

**SECRETARÍA DE OBRAS PÚBLICAS  
SUBSECRETARÍA DE RECURSOS HÍDRICOS**



**ESTUDIO DE EROSIÓN EN EL RÍO PARANÁ GUAZÚ  
AGUAS ARRIBA DEL PUENTE ZÁRATE - BRAZO LARGO**

**Informe LHA-239-01-2004**

**Informe Final**

*Junio de 2004*

**LABORATORIO DE HIDRÁULICA**

# **ESTUDIO DE EROSIÓN EN EL RÍO PARANÁ GUAZÚ AGUAS ARRIBA DEL PUENTE ZÁRATE – BRAZO LARGO**

**INFORME LHA 239-01-2004**

## **RESUMEN**

En este Informe se presentan los estudios realizados tendientes a conocer el funcionamiento hidráulico y morfológico del tramo del río Paraná Guazú localizado aguas arriba del puente Zárate - Brazo Largo, con el fin de determinar, por un lado, el comportamiento de la costa en la margen izquierda del tramo de río en cuestión, y por otro, los parámetros de cálculo para las obras a llevar a cabo en la zona.

### **Descriptores**

#### **Temáticos:**

Erosión. Evolución morfológica.

#### **Geográficos e institucionales:**

Río Paraná Guazú. Puente Zárate - Brazo Largo

## **EQUIPO DE TRABAJO**

**DIRECTOR DEL LABORATORIO DE HIDRÁULICA: Ing. Julio C. De Lío**

**JEFE DEL PROGRAMA HIDRÁULICA FLUVIAL: Ing. José Daniel Brea**

**RESPONSABLE DE PROYECTO: Ing. Pablo Spalletti**

**INFORME PRODUCIDO POR:  
Ing. José Daniel Brea  
Ing. Pablo Spalletti**

## ÍNDICE TEMÁTICO

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>2. RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE ANTECEDENTES</b>	<b>1</b>
<b>3. ESTUDIO HIDRÁULICO Y MORFOLÓGICO</b>	<b>2</b>
<b>3.1. Caracterización General</b>	<b>3</b>
<b>3.2. Evolución morfológica a partir del análisis de fotografías aéreas entre 1968 y 1995</b>	<b>3</b>
<b>3.3. Comentarios a partir de los datos batimétricos</b>	<b>8</b>
<b>3.4. Análisis de datos de la estación de aforos de la SSRH en el río Paraná Guazú</b>	<b>10</b>
<b>3.5. Modelación hidrodinámica de la totalidad del Delta del Paraná</b>	<b>12</b>
<b>3.6. Modelación hidrodinámica y morfológica del río Paraná Guazú</b>	<b>15</b>
<b>4. CONCLUSIONES</b>	<b>20</b>

## 1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se ha llevado a cabo en el marco del Convenio entre la Empresa Del Guazú S.A. y el Instituto Nacional del Agua, para el “Estudio de Erosión en el Río Paraná Guazú Aguas Arriba del Puente Zárate - Brazo Largo”.

El predio, propiedad de Del Guazú S.A., sobre el que se prevé la construcción de un muelle y una playa de depósito, se localiza sobre la margen izquierda del río Paraná Guazú, aguas arriba del puente Zárate - Brazo Largo. El río en este tramo presenta una configuración particular, ya que si bien se corresponde con una curva suave, la presencia del puente por un lado, y la cercana afluencia del Pasaje Talavera por la margen derecha, por otro, condicionan la morfología del cauce en este sector del río. En la Figura N°1 se aprecia, sobre una imagen satelital Landsat del día 27 de abril del año 2001, el emplazamiento de la zona bajo estudio.

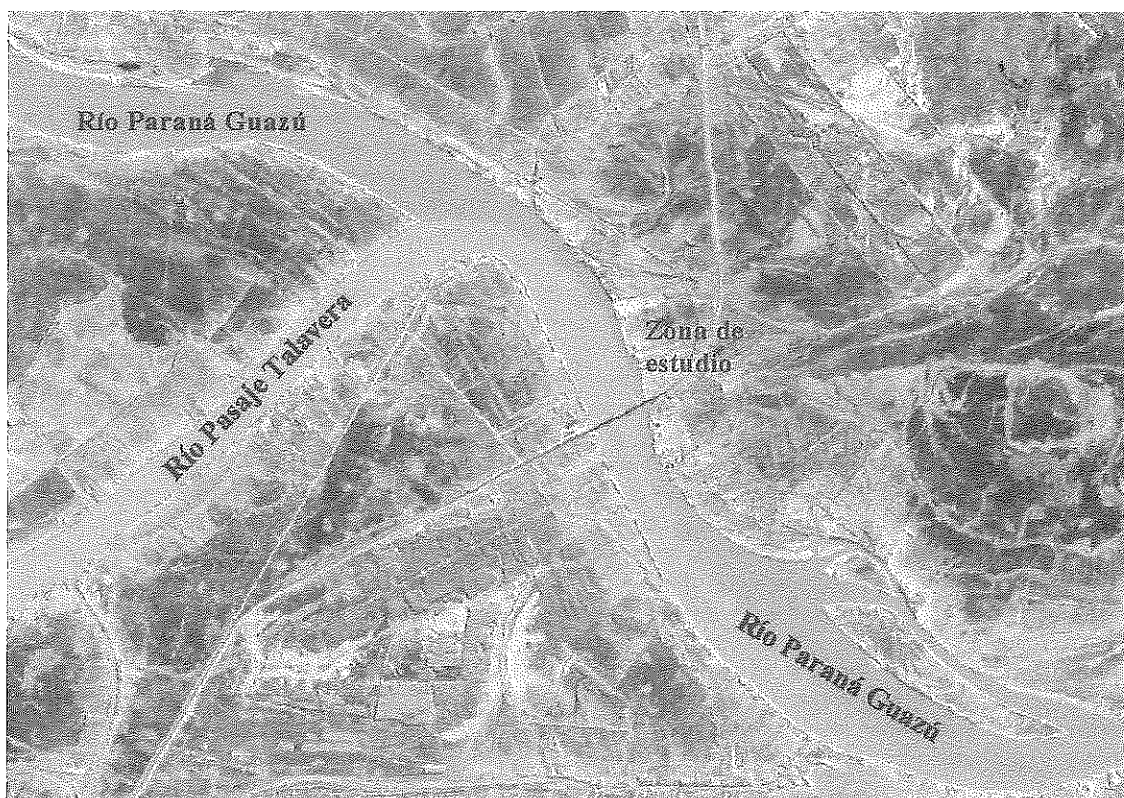


Figura N° 1: Localización de la zona de estudio.

Con el fin de determinar el comportamiento de la costa en la margen izquierda del río Paraná Guazú, y los parámetros de cálculo para las obras a llevar a cabo en la zona, se realizaron los estudios tendientes a conocer el funcionamiento hidráulico y morfológico del tramo de río en cuestión.

## 2. RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE ANTECEDENTES

La recopilación y análisis de antecedentes involucró los siguientes ítems:

- Datos hidrométricos:
  - Niveles líquidos en la Estación Canal Nuevo en los años 2003 y 2004.
  - Estadística de niveles en la Estación Canal Nuevo para el período 1983-2003.

- Datos de la estación de aforos localizada sobre el río Paraná Guazú entre la desembocadura del río Pasaje Talavera y el puente Zárate-Brazo Largo. Estación de aforo N° 4002 operada por EVARSA para la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación. Período 1993-2003.
- Niveles líquidos en la Estación Zárate desde el año 1978.
- **Cartografía histórica:**
  - Río Paraná Guazú de Km 203 al Km 179 entre Puerto Constanza y Río Pasaje Talavera. Escala 1:10000. Año 1959. Ministerio de Obras y Servicios Públicos – Secretaría de Estado de Obras Públicas – Dirección Nacional de Construcciones Portuarias y Vías Navegables – Dirección de Estudios y Dragados del Río de la Plata.
  - Río de la Plata y Delta del Paraná - Plano General. Escala 1:100000. Año 1960. Ministerio de Obras y Servicios Públicos – Secretaría de Estado de Obras Públicas – Dirección Nacional de Construcciones Portuarias y Vías Navegables – Dirección de Estudios y Dragados del Río de la Plata.
- **Estudios previos en la zona:**
  - Río Paraná Guazú Km 180 a Km 184 – Diagnóstico de Evolución Morfológica. Serman & Asociados S.A. – Consultora. Octubre de 1998. En dicho estudio hay información batimétrica del río Paraná Guazú llevada a cabo para el mismo, así como de trabajos llevados a cabo por Hidrovía S.A. durante el año 1998.
  - Río Paraná Guazú - Brazo Largo. “Recreo lo de Maxi”. Relevamiento batimétrico. HIDRA 2003.
  - Estudio de “Desmoronamientos de costas en la margen izquierda del Río Paraná Guazú (Km. 180,5 – 181)”. Informe Final LHA-231-01-2004. Marzo de 2004. Laboratorio de Hidráulica. Instituto Nacional del Agua.
- **Fotos aéreas de la Dirección de Geodesia de la Provincia de Buenos Aires, en las siguientes fechas:**
  - 20 de mayo de 1968 (19a-1037, 21-1214)
  - 18 de abril de 1969 (20-7161, 20-7163)
  - 25 de julio de 1981 (C745-56, C746-57, C746-59)
  - 1 de agosto de 1982 (C747-61)
  - 12 de abril de 1995 (C07-08, C07-10, C07-12)
- **Imagen satelital LANDSAT 7 ETM (225-84) en la siguiente fecha:**
  - 27 de abril de 2001

### **3. ESTUDIO HIDRÁULICO Y MORFOLÓGICO**

Si bien en el tramo del río Paraná Guazú localizado frente al predio, las secciones transversales presentan un sector ancho con profundidades elevadas, del orden de 25 metros, hay una tendencia a que las corrientes principales se recuesten sobre la margen izquierda, como consecuencia de la configuración en planta del río, y a la presencia de la desembocadura del río Pasaje Talavera sobre la margen derecha, inmediatamente aguas arriba de la zona de estudio.

