

INFORME HIDRODINÁMICO

PUERTO LAS PALMAS



**PUERTO
LAS PALMAS**
CHACO

Anexo:

Estudio de erosión y diseño de
protecciones costeras

Plano general de cortes
transversales aguas abajo y
aguas arriba





CIVILTEC CONSULTORES SRL

ESTUDIO DE EROSIÓN Y DISEÑO DE PROTECCIONES COSTERAS, LAS PALMAS, CHACO

INFORME FINAL

DICIEMBRE 2018

Por

Ing. Jorge E. Abramian
Ing. Constanza F. Vargas
Ing. Gerardo R. Bourg

Para

NORGAV SA-SAN PEDRO FUNDACIONES

CIVILTEC CONSULTORES SRL
Esmeralda 570 1º 1
1007 Buenos Aires
Argentina

+54 11 4326 7150
+54 9 11 4540 3515

Tabla de Contenidos

1.0	INTRODUCCIÓN	5
2.0	UBICACIÓN Y ÁREA DE ESTUDIO	5
3.0	ANÁLISIS DE ANTECEDENTES	6
4.0	ESTUDIOS DE CAMPO	8
5.0	CARACTERIZACIÓN MORFO-HIDROSEDIMENTOLÓGICA DEL ÁREA DE ESTUDIO	21
5.3.1	Niveles de río	25
5.3.2	Relación altura-caudal	26
5.3.3	Recurrencia de caudales	27
6.0	MODELACIÓN HIDRODINÁMICA	28
6.4.1	Escenario 0: Escenario actual	31
6.4.2	Escenario 1: Protección longitudinal	32
6.4.3	Escenario 2: Protección transversal	33
6.5.1	Resultados de la modelación del Escenario 0	33
6.5.2	Resultados de la modelación del Escenario 1	35
6.5.3	Resultados de la modelación del Escenario 2	36
6.5.4	Comparación de resultados	37
7.0	ANÁLISIS DE LA EROSIÓN	39
8.0	DISEÑO DE PROTECCIONES COSTERAS	44
8.1.1	Selección de la solución conceptual	44
8.1.2	Selección de la solución constructiva	45
8.3.1	Olas generadas por el viento	50
8.3.2	Olas generadas por embarcaciones	50
8.3.3	Corrientes fluviales	51
8.3.4	Corrientes inducidas por embarcaciones	51
8.3.5	Dimensionamiento de las mantas	52
8.3.6	Otras consideraciones constructivas	53
9.0	CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES	55
	ANEXO	57
1.0	CRECIDA DE 5 AÑOS	58



Índice de Tablas

<i>Tabla 1: Granulometría de muestra 1112, margen derecha, aguas arriba.....</i>	17
<i>Tabla 2: Granulometría de muestra 1111, margen izquierda, aguas arriba.....</i>	18
<i>Tabla 3: Granulometría de muestra 1109, margen izquierda, aguas abajo.....</i>	18
<i>Tabla 4: Recurrencia de niveles hidrométricos y caudales en Puerto Bermejo</i>	27
<i>Tabla 5: Recurrencia de niveles hidrométricos y caudales en Puerto Las Palmas</i>	27
<i>Tabla 6: Niveles hidrométricos y caudales de crecidas modeladas.....</i>	32
<i>Tabla 7: Velocidades medias en celdas indicadas. Escenarios 0, 1, y 2.....</i>	38
<i>Tabla 8: Tabla comparativa de soluciones constructivas para protección costera</i>	46

Índice de Figuras

<i>Figura 1: Ubicación del área de estudio.....</i>	6
<i>Figura 2: Track del relevamiento batimétrico.....</i>	8
<i>Figura 3: Ejecución del relevamiento.....</i>	9
<i>Figura 4: Sondajes reducidos.....</i>	10
<i>Figura 5: Mapeo de profundidades (referidas al cero de Puerto Bermejo).....</i>	10
<i>Figura 6: Margen derecha, aguas arriba. La ribera cubierta por material arcilloso con vegetación arbustiva y arbórea dependiendo del sector.....</i>	11
<i>Figura 7: Margen izquierda, aguas arriba. Con más presencia de árboles y también arcillosa, es un poco más alta que la margen contraria. La presencia de árboles caídos demuestran los efectos erosivos del río.</i>	12
<i>Figura 8: Margen derecha, aguas arriba, frente al muelle. Se observa el corte que el río produce sobre la margen exponiendo las raíces.....</i>	12
<i>Figura 9: Margen izquierda, muelle. La costa fue modificada con la instalación del tablestacado posterior.....</i>	13
<i>Figura 10: Margen izquierda, agua abajo. Esta zona es más baja que las anteriores, aunque es notoria la presencia de árboles caídos y el corte del talud que muestran un efecto erosivo durante las crecidas.....</i>	13
<i>Figura 11: Margen derecha, aguas abajo. Esta zona es un poco más alta. Por detrás de la fila de árboles se desarrolla un camino de ripio paralelo al río.....</i>	14
<i>Figura 12: Extracción de muestras de sedimentos.....</i>	15
<i>Figura 13: Ubicación de las estaciones de muestreo.....</i>	15
<i>Figura 14: Granulometría de la muestra 1113 (eje de canal), μm.....</i>	16
<i>Figura 15: Granulometría de la muestra 1110 (eje de canal), μm.....</i>	16
<i>Figura 16: Granulometría de la muestra 1108 (eje de canal), μm.....</i>	17
<i>Figura 17: Flotador a la deriva con GPS registrando el track.....</i>	19



