ser los indicados en la tabla 4.3. La comparación entre cada uno de estos Frentes se muestra en las figuras 4.32 y 4.33.

Frente Cartográfico	Frente Simulado
1905	1905
1926	1940
1969	1955
1984	1970
1994	1980
2002	1985

Tabla 4.3: Frentes simulados más similares a los cartográficos

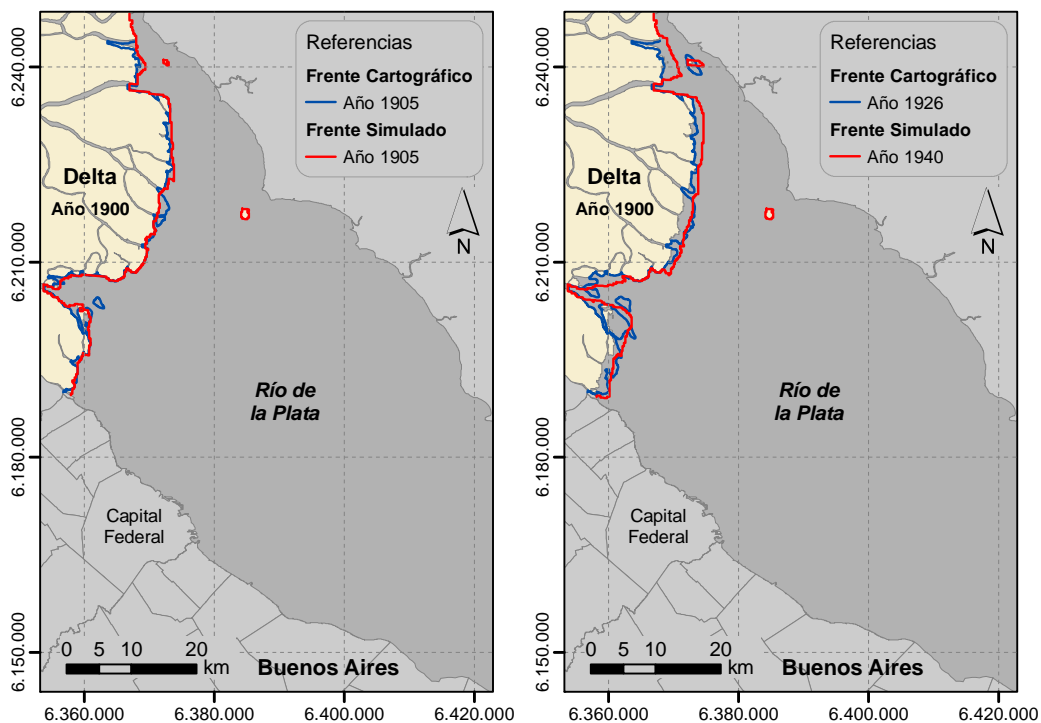


Figura 4.32: Comparación de los Frentes cartográficos de 1905 y 1926 con los Frentes simulados que más se les asemejan

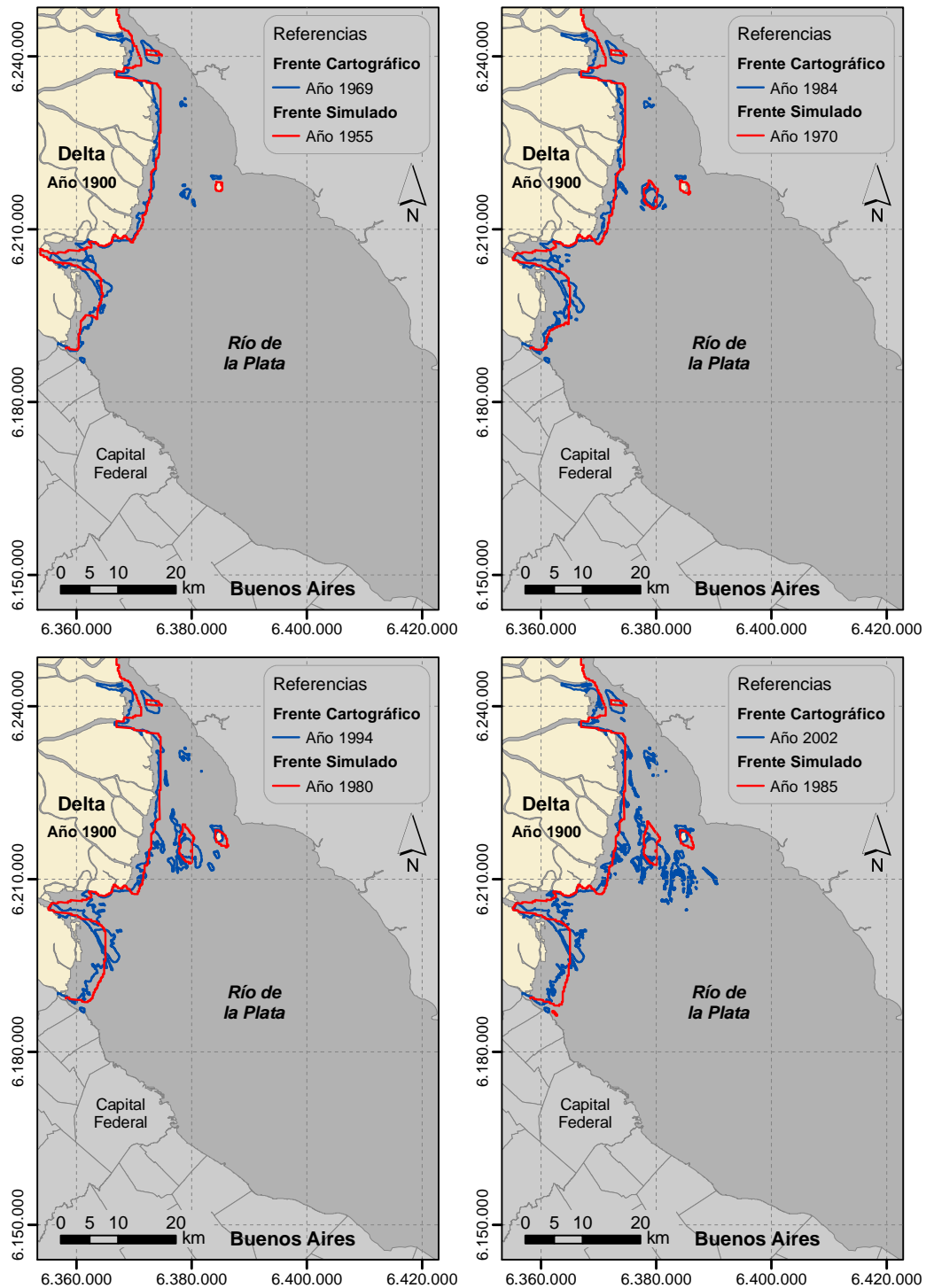


Figura 4.33: Comparación de los Frentes cartográficos de 1969, 1984, 1994 y 2002 con los Frentes simulados que más se les asemejan



Volcando los datos de la tabla 4.3 en un gráfico del tipo X-Y se obtuvo la relación entre años cartográficos y años simulados que se muestra en la figura 4.34. Dicha curva puede interpretarse como una transformación no lineal en la escala temporal del modelo. De esta forma, los años a los que hacen referencia los Frentes obtenidos en la simulación se corrigieron con esta relación. Por ejemplo, el Frente simulado que se obtuvo para el año 1930, en realidad representa el Frente del Delta en el año 1919 (figura 4.34).

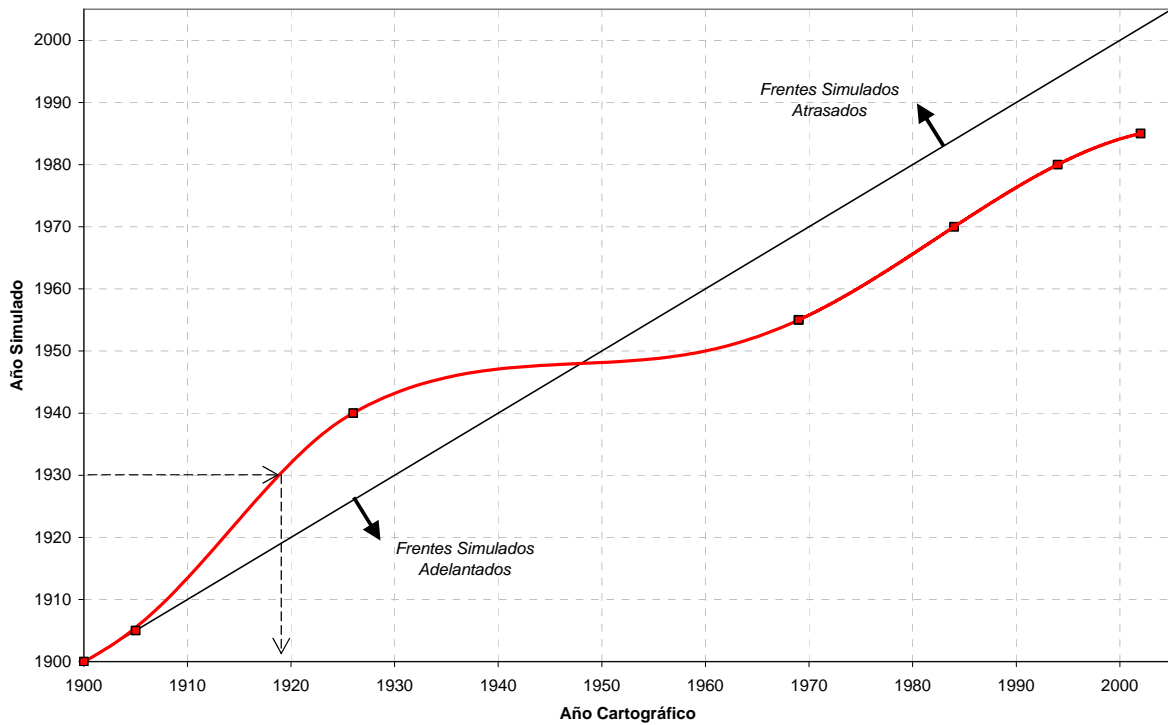


Figura 4.34: Relación entre los años cartográficos y simulados

La calibración del modelo se finalizó con esta transformación no lineal de la escala temporal, que permitió corregir los desfases señalados anteriormente, producto de considerar un caudal sólido constante. Así, los Frentes obtenidos en la simulación, calibrados en el tiempo, pueden observarse en la figura 4.35.

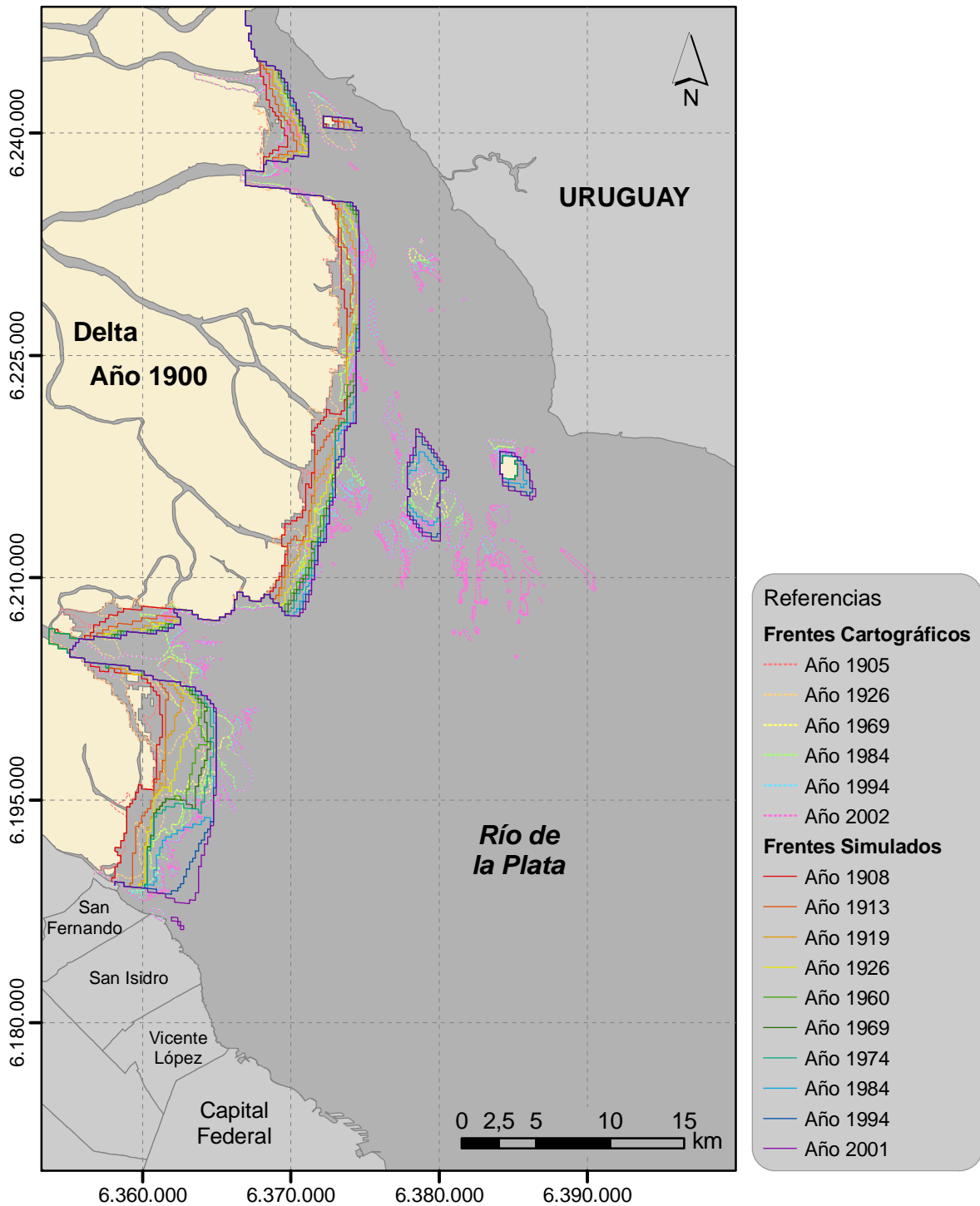


Figura 4.35: Frentes simulados transformados en la escala temporal



Del análisis de la curva de tiempos obtenida (figura 4.34), surge lo siguiente: los Frentes simulados en correspondencia con la parte de la curva que está por arriba de la recta a 45° (que representa la igualdad entre los años simulados y cartográficos), concuerdan con Frentes cartográficos de años anteriores. Consecuentemente, dichos Frentes están atrasados respecto a los cartográficos. Análogamente, los Frentes simulados que están en correspondencia con la parte de la curva inferior a la recta de 45° están adelantados respecto a los cartográficos.

