

EL MANTENIMIENTO DEL ACCESO FLUVIAL AL PUERTO DE BARRANQUERAS

Héctor H. Prendes, José Huespe y Silvina Mangini

Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas. Universidad Nacional del Litoral. Santa Fe. Argentina
Ciudad Universitaria. CC 217. Paraje el Pozo. (3000) santa fe

E-mail: hprendes@fich1.unl.edu.ar, silvinamangini@yahoo.com.ar, jhuespe@fich1.unl.edu.ar

RESUMEN

En varios puertos fluviales de la Hidrovía Paraná-Paraguay los canales de acceso para navegación presentan problemas de calado debido a la depositación de sedimentos finos ($d < 62 \mu\text{m}$) provenientes de la alta cuenca del Río Bermejo y son importantes durante Enero-Abril cada año. Su dragado involucra altos costos de mantenimiento. Ejemplo de este problema lo constituye el Puerto de Barranqueras ubicado en el interior del Riacho Barranqueras.

La Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas de la Universidad Nacional del Litoral (FICH-UNL) realizó un "Estudio fluvial y anteproyecto de obras de dragado en el Riacho Barranqueras", para analizar alternativas de solución al problema mediante la aplicación de modelos hidráulicos y sedimentológicos. Se estimó el recrecimiento del lecho por depositación de finos, utilizando datos de ensayos en un canal de laboratorio validados con mediciones de campo.

Se sugiere evitar dragados en la boca norte y acceder al puerto a través de la desembocadura sur, incluyendo mínimas obras de dragado, ya que las mismas inducen a mayores tasas de sedimentación. Los resultados obtenidos evidencian complicaciones al intentar revertir el proceso de atrofiamiento morfológico del riacho, estimulado por su baja pendiente hidráulica y magnificado por los aportes de sedimentos finos provenientes del Río Bermejo.

ABSTRACT

In several river harbors of Paraná- Paraguay waterway, a common problem in channels access is the deposition of fine sediments ($d < 62 \mu\text{m}$). These sediments come as wash load from Bermejo River basin and are very important during February to April, each year. The dredging works involves high costs of maintenance. A typical example of this problem is the Barranqueras Harbor on Barranqueras River.

As a request to the Provincial Water Administration of the province of Chaco, the Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas de la Universidad nacional del Litoral (FICH - UNL) has done a Fluvial Study of Dredging Works in Barranqueras river. To analyze possible alternatives of solutions, the application of hydraulic and sedimentation models allowed to estimate the growth bed by fine sediment deposition (using laboratory experimental data validated with field measurements data).

It was suggested avoid dredging works at the Northern mouth and have access by the South mouth, including minimum dredging works, because of the high sedimentation rates. The results show problems when it was trying to reverse the morphological process of closure of Barranqueras River, due to its low hydraulic slope and magnified by the fine sediments from Bermejo River.

INTRODUCCIÓN

El Puerto de Barranqueras (Figura 1), está ubicado sobre la margen derecha del Riacho Barranqueras, que es un cauce secundario del río Paraná, con una longitud de aproximadamente 14 kilómetros. A lo largo de su extensión, en el tramo medio se ubican varios puntos de atraque destinados para actividades portuarias.



Figura 1. Imagen satelital con ubicación del Puerto Barranqueras

A este puerto fluvial acceden trenes de barcazas, buques portacontenedores y de carga general, buques cisternas, y otras embarcaciones comerciales y deportivas de menores dimensiones. Los sedimentos transportados en suspensión que ingresan al riacho provienen como carga de lavado del río Bermejo, y son muy importantes durante los meses de Enero hasta Abril, cada año. Debido a las depositaciones de sedimentos la navegación del acceso al puerto presenta: disminución de calado, aumento de la frecuencia y volúmenes de obras de dragado para el mantenimiento de profundidades, visible obturación natural de la boca del riacho y pérdida de la capacidad de transporte de sedimentos en su interior (relacionada con el cierre natural de su boca y por la baja pendiente hidráulica del curso).