En los puntos que siguen se presentan una serie de estudios y consideraciones con el objeto de determinar el comportamiento hidráulico y morfológico del tramo de río en cuestión.

### **3.1. Caracterización General**

La zona bajo estudio se localiza en el Delta del río Paraná. Este Delta abarca una franja de tierras bajas, con una superficie total aproximada de 1500000 hectáreas, y está conformado por numerosos cursos de agua de distinta magnitud, naturales y artificiales, cuyo comportamiento hidrodinámico está sujeto a las condiciones de caudales aportados por los ríos Paraná y Uruguay, y a los niveles en el Río de la Plata.

El aporte líquido fundamental al sistema está dado por el río Paraná, siendo sus dos brazos principales en la zona inferior el Paraná de las Palmas y el Paraná Guazú, siendo este último el que lleva una porción mayor del caudal total del Paraná.

En el extremo inferior, el nivel de agua en el río de la Plata está determinado por la descarga fluvial, el régimen de mareas y los factores atmosféricos o meteorológicos, siendo la zona del Delta del Paraná afectada por la onda de marea en el río de la Plata, ya que la misma 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, aunque durante las grandes crecidas, la amplitud de la onda propagada hacia aguas arriba se atenúa más rápidamente.

El principal agente atmosférico que incide sobre el nivel del agua es la acción del viento, cuyo rasgo más saliente en la región es la existencia de las llamadas "sudestadas", las que generan incrementos de los niveles líquidos al dificultar el desagüe de los ríos Paraná y Uruguay.

Las crecidas extraordinarias de los años 1982/83, 1992 y 1998 constituyen los eventos modernos más significativos desde el punto de vista de los caudales aportados por el río Paraná. La crecida de 1983 tuvo como rasgo característico su gran duración (el pico se mantuvo durante aproximadamente cuatro meses), además de la magnitud de los niveles líquidos alcanzados. Esta permanencia generó importantes estados de inundación en las planicies y zonas de islas. La crecida de 1992 si bien alcanzó niveles mayores que la de 1983 en algunas estaciones (por ejemplo, Rosario), tuvo las características de una onda de crecida normal u ordinaria. Desde el punto de vista de los niveles líquidos alcanzados, a ambas crecidas se les puede asignar una recurrencia semejante (alrededor de 50 años), mientras que desde el punto de vista de la duración, la de 1983 tiene recurrencia milenaria.

### **3.2. Evolución morfológica del río en planta a partir del análisis de fotografías aéreas entre 1968 y 1995**

Para llevar a cabo esta tarea se implementó un sistema de información geográfico (GIS) de la zona de estudio. En el mismo se volcó la información del Instituto Geográfico Militar, a partir de la cual se procedió a la georreferenciación de las fotografías aéreas, con el fin de tener toda la información en el mismo sistema de coordenadas y poder realizar la comparación de las líneas de costa para las distintas fechas, y de esa manera observar el comportamiento morfológico en planta del río en la zona y evaluar su tendencia futura.

En la Figura N° 2 se presenta una imagen con la información volcada al sistema, en la que se aprecia la zona en estudio.

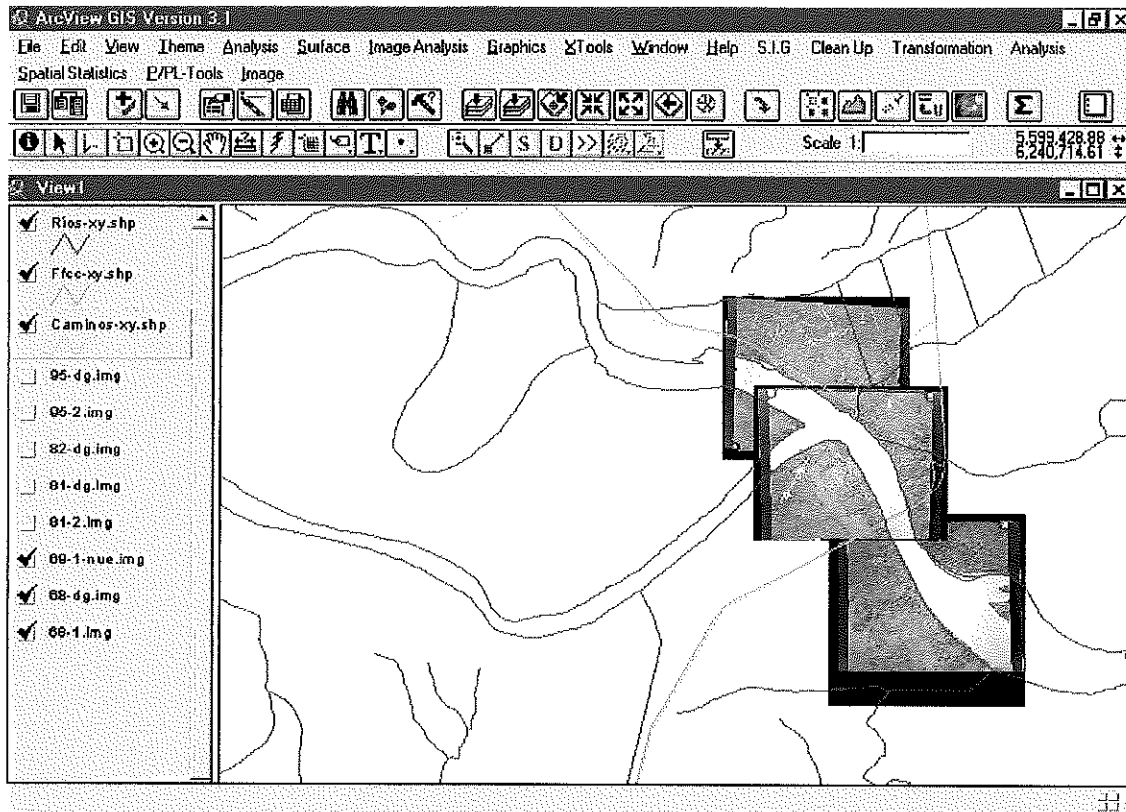


Figura N° 2: Sistema de Información Geográfico de la zona de estudio.

Con el objeto de evaluar la evolución temporal de las costas se consideraron las fotografías aéreas de la totalidad de los vuelos disponibles, que fueron las de los años 1968, 1981 y 1995, con intervalos entre fotografías de aproximadamente 13 y 14 años. Las Figuras 3, 4 y 5 muestran cada una de las fotografías georreferenciadas, sobre las que se han digitalizado las líneas de costa.



Figura N° 3: Fotografía de 1968 con la línea de costa.



Figura N° 4: Fotografía de 1981 con la línea de costa.

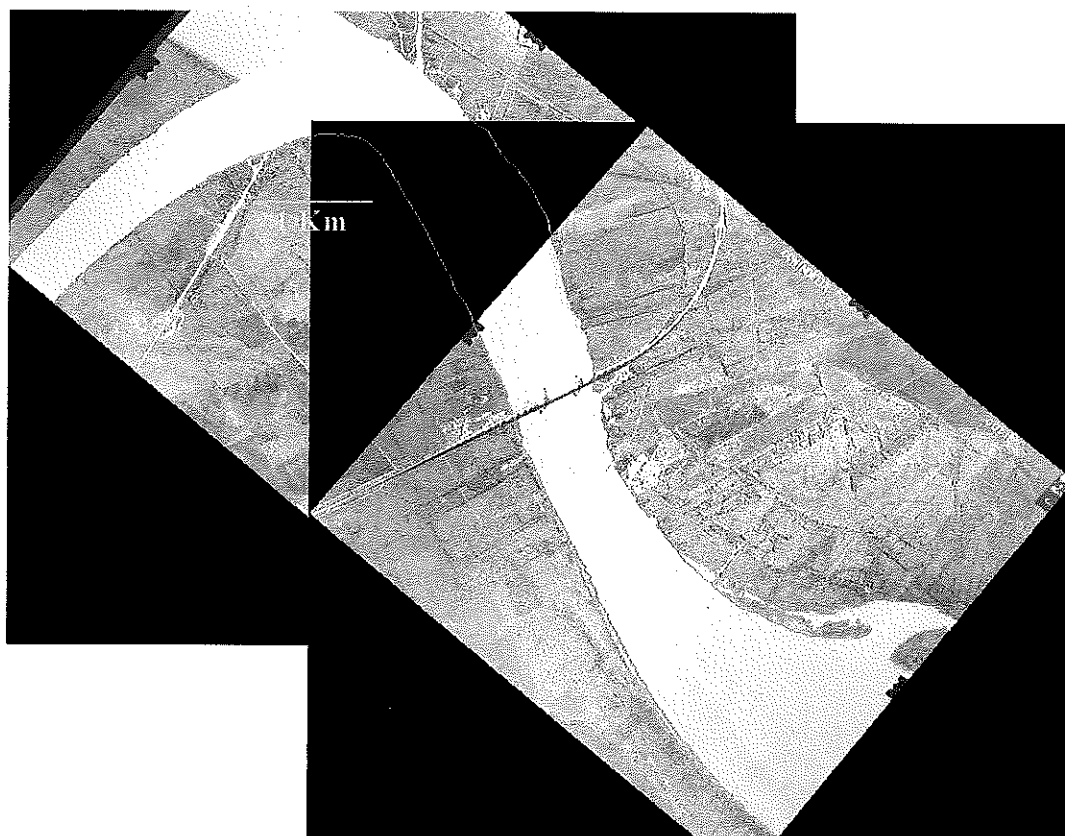


Figura N° 5: Fotografía de 1995 con la línea de costa.