Estos desfases fueron interpretados como indicadores de que la carga sólida aportada por el Río Paraná no permaneció constante en el tiempo (en el valor de referencia de 6.500.000 t/año), como se supuso en la simulación, sino que esta fue variando año a año.

En un intervalo del tiempo simulado Δt_s (figura 4.36), el volumen de arenas finas aportado es:

$$\Delta V = Q_0 \cdot \Delta t_s \quad (4.20)$$

donde Q_0 es el caudal sólido considerado en la simulación (caudal sólido de referencia, adoptado en 6.500.000 t/año).

El intervalo Δt_s del tiempo simulado está asociado a un intervalo del tiempo cartográfico Δt_c (figura 4.36) durante el que se aporta el mismo volumen de arenas finas, pero con el caudal sólido *real*, es decir:

$$\Delta V = Q_{sólido} \cdot \Delta t_c \quad (4.21)$$

donde $Q_{sólido}$ es el caudal sólido real.

Vale aclarar que los volúmenes de arenas finas aportados en los intervalos de tiempo Δt_s y Δt_c pueden considerarse prácticamente iguales porque la curva de tiempos se obtuvo vinculando los Frentes cartográficos con los Frentes simulados más similares.

De (4.20) y (4.21) surge, en el límite, que:

$$\frac{dt_s}{dt_c} = \frac{Q_{sólido}}{Q_0} \quad (4.22)$$

El primer término de la expresión (4.22) es la derivada de la curva de tiempos, mientras que el segundo término representa el caudal de arenas finas efectivamente aportado respecto al considerado en la simulación. De esta forma, podemos interpretar a la derivada de la curva de tiempos como la función de modulación de la carga sólida (figura 4.37). Multiplicando esta función de modulación por el valor de referencia adoptado en la simulación (6.500.000 t/año), se obtuvo la historia temporal del caudal sólido de arenas finas del Río Paraná, que se muestra en la figura 4.37.

La plausibilidad de dicha historia temporal de aporte sólido es discutida en la siguiente sección.

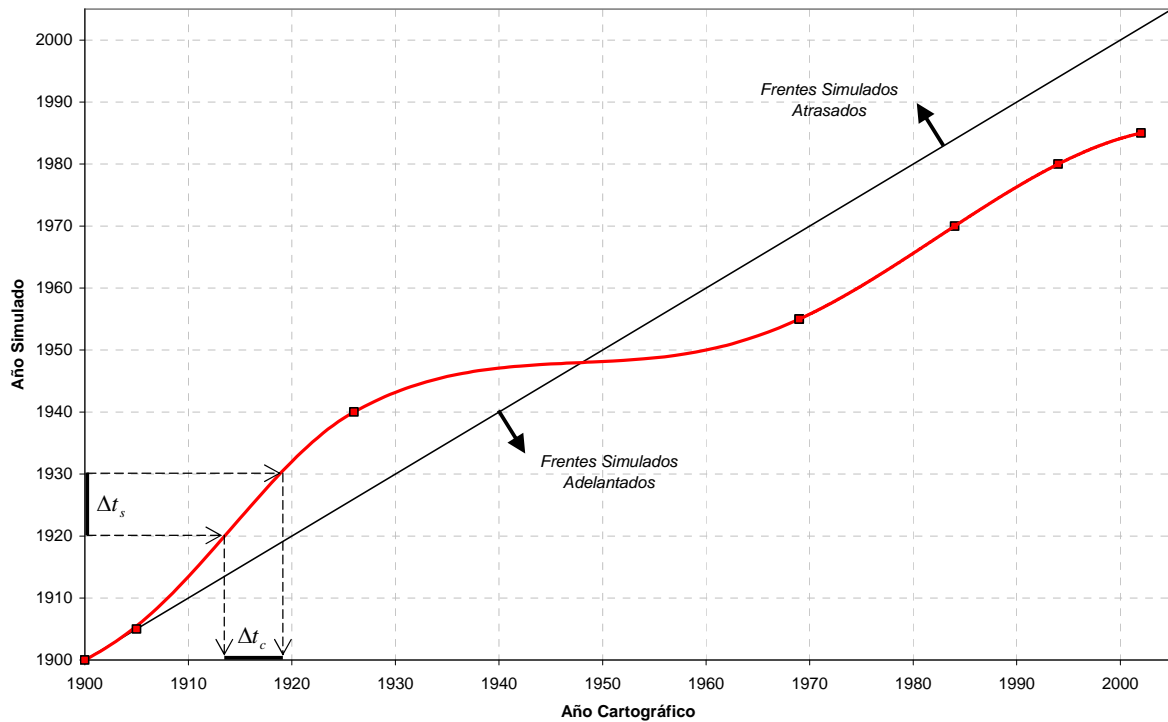


Figura 4.36: Relación entre los intervalos de tiempo cartográfico (Δt_c) y simulado (Δt_s)

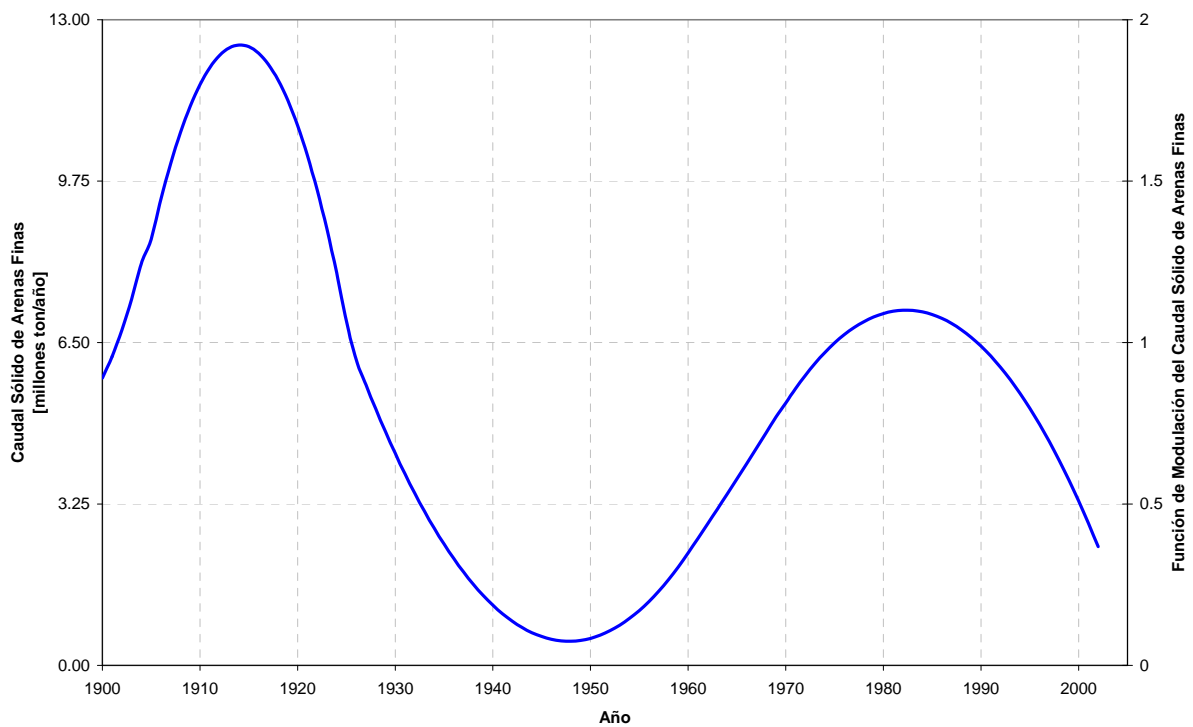


Figura 4.37: Caudal sólido de arenas finas del Río Paraná a lo largo de todo el siglo XX



4.2 CARGA SÓLIDA A LO LARGO DEL SIGLO XX

La carga sólida de arenas finas obtenida en la calibración se vinculó con la serie de caudales históricos del Río Paraná, de modo de poder cotejar la primera.

Los caudales líquidos tenidos en cuenta para la comparación fueron los máximos, ya que, al estar éstos asociados con las cargas sólidas dominantes del sistema, reflejan con más precisión los volúmenes aportados. En la figura 4.38, se muestran los máximos anuales de los caudales diarios del Río Paraná en la sección Paraná-Santa Fe para el período 1902-2004. En la misma, puede observarse también la tendencia de dicha serie.

En la figura 4.39, se muestra la superposición del caudal sólido de arenas finas con la tendencia de los caudales máximos. Vale mencionar que la primer curva representa, también, la tendencia del caudal sólido de arenas finas, y no los valores puntuales de cada año.

De esta comparación surge lo siguiente: hasta 1975, aproximadamente, se observa una correlación entre ambos ciclos, los cuales se encuentran desfasados en unos 10 o 20 años (figura 4.39). A partir de 1975 esa correlación se pierde, notándose una marcada disminución del caudal sólido.

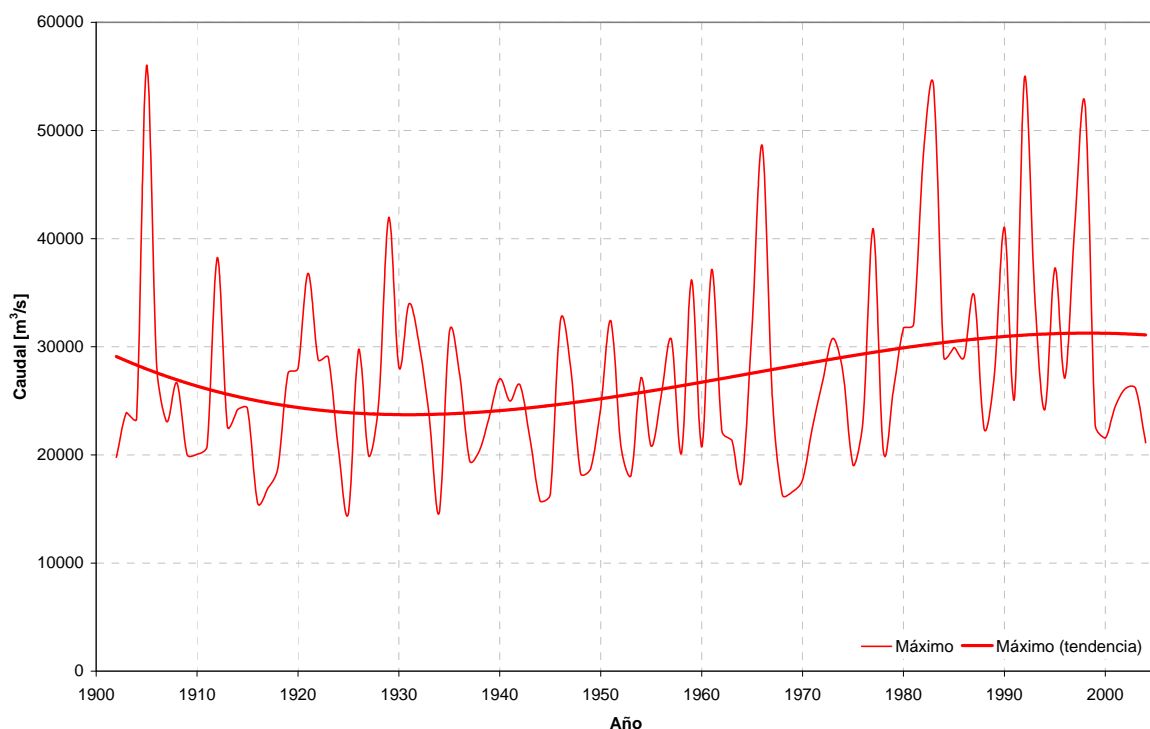


Figura 4.38: Máximos anuales de los caudales diarios del Río Paraná en la sección Paraná-Santa Fe para el período 1902-2004