A solicitud de la Administración Provincial del Agua de la Provincia del Chaco, la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas de la Universidad Nacional del Litoral (FICH - UNL) ha realizado el “Estudio fluvial y anteproyecto de obras de dragado en el Riacho Barranqueras”, a fin de analizar posibles alternativas de solución al problema planteado. El presente artículo tiene por objeto divulgar la metodología de estudio desarrollada, especialmente orientada a determinar la depositación de material fino, y comentar las dificultades que se presentan al intentar revertir el proceso de atrofiamiento morfológico que experimenta este curso.

El estudio realizado permitió obtener conclusiones sobre los siguientes aspectos:

- Analizar la factibilidad de mantener las condiciones actuales de circulación fluvial mediante el dragado y mantenimiento de profundidades del riacho, a través del Acceso Sur.
- Analizar la factibilidad y beneficios de una obra de dragado de apertura del Acceso Norte, y de mantener condiciones de navegabilidad en todo el riacho, es decir desde dicho acceso norte hasta la desembocadura sur del Riacho Barranqueras.

METODOLOGÍA GENERAL

Mediciones de campo, recopilación de información hidrológica, análisis de muestras y un ensayo en canal de laboratorio con sedimento obtenido del mismo riacho, fueron las tareas iniciales realizadas. Las mismas, permitieron la aplicación de un modelo hidráulico y el desarrollo de un modelo de balance sedimentológico para el sedimento fino que ingresa en suspensión. La utilización de estos modelos de cálculo permitieron el análisis de distintas alternativas de obras para reacondicionar y mantener el riacho en condiciones para la navegación. Estas alternativas se describen a continuación:

A) Manteniendo la boca en la condición actual sin ninguna obra. En este caso se analizaron las siguientes variantes: A1: Sedimentación natural sin dragados. A2: Sedimentación con dragados de canal para navegar con 4 barcazas desde y hacia silos de granos hasta desembocadura sur (60 m de solera en tramos rectos). A3: Sedimentación con dragados de canal para navegar con 2 barcazas desde y hacia silos de granos hasta desembocadura sur (40 m de solera en tramos rectos).

B) Dragando la boca para aumentar el ingreso de caudales. En este caso se consideró un canal profundo en la boca. Esta alternativa incluye dragados de canal para navegar con 4 barcazas desde y hacia silos de granos hasta desembocadura sur (60 m de solera en tramos rectos).

C) Dragando la boca para permitir la navegación en todo el riacho. En este caso se analizaron las siguientes variantes: C1: Obras de dragados en la boca e interior del riacho para navegar con 2 barcazas desde y hacia boca norte hasta desembocadura sur (60 m de solera en tramos rectos). C2: Obras de dragados de la boca e interior del riacho para navegar con 1 barcaza y empujador desde y hacia boca norte hasta desembocadura sur (40 m de solera en tramos rectos).

D) Suponiendo un mayor atrofiamiento natural de la boca, se consideró un cierre parcial de la boca, por atrofiamiento natural, que como consecuencia reduciría un 50% los actuales caudales de ingreso al riacho. Incluye el dragado del canal para navegar con 4 barcazas desde y hacia silos de granos hasta desembocadura sur (60 m de solera en tramos rectos).

Tareas de Campo

Se llevaron a cabo en dos etapas:

- noviembre de 2007 (bajas concentraciones de sedimentos en suspensión): relevamientos batimétricos, líneas de corriente y muestreos de sedimento transportado en suspensión y del lecho.
- febrero de 2008 (Altas concentraciones de sedimentos en suspensión): medición de velocidades y aforos a lo largo del Riacho en secciones representativas, determinación de líneas de corriente (en la boca del riacho), muestreo detallado de sedimento en suspensión (cerca de superficie y cerca del fondo) y del material del lecho, en 31 secciones definidas a lo largo del riacho, determinación del nivel del pelo de agua en todo el curso y relevamiento topográfico de la margen derecha en la boca de entrada.

Análisis de muestras de sedimentos

Se realizaron en el laboratorio de sedimentología determinaciones de:

- concentraciones y granulometría de muestras de sedimentos en suspensión.
- granulometría de muestras de sedimentos de fondo

Los resultados de las determinaciones de concentración de finos y arenas transportados en suspensión cerca de la superficie y cerca del fondo de las muestras extraídas el día 12/02/08 a lo largo del riacho se observan en la Tabla 1. Estos valores permitieron la calibración del modelo de balance de sedimentación de finos, mediante el ajuste de un perfil longitudinal de concentraciones de sedimentos en suspensión.