En la Figura N° 6 se han superpuesto las líneas de costa digitalizadas para las tres fechas (rojo: 1968, azul: 1981 y verde: 1995), en las que se pueden observar los cambios acontecidos en ambas márgenes del río.

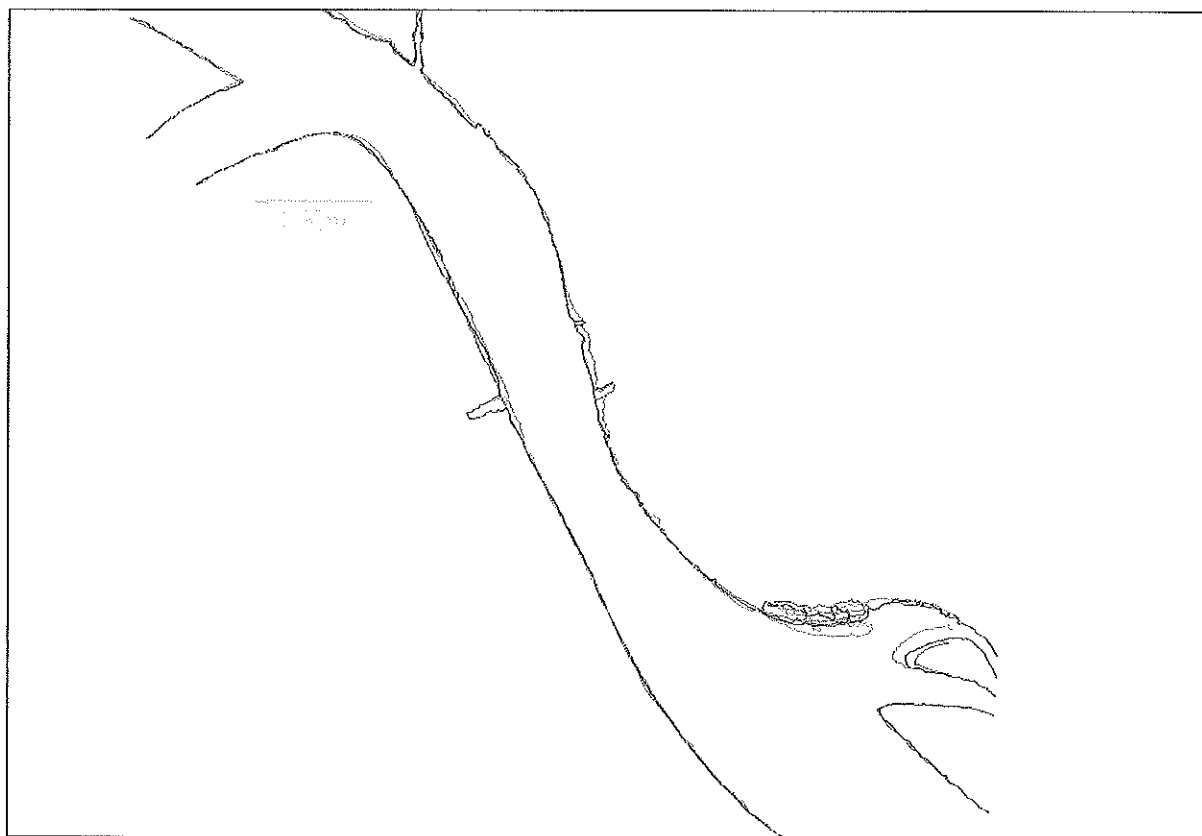


Figura N° 6: Líneas de costa para los años 1968, 1981 y 1995.

Los cambios observados en la Figura N° 6 se pueden agrupar, de acuerdo a la zona afectada, de la siguiente manera:

- Margen derecha del río Paraná Guazú:
  - Desde aguas abajo de la desembocadura del río Pasaje Talavera, hasta aguas abajo del puente Zárate-Brazo Largo, se aprecia una zona de depósito de sedimentos, que motiva el progresivo avance de la margen. Este efecto está asociado a la configuración en planta de la red de escurrimiento.
- Margen izquierda del río Paraná Guazú:
  - Frente a la desembocadura del río Pasaje Talavera y aguas abajo del arroyo Brazo Largo, debido por una parte a la curvatura del río Paraná Guazú, y por otra, a la afluencia del río Pasaje Talavera, la corriente se recuesta sobre la margen izquierda, y por ello en ese sector del cauce se tienen las mayores profundidades.
  - En la zona antes indicada, se observa en la Figura N° 6, un progresivo retroceso de la costa. Si bien este fenómeno se aprecia a partir de la comparación de las fotografías de 1968 y 1981, el avance es notoriamente mayor entre 1981 y 1995, en el que el retroceso es del orden de los 30 metros hasta aproximadamente 1 kilómetro aguas abajo de la desembocadura del arroyo Brazo Largo.

- En las adyacencias del puente, hasta aproximadamente 1 kilómetro aguas arriba y 500 metros aguas abajo, se aprecia entre las líneas de costa de los años 1981 y 1995 un notorio retroceso de la costa que en algunos sectores supera los 70 metros.

Es interesante destacar que entre las fotografías de 1981 y 1995 ocurrieron dos crecidas de recurrencia importante, mencionadas en el punto anterior.

Con el fin de apreciar en detalle los cambios experimentados por las márgenes en correspondencia con las progresivas del río entre las que se localiza el predio de la empresa Del Guazú S.A., se ha realizado la Figura N° 7, en la que sobre la imagen satelital del año 2001, también se han volcado las líneas de costa obtenidas de la digitalización de las fotografías aéreas de los años 1968, 1981 y 1995.

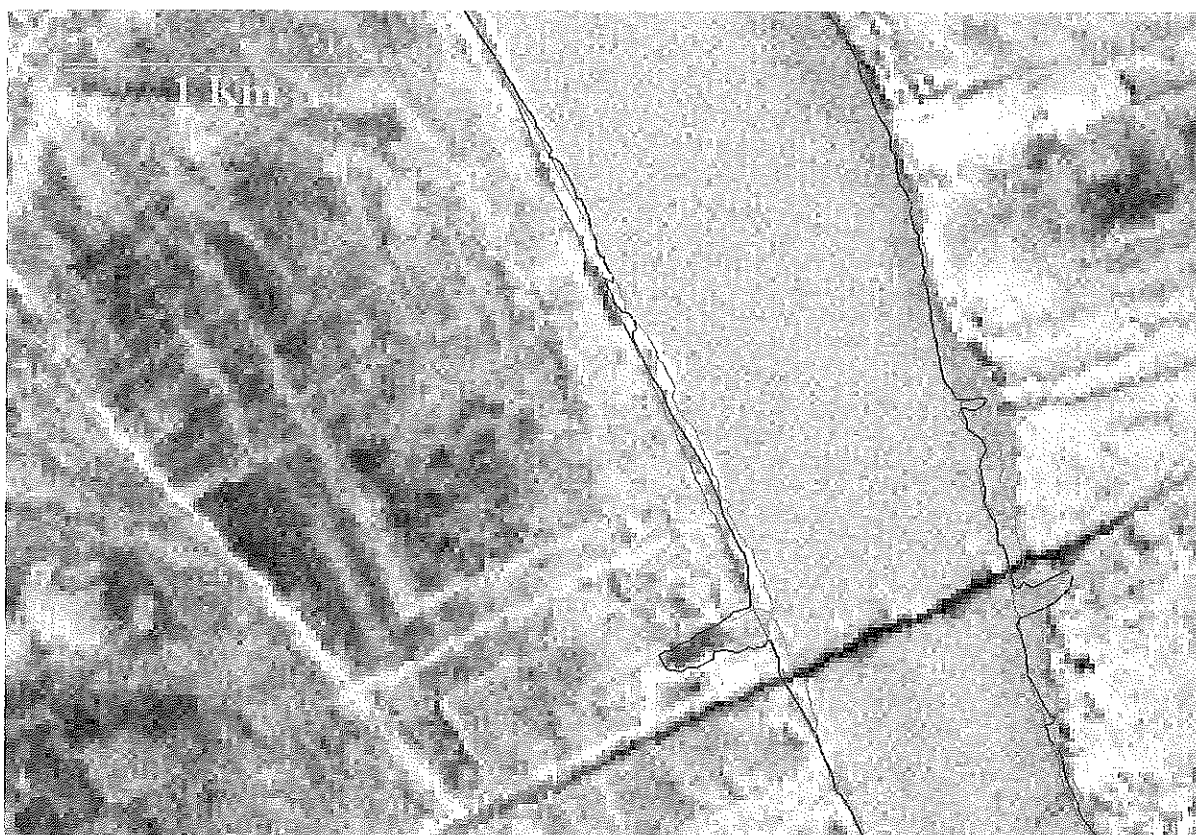


Figura N° 7: Detalle de las líneas de costa para los años 1968, 1981 y 1995.