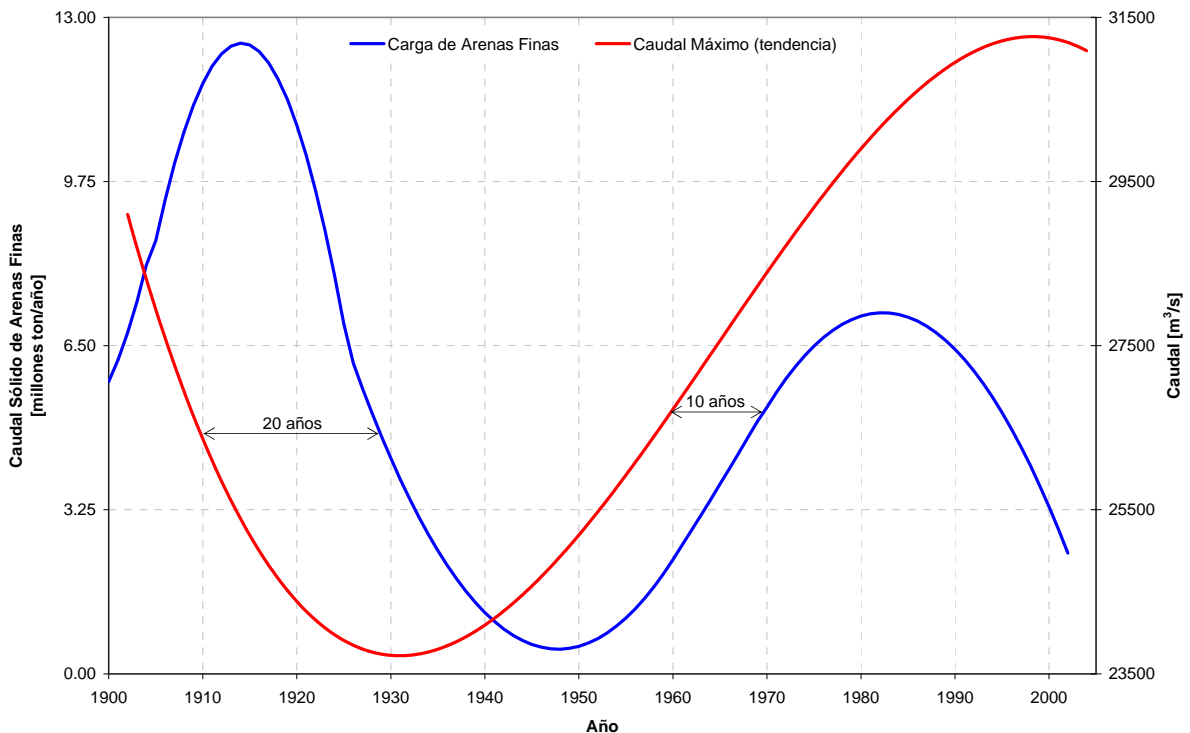


Figura 4.39: Comparación entre la carga de arenas finas y la tendencia de los caudales máximos del Río Paraná a lo largo de todo el siglo XX

El desfase entre ambos ciclos refleja que los caudales líquidos (que representan la causa de la erosión de suelos en la cuenca imbrífera, es decir, de la generación de sedimentos) tienen efecto en la carga sólida del sistema durante unos 10 o 20 años. Nótese que esto coincide con el tiempo de respuesta del sistema señalado en el análisis de incremento areal de la sección 3.2.2.2.

A su vez, como se indicó en la mencionada sección, dicho período de tiempo concuerda con lo indicado por los geomorfólogos en que los sedimentos más finos (limos y arcillas) requieren décadas para ser transportados fuera de la cuenca de aporte, siendo una clara muestra de ello, el hecho que en Norteamérica, por lo menos hasta 1996, se seguían encontrando muestras de DDT en sedimentos aún cuando dicho pesticida ya había dejado de utilizarse hacía casi dos décadas (Ongley 1996).

De esta forma, se ve reforzada la idea de que el tiempo de respuesta del sistema es del orden de 20 años.



La brusca disminución del caudal sólido que se da a partir de 1975 estaría poniendo de manifiesto la influencia de las grandes presas construidas a lo largo de todo el sistema, las cuales actúan como instrumentos de retención sedimentaria.

Para comprobar esto, se procedió a datar el período de construcción de las presas brasileñas más importantes de la cuenca del Río Paraná. En la tabla 4.4, se detallan las presas analizadas ordenadas en función del año final de construcción, es decir, del año a partir del cual comenzaron a retener sedimentos. Acompañando dicha tabla, en la figura 4.40, se muestra la ubicación esquemática de todas las presas.

Nº	Presa	Río	Construcción [años]	
			Inicio	Fin
1	M. Moraes ^(f)	Grande	1950	1957
2	Jurumirim ^(e)	Paranapanema	1956	1962
3	Barra Bonita ^(a)	Tietê	1957	1963
4	Furnas ^(f)	Grande	1958	1963
5	Chavantes ^(e)	Paranapanema	1959	1971
6	Jupíá ^(c)	Paraná	-	1974
7	Promissão ^(a)	Tietê	1966	1975
8	Marimondo ^(f)	Grande	1971	1975
9	Capivara ^(e)	Paranapanema	1970	1978
10	São Simão ^(b)	Paranaíba	-	1978
11	Ilha Solteira ^(c)	Paraná	-	1978
12	Água Vermelha ^(a)	Grande	1973	1978
13	G.B. Munhoz ^(d)	Iguazú	1975	1979
14	Salto Santiago ^(h)	Iguazú	-	1980
15	Itumbiara ^(f)	Paranaíba	1974	1980
16	Emborcação ^(b)	Paranaíba	-	1982
17	Itaipú ^(g)	Paraná	1975	1983
18	Três Irmãos ^(c)	Tietê	-	1993
19	Nova Ponte ^(b)	Araguari	-	1994

Fuentes:

^(a) <http://www.aestiete.com.br>

^(b) <http://www.cemig.com.br>

^(c) <http://www.cesp.com.br>

^(d) <http://www.copel.com>

^(e) <http://www.duke-energy.com.br>

^(f) <http://www.furnas.com.br>

^(g) <http://www.itaipu.gov.py>

^(h) <http://www.tractebelenergia.com.br>

Tabla 4.4: Detalle de las presas brasileñas más importantes construidas en la cuenca del Río Paraná

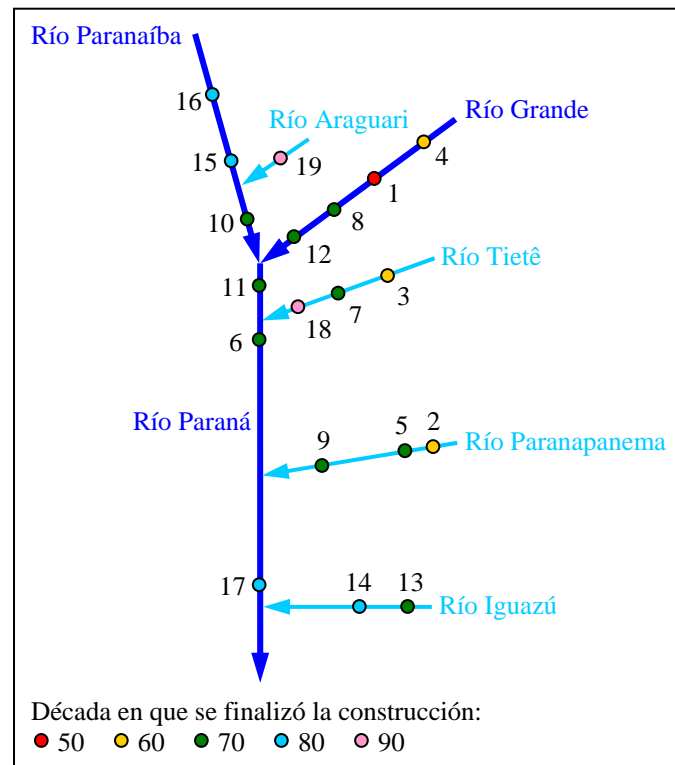


Figura 4.40: Ubicación esquemática de las presas de la tabla 4.4

Observando la tabla 4.4, se advierte que hacia fines de la década del 70 ya se habían construido prácticamente el 70% de todas las presas. Esta década en particular, es conocida como “El período dorado de la construcción de presas en Brasil” debido al gran número de obras realizadas en ese país.

La marcada caída de la carga sólida que se da a partir de 1975 puede considerarse como el impacto de la puesta en operación de todas estas presas. A su vez, a este efecto debe sumarse la tendencia a la estabilización y posterior recesión de los caudales máximos que se observa hacia fines de siglo XX, que aceleró, consecuentemente, la disminución del caudal sólido (figura 4.41).

Nótese que en todo este análisis no aparece reflejado el aumento en la tasa de crecimiento areal que se identificó en la sección 3.2.2.2 a partir de la gran crecida del año 1983. Esto es así porque la simulación capta sólo la tendencia decadal, no pudiendo discriminar el transitorio que generó aquella crecida.

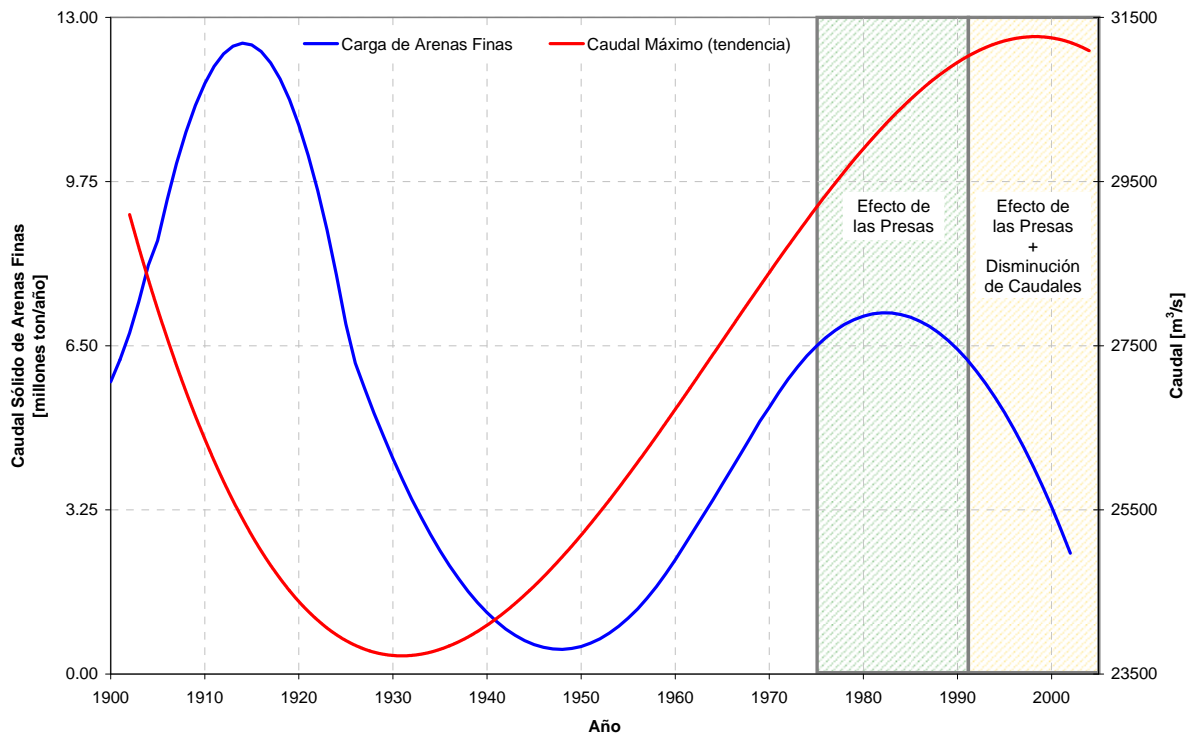


Figura 4.41: Causas de la disminución del caudal sólido de arenas finas que se observa a partir de 1975

4.3 TENDENCIA DE AVANCE FUTURA

Partiendo del último Frente obtenido durante la calibración (año de simulación 2005) se continuó la corrida del modelo hasta el año de simulación 2100 (conservando tanto el paso de cálculo como los valores de los forzantes), con el fin de utilizar esos resultados como base para hacer proyecciones sobre el avance del Frente del Delta en los próximos 100 años.

Para transformar la escala temporal de los nuevos Frentes obtenidos, se plantearon tres escenarios futuros, en función de la carga de arenas finas del sistema. Los mismos corresponden a situaciones de mínimo, medio y máximo caudal sólido. Se definieron las curvas de caudal sólido para cada escenario, de cuya integración se obtuvieron las respectivas curvas de relación entre los años cartográficos (es decir, reales) y los de la simulación.



Escenario de Mínima

Para este escenario, el caudal sólido de arenas finas se definió de la siguiente manera: partiendo del año 2002, se continuó el ciclo hasta el valor mínimo del año 1948 (500.000 t/año), y a partir de allí, se dejó constante ese valor para el resto de los años (figura 4.42). Integrando esta curva se obtuvo la relación entre los años cartográficos y simulados que se muestra en la figura 4.42, la cual permitió corregir la escala temporal de los nuevos Frentes obtenidos.