Tabla 1.- Concentraciones de finos y arenas transportadas en el Riacho Barranqueras.

Muestra	Finos		Arenas		Muestra	Finos		Arenas	
	Superficial	Fondo	Superficial	Fondo		Superficial	Fondo	Superficial	Fondo
M1	750	1046	1,1	3,1	M10	917	1450	0,3	7,1
M2	817	999	-	3,3	M11	947	1015	0,8	4,7
M3	900	1048	-	5,3	M12	953	1107	0,6	10,4
M4	979	1103	-	5	M13	916	1391	1,3	41,7
M5	894	1106	-	8,9	M14	1186	1267	4,2	24,6
M6	890	1078	3,4	8,9	M15	1084	1236	5,5	11,2
M7	913	1219	3,3	25,5	M16	962	1189	3	9,4
M8	980	1133	2,9	15,3	M17	-	-	-	-
M9	869	1057	1,5	8,1	M18	737	1007,9	3,8	3,5

La distribución de tamaño de partículas de sedimentos transportados en suspensión en la boca de entrada y en la zona de salida del Riacho Barranqueras muestreadas el 12/02/08 se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2.- Distribución de tamaños de los sedimento en suspensión en la entrada y salida del Riacho Barranqueras. (Ce: Conc. entrada, Cs: Conc. salida)

Diam. (mic)	% Entrada	Ce (mg/l)	Cs (mg/l)	Ce-Cs (mg/l)	% Depositado
25-62	17	209	35	174	83
10-25	16	202	135	67	33
4-10	21	252	227	25	10
2-4	13	160	104	56	35
d<2	33	404	371	33	8
total	100	1227	872	355	29

Se puede observar que el 83 % de las partículas transportadas en suspensión resultaron más finos de 25 μm . Los sedimentos de 25-62 μm que ingresan son escasos (17%) y depositan casi totalmente (83%). Las partículas de 2-4 μm depositan más (35%) que las de 4-10 μm (10%); y las más finas, d<2 μm , depositan tanto como las de 4-10 μm . Estas mediciones conciden con otras realizadas previamente, (Mangini, et al 2000, 2003, 2005 y 2007), (Prendes, 2004.a y 2004.b), y sugieren que en los ríos Paraná y Uruguay los sedimentos menores a 25 μm depositan formando agregados. Por este motivo, los cálculos para la fracción de 25-62 μm , se realizaron considerando depositación independiente, y para los tamaños menores a 25 μm se consideró floculación (Prendes, 2009).

Ensayos de laboratorio

En el Laboratorio de Hidráulica de la FICH, se realizaron ensayos de sedimentación en un canal recto con material fino, de tamaños menores a 25 μm , extraído del lecho del riacho. Del mismo se obtuvo una curva empírica de concentraciones versus tensiones de corte del lecho (parámetro que controla la sedimentación de las partículas que forman agregados), para tamaño de partículas menores a 25 μm . La misma se presenta en Figura 2.

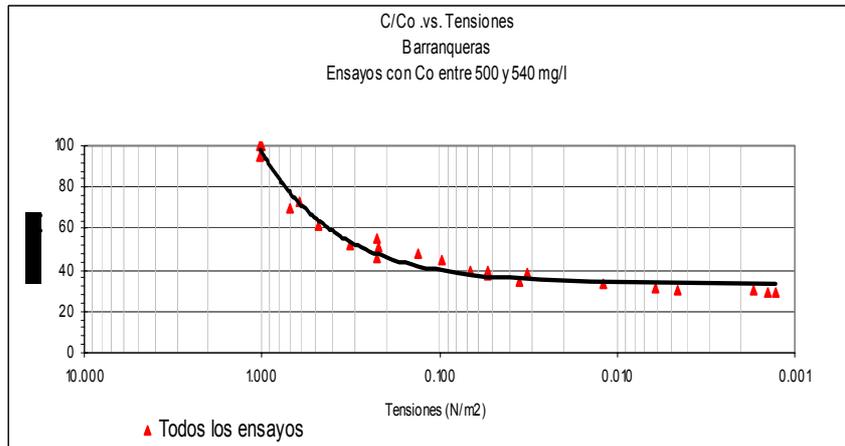


Figura 2.- Curva de Concentraciones de finos. Vs. Tensiones de corte del lecho.