Respecto de la imagen satelital del año 2001, puede decirse que si bien para la determinación de la costa a partir de este tipo de información hay dificultades por la escasa definición de las imágenes Landsat para llevar a cabo este tipo de tareas (se trabajó con la banda pancromática con tamaños de pixeles de 15 x 15 metros), se puede apreciar que se mantiene la tendencia de lo observado en las fotografías aéreas entre 1968 y 1995.

### **3.3. Comentarios a partir de los datos batimétricos**

En la Figura N° 8 se indica la zona en la que se realizaron los relevamientos batimétricos del año 2003, en los cuales, a 100 metros de la costa, se han registrado profundidades entre 25 y

40 metros. Otra cuestión interesante a destacar de esta información, es que en algunos sectores del cauce se tienen pendientes del lecho mayores a 1:1,5 (1 en vertical y 1,5 en horizontal) a 20, e incluso 30 metros de profundidad.

Entre 50 y 150 metros del extremo de aguas abajo del relevamiento batimétrico, en correspondencia con un sector cóncavo de la costa, se observa que los perfiles transversales presentan a aproximadamente 23 metros de profundidad, un sector playo de unos 40 metros de ancho y a continuación un continuo descenso del lecho hasta superar los 40 metros de profundidad.



Figura N° 8: Imagen Satelital Landsat 27 de abril de 2001. Línea de costa 1995. Batimetría 2003.

En la Figura N° 9 se presenta la batimetría de la zona en el año 1959. Se observa que en correspondencia con la zona donde se registró el retroceso de la costa en la margen izquierda, inmediatamente aguas arriba del puente, el patrón morfológico del lecho presentaba las zonas de mayor profundidad (mayores a 100 pies), recostadas sobre la línea de costa de la izquierda, con un descenso brusco del lecho y sin que se observen indicios de sectores del cauce playos entre la zona de máxima profundidad y la margen.

Los cambios en las pendientes de los taludes que conforman las márgenes, que se observan en la batimetría del año 2003, son un indicio de los procesos de desmoronamiento de costa determinados a partir del análisis de las fotografías aéreas.



Figura N° 9: Batimetría histórica de 1959.

### 3.4. Análisis de datos de la estación de aforos de la SSRH en el río Paraná Guazú

En el río Paraná Guazú la Empresa EVARSA para la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación ha operado entre los años 1993 y 2003 la estación de aforos N° 4002 Brazo Largo - Paraná Guazú (localizada entre la desembocadura del arroyo Brazo Largo y el puente Zárate-Brazo Largo y cuyas coordenadas son: latitud S 33° 53' 12", longitud O 58° 54' 30").

En la Tabla N° 1 se vuelcan los valores registrados en los aforos de niveles líquidos, caudales, áreas mojadas, anchos superficiales, caudales sólidos en suspensión, tanto de material fino (arcillas y limos) como grueso (arenas), y velocidades medias y máximas en la sección.

A partir de los datos de los aforos se tiene que las velocidades medias medidas variaron entre 0.497 y 1.579 m/s, mientras que las velocidades máximas lo hicieron entre 0.789 y 2.79 m/s.

Fecha	Altura	Caudal	Area	Ancho Sup.	Qs Fino	Qs Grueso	Vel. Media	Vel. Max.
18/02/93	1.2	18285.64	14906.79	863.4			1.227	1.545
17/03/93	0.9	18513.38	15190.36	859.4			1.219	1.593
06/05/93	1.45	16345.13	15710.33	864.3			1.04	1.319
22/07/93	0.95	13677.95	15930.73	855.1			0.859	1.189
15/09/93	0.3	12130.39	15254.15	835.1	747.4	46.2	0.795	1.12
09/11/93	0.925	18710.06	15659.14	859.2	2004.9	369.4	1.195	1.571
27/01/94	0.7	13784.13	15493.66	856.1	2247.4	68.9	0.89	1.155
22/03/94	1.2	16104.7	15704.44	867	4246.6	150	1.025	1.38
18/05/94	0.6	14852.52	15096.83	839.2	1510.7	185.8	0.984	1.224
13/07/94	0.75	15735.89	15374.8	854.4	1397.5	379.7	1.023	1.355
22/09/94	0.575	9817.36	16146.44	841.2	436.2	15.8	0.608	0.789
08/11/94	0.4	13604.92	15488.7	841	1159.3	64	0.878	1.193
10/01/95	0.9	13786.7	16369.57	859.8	3137.7	29.5	0.842	1.092
28/03/95	1.075	23763.9	16228.37	864.5	3929.6	1268.9	1.464	1.921
31/05/95	0.65	19118.8	15227.63	843.1	1827.7	796.1	1.256	1.528
18/07/95	0.775	14455.98	16061.8	855.5	986.8	69.1	0.9	1.161
19/09/95	0.6	11959.82	16201.72	852.4	769.2	46	0.738	0.98
14/11/95	0.425	16944.12	15320.32	846	2895.1	349.9	1.106	1.532
16/01/96	0.1	11138.94	15096.67	840.8	821.3	26.4	0.738	1.066
13/03/96	0.525	16074.78	15441.42	847.4	3650	111.9	1.041	1.39
14/05/96	0.785	18678.43	15784.32	859.1	2123.9	317.8	1.183	1.644
07/07/96	0.475	12416.39	15511.88	848.4	897.5	57.9	0.8	1.139
04/09/96	0.78	14301.1	15812.6	854	958.2	81.5	0.904	1.191
13/11/96	0.825	16124.68	15816.87	858.1	1612.5	161.2	1.019	1.441
21/01/97	0.6	18179.44	15865.55	853.6	3419.4	332.2	1.146	1.649
26/03/97	1.365	26308	16779.42	868.9	4197.4	1534.7	1.568	2.197
22/05/97	0.8	11319.24	15633.38	860.9	954.4	14.2	0.724	0.945
29/07/97	0.775	17737.41	15895.28	860.1	1657.4	353.1	1.116	1.692
10/09/97	0.65	13275.98	15730.56	859.1	929.3	119.5	0.844	1.252
26/11/97	1.5	20340.97	16603.47	859	1631.3	617.4	1.225	1.746
22/01/98	1.929	27296.2	17285.1	892.66	1827.1	1559.2	1.579	1.943
12/03/98	2.12	24493.55	17419.83	874	1921.5	1459.3	1.406	1.929
21/05/98	2.175	27583.2	20337.35	861.9			1.356	2.79
08/07/98	1.8	23988.61	16692.35	884			1.437	1.909
09/09/98	1.34	16984.5	16828.98	850	986.8	150.6	1.009	1.43
11/11/98	1.25	22406.2	17900.26	875	1433.4	1116.8	1.252	1.87
07/01/99	0.6	15881.1	16640.63	844.4	1583.5	152.3	0.954	1.46
18/03/99	0.966	14448.32	16234.65	840	1319.6	119.4	0.89	1.192
05/05/99	0.878	16006.75	15866.49	848	3273.4	289.6	1.009	1.427
28/07/99	1.045	17576.62	16141.88	848.5	1875.8	372	1.089	1.427
22/09/99	0.486	13206.54	15842.02	846	1133.5	120.5	0.834	1.176
11/11/99	0.1	11557.5	15919.42	836.3	670.5	6.5	0.726	0.97
26/01/00	0.35	12006.6	15089.5	808.7	705.6	13.4	0.796	1.09
29/03/00	0.6	12299.4	16270.21	745	4775.9	23.6	0.756	1.12
23/05/00	0.7	12736.1	16272.25	848.1	3125.2	17.4	0.783	1.1
26/07/00	0.74	14708.7	16332.24	832.9	905.6	61	0.901	1.23
19/09/00	0.45	13344.8	16504.25	911.36	998.49	29.93	0.809	1.23
09/01/01	1.2	13667.8	16889.01	867.57	1282.026	20.79	0.809	1.25
28/03/01	1	18811.5	15993.99	880.72	5661.205	306.32	1.176	1.53
18/05/01	0.55	16789.1	16114.48	866.34	2765.602	327.87	1.042	-99
05/07/01	1	10622.9	16373.7	871	512.675	2.61	0.649	1.02
13/09/01	0.15	10436.2	15699.99	852.89	534.256	35.09	0.665	0.95
20/11/01	0.28	13073.5	15974.74	865.17	949.943	61.42	0.818	1.29
31/01/02	0.4	8328.8	16763.21	871.85	2171.995	126.27	0.497	1.07
19/03/02	1.3	16608.4	15562.75	826.05	4201.127	266.45	1.067	1.71
27/05/02	0.75	17500.3	15940.1	857.23	4290.945	307.93	1.098	1.76
16/07/02	0.6	17178.1	16035.41	863.91	1034.99	338.72	1.071	1.78
12/09/02	0.24	12840.7	15240.64	803.29	608.86	32.82	0.843	1.49
06/11/02	1.27	15064	16847.82	872.42	1041.585	89.22	0.894	1.39
30/01/03	0.6	17251.08	15782.29	858.27	3352.443	267.95	1.093	1.81
26/03/03	0.78	19087.79	16834.35	867.96	3347.497	119.33	1.134	1.6
20/05/03	1.7	18606	17536.98	861.5	1082.711	166.3	1.061	1.53
03/07/03	0.7	15166.54	16530.78	868.75	1050.596	90.958	0.917	1.36
25/09/03	0.48	10355.06	16397.74	865.71	618.591	17.92	0.631	0.96
28/11/03	0.9	9009.378	17365.33	861.42	328.147	13.44	0.519	1

Tabla N° 1: Estación de aforo Brazo Largo - Río Paraná Guazú.