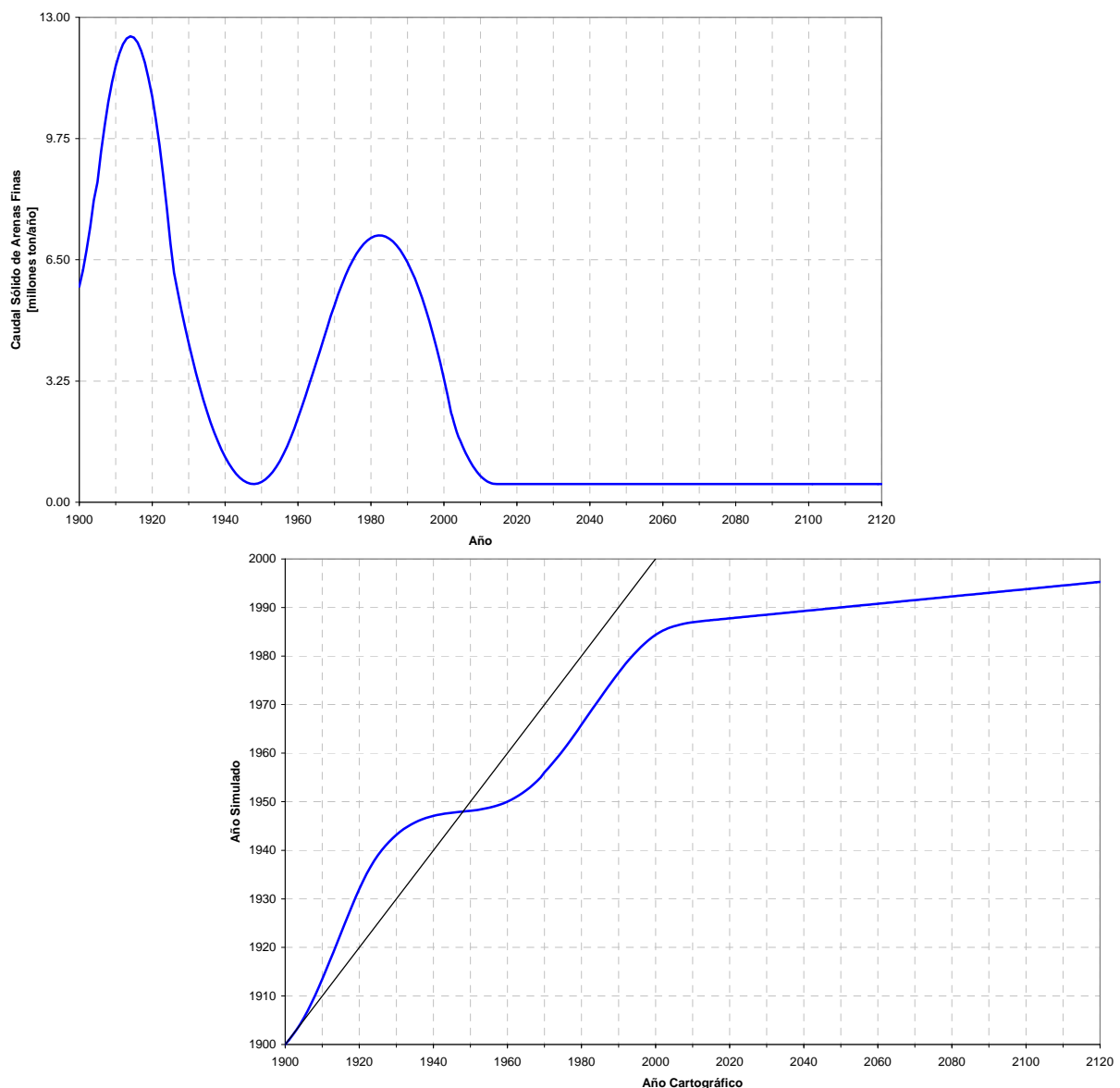


Figura 4.42: Caudal sólido de arenas finas (arriba) y relación entre los años cartográficos y simulados (abajo) para el escenario de mínima



En la figura 4.43 se muestran los Frentes obtenidos durante la simulación para el escenario propuesto.

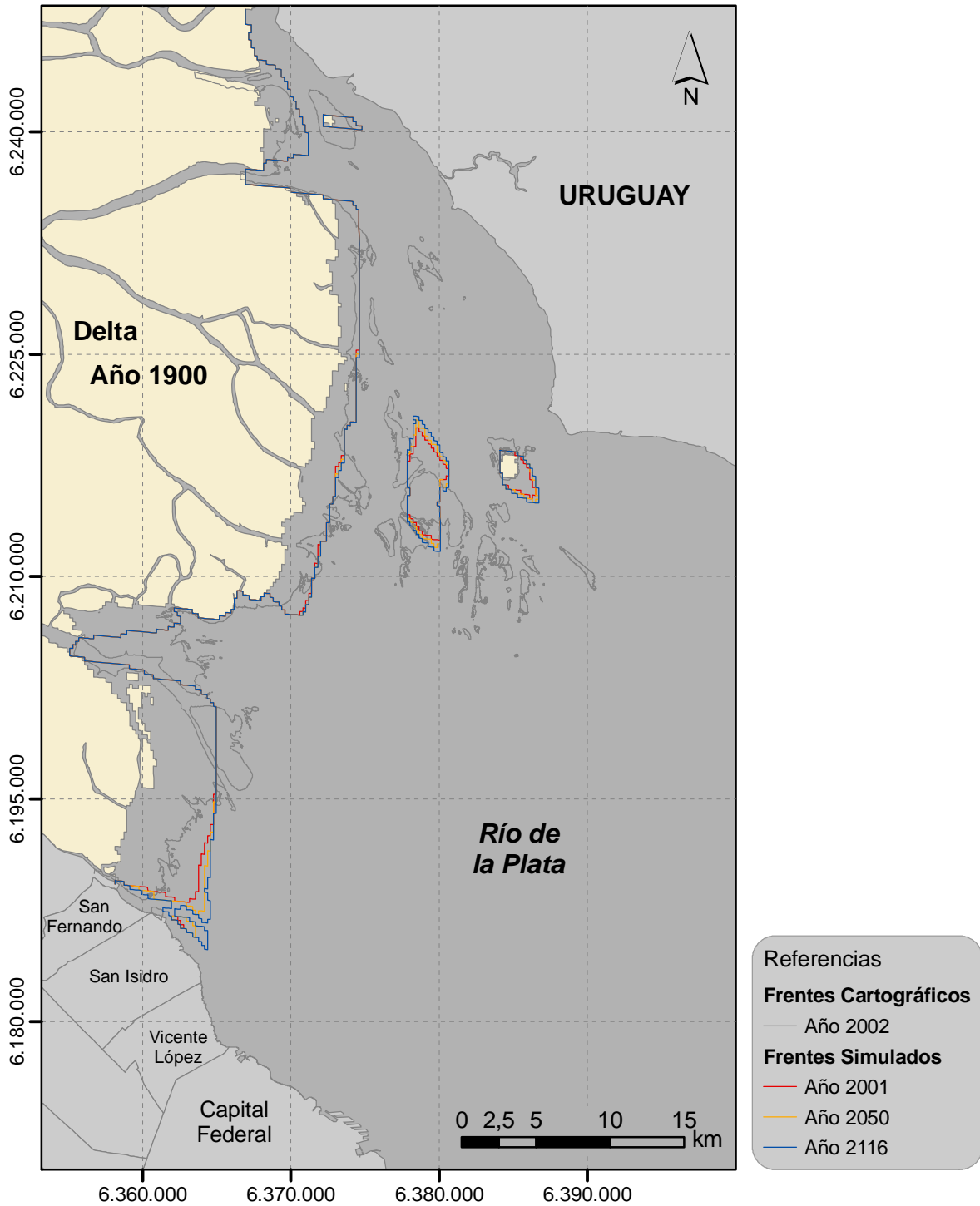


Figura 4.43: Frentes simulados para el escenario de mínima



En líneas generales se observan cambios relativamente débiles respecto al Frente del 2001, distinguiéndose sólo algo de actividad al sur del subfrente Sur del Paraná de las Palmas, el cual presenta una tasa media de avance de unos 10 a 15 m/año durante todo el siglo XXI.

Escenario de Media

En este caso, para el caudal sólido de arenas finas se terminó el ciclo que se da a partir de 1948 y luego se repitió el mismo para el resto de los años. En la figura 4.44, se muestran las curvas correspondientes al mencionado caudal sólido y a la relación entre los años cartográficos y simulados que se deriva del mismo.

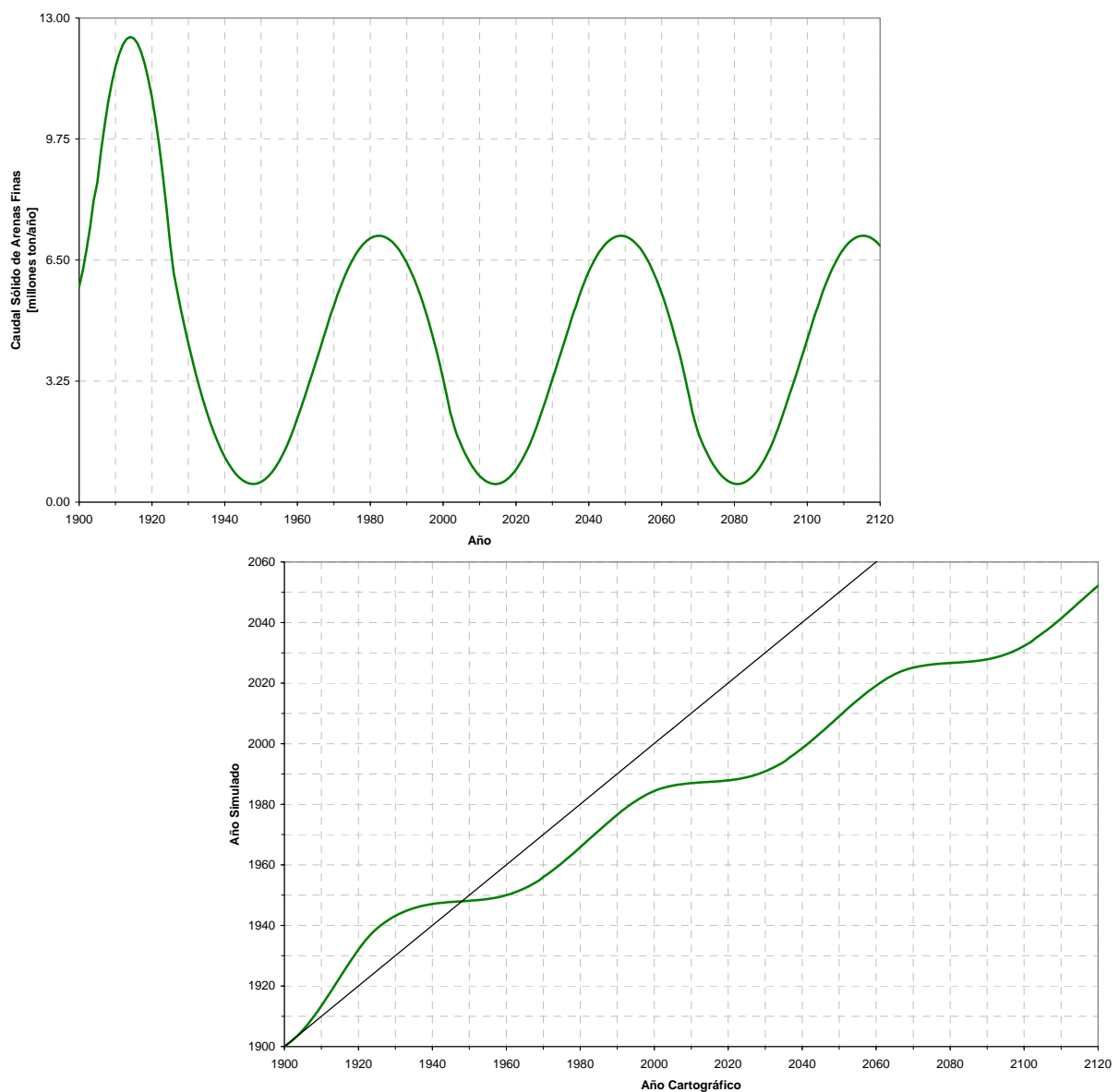


Figura 4.44: Caudal sólido de arenas finas (arriba) y relación entre los años cartográficos y simulados (abajo) para el escenario de media



Los Frentes simulados para el escenario de media, corregidos en la escala temporal, se muestran en la figura 4.45.

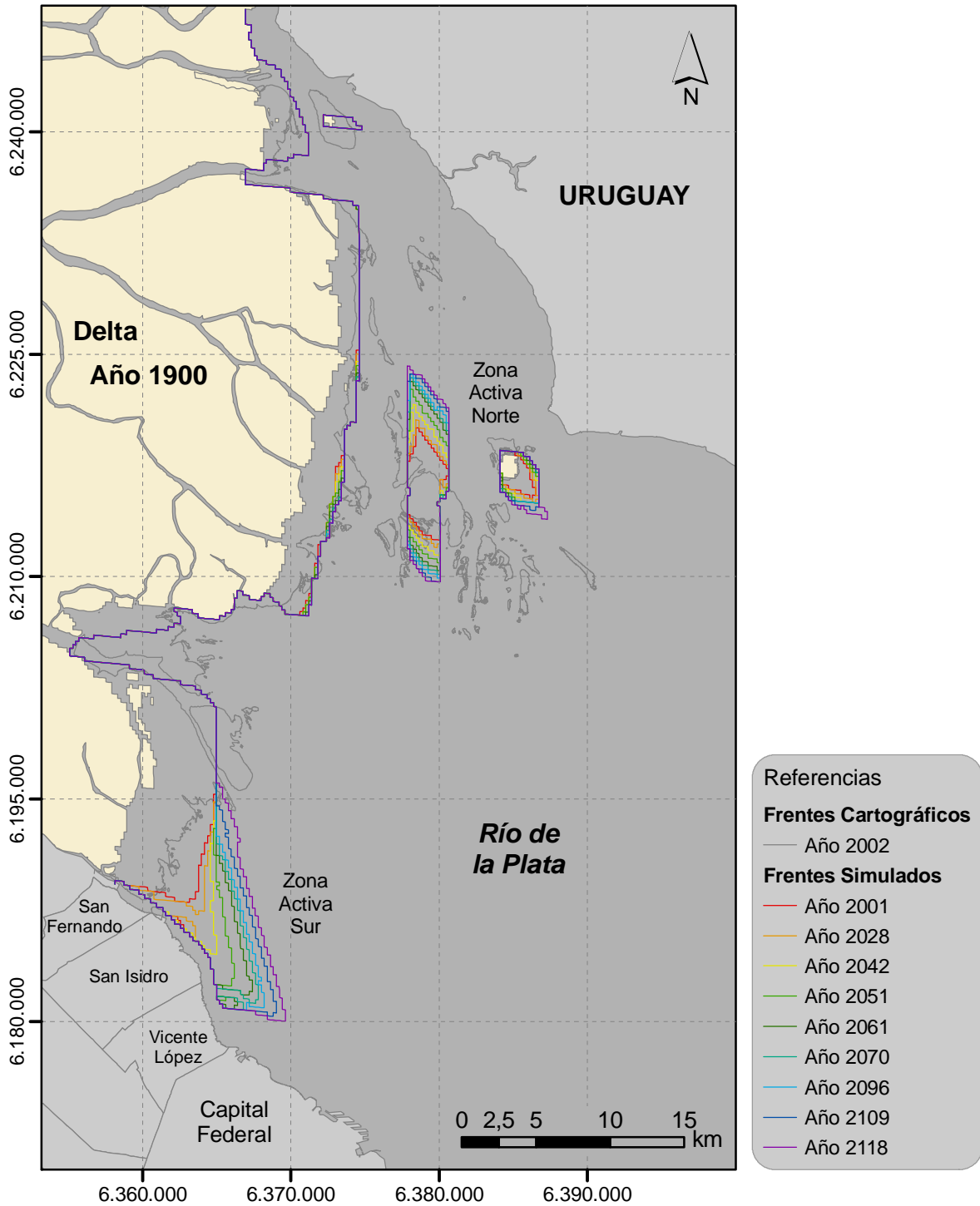


Figura 4.45: Frentes simulados para el escenario de media



Analizando la figura 4.45, se observan dos zonas de actividad al Norte y al Sur, la primera en torno a las islas Oyarvide y Martín García y la segunda en correspondencia con el subfrente Sur del Paraná de las Palmas.