Estimaciones de caudales líquidos y sólidos ingresantes al riacho

Este cálculo se realizó considerando que el caudal del río Paraguay se mezcla con el caudal sólido fino aportado por el río Bermejo en la desembocadura de este último en el río Paraguay. Luego, desde allí, esta mezcla agua sedimento se transporta hasta la confluencia con el río Paraná, e incluso trasladándose aguas abajo sobre su margen derecha, con una pobre dilución con el caudal líquido que proviene del Alto Paraná. La Figura 3 muestra: la serie de caudales sólidos de finos del río Bermejo en la estación El Colorado, la serie de caudales líquidos del río Paraguay y la concentración de sedimento fino en suspensión en la estación Puerto Bermejo del Río Paraguay, producto del cálculo más arriba detallado.

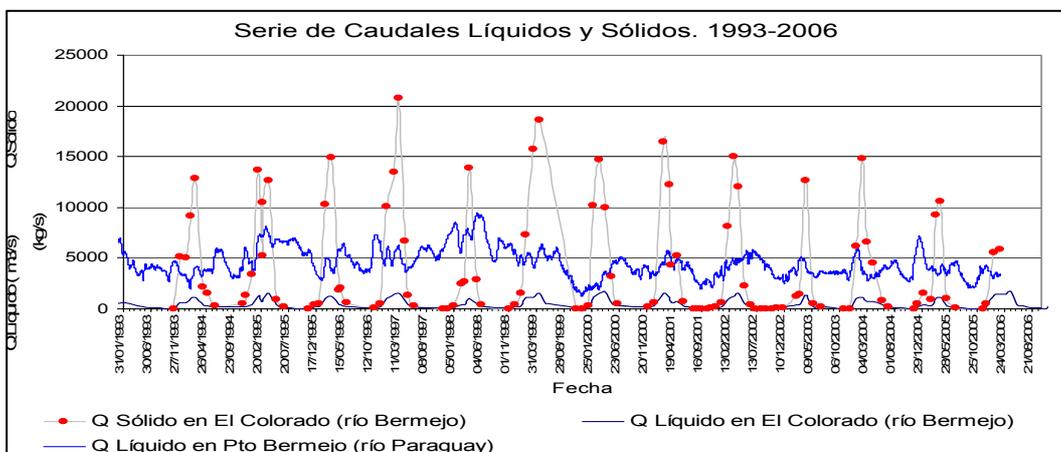


Figura 3.- Caudales líquidos y sólidos de los ríos Bermejo y caudales líquidos del río Paraguay.

A partir de la información recopilada (caudales líquidos y sólidos en el río Bermejo y caudales líquidos en el río Paraguay) se pudo estimar las concentraciones medias mensuales de sedimentos finos transportados en suspensión en el río Paraguay en la estación Puerto Bermejo, Tabla 3.

Tabla 3.- Concentraciones medias mensuales en Puerto Bermejo en mg/l.

Concentraciones medias en mg/l. Puerto Bermejo							
Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Nov	Dic
681	2210	2715	1908	405	73	18	176

Comparando algunos aforos sólidos disponibles, se observa que las concentraciones medias mensuales de finos en Puerto Bermejo, sobre el río Paraguay, resultan mayores que las medidas en la boca de entrada del riacho Barranqueras. Esto se debe a la dilución de las concentraciones de sedimentos finos transportados en suspensión con el agua clara del río Paraná, desde la confluencia Paraguay-Paraná a la boca del Barranqueras. En base a estos datos se estima que las concentraciones calculadas del río Paraguay en puerto Bermejo estarían reducidas en un 70 % por la mezcla con el río Paraná desde confluencia hasta la boca del riacho Barranqueras. Con este criterio se pudo obtener las concentraciones de ingreso al riacho. La Tabla 4 presenta los caudales líquidos medios mensuales, obtenidos mediante el Modelo Hidráulico, y las concentraciones de finos ingresantes al riacho.

Tabla 4.- Caudales y Concentraciones de Finos ingresantes al Riacho Barranqueras.

	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun
Caudal (m ³ /seg)	257	305	380	325	297	290	293
Concentración (mg/l)	123	477	1547	1901	1335	283	51

Atrofiamiento hidráulico del riacho.