En la Figura N° 10 se presenta una correlación entre los caudales aforados y las velocidades medidas, tanto medias como máximas, pudiéndose apreciar que hay una tendencia clara, en la que para caudales altos las velocidades medias son del orden de 1.5 m/s mientras que las máximas alcanzan los 2 m/s. Estos valores son notoriamente mayores a los correspondientes a las condiciones medias del río, por lo que durante eventos de crecida, pueden desarrollarse procesos erosivos en las márgenes expuestas a las corrientes.

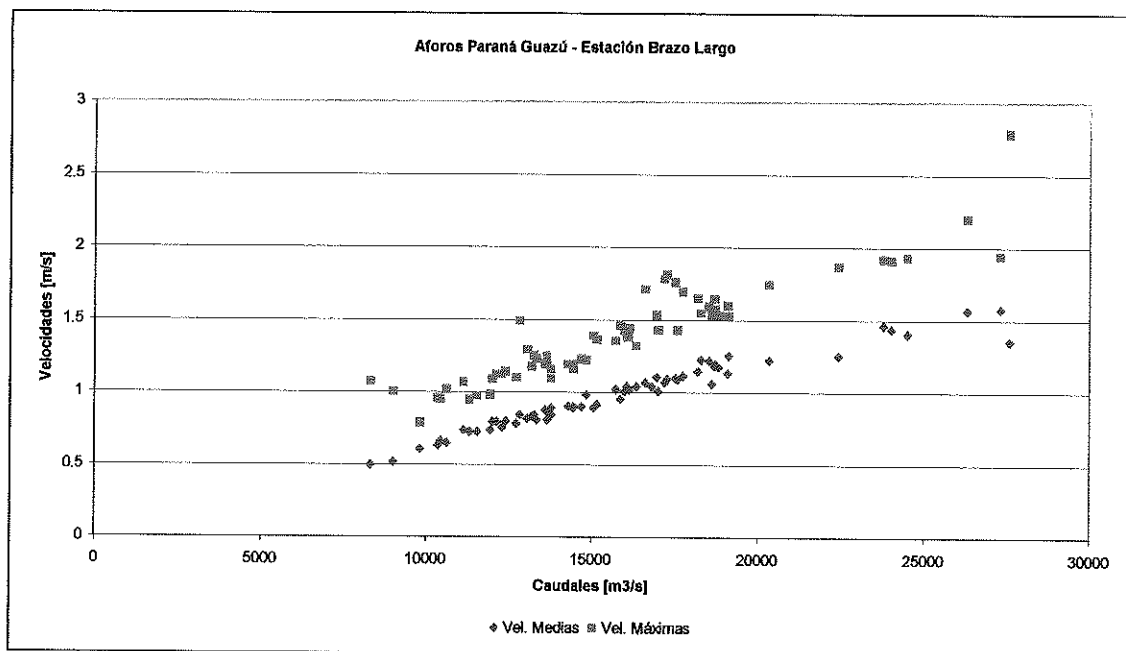


Figura N° 10: Correlación Caudales-Velocidades

### 3.5. Modelación hidrodinámica del Delta del Paraná

El cumplimiento de los objetivos del presente estudio requirió el conocimiento del comportamiento hidrodinámico del río Paraná Guazú y sus afluentes. Con dicho fin se empleó el modelo del Delta del Paraná implementado en el INA. Para dicha modelación se utilizó el programa MIKE 11, que es un software desarrollado por el Danish Hydraulic Institute (DHI) para la simulación de escurrimientos, transporte de sedimentos y calidad de aguas en ríos. El módulo hidrodinámico, que fue el utilizado en esta etapa del proyecto, ha sido desarrollado mediante un esquema en diferencias finitas para escurrimientos impermanentes en ríos.

El programa es capaz de describir condiciones de flujo subcrítico o supercrítico a través de modelos numéricos, los cuales se adaptan a las condiciones de flujo local (en tiempo y espacio). El esquema computacional en el que se basa el MIKE 11 permite aplicarlo a un escurrimiento unidimensional, cuya solución se basa en las ecuaciones de continuidad y momenta, en un esquema en diferencias finitas.

El software incluye también módulos computacionales avanzados para estudiar el escurrimiento sobre estructuras hidráulicas, siendo posible analizar la operación de las mismas. Además, entre otras aplicaciones, permite considerar descargas laterales puntuales o distribuidas y evaluar el comportamiento de planicies de inundación en situaciones de crecidas y su interacción con el cauce principal.

La utilización del modelo hidrodinámico permite la evaluación de niveles, caudales y velocidad de un escurrimiento unidimensional en diferentes secciones del río, a través del tiempo.

Para la implementación del modelo de todo el Delta del Paraná, se procedió a representar mediante un gran número de secciones transversales, los principales cursos de agua. En su extremo de aguas arriba, se ha simulado por un lado el tramo del río Paraná desde la ciudad de Paraná, hasta el comienzo del Delta, y por otro, el río Uruguay, desde aguas abajo de la presa de Salto Grande.

Las Figuras N° 11 y 12 muestran respectivamente, las plantas de la totalidad de la zona modelada y del delta medio e inferior, en las que se aprecian los cursos ingresados y la red de canales representada. Como fondo se ha incluido la imagen satelital del año 2001, con el fin de poner de manifiesto el grado de detalle de la implementación del modelo.

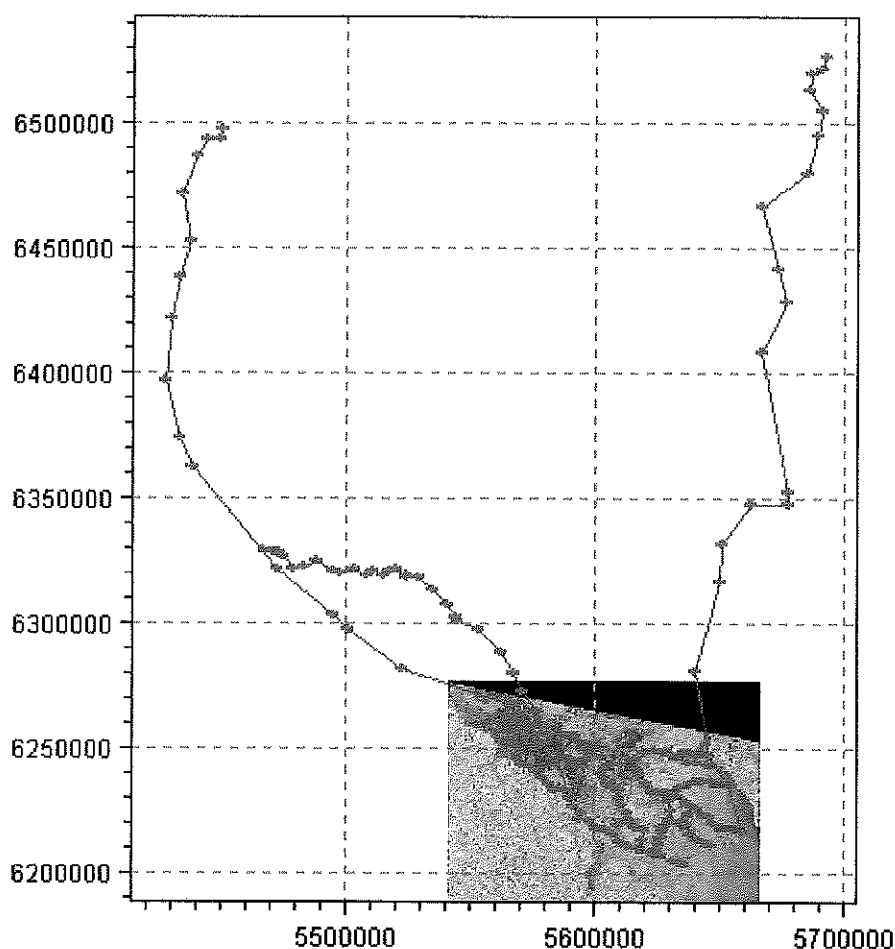


Figura N° 11: Planta del modelo de la totalidad del Delta del Paraná

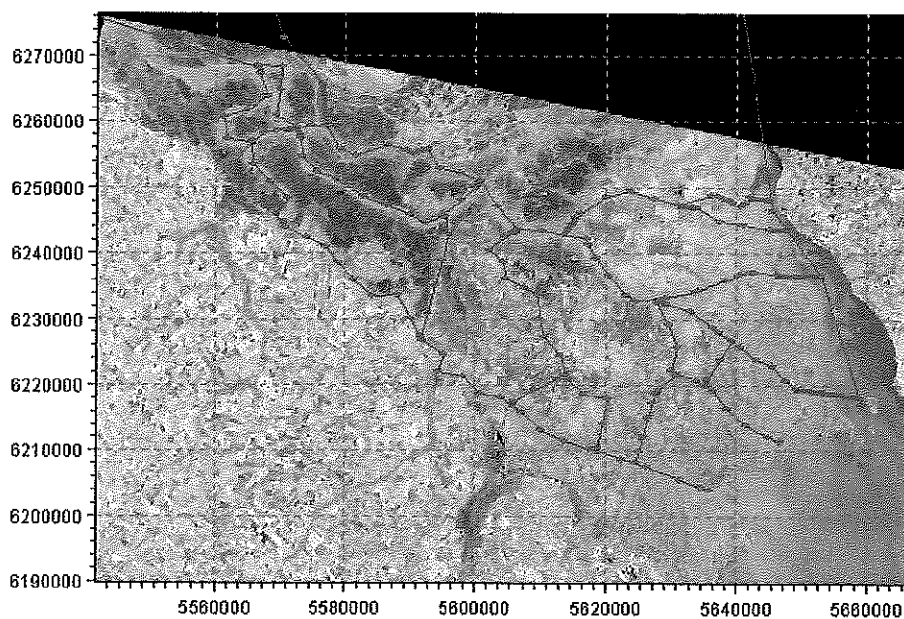


Figura N° 12: Planta del modelo del Delta Medio e Inferior

Las condiciones de borde a considerar en las simulaciones, consistieron de caudales en los extremos de aguas arriba de la modelación y niveles líquidos en los extremos de aguas abajo.