La zona activa Norte, presenta una tasa media de avance de unos 25 m/año durante todo el siglo XXI, mientras que para el subfrente Sur del Paraná de las Palmas dicha tasa es de unos 80 m/año. A esa tasa de avance, el Frente del Delta recorrerá el partido de San Isidro en los próximos 50 años, llegando a Vicente López hacia fines de siglo.

Por su parte, tanto el subfrente Norte del Paraná de las Palmas como todo el frente de avance del Paraná Guazú no presentan ningún cambio respecto al año 2001.

Escenario de Máxima

Para definir el caudal sólido del escenario de máxima, se continuó el ciclo que se da a partir de 1948 hasta llegar al valor máximo del año 1982 (7.150.000 t/año) y a partir de allí, se dejó constante ese valor para el resto de los años (figura 4.46). La relación entre los años cartográficos y simulados que se obtuvo al integrar la curva de caudal sólido se muestra en la figura 4.46.

En la figura 4.47, se muestran los Frentes obtenidos en la simulación para el escenario planteado. Al igual que en el escenario anterior, se observan dos zonas de actividad, una Norte, en torno a las islas Oyarvide y Martín García, y otra Sur, en correspondencia con el subfrente Sur del Paraná de las Palmas.

Las tasas medias de avance durante todo el siglo son de unos 35 m/año para la zona activa Norte y de 80 a 90 m/año para el subfrente Sur del Paraná de las Palmas. Respecto a este último, cabe señalar que la parte norte del mismo recién entra en actividad hacia fines del siglo XXI. Al igual que para el escenario de media, el Frente del Delta recorrerá el partido de San Isidro en los próximos 50 años, llegando a Vicente López hacia fines de siglo.

El subfrente Norte del Paraná de las Palmas y el frente de avance del Paraná Guazú no presentan ningún cambio respecto al año 2001.

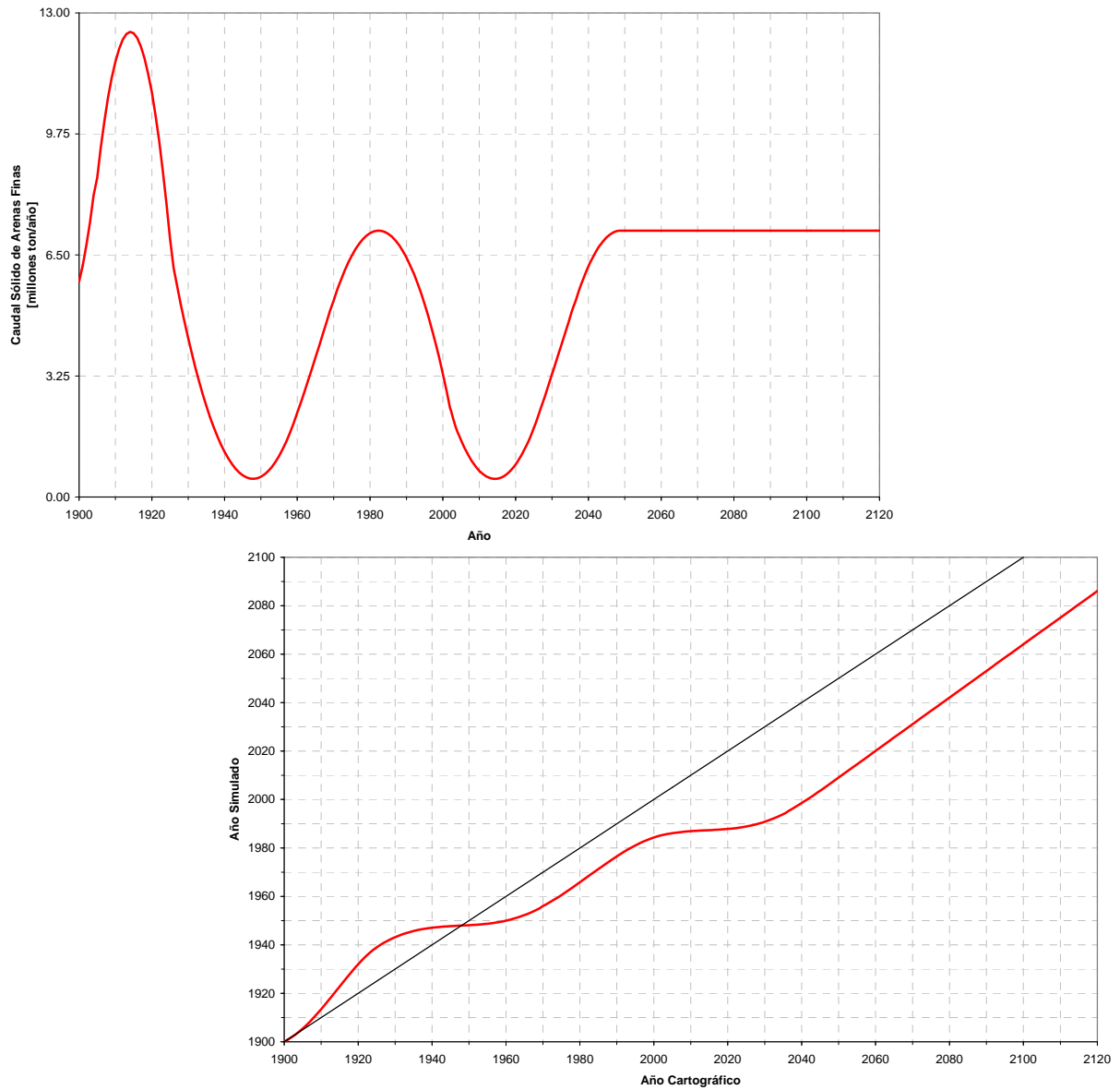


Figura 4.46: Caudal sólido de arenas finas (arriba) y relación entre los años cartográficos y simulados (abajo) para el escenario de máxima

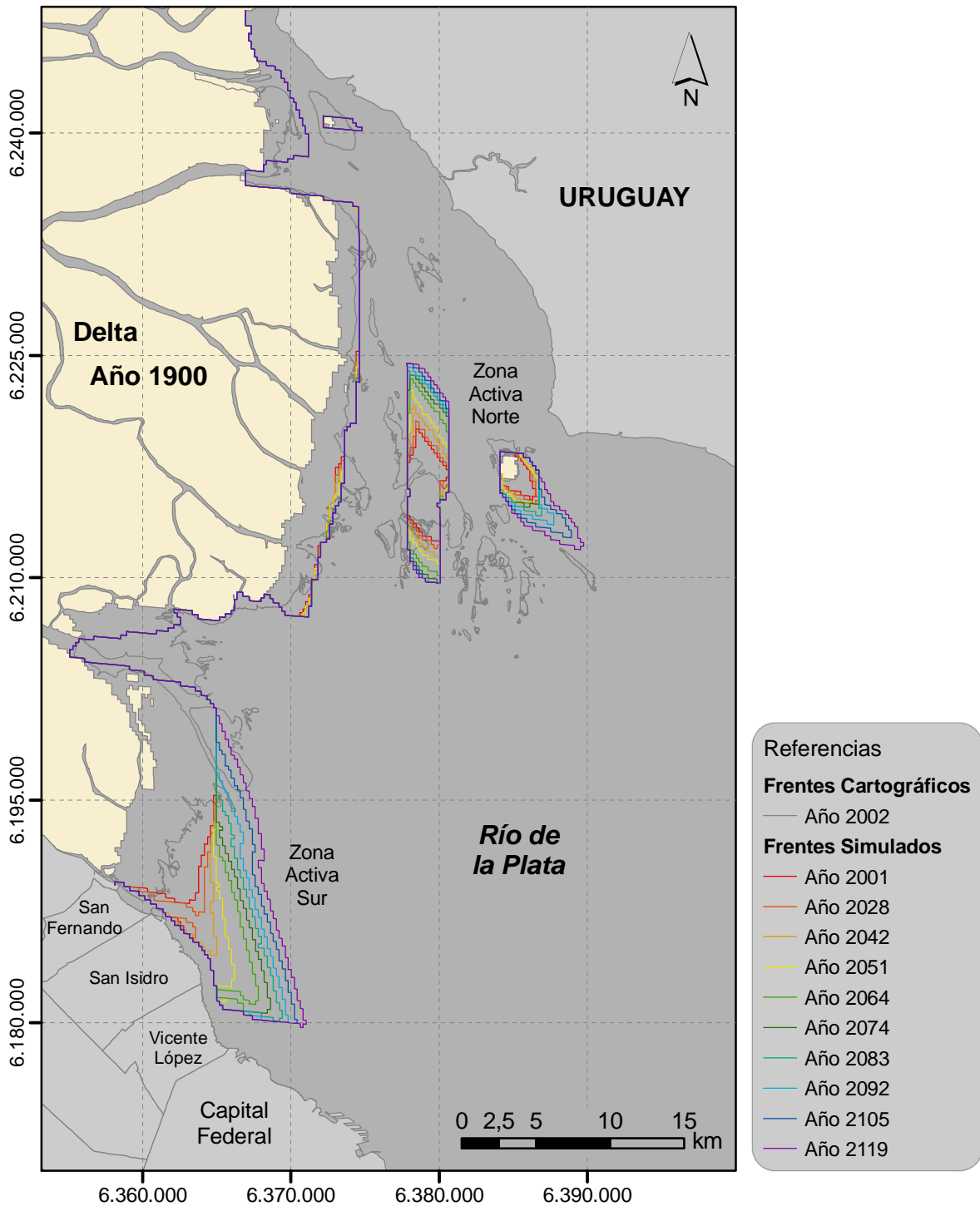


Figura 4.47: Frentes simulados para el escenario de máxima



Consecuencias del Avance del Delta durante el Siglo XXI

En la figura 4.48 se muestra el crecimiento del Delta del Río Paraná hacia el año 2120 según los tres escenarios propuestos. Como ya se mencionó anteriormente, pueden observarse dos zonas de actividad, una Norte, en torno a las islas Oyarvide y Martín García, y otra Sur, en correspondencia con el subfrente Sur del Paraná de las Palmas. Puede notarse que hacia fines de siglo el Frente del Delta recorrerá prácticamente todo el partido de San Isidro, pudiendo llegar a Vicente López si se dieran escenarios entre media y máxima. También se destaca que la diferencia entre los resultados de los escenarios de media y máxima es mucho menor que entre los de media y mínima.

Una mayor parte del canal de navegación Emilio Mitre quedará encajonada, lo cual afectará (no necesariamente en forma negativa) la estrategia de dragado. También se verán afectadas las tasas de sedimentación en los puertos y clubes náuticos de los partidos de San Isidro y Vicente López.

La toma de agua para la Planta General San Martín (la más importante de provisión de agua potable) podría presentar inconvenientes para los escenarios de media y máxima por su cercanía con el Frente del Delta, potenciando la posibilidad de generación de embancamientos en su entorno o aumento de turbidez. Por el contrario, no se visualizan dificultades con las descargas de efluentes domésticos desde el emisario Berazategui y del futuro emisario Capital.

Desde el punto de vista catastral, deberían preverse medidas de actualización periódicas del catastro de esta zona del Delta, perteneciente a la provincia de Buenos Aires, para evitar conflictos en relación al reconocimiento de titularidad sobre las nuevas tierras, tanto por parte de particulares como de municipios o entidades gubernamentales.

De la Proyección a la Predicción

No es posible asignar probabilidades a los escenarios propuestos. Sin embargo, la cercanía entre los resultados de los escenarios medio y máximo torna mucho más probable que el Frente alcance Vicente López a que sólo llegue al fin de San Isidro a principios del próximo siglo.

Por otro lado, el Cambio Climático ha venido actuando, hasta fines del siglo XX, en el sentido de aumentar las precipitaciones en la cuenca imbrífera del Río Paraná y, en consecuencia, a incrementar el caudal de dicho río (Menéndez 2006). Esta tendencia pareció revertirse a principios del presente siglo, con años relativamente secos y, en consecuencia, de bajo caudal, aunque en este año 2007 las precipitaciones y, consecuentemente, el caudal parecen haber recobrado fuerza. Esa mayor pluviosidad no se ha manifestado en un aumento de la carga sólida en el tramo argentino del Río Paraná debido a la presencia de los embalses brasileños, que la retienen. Entonces, el aporte de carga sedimentaria está determinado básicamente por lo que proviene a través del río Paraguay desde la cuenca del Bermejo. Si bien la generación de sedimentos en esa zona obedece a causas naturales, que muy probablemente permanezcan con leves variaciones durante el presente siglo (lo que podría llevar a una estabilización en la tendencia del aporte), es de esperarse un incremento no despreciable por acción antrópica (incremento de la erosión de suelos por malas prácticas de uso). Entonces, la probabilidad de una reversión hacia una tendencia creciente de la carga



sólida aumenta, y con ello la probabilidad de que se dé un escenario al menos más cercano al medio. Es decir, nuevamente se llega a la conclusión de que el Frente del Delta avanzará con relativa rapidez en su extremo sur, alcanzando Vicente López hacia principios del próximo siglo.