En un estudio anterior tomado como antecedente (EVARSA, 1995), se midieron caudales en el riacho para diferentes estados hidrológicos ocurridos en aquella época. Con el modelo hidráulico elaborado para el presente estudio se calcularon los correspondientes caudales en el riacho para los mismos estados hidrológicos del año 1995, pero contemplando la actual morfología del cauce (Noviembre 2007). Los valores obtenidos se presentan, en comparación con los medidos durante 1995, en la Tabla 5.

Tabla 5. - Evolución de caudales del Riacho Barranqueras

Niveles Puerto Barranqueras (m)	Caudales Medidos en 1995(m ³ /s)	Caudales Actuales en 2007 (m ³ /s)	Diferencias (1995-2007) (m ³ /s)	Atrofiamiento Hidráulico (%)
3.02	287	190	97	33.8
4.92	600	380	220	36.7
6.84	1156	630	526	45.5

Como puede notarse, en estos últimos 12 años transcurridos (entre 1995 y 2007), el riacho ha perdido aproximadamente un 40% de su capacidad de conducir caudales. Este importante deterioro hidráulico es consecuencia de su atrofiamiento morfológico, que le provoca una continua disminución de su sección de escurrimiento.

Breve descripción de los modelos Hidráulicos y Sedimentológicos

Para los cálculos hidráulicos y sedimentológicos se dividió al riacho en 31 secciones representativas en todo su recorrido (Figura 4).