Para esta aplicación, el borde aguas arriba del modelo se consideró en la ciudad de Rosario, y se consideraron tres condiciones de crecida, asumiéndose en esta sección caudales de 20000, 40000 y 60000 m<sup>3</sup>/s. El primero de los valores se corresponde a una crecida ordinaria del río, algo mayor al módulo, mientras que el último se ubica entre los máximos registrados en las crecidas más importantes. Como condición de borde superior en el río Uruguay se utilizó un caudal medio, y aguas abajo se consideró el nivel en el río de la Plata correspondiente a una recurrencia de 1 año.

A partir de las situaciones bajo las que se realizaron las simulaciones, se obtuvieron los caudales en tramos de interés para su posterior utilización como condiciones de contorno en el modelo hidromorfológico del río Paraná Guazú. Los resultados obtenidos se resumen en la Tabla N° 2, que se presenta a continuación.

Lugar / Caudales Paraná	Caudal (m <sup>3</sup> /s)		
	60000	40000	20000
aguas abajo confluencia Guazú - Ibicuy	28500	18500	8600
Guazú aguas abajo Pasaje Talavera	43600	28400	13400
Guazú aguas abajo Carabelas Grande	43200	28300	13400
Guazú aguas abajo Paraná Bravo	26500	17500	7700
Guazú aguas abajo Barca Gde - Miní	19800	13200	5100

Tabla N° 2: Resultados de la modelación de la totalidad del Delta del Paraná.

En la tabla precedente resulta de interés observar la importancia de los caudales aportados al Paraná Guazú desde el Pasaje Talavera, para los tres casos analizados. Además, comparando los valores con los de la Tabla N° 1, se observa que existen varios aforos en el Paraná Guazú del orden del caudal en la zona correspondiente a un caudal en Rosario de 20000 m<sup>3</sup>/s (13400 m<sup>3</sup>/s), y algunos pocos correspondientes al caudal en Rosario de 40000 m<sup>3</sup>/s (28400 m<sup>3</sup>/s). No hay aforos en la zona equivalentes al caudal en Rosario de 60000 m<sup>3</sup>/s (43600 m<sup>3</sup>/s).

Por otra parte, con los datos de altura registrados en los aforos, se realizó una comparación con los registros de niveles en Zárate, pudiéndose apreciar un comportamiento similar en ambos sectores del Delta. Como se indicara en puntos anteriores, los niveles están influenciados por la marea en el río de la Plata, por lo que no se puede establecer una ley que relacione las alturas con los caudales.

El comportamiento del río Paraná a la altura de Rosario ya es independiente del efecto de la marea, y el análisis de los niveles líquidos es un indicador de las condiciones de crecida.

En la Figura N° 11 se presentan los registros de niveles en Zárate y Rosario del año 1994 y los primeros meses de 1995. Si se tiene en cuenta que el desfase para una crecida ordinaria entre Rosario y Zárate es de 5 a 7 días, se aprecia que si bien, hay una línea de tendencia media de niveles en Zárate que acompaña la crecida registrada en Rosario, las alturas de agua están notoriamente influenciadas por los niveles de marea en el río de la Plata.

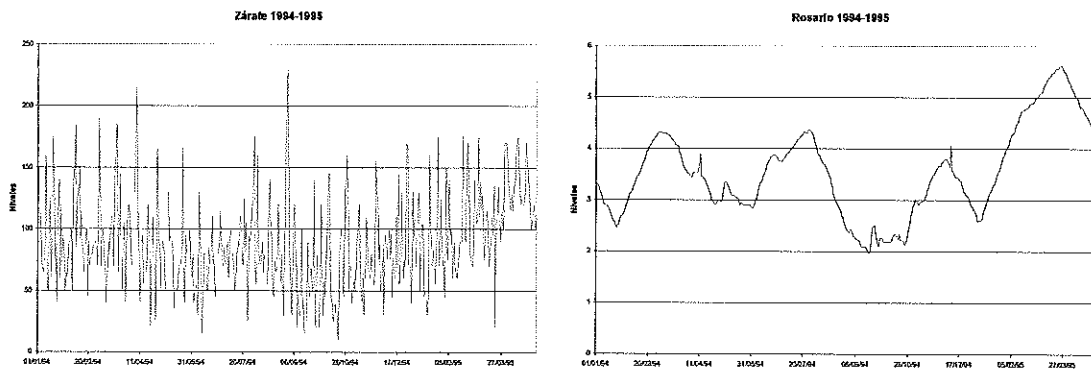


Figura N° 11: Niveles en Zárate y Rosario (1994-1995)

La metodología de trabajo consistente en la aplicación de un modelo hidrodinámico regional a partir del cuál se obtienen los parámetros a utilizar en un modelo hidromorfológico de mayor detalle, se justifica debido a que este último es más complejo, y para evitar inestabilidades numéricas y lograr resultados representativos, los tiempos de las corridas deberían ser demasiado grandes e incompatibles con el desarrollo del estudio.

### 3.6. Modelación hidrodinámica y morfológica del río Paraná Guazú

A partir de los resultados obtenidos con el modelo general del Delta del Paraná descrito, se implementó, sólo para la rama correspondiente al río Paraná Guazú, un modelo morfológico del río. Esta herramienta de cálculo permite determinar la erosión en función del tiempo en una determinada sección, para las condiciones de cálculo que se establezcan. También calcula el transporte sólido en cada sección de cálculo.

El modelo utilizado puede ser usado en dos modos: explícito y morfológico. En el primer caso se requiere como dato de entrada la salida de un modelo hidrodinámico en lo que hace a niveles y caudales líquidos, en el tiempo y el espacio. No hay actualización de los datos hidrodinámicos a partir de los cambios en las condiciones de transporte sólido calculados en base a dichos datos. En estas condiciones, los resultados obtenidos son relaciones de volúmenes de sedimento transportado, y determinación de zonas y volúmenes de depósito o de erosión.

En el modo morfológico, el transporte de sedimentos es calculado en tandem con el hidrodinámico. En este caso los resultados obtenidos son las tasas de transporte de sedimento, cambios en el nivel del lecho, cambios en la resistencia al escurrimiento, dimensiones de formas de fondo, etc. En estas condiciones, que fueron las utilizadas para el presente estudio, se logra una representación muy superior de la dinámica de los procesos aluviales.

El modelo requiere la selección de una ecuación de transporte sólido. En función de numerosos estudios realizados en el río Paraná, se ha seleccionado la fórmula de Engelund – Hansen, reconocida por su correcta representación de los procesos de transporte en ríos de arena como el que nos ocupa. Esta fórmula permite calcular el transporte total de arenas.

Las condiciones de borde líquidas del modelo se tomaron del modelo general del Delta, para cada caudal de análisis. El modelo morfológico requiere además de una condición de borde de caudal sólido. La misma se efectivizó calculando en la sección de arranque el transporte sólido mediante la fórmula de Engelund-Hansen, ya mencionada. Se utilizó un material del lecho correspondiente a arenas de diámetro medio representativo de 200  $\mu\text{m}$ .

En la Figura N° 12 se presenta un esquema de la planta del modelo del río Paraná Guazú implementado. La sección de arranque se ubicó en el río Paraná Guazú, aguas abajo de su confluencia con el río Ibicuy. Se modelaron además los aportes/salidas de agua a/desde el río (aporte desde el Pasaje Talavera, salidas al Carabelas Grande, Paraná Bravo, Barca Grande y Paraná Miní).