En todo el análisis efectuado, no se ha considerado la posibilidad de que la acción de otros mecanismos pueda tornarse significativa e interferir con la tendencia descrita. En particular, el Cambio Climático está produciendo un aumento del nivel medio del mar, que implica un aumento similar en el nivel medio del Río de la Plata (Barros et al. 2005). También está generando un desplazamiento hacia el sur del Anticiclón del Atlántico Sur, aumentando la frecuencia de los vientos provenientes del este e incrementando consecuentemente la altura de las olas (Dragani & Romero 2004). Estos cambios se traducen, respectivamente, en la necesidad de generar islas más altas y en un aumento de la acción erosiva, de modo que ambos efectos contribuyen a la disminución de la tasa de avance del Frente (Codignotto & Medina 2005).

Sin embargo, más que un cambio cuantitativo mensurable, lo que esos factores regresivos podrían llegar a producir es un cambio de dinámica, pasando a una transgresión (Stanley & Warne 1994), es decir, generando una redistribución del material deltaico que transformaría a la zona del Frente en un pantanal y luego, parcialmente, en una planicie de marea.

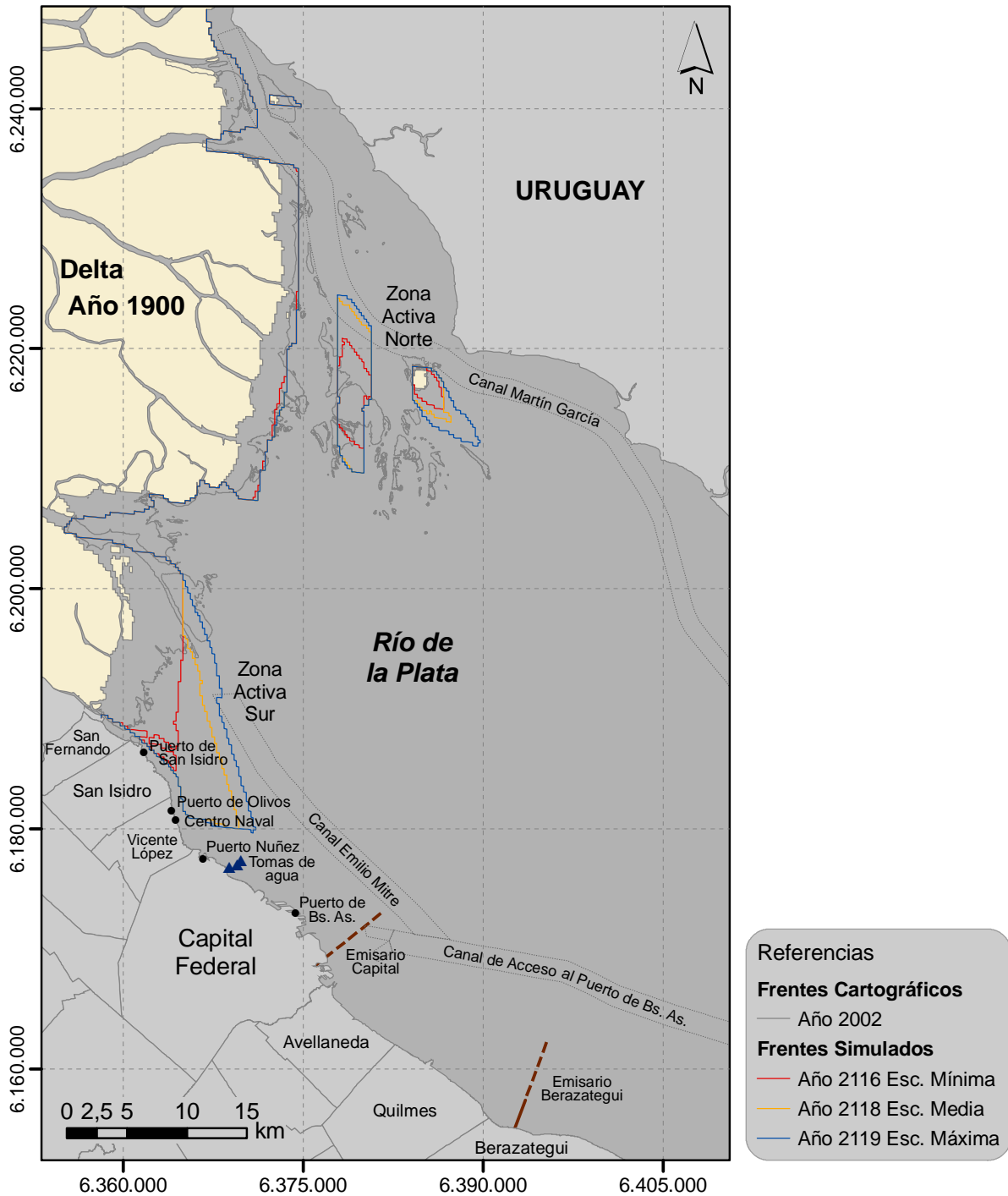


Figura 4.48: Crecimiento del Delta del Río Paraná hacia el año 2120 según los distintos escenarios



Capítulo 5

CONCLUSIONES

Las conclusiones del presente trabajo se desarrollan en tres secciones: “*Carga Sólida del Río Paraná*”, “*Avance del Frente e Incremento Areal del Delta del Río Paraná*” y “*Productos Obtenidos*”. En la primera de ellas se exponen las conclusiones concernientes al transporte de sedimentos del Río Paraná, mientras que en la segunda se hace referencia al avance del Frente del Delta. En la última sección se presentan los productos generados durante el desarrollo de la tesis.

La primer sección, a su vez, se dividió en dos partes: “*Situación Actual*” y “*Caudal Sólido de Arenas Finas a lo largo del Siglo XX*”. En la primera de ellas se presentan las conclusiones referentes al transporte total de sedimentos del Río Paraná en la actualidad, las cuales se desprenden del balance de sedimentos efectuado en el Capítulo 2. La segunda parte hace referencia a la historia temporal del caudal sólido de arenas finas que se reconstruyó a partir del modelo implementado (Capítulo 4).

La segunda sección también se dividió en dos partes: “*Durante el Siglo XX*” y “*Durante el Siglo XXI*”. Como su nombre lo indica, en la primera de ellas se exponen las conclusiones relativas al avance del Frente del Delta durante el último siglo, las cuales se extraen del análisis realizado en el Capítulo 3. La segunda parte se refiere a la proyección futura de avance del Frente en base a los resultados obtenidos con el modelo para los escenarios propuestos (Capítulo 4).

Carga Sólida del Río Paraná

Situación Actual

- Al presente, el Río Paraná en su desembocadura transporta aproximadamente un total de 160.000.000 de toneladas anuales de sedimentos. Dicha carga se reparte en función del tamaño de sus partículas de la siguiente manera:

Arcillas	45 millones t/año	(25%)
Limos	90 millones t/año	(60%)
Arenas	25 millones t/año	(15%)



- La carga suspendida total es de alrededor de 145.000.000 de toneladas al año, distribuidas de la siguiente forma:

Arcillas	45 millones t/año	(30%)
Limos	90 millones t/año	(60-65%)
Arenas	10 millones t/año	(5-10%)

- La carga de lavado, que por motivos prácticos se consideró conformada por las arcillas y los limos en su totalidad, fue cuantificada en unos 135.000.000 de toneladas anuales. Dicho valor representa aproximadamente el 90% de la carga total suspendida.
- La concentración media de la carga de lavado es de alrededor de 250 mg/l.
- La carga de fondo, que viene dada por la arena transportada principalmente por arrastre, fue cuantificada en alrededor de 15.000.000 de toneladas al año.
- En el Delta del Paraná (incluyendo el interior y el Frente) se deposita prácticamente la totalidad de la arena transportada (25.000.000 de toneladas anuales) y sólo una parte menor de los limos y arcillas.
- En los canales navegables del Río de la Plata se depositan alrededor de 23.000.000 de toneladas anuales del sedimento fino transportado en suspensión (preponderantemente los limos más gruesos).
- El Delta es una geoforma que crece continuamente tanto en longitud como en cota. Las arenas tienen preponderancia en el crecimiento en longitud (como zona de bancos), mientras que los limos tienen mayor peso en el crecimiento en cota por sobre el nivel del agua (emergencia de bancos que se transforman en islas).
- El Río Bermejo aporta alrededor del 70% de la carga sólida total del Río Paraná en su desembocadura.

Caudal Sólido de Arenas Finas a lo largo del Siglo XX

- Las arenas finas transportadas por el Río Paraná se depositan en el Frente del Delta, provocando, así, el avance del mismo.
- A lo largo de todo el siglo XX, la tendencia del caudal sólido de arenas finas varió aproximadamente entre 500.000 y 12.500.000 t/año. El valor mínimo se dio en el año 1948 y el máximo en 1914.
- A partir de 1975 se produjo una marcada caída de la carga sólida como consecuencia del impacto de las grandes presas construidas a lo largo de todo el sistema. A su vez, a este efecto se le sumó la tendencia a la estabilización y posterior recesión de los caudales máximos que se observa hacia fines de siglo XX, que aceleró, consecuentemente, la disminución del caudal sólido.



Avance del Frente e Incremento Areal del Delta del Río Paraná

Durante el Siglo XX

- El avance del Frente del Delta, determinado por la deposición de arenas finas, está condicionado por la presencia de la costa uruguaya rocosa y la descarga del río Uruguay, que le han impuesto un límite a su desarrollo en esa dirección.
- En cuanto al avance lineal del Frente del Delta del Río Paraná se identificaron dos frentes principales de avance: uno en torno al Paraná Guazú y otro asociado al Paraná de las Palmas. A su vez, en cada uno de ellos se distinguieron dos subfrentes al Norte y al Sur. Las tasas de avance son variables: alrededor de 0 y 25 m/año asociados al Paraná Guazú en los subfrentes Norte y Sur respectivamente y de 75 y 50 m/año en los subfrentes Norte y Sur del Paraná de las Palmas.
- Respecto al crecimiento areal, se observa una tendencia a la estabilización para todas las zonas hasta los años 1982-83, produciéndose un quiebre de esa tendencia a partir del evento extraordinario de crecida del Río Paraná de ese año hidrológico, manifestándose desde entonces una mayor tasa de crecimiento, que muestra una nueva tendencia estabilizadora.
- El efecto de los cambios en los caudales líquidos sobre la carga sólida del sistema tiene un retraso de alrededor de 20 años (*tiempo de respuesta* del sistema). En particular, las crecidas con mayores caudales pico y permanencia son las que tienen principal efecto en el crecimiento del Delta.
- En las zonas ubicadas más al norte, subfrente Norte del Paraná Guazú e isla Juncal, las condiciones locales hacen que no haya depositación por lo que la generación de áreas superficiales en la actualidad es reducida.
- Por el contrario, el subfrente Sur del Paraná Guazú (principalmente la zona b), conjuntamente con la zona de desarrollo de islas en la que se enmarca la isla Oyarvide, son predominantemente los sectores del Delta que más actividad sedimentológica presentan. En efecto, a partir del evento extraordinario de los años 1982-83, se disparó un proceso de aparición de áreas emergidas en torno a la isla Oyarvide, la cual se ha convertido en una nueva región acumuladora de sedimentos que se suma al Frente histórico.
- Por su parte, el frente asociado al Paraná de las Palmas presenta una mayor actividad en la zona sur, la cual se encuentra avanzando en forma perpendicular a la costa bonaerense. Es interesante destacar el ensanchamiento de este subfrente debido a la aparición en el período 1984-1994 y, actualmente en crecimiento, de bancos e islas situados en torno a la isla Zárate.



Durante el Siglo XXI

- El proceso sedimentario se concentrará en dos zonas, una Norte, en torno a las islas Oyarvide y Martín García, y otra Sur, en correspondencia con el subfrente Sur del Paraná de las Palmas.
- Hacia fines del presente siglo XXI el Frente del Delta recorrerá todo el partido de San Isidro, siendo lo más probable que llegue hasta el partido de Vicente López.
- Una parte del canal de navegación Emilio Mitre que actualmente se desarrolla sobre el Río de la Plata quedará encajonada, lo cual afectará (no necesariamente en forma negativa) la estrategia de dragado. También se verán afectadas las tasas de sedimentación en los puertos y clubes náuticos de los partidos de San Isidro y Vicente López.
- La toma de agua para la Planta General San Martín podría presentar inconvenientes para los escenarios de media y máxima por su cercanía con el Frente del Delta, potenciando la posibilidad de generación de embancamientos en su entorno o aumento de turbidez.
- Por el contrario, no se visualizan dificultades con las descargas de efluentes domésticos desde el emisario Berazategui y del futuro emisario Capital.
- Desde el punto de vista catastral, deberán preverse medidas de actualización periódicas del catastro de la zona extrema sur del Delta, para evitar conflictos en relación al reconocimiento de titularidad sobre las nuevas tierras, tanto por parte de particulares como de municipios o entidades gubernamentales.
- El aumento del nivel medio del mar y de la altura de las olas, como consecuencia del Cambio Climático, podrían producir un cambio de dinámica en el Frente del Delta, pasando a un proceso de transgresión que redistribuiría entonces el material deltaico, y transformaría a la zona del Frente en un pantanal y luego, parcialmente, en una planicie de marea.