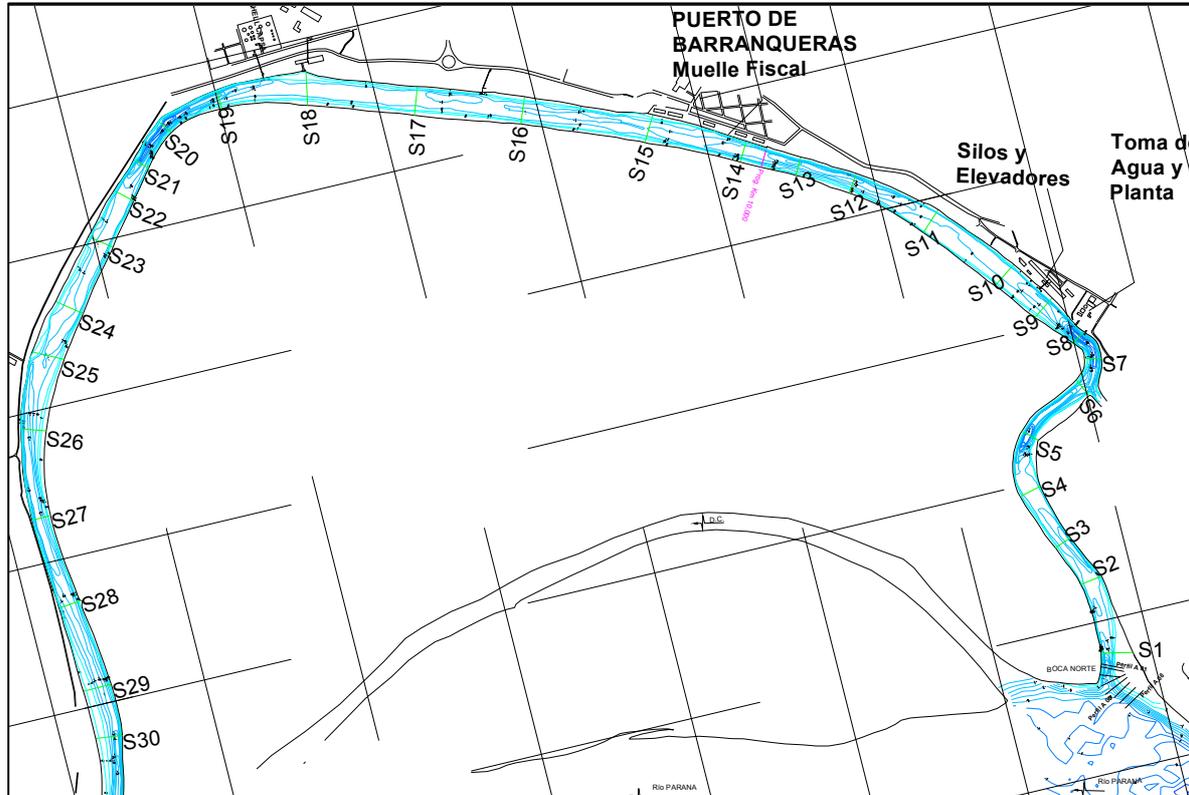


Figura 4.- Planta del riacho Barranqueras con ubicación de las 31 secciones

Con un modelo hidráulico (Resolución explícita de la ecuación de Chezy en régimen permanente) se estimaron los caudales líquidos de ingreso y las variables hidráulicas (velocidad media, radio hidráulico, tensión de corte del lecho) del riacho en las 31 secciones.

A partir de un modelo numérico de transporte y depositación de sedimentos, por el método de balances, fue estimado el recrecimiento del lecho por depositación de finos (utilizando datos experimentales en un canal de laboratorio, validados con datos hidrosedimentológicos obtenidos en campo).

A tales efectos se subdividió el riacho en 30 subtramos y aplicó en cada uno de ellos un modelo de balance de sedimentos con paso de tiempo mensual para sedimentos finos en suspensión. Para la fracción mayor a $25 \mu\text{m}$ se consideró sedimentación independiente; y para la fracción menor a $25 \mu\text{m}$ se contempló la formación de agregados y depositación según la curva de laboratorio mostrada en figura 2 (Prendes, 2009).

Estos modelos se calibraron a partir de los valores mostrados en la Tabla 1. Se observa una buena coincidencia entre el perfil longitudinal de concentraciones medido y calculado, en toda la extensión del riacho (Figura 5).

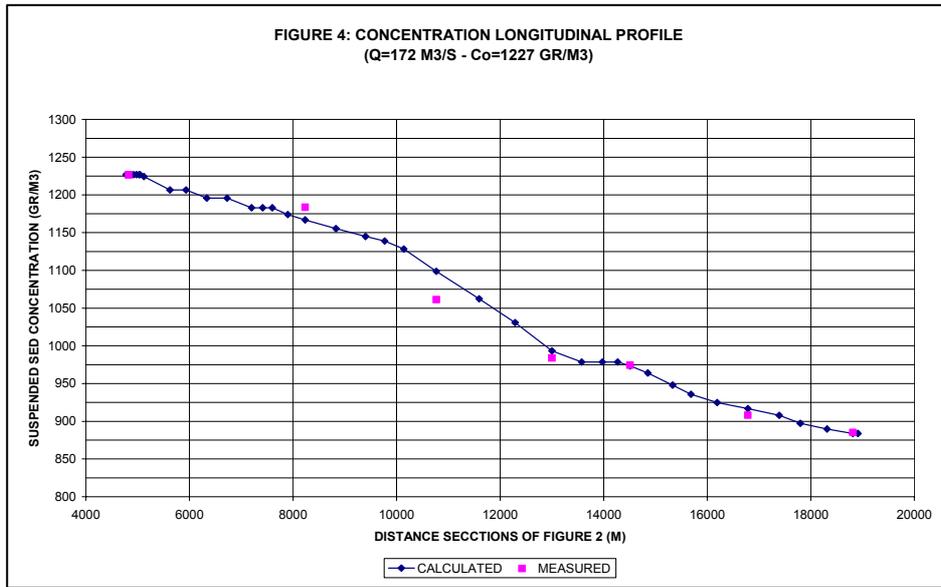


Figura 5. - Perfil longitudinal de concentraciones de sedimentos en suspensión

Estos resultados se obtuvieron para un estado hidro-sedimentológico en particular (14 Feb 2008). Para una verificación del cálculo que incluyera otros estados del río, se dispuso de batimetrías comparativas entre 2005 y 2007. Los resultados de los cálculos realizados, discretizando el riacho en 30 subtramos (Figura 4), también concuerdan aceptablemente con estas mediciones, mostrando coincidencia en la ubicación y espesores de los depósitos (ver fig. 6).