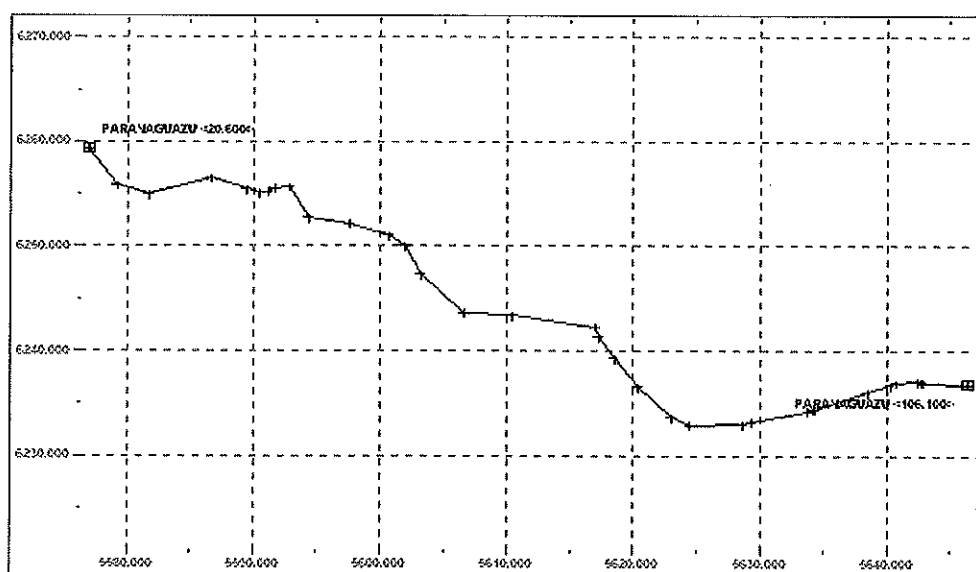


Figura N° 12: Planta modelo morfológico

En una primera etapa, el modelo del río Paraná Guazú quedó conformado por las mismas secciones que tenía en el modelo general del Delta. Este modelo no tenía una sección moderna correspondiente a la zona en estudio. En los gráficos siguientes se presentan los resultados de la erosión en una sección ubicada unos 100 metros aguas abajo de la afluencia del Pasaje Talavera al Paraná Guazú. En dicha sección, seguramente extraída de un relevamiento de mucha antigüedad, la cota del talweg era de aproximadamente  $-6.0$  m, muy por encima de la cota del lecho que presenta hoy el río en esa zona (del orden de los  $-30$  m). No obstante se presentan los resultados pues resultan de interés para análisis posteriores.

La Figura N° 13 presenta la evolución en función del tiempo de la cota del talweg del río en la sección mencionada, para la condición de  $Q_{\text{Paraná}} = 20000 \text{ m}^3/\text{s}$ . Se observa el fuerte proceso erosivo generado, alcanzando en 6 meses una cota del orden de los  $-18.5 \text{ m}$ .

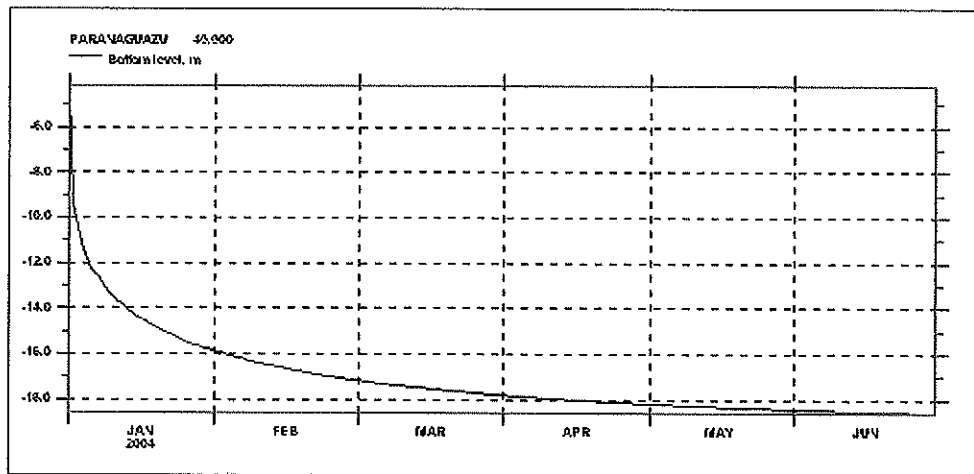


Figura N° 13: Erosión lecho aguas abajo Pasaje Talavera,  $Q=20000 \text{ m}^3/\text{s}$

La Figura N° 14 es análoga a la anterior, pero para la condición de  $Q_{\text{Paraná}} = 40000 \text{ m}^3/\text{s}$ . Se observa también un proceso erosivo severo, alcanzándose en este caso la cota máxima de erosión (algo mayor que  $-21 \text{ m}$ ) en tres meses. Los cambios morfológicos en el tramo aguas arriba hacen que luego se verifique un proceso de sedimentación.

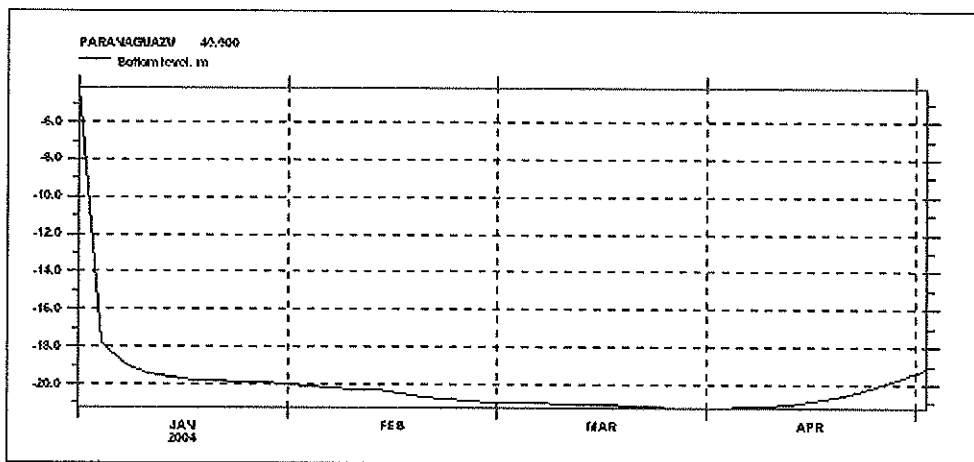


Figura N° 14: Erosión lecho aguas abajo Pasaje Talavera,  $Q=40000 \text{ m}^3/\text{s}$

Finalmente la Figura N° 15 corresponde a la situación de  $Q_{\text{Paraná}} = 60000 \text{ m}^3/\text{s}$ . Obsérvese que en sólo 4 días se alcanza una cota máxima semejante a la condición anterior. Inestabilidades en el modelo impidieron continuar la corrida, pero de todos modos el resultado refleja la tendencia.

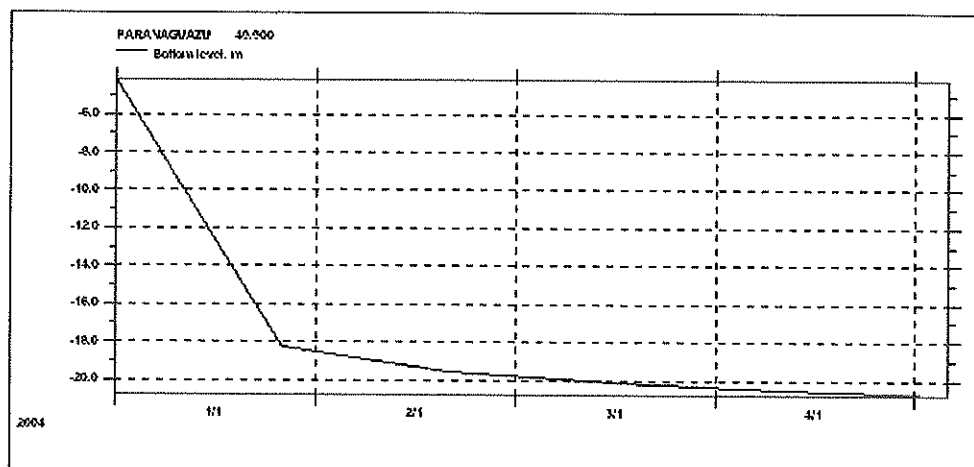


Figura N° 15: Erosión lecho aguas abajo Pasaje Talavera,  $Q=60000 \text{ m}^3/\text{s}$

Para representar en el modelo la situación en la zona de estudio, de modo que los resultados sirvan para la correcta representación del funcionamiento hidrosedimentológico del río en la zona, se actualizaron las secciones transversales en el tramo, a partir de los levantamientos de campo recientes realizados por el INA en el estudio antecedente citado en el punto 2 del presente informe. A modo de ejemplo se presenta en la Figura N° 16 el perfil transversal del río en correspondencia con la zona en estudio. Obsérvese que la cota del talweg es del orden de los  $-30 \text{ m}$ .

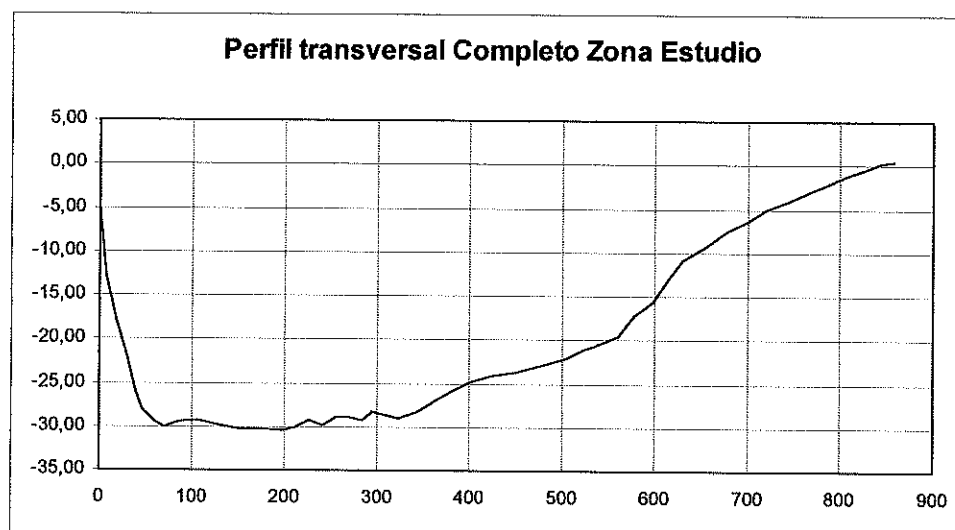


Figura N° 16: Sección transversal zona de estudio

Con el modelo así modificado se realizaron las corridas correspondientes a los tres caudales de estudio.