Productos Obtenidos

- **Modelo Hidrodinámico y Sedimentológico del Frente del Delta del Río Paraná:** Se implementó un modelo hidrodinámico y sedimentológico que simula el mecanismo de avance del Frente del Delta del Río Paraná durante todo el siglo XX. A partir del mismo se pueden efectuar proyecciones sobre el desarrollo futuro del Frente.
- **Base de Datos Cartográficos del Delta del Río Paraná:** Toda la cartografía recopilada (53 mapas) fue volcada en una base de datos específicamente desarrollada para el caso. De esta forma, se logró tener todo el material debidamente clasificado e individualizado (ver Anexo 1).
- **GIS del Delta del Río Paraná:** Para visualizar los datos de salida del modelo se construyó un Sistema de Información Geográfica, ó GIS (por sus siglas en inglés), de toda la zona de estudio. De esta manera, se logró facilitar la administración, el análisis y la presentación de todos los datos obtenidos (ver Anexo 2).



REFERENCIAS

- Abbott, M.** (1979): “*Computational Hydraulics*”. Pitman, Boston.
- Amato, S.D. y A. Silva Busso** (2007): “*Características geológicas de subsuelo y variaciones paleoambientales durante el cuartario en el área deltaica del río Paraná*”. Informe INA en preparación.
- Amsler, M.L. y E.C. Drago** (1984): “*Estudios limnológicos de una sección transversal del tramo medio del Río Paraná. II: Características y variaciones temporales de la granometría de los sedimentos suspendidos*”. Revista de la asociación de Ciencias Naturales del Litoral. Vol. 15, pp. 7-21.
- Amsler, M.L.** (1993): “*Aspectos sedimentológicos y problemas relacionados con la navegación en el área argentina de la cuenca del Plata*”. Mesa Redonda: “Sedimentos e Hidrovía”, X Simposio Brasileño de Recursos Hídricos, I Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur. Gramado, Brasil.
- Amsler, M.L.** (1995): “*Carga de lavado del Río Paraná en sus tramos medio e inferior. Origen, comportamiento anual, concentraciones y caudales sólidos*”.
- AyEE** (1987): “*Estadística Hidrológica hasta 1983*”. Agua y Energía Eléctrica. Tomos I y II. División Recursos Hídricos. Buenos Aires, Argentina.
- Barros, V., A.N. Menéndez y G. Nagy** (editores) (2005): “*El Cambio Climático en el Río de la Plata*”. CIMA-CONICET. 1ra. Edición, Buenos Aires.
- Barros, V., R. Clarke y P. Silva Dias** (editores) (2006): “*El Cambio Climático en la Cuenca del Plata*”. CIMA-CONICET. 1ra. Edición, Buenos Aires.
- Bertoldi de Pomar, H.** (1984): “*Estudios limnológicos de una sección transversal del tramo medio del Río Paraná. III: Componentes sólidos transportados en suspensión*”. Revista de la asociación de Ciencias Naturales del Litoral. Vol. 15, pp. 25-46.
- Bombardelli, F.A., A.N. Menéndez, J.D. Brea, M.R. Lapetina y M. Uriburu Quirno** (1995): “*Estudio hidrodinámico del Delta del Río Paraná mediante modelación matemática*”. Informe LHA-INCYTH 137-03-95.
- Bonetto, A. y O. Orfeo** (1984): “*Caracteres sedimentológicos de la carga en suspensión del río Paraná entre Corrientes y Esquina (Rep. Argentina)*”. Rev. Asoc. Arg. Min., Petr. y Sediment. Buenos Aires, 15 (3-4): 51-61.
- Brahms, A.** (1754): “*Anfangsgründe der Deich- und Wasserbaukunst*” (“*Elementos de Presas e Ingeniería Hidráulica*”). Vol. I, p. 105. Aurich, Alemania.
- Brea, J.D., M.S. Busquets y P.D. Spalletti** (1996): “*Estudio sedimentológico preliminar de la Cuenca Inferior del Río Bermejo. Evaluación del impacto de las presas de la Alta Cuenca del Río Bermejo en la morfología del tramo inferior*”. Informe LHA 131-01-96. INCYTH-COREBE.
- Brea, J.D., M.S. Busquets y P.D. Spalletti** (1999): “*Generación y transporte de sedimentos en la alta cuenca del Río Bermejo. Impacto en la hidrovía, Delta del Paraná y Río de la Plata*”. Programa Estratégico de Acción para la Cuenca del Río Bermejo.



- Chebez, J.C. y P. Chiesa** (1983): “*Salvar al Delta*”. Revista de la Fundación Vida Silvestre Argentina. N°3: 8-14. Extraído de <http://www.proyectogeo.com/parques/areas_nat/delta_parana.asp>. [Consulta: 15-04-07].
- Chézy, A.** (1769): “*Informe del proyecto del Canal de l’Yvette*”. École des Ponts et Chaussées. París. [Descubierto por el ingeniero norteamericano Clemens Herschel en 1897 (Herschel 1897)].
- Codignotto, J.O. y R.A. Medina** (2005): “*Morfodinámica del Delta del Río Paraná y su vinculación con el Cambio Climático*”. Actas XVI Congreso Geológico Argentino, CD-Room, Artículo n° 215, 8p. Actas (3): 651-656. La Plata.
- Colby, B.** (1964): “*Discharge of sands and mean-velocity relationships in sand-beds streams*”. U. S. Geol. Survey. Prof. Pap. 462-A, 47 p.
- Depetris, P.J.** (1968): “*Mineralogía de algunos sedimentos fluviales de la cuenca del Río de la Plata*”. Rev. Asoc. Geológica Arg., tomo XXIII. Buenos Aires, Argentina.
- Dragani, W. and S. Romero** (2004): “*Impacts of a possible local wind change on the wave climate in the upper Río de la Plata*”. International Journal of Climatology, 24, 1149-1157.
- Drago, E.C. and M.L. Amsler** (1988): “*Suspended sediment at a cross section of the middle Paraná River: concentration, granulometry and influence of the main tributaries*”. Sediment Budgets (Proceedings of the Porto Alegre Symposium, December 1988). IAHS Publ. No. 174, pp. 381-396.
- EVARSA** (1994): “*Estadística hidrológica hasta 1994*”. Secretaría de Energía. Ministerio de Economía y Obras y Servicios Públicos. Buenos Aires, Argentina.
- EVARSA, nhc y GLMorris & Associates** (2002): “*Estudios de Sedimentación para actualizar la definición de la vida útil del embalse del complejo hidroeléctrico Yacretá*”. Informe para la Entidad Binacional Yacretá.
- GENAN, Grupo Estrategia Nacional de Áreas Naturales Protegidas** (1989): “*La Conservación de la Naturaleza en el Delta del Paraná*”. Fundación Vida Silvestre Argentina. (inf. inéd.). Extraído de <http://www.proyectogeo.com/parques/areas_nat/deltaparana.asp>. [Consulta: 15-04-07].
- Goodchild, M.F.** (1997): “*What is Geographic Information Science?*”, [en línea]. NCGIA Core Curriculum in GIScience. Unit 002. Disponible en <<http://www.ncgia.ucsb.edu/giscc/units/u002/u002.html>>. [Consulta: 18-04-07].
- Halcrow, W. & Partners** (1973): “*Estudio de navegabilidad del río Paraguay al sur de Asunción*”. Estudios hidráulicos e hidrológicos. Volumen II.
- Harrison, A.J.M. and M.W. Owen** (1971): “*Siltation of fine sediments in estuaries*”. XIV Congress of the IAHR. Paris.
- Herschel, C.** (1897): “*On the origin of Chézy formula*”. Journal Association of Engineering Societies, 18: 363-368.
- Hopwood, H.J., A.N. Menéndez, M.F. Chividini, M.A. Cavaliere y J.D. Brea** (1991): “*Informe de diagnóstico sobre navegación en la Ruta Rosario-Océano*”. Informe LHA-114-0-91.



- Jaime, P. y A.N. Menéndez** (1999): “*Modelo Hidrodinámico Río de la Plata 2000*”. Informe LHA-INA 183-01-99.
- Krone, R.B.** (1962): “*Flume studies of the transport of sediment in estuarial shoaling processes*”. Hydraulic Engineering Laboratory, University of California, Berkeley.
- Lelievre, J. y E. Navntoft** (1977): “*Mediciones del transporte de sedimentos en el río Paraná a la altura de Corrientes*”. Proyecto ARG/73/023: Mejoramiento de la Navegación del Río Paraná, Naciones Unidas, Dirección Nacional de Construcciones Portuarias y Vías Navegables. Buenos Aires, Argentina.
- LHA-UNESCO** (1974): “*Estudio del Sistema Fluvial Paraná-Santa Fe*”. Vol. I y II. Laboratorio de Hidráulica Aplicada. Ezeiza, Argentina.
- Manning, R.** (1891): “*On the flow of water in open channels and pipes*”. Trans. of the Institution of Civil Engineers of Ireland, 20: 161-195.
- Menéndez, A.N.** (1985): “*Simulación numérica de flujos cuasi-bidimensionales a superficie libre*”. Informe LHA-INCYTH S5-016-85.
- Menéndez, A.N.** (1987): “*On the accuracy of numerical methods for the two-dimensional shallow-water equations*”. XXII IAHR Congress, Lausanne.
- Menéndez, A.N.** (1990): “*Sistema HIDROBID II para simular corrientes en cuencos*”. Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería, Vol. 6, 1.
- Menéndez, A.N. and R. Castellano** (2000): “*Simulation of sedimentation in an estuary due to an artificial island*”. 4th International Conference HydroInformatics 2000. Cedar Rapids, Iowa, USA.
- Menéndez, A.N.** (2001): “*Description and modeling of the hydrosedimentologic mechanism in the Río de la Plata river*”. VII International Seminar on Recent Advances in Fluid Mechanics, Physics of Fluids and Associated Complex Systems.
- Menéndez, A.N.** (2006): “*Tendencias Hidrológicas en la Cuenca del Plata*”. Capítulo VI de “El Cambio Climático en la Cuenca del Plata” (Barros et al. 2006).
- Ongley, E. D.** (1996): “*Control of water pollution from agriculture*”. FAO Irrigation and drainage paper 55.
- Orfeo, O.** (1995): “*Sedimentología del Río Paraná en el área de su confluencia con el Río Paraguay*”. Tesis doctoral.
- Ortiz, G.J.** (2007): “*Qué son los Sistemas de Información Geográfica. Tipos de SIG y modelos de datos. Un artículo introductorio para entender las bases de los SIG*”, [en línea]. Disponible en <<http://www.gabrielortiz.com/index.asp?Info=012>>. [Consulta: 18-04-07].
- Partheniades, E.** (1962): “*A study of erosion and deposition of cohesive soils in salt water*”. Ph.D. Thesis. University of California, Berkeley.
- Ré, M. y A.N. Menéndez** (2003): “*Modelo Hidrodinámico del Río de la Plata y su Frente Marítimo*”. Informe LHA-INA 03-216-03.



Rinaldi, V., E. Abril y J. Clariá (2006): “*Aspectos Geotécnicos Fundamentales de las Formaciones del Delta del Río Paraná y del Estuario del Río de la Plata*”. Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil. Vol. 6(2).

Scartascini, G. (1971): “*Caudales sedimentarios en suspensión del Río Alto Paraná*”. Actas V Congr. Nac. del Agua, Santa Fe, Argentina.

Siegel, F., J. Pierce, C.M. Urien and I. Stone (1968): “*Clay Mineralogy in the Estuary of the Río de la Plata, South America*”. XXIII International Geological Congress. Vol II.

Stanley, D.J. and A.G. Warne (1994): “*World initiation of Holocene marine deltas by deceleration of sea-level rise*”. Science. Vol. 265, 8 July.



ANEXO 1: BASE DE DATOS CARTOGRÁFICOS

Todo el material cartográfico recopilado de la zona del Delta del Río Paraná (53 mapas) fue volcado en una base de datos específicamente desarrollada para el caso. De esta forma se logró tener todo el material debidamente clasificado e individualizado. Dicho material fue organizado de manera que cada mapa tuviera su propia ficha ó registro.

Cada registro presenta la siguiente información sobre el mapa:

- A. Identificación
- B. Origen
- C. Ubicación Histórica
- D. Tamaño y Escala
- E. Descripción y/o Comentarios
- F. Imagen

A. Identificación

En esta sección se encuentran los campos *Designación* y *Número de Mapa*. En este último se indica el número de identificación del mapa, el cual coincide con el número de registro. El campo *Designación* corresponde a la clave única que identifica a cada mapa dentro de la base de datos. El mismo se definió de la siguiente manera:

$$Designación = N^{\circ} - año - LUGAR$$

donde N° es el número de registro, *año* el año al que hace referencia el mapa (“S/F” para año desconocido) y *LUGAR* la sigla identificatoria del lugar donde fue recopilado el mapa.

Así por ejemplo para el mapa número 7, el cual hace referencia al año 1817 y que fue recopilado en la Academia Nacional de Historia (cuya sigla identificatoria es ANH), el campo *Designación* resultó ser finalmente “7-1817-ANH”.

De la misma forma, para el mapa número 17 recopilado en la Biblioteca del Congreso (cuya sigla identificatoria es BC) y del cual no se conoce el año al que hace referencia, el campo *Designación* resultó ser “17-S/F-BC”.

En las figuras A1.1 y A1.2 se muestran los registros de los mapas “7-1817-ANH” y “17-S/F-BC” respectivamente.