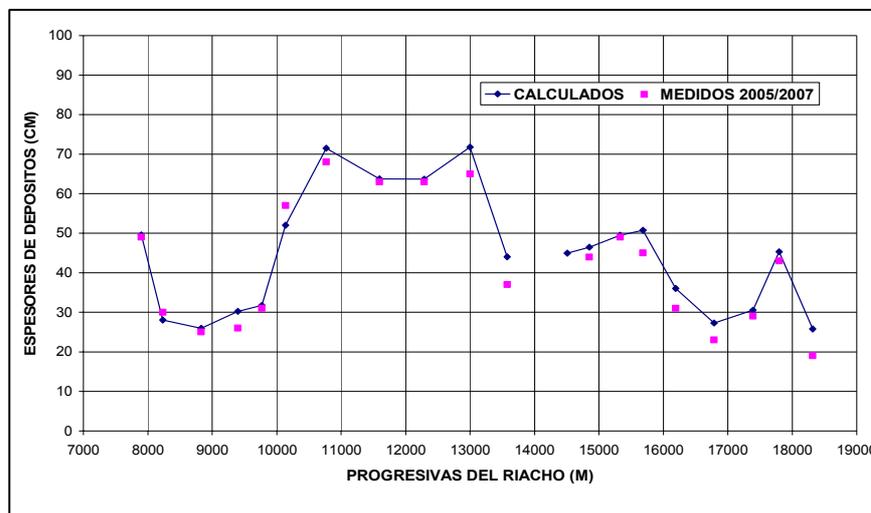


Figura 6.- Perfil longitudinal de espesores de sedimentación

RESULTADOS Y CONCLUSIONES DEL ANALISIS DE ALTERNATIVAS

Los modelos de cálculo descriptos se aplicaron a las distintas alternativas de obra consideradas. Como puede notarse en la Tabla 6, en promedio aproximadamente el 85% del volumen de sedimentos que se depositan anualmente en el interior del riacho (ya sea canal de navegación y/o cauce total), se produce generalmente durante los meses de Febrero, Marzo y Abril. Esto ratifica la gran importancia que tienen los aportes sólidos de la cuenca del Río Bermejo, en los costos de mantenimiento del acceso al Puerto de Barranqueras. Normalmente, los meses de Diciembre, Enero y Mayo son poco significativos (aproximadamente el 10-15%); y el resto del año (Junio a Noviembre), prácticamente despreciables.

Tabla 6. - Volúmenes y costos por alternativas consideradas

RECONSTRUCCION CANAL DE NAVEGACION DE ACCESO AL PUERTO DE BARRANQUERAS							
RESULTADOS RESUMIDOS DE ALTERNATIVAS ANALIZADAS							
	SITUACIONES, ALTERNATIVAS Y VARIANTES						
	A1	A2	B	C1	C2	A3	D
VALORES MEDIOS ANUALES							
CAUDAL MEDIO DIC/JUN (M3/S)	307	344	358	375	340	333	172
REDUCC CONCENT INTER (%)	20,81	19,13	18,62	17,90	19,35	19,67	31,23
VOL SED CAUCE TOTAL (M3)	622394	642143	649102	653039	640212	637559	531786
VOL SED CAUCE S8-S31 (M3)	546587	566040	569990	576763	564250	561510	457221
VOL MANT CANAL TOTAL (M3)	253484	260608	263240	265013	185663	184876	216760
VOL MANT CANAL S8-S31 (M3)	220077	227170	228728	231430	161789	161011	184092
VOL MANT BOCA (M3)	0	0	47000	86197	96672	0	0
VOL MANT ACC MUELLES (M3)		37413	37670	38115	51772	51523	30319
VOL MANT ANUAL (M3)	220077	264583	313398	389324	334107	212534	214411
OBRAS DE APERTURA							
DRAGADO EN LA BOCA (M3)		0	47000	28800	32300	0	0
DRAG. CANAL NAVEGACION (M3)		697829	697829	853267	546643	444028	697829
DRAG. ACCESO MUELLES (M3)		114927	114927	114927	142088	142088	114927
VOL DRAG APERT TOTAL (M3)		812756	859756	996994	721031	586116	812756
MANTENIMIENTO EN 9 AÑOS (MILL M3)		2,381	2,821	3,504	3,007	1,913	1,930
VOL OBRAS DRAG 10 AÑOS (MILL. M3)		3,194	3,680	4,501	3,728	2,499	2,742
COSTOS OBRAS PRIMER AÑO (MILL. \$)		7,315	7,738	8,973	6,489	5,275	7,315
COSTOS MANTEN ANUAL (MILL. \$)		2,381	2,962	3,763	3,297	1,913	1,930
COSTOS EN 10 AÑOS (MILL \$)		28,746	34,392	42,836	36,162	22,490	24,682
COSTO MEDIO ANUAL (MILL \$)		2,875	3,439	4,284	3,616	2,249	2,468