En la Figura N° 17 se presenta la evolución en función del tiempo de la cota del talweg del río en la sección mencionada, para la condición de  $Q_{\text{Paraná}} = 20000 \text{ m}^3/\text{s}$ . Se observan los escasos cambios morfológicos en la zona, consistentes en un leve proceso de sedimentación que no llega a  $0.2 \text{ m}$  en 6 meses.

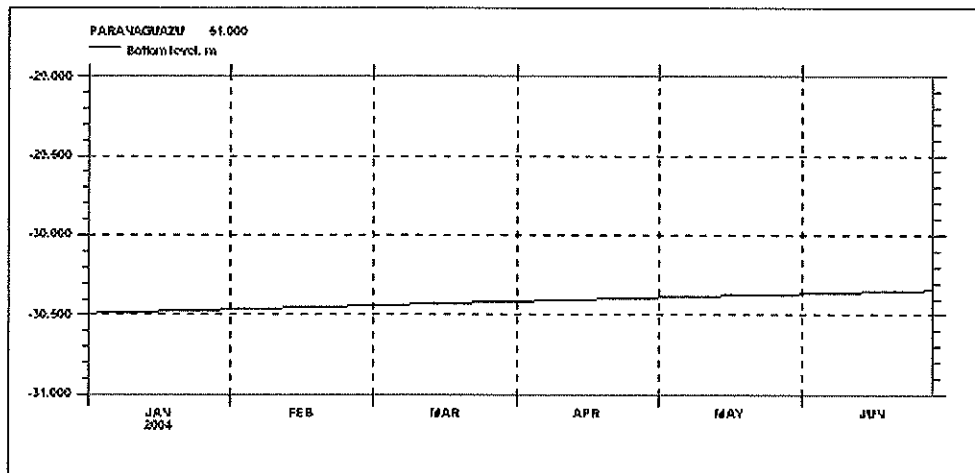


Figura N° 17: Erosión lecho zona estudio,  $Q=20000 \text{ m}^3/\text{s}$

Similares efectos se observan en las Figuras N° 18 y 19, correspondientes a los caudales de 40000 y 60000  $\text{m}^3/\text{s}$ , respectivamente. En el primer caso el proceso de sedimentación alcanza se estabiliza en los 0.5 m, y en el segundo caso no se observan variaciones.

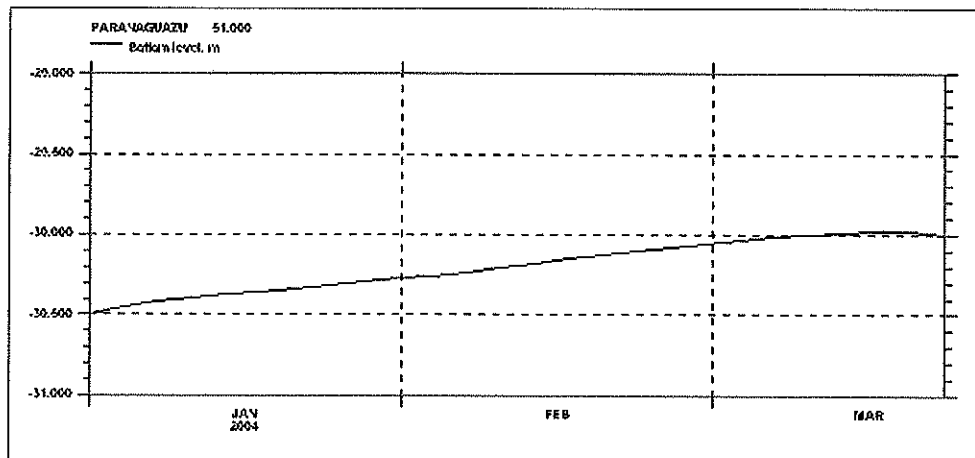


Figura N° 18: Erosión lecho zona estudio,  $Q=40000 \text{ m}^3/\text{s}$

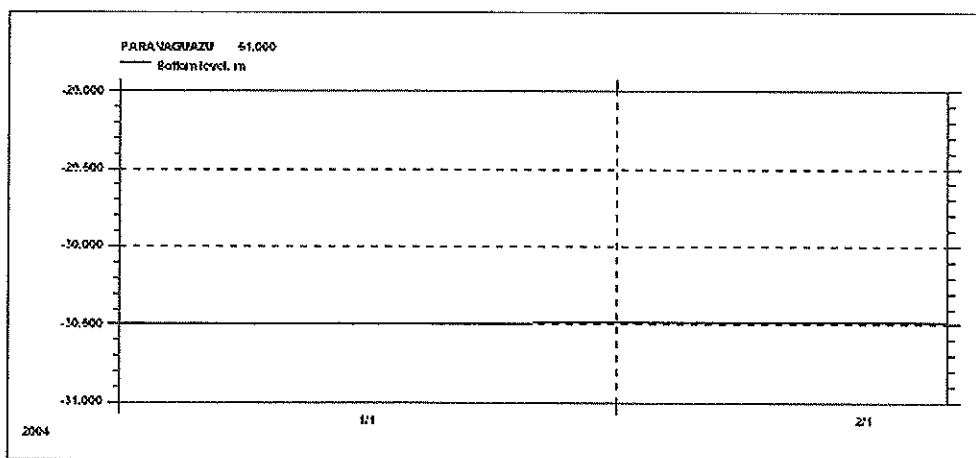


Figura N° 19: Erosión lecho zona estudio,  $Q=60000 \text{ m}^3/\text{s}$

Los comportamientos observados en los resultados de las corridas efectuadas, permiten concluir que las cotas del talweg del río Paraná Guazú en la zona entre el Pasaje Talavera y el puente Zárate – Brazo Largo, se corresponden con los valores máximos que pueden obtenerse mediante el cálculo con un modelo morfológico, con condiciones de aporte sólido vinculadas a la capacidad de arrastre de los cursos de agua involucrados, para los caudales analizados. Al ser el mayor de los caudales estudiados del orden de los picos máximos de las mayores crecidas del río registradas, se estima que las profundidades actuales del río en la zona se corresponden con los mismos. La gran duración de las crecidas de 1982-83 y, en menor medida, de 1998, más la particular configuración en planta de la zona, con la afluencia del Pasaje Talavera con importantes caudales, han dado las condiciones de permanencia de altos caudales, que permitieron modelar el cauce hasta una profundidad cercana a la de equilibrio.

#### 4. CONCLUSIONES

- Se estudió el funcionamiento hidráulico y morfológico del río Paraná Guazú en el tramo de interés, mediante el análisis de la información recopilada y de los estudios de modelación hidromorfológica efectuados. Se realizó además la comparación de batimetrías e imágenes obtenidas de fotos aéreas e imágenes satelitales para distintos años.
- En base a los análisis comparativos llevados a cabo, se observó la evolución en planta natural del río, cuya tendencia en un amplio sector de la margen izquierda, es el corrimiento de la línea de costa tierra adentro debido a los procesos erosivos sobre la margen. Esto implica que los procesos erosivos verificados en la zona en estudio, se corresponden con el comportamiento hidráulico y morfológico del sistema.
- De acuerdo a los resultados obtenidos, el corrimiento en planta del río hacia margen izquierda aparece como un proceso activo, en el que se suman los efectos del desarrollo natural de la curva del río Paraná Guazú, y la afluencia del Pasaje Talavera que aporta importantes caudales líquidos al sistema.
- Otras efectos erosivos pueden acelerar los procesos observados, tales como la erosión por oleaje debido al paso de embarcaciones.
- Desde el punto de la evolución del lecho, los cálculos efectuados con el modelo morfológico unidimensional, indican que las profundidades en la zona debidas a la erosión generalizada del lecho por el pasaje de crecidas, se encuentran en valores cercanos a los máximos esperables (del orden de  $-30$  m).
- No obstante, debido a la tridimensionalidad de los fenómenos morfológicos en la zona, y a los altos caudales que escurren por el río, pueden darse profundidades mayores en algunos sitios en particular.
- Se recomienda realizar el monitoreo del avance de la línea de costa de la margen izquierda, tanto en el predio en estudio, como en la zona inmediatamente aguas arriba, ya que en esta última, su configuración en planta (Figura N° 8) hace suponer que sean esperables procesos erosivos.

- Para la definición de obras en la zona, se recomienda tener en cuenta los resultados aquí presentados, sumados a los relevamientos de campo actualizados.
- Las obras de defensa de márgenes en la zona resultarán de gran magnitud, tanto por las características del río, como por las profundidades cercanas a la costa y la actividad de los fenómenos erosivos.