Delta del Paraná: Base de Datos Cartográficos

7 - 1817 - ANH

Identificación	
Designación:	7 - 1817 - ANH
Número de Mapa:	7
Origen	
Lugar de Procedencia:	Academia Nacional de Historia · ANH
Fecha de Recopilación:	08/05/03
Fuente:	Cartografía y Relaciones Históricas de Ultramar TOMO VII - Río de la Plata Volumen de Cartografía Mapa 59
Autor:	Servicio Histórico Militar Servicio Geográfico del Ejército Ministerio de Defensa Madrid 1992
Ubicación Histórica	Tamaño y Escala
Siglo: XIX	Tamaño: 199 × 265 mm
Año: 1817	Esc. Original: 1 : 2100000
Descripción y/o Comentarios	
"Carta esférica de las Provincias septentrionales del Río de la Plata". Copia de Dámaso Aldao Rodríguez del Monte. Coordenadas referidas al meridiano de Buenos Aires.	
Digitalizado: Sí	Nombre de los Archivos: 7-1817-ANH.dwg 7-1817-ANH coordenado.dwg

Figura A1.1: Registro del mapa "7-1817-ANH"



Delta del Paraná: Base de Datos Cartográficos

17 - S/F - BC

Identificación	
Designación:	17 - S/F - BC
Número de Mapa:	17
Origen	
Lugar de Procedencia:	Biblioteca del Congreso · BC
Fecha de Recopilación:	23/04/03
Fuente:	Mapas y planos referentes al Virreynato del Plata Mapa I
Autor:	José Torre Revelio
Ubicación Histórica	Tamaño y Escala
Siglo: XVIII	Tamaño: 305 × 188 mm
Año: S/F	Esc. Original: 48 mm = 40 leguas
Descripción y/o Comentarios	
El mapa presenta un aspecto "artístico", de manera que su grado de precisión en la representación del frente del delta carece de confiabilidad suficiente como para ser utilizada posteriormente en un estudio comparativo. Sin embargo, esto no lo invalida para ser usado en un análisis cualitativo. Es el mismo mapa que el 33-1732-IGM.	
Digitalizado: No	Nombre de los Archivos:

Figura A1.2: Registro del mapa "17-S/F-BC"



B. Origen

En esta parte se encuentran los campos *Lugar de Procedencia*, *Fecha de Recopilación*, *Fuente* y *Autor*. En el primero de ellos se indica el lugar donde fue obtenido el mapa incluyendo su sigla identificatoria. A saber:

Lugar de Procedencia	Sigla Identificatoria
Academia Nacional de Historia	ANH
Archivo General de la Nación	AGN
Biblioteca del Congreso	BC
Biblioteca del Museo de Ciencias Naturales de La Plata	BMCN
Departamento de Geodesia de La Plata	DGLP
Instituto Geográfico Militar	IGM

Tabla A1.1: Siglas identificatorias de los distintos lugares donde fueron recopilados los mapas

Si el lugar de procedencia no es conocido, entonces la sigla identificatoria es “S/R” (sin referencia). El campo *Fecha de Recopilación* contiene la fecha en que fue obtenido el mapa. Por su parte, el campo *Fuente* indica efectivamente la fuente de origen del mapa, es decir, la obra, escrito o publicación donde se encontraba el mismo. Si corresponde, el autor de la fuente de origen del mapa se señala en el campo *Autor*.

De esta forma, el mapa “7-1817-ANH”, tal como se muestra en la figura A1.1, presenta la siguiente información de origen:

Lugar de Procedencia: Academia Nacional de Historia · ANH

Fecha de Recopilación: 08/05/03

Fuente: Cartografía y Relaciones Históricas de Ultramar. TOMO VII - Río de la Plata. Volumen de Cartografía. Mapa 59.

Autor: Servicio Histórico Militar. Servicio Geográfico del Ejército. Ministerio de Defensa. Madrid 1992.

En cambio, el mapa “49-1826-AGN” muestra la siguiente información (figura A1.3):

Lugar de Procedencia: Archivo General de la Nación · AGN

Fecha de Recopilación: 03/07/03

Fuente: Mapoteca del Archivo General de la Nación. Mapa I-24.

Autor: Desconocido.



Delta del Paraná: Base de Datos Cartográficos

49 - 1826 - AGN

Identificación	
Designación:	49 - 1826 - AGN
Número de Mapa:	49
Origen	
Lugar de Procedencia:	Archivo General de la Nación · AGN
Fecha de Recopilación:	03/07/03
Fuente:	Mapoteca Archivo General de la Nación Mapa I-24
Autor:	
Ubicación Histórica	Tamaño y Escala
Siglo: XIX	Tamaño: 90 × 120 mm
Año: 1826	Esc. Original: 20 leguas marítimas = 65 mm
Descripción y/o Comentarios	
"Carta Geographica / que comprende / los Rios de la Plata, Paraná, / Uruguay y Grande / y / los terrenos / Adyacentes / London, Published for the Proprietor. / by G. & J. Cary, N° 86, St. James' Street, April 10, 1826". Gran detalle del delta. Se observan pequeñas islas en la desembocadura del río Luján y río Las Conchas.	
Digitalizado: Sí	Nombre de los Archivos: 49-1826-AGN.dwg

Figura A1.3: Registro del mapa "49-1826-AGN"



C. Ubicación Histórica

Aquí se indican el siglo y el año al que hace referencia el mapa (campos *Siglo* y *Año* respectivamente). La expresión “S/F” (sin fecha) indica que no se conoce el año de referencia del mapa. Ejemplos:

El mapa “7-1817-ANH” presenta la siguiente información (figura A1.1):

Siglo: XIX

Año: 1817

Por su parte, en el mapa “17-S/F-BC” puede observarse lo siguiente (figura A1.2):

Siglo: XVIII

Año: S/F

D. Tamaño y Escala

En esta sección se encuentran los campos *Tamaño* y *Escala Original*. En el primero de ellos se detallan las medidas de la copia del mapa recopilado (no las del original). Por su parte, en el campo *Escala Original* se especifica la escala con la que fue confeccionado originalmente el mapa. La expresión “S/E” (sin escala) indica que no se conoce la escala del mapa. Ejemplos:

El mapa “7-1817-ANH”, tal como se muestra en la figura A1.1, presenta la siguiente información de tamaño y escala:

Tamaño: 199 × 265 mm

Escala Original: 1:2.100.000

Por su parte, en el mapa “17-S/F-BC” se muestra la siguiente información (figura A1.2):

Tamaño: 305 × 188 mm

Escala Original: 48 mm = 40 leguas

En cambio, en el mapa “24-1599-BMCN” puede observarse lo siguiente (figura A1.4):

Tamaño: 203 × 145 mm

Escala Original: S/E



Delta del Paraná: Base de Datos Cartográficos

24 - 1599 - BMCN

Identificación	
Designación:	24 - 1599 - BMCN
Número de Mapa:	24
Origen	
Lugar de Procedencia:	Biblioteca del Museo de Ciencias Naturales de La Plata · BMCN
Fecha de Recopilación:	16/09/03
Fuente:	Autor:
América: Prehistoria y Geopolítica 1° edición - Buenos Aires Tipográfica Argentina - 1994 Página 21	María Amanda Caggiano María Carlota Sempé
Ubicación Histórica	Tamaño y Escala
Siglo: XVI	Tamaño: 203 × 145 mm
Año: 1599	Esc. Original: S/E
Descripción y/o Comentarios	
<p>"Mapa de América del Sur". Por Levinus Hulsius. Lógicamente para la época, el mapa presenta un aspecto "artístico", de manera que su grado de precisión en la representación del frente del delta carece de confiabilidad suficiente como para ser utilizada posteriormente en un estudio comparativo. Sin embargo, esto no lo invalida para ser usado en un análisis cualitativo. Es el mismo mapa que el 26-1599-BMCN.</p>	
Digitalizado: No	Nombre de los Archivos:

Figura A1.4: Registro del mapa "24-1599-BMCN"



E. Descripción y/o Comentarios

Aquí se muestra una descripción general del mapa, incluyendo comentarios y fragmentos de texto que se encontraban en el mapa mismo o en la fuente de donde fue obtenido.

De esta forma, el mapa “7-1817-ANH”, tal como se muestra en la figura A1.1, presenta la siguiente descripción:

Descripción y/o Comentarios: "Carta esférica de las Provincias septentrionales del Río de la Plata". Copia de Dámaso Aldao Rodríguez del Monte. Coordenadas referidas al meridiano de Buenos Aires.

Por su parte, la descripción del mapa “17-S/F-BC” es la siguiente (figura A1.2):

Descripción y/o Comentarios: El mapa presenta un aspecto "artístico", de manera que su grado de precisión en la representación del Frente del Delta carece de confiabilidad suficiente como para ser utilizada posteriormente en un estudio comparativo. Sin embargo, esto no lo invalida para ser usado en un análisis cualitativo. Es el mismo mapa que el 33-1732-IGM.

F. Imagen

En esta sección se indica si el mapa fue o no digitalizado (campo *Digitalizado*). En caso afirmativo se muestran los nombres de los archivos donde se encuentra dicha digitalización.

De esta forma, el mapa “7-1817-ANH” presenta la siguiente información (figura A1.1):

Digitalizado: Sí. Nombre de los archivos: “7-1817-ANH coordinado.dwg” y “1817-ANH.dwg”.

Por supuesto, cada registro está acompañado con la imagen del mapa correspondiente. En la figura A1.5 se muestra la imagen del mapa “24-1599-BMCN”.



Delta del Paraná: Base de Datos Cartográficos

24 - 1599 - BMCN



Figura A1.5: Imagen del mapa "24-1599-BMCN"



ANEXO 2: GIS DEL DELTA DEL RÍO PARANÁ

Para visualizar los datos de salida del modelo se construyó un Sistema de Información Geográfica de toda la zona de estudio. De esta manera, se logró facilitar la administración, el análisis y la presentación de todos los datos obtenidos.

De acuerdo al National Center for Geographic Information and Analysis de los Estados Unidos (NCGIA), un Sistema de Información Geográfica, ó GIS por sus siglas en inglés, se puede definir como aquél sistema de hardware, software y procedimientos elaborado para facilitar la representación, la manipulación, el análisis y la edición de datos espacialmente referenciados, de manera de poder resolver problemas complejos de planificación y gestión (Goodchild 1997).

Los elementos constitutivos de estos sistemas son los siguientes:

- *Hardware* (computadora)
- *Software* (para manipular la información)
- *Datos geográficos* (información)
- *Recursos humanos* (desarrolladores y usuarios)

La información geográfica es el elemento diferenciador de un Sistema de Información Geográfica frente a otros tipos de sistemas de información. Mientras que estos últimos (como por ejemplo el sistema de información de un banco) contienen sólo datos alfanuméricos (nombres, direcciones, números de cuenta, etc.), las bases de datos de un GIS han de contener además la delimitación espacial de cada uno de los objetos geográficos (Ortiz 2007).

Por ejemplo, un lago que tiene su correspondiente forma geométrica plasmada en un plano, tiene también otros datos asociados como profundidades, concentración de sedimentos, niveles de contaminación, etc. (Ortiz 2007).

Por lo tanto, un GIS tiene que trabajar a la vez con ambas partes de información: su forma perfectamente definida en plano y sus atributos temáticos asociados. Es decir, tiene que trabajar con cartografía y con bases de datos a la vez, uniendo ambas partes y constituyendo con todo ello una sola base de datos geográfica (Ortiz 2007).

Esta capacidad de asociación de bases de datos temáticas junto con la descripción espacial precisa de objetos geográficos y las relaciones entre los mismos (topología) es lo que diferencia a un GIS de otros sistemas de información (Ortiz 2007).

Además de constituir una herramienta de gran utilidad para la toma de decisiones, la implementación de un GIS para administrar la información de un proyecto acarrea las siguientes ventajas:

- Toda la información está clasificada y ordenada.
- La información cargada es compatible, es decir integrable.
- Se evita la superposición y duplicidad de esfuerzos.



El GIS desarrollado se enmarca dentro del área comprendida entre los paralelos 33,6°S al Norte y 35,2°S al Sur, y los meridianos 58,8°W al Oeste y 57,6°W al Este. En coordenadas Gauss-Krüger los límites resultan ser 6.282.922,9 m al Norte, 6.109.526,6 m al Sur, 6.330.229,9 m al Oeste y 6.445.827,5 m al Este (figura A2.1).

Para la implementación del sistema se contó con los siguientes datos de base:

De la República Argentina:

- Límites internacionales, provinciales y departamentales ^(a y b)
- Localidades principales ^(a y b)
- Red vial y ferroviaria ^(a)
- Ríos y cursos de agua ^(a)
- Canales de navegación ^(b)

De la República Oriental del Uruguay:

- Límites internacionales ^(b)
- Localidades principales ^(b)

Fuentes:

- ^(a) Atlas de Suelos de la República Argentina del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA)
- ^(b) Proyecto FREPLATA. Protección Ambiental del Río de la Plata y su Frente Marítimo: Prevención y Control de la Contaminación y Restauración de Hábitats (<http://www.freplata.org>)

El GIS también incluye la siguiente información, construida gran parte de ella, a partir de la información de base y de los datos de salida obtenidos con el modelo:

- Frentes cartográficos del Delta del Río Paraná para los años 1900, 1905, 1926, 1969, 1984, 1994 y 2002.
- Puertos y clubes náuticos de la Provincia de Buenos Aires.
- Tomas de agua sobre el Río de la Plata para la provisión de agua potable.
- Trazas del emisario Berazategui y del futuro emisario Capital (descargas de efluentes domésticos).
- Salidas del modelo: Batimetrías, niveles de agua, velocidades de corriente, tasas de sedimentación y Frentes del Delta simulados durante el período 1900-2100.

La figura A2.1 muestra el área de extensión del GIS con algunos de los datos de base.



Figura A2.1: Área de extensión del GIS (se incluyen algunos de los datos de base)