El análisis técnico y económico de alternativas realizado sugiere la no conveniencia de obras (dragados en la boca y primer subtramo norte del riacho) para navegar en toda la longitud del riacho, en ninguna de sus variantes de dimensiones de canal, es decir alternativas C1 y C2. Se considera conveniente sugerir la navegación del riacho para acceder al Puerto de Barranqueras a través de la desembocadura sur, tal cual se lo viene haciendo últimamente. La decisión de qué ancho de canal adoptar entre la variante A2 (60m) y A3 (40m) dependería de las expectativas de uso del puerto en el futuro inmediato. La A3 (2 barcazas) representa una inversión mínima indispensable, y siempre puede ser mejorada ampliando el canal de navegación (alternativa A2 – con 4 barcazas), cuando esto fuera necesario.

Los estudios realizados evidencian que se debe dragar el riacho lo menos posible, pues cuanto más se amplían innecesariamente las secciones del mismo, se fomenta a una mayor tasa de sedimentación. Cabe destacar que estas obras (A2 ó A3), es decir posibilitar la navegación del riacho mediante obras sistemáticas de dragados de mantenimiento, son solo soluciones paliativas del problema (atrofiamiento natural del riacho). Por este motivo, los recursos económicos asignados deben considerarse como gastos inevitables, que continuarán existiendo, sin esperar por ello beneficios correctivos del problema existente. Ante este

panorama, cabe entonces la opción de contemplar la posibilidad en el futuro de su traslado a un lugar más conveniente dentro del cauce principal del Río Paraná, con acceso directo desde la ruta troncal de navegación.

Referencias Bibliográficas

Prendes H., Mangini S., Huespe J (2009). “Deposition of fine sediments in ports and navigation channels in Paraná River”. *10th International Conference on Cohesive Sediment Transport Processes*. Rio de Janeiro-Paraty. Brazil.

Mangini S., Prendes H., Huespe J., Amsler M. y Piedra Cueva I. (2007). “Sedimentación de Finos en el Entorno del Embalse de Salto Grande en el Río Uruguay”. *Revista Ingeniería del Agua en España*. Vol.14 No.4. pp 307-318.

Mangini S., Huespe J., Piedra Cueva I., Prendes H., Amsler M. (2005). “Sedimentación de la carga de lavado en ambientes fluviales de los ríos Paraná y Uruguay”. *XX Congreso Nacional del Agua y III Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur*. Mendoza, Argentina.

Prendes H., Huespe J., Mangini S., Amsler M., Piedra Cueva I., Irigoyen M., Simonet D. y Zamanillo E. (2004.a-). “Sedimentación de finos en el embalse de Salto Grande. Relevamiento de las zonas con mayores depósitos”. *VI Taller Internacional sobre Enfoques para el Desarrollo y Gestión de Embalses en la Cuenca del Plata. Salto Grande*. Argentina-Uruguay.

Prendes H., Mangini S., Huespe J., Amsler M., Piedra Cueva I., Irigoyen, M., Simonet D. y Zamanillo E. (2004.b-). “Estudios de Sedimentación en el Embalse de Salto Grande. Caracterización del Funcionamiento Hidrosedimentológico”. *VI Taller Internacional sobre Enfoques para el Desarrollo y Gestión de Embalses en la Cuenca del Plata*. Salto Grande. Argentina-Uruguay.

Mangini S., Prendes H., Huespe J. y Amsler M. (2003). “Importancia de la floculación en la sedimentación de la carga de lavado en ambientes del Río Paraná”. *Revista Ingeniería Hidráulica en México*. Vol. XVIII, No. 3, pp 55-69.

Mangini S., Prendes H., Amsler M. y Huespe J. (2000) “Sedimentación de limos y arcillas en ambientes del Río Paraná”. Trabajo publicado en las memorias del *XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica*. Tomo I, pp. 339-348. Córdoba.