Figura 18: Gráfico de vectores de velocidades de corriente	20
Figura 19: Esquema ilustrativo para aforo con flotadores	20
Figura 20: Sección cercana a Puerto Las Palmas (km 1265). (Fuente: Drago et al. (2008)).	22
Figura 21: Evolución morfológica entre 2003 y 2017	22
Figura 22: Evolución morfológica entre 2003 y 2017. Detalle Puerto Las Palmas	23
Figura 23: Caudal líquido vs. Caudal sólido total. Puerto Bermejo.....	23
Figura 24: Series de nivel medio diario del río Paraguay en Puerto Bermejo e Isla del Cerrito.....	25
Figura 25: Diferencia de nivel de agua del río Paraguay entre Puerto Bermejo e Isla del Cerrito	26
Figura 26: Curva H-Q del río Paraguay en Puerto Bermejo	26
Figura 27: Grilla generada en dominio de cálculo	29
Figura 28: Mapeo de cotas topobatimétricas (referidas al cero de Puerto Bermejo).....	29
Figura 29: Mapa de Velocidades. Resultado del ajuste del modelo.....	30
Figura 30: Relación de velocidades	31
Figura 31: Esquema de protección longitudinal. Escenario 1.....	32
Figura 32: Esquema de protección transversal. Escenario 2	33
Figura 33: Mapa de Profundidades. Escenario 0	34
Figura 34: Mapa de Velocidades. Escenario 0.....	34
Figura 35: Detalle de velocidades y profundidades en zona costera. Escenario 0	35
Figura 36: Detalle de velocidades y profundidades en zona costera. Escenario 1	36
Figura 37: Detalle de velocidades y profundidades en zona costera. Escenario 2	37
Figura 38: Secciones para el cálculo de erosión generalizada	40
Figura 39: Erosión generalizada en sección A	42
Figura 40: Erosión generalizada en sección B.....	42
Figura 41: Erosión generalizada en sección C.....	43
Figura 42: Erosión generalizada en margen derecha. Sección C	43
Figura 43: Tubo geotextil MacTubes utilizado como escollera (Fuente: Maccaferri)	47
Figura 44: Protección con mantas flexibles (Fuente: Coripa).....	47
Figura 45: Izq. protección con bloques Bentonplan (Fuente: Coripa); der. riprapp	47
Figura 46: Esquema del jet generado por una hélice (Fuente: Froehlich et al.)51	
Figura 47: Variación de la velocidad respecto del diámetro de la hélice	52

1.0 INTRODUCCIÓN

Este informe de avance se preparó en cumplimiento de la OC 115 emitida por la UTE Norgav – San Pedro Fundaciones el día 27 de agosto de 2018 para estudiar la erosión en el Puerto de las Palmas y proponer soluciones.

El presente estudio tiene por objeto analizar los procesos hidrosedimentológicos en Puerto Las Palmas y los efectos erosivos del río Paraguay. Consecuentemente, se busca proponer soluciones que permitan estabilizar el borde costero en la zona y proteger las estructuras de acciones erosivas.

Para ello, a partir de información obtenida a través del análisis de antecedentes, estudios de campo y recolección de datos, se realiza la modelación hidrodinámica del área de estudio. La modelación hidrodinámica, junto al estudio de erosión, permitirán decidir la alternativa más adecuada para proteger la costa en Puerto Las Palmas. Por último, se lleva a cabo el diseño de la protección elegida.

2.0 UBICACIÓN Y ÁREA DE ESTUDIO

La localidad de Puerto Las Palmas se encuentra al sudeste de la provincia de Chaco (Argentina), en el kilómetro 1266 del río Paraguay. Se ubica sobre la margen derecha del río, y a 25 km de la confluencia con el río Paraná (Figura 1).

Desde Asunción y hasta la confluencia con el Paraná, el río Paraguay recibe el nombre de Bajo Paraguay. El cauce principal del Bajo Paraguay presenta una alta sinuosidad, con una longitud de 390 km y un ancho medio de 575 m. El río ha construido una llanura de inundación de 2000 km² que se fusiona con la llanura de inundación del Paraná Medio (Drago, 1990)¹. El Bajo Paraguay tiene un régimen hídrico irregular y complejo. El Pantanal (Brasil) actúa como un embalse natural que regula el flujo de agua y sedimentos aguas abajo (Ponce, 1995)². Por lo tanto, a pesar de que las cabeceras de los ríos Paraguay y Paraná están bajo el mismo régimen de lluvias, el Pantanal retrasa el pico de inundación del río Paraguay cuatro meses en promedio, respecto a la llegada a la confluencia del pico de inundación del Paraná. Este retraso puede influir sobre la hidrodinámica del tramo inferior del río Paraguay: dada la baja pendiente de su lecho y su proximidad a la confluencia, cuando el río Paraná se encuentra en crecida y el Paraguay está bajo, se genera un remanso en este último, que puede extenderse cientos de kilómetros.

Los puertos más cercanos a Puerto Las Palmas se localizan en: Puerto Bermejo (46 km aguas arriba) e Isla del Cerrito (24 km aguas abajo, cercano a la confluencia con el río Paraná). El área de estudio comprende el tramo del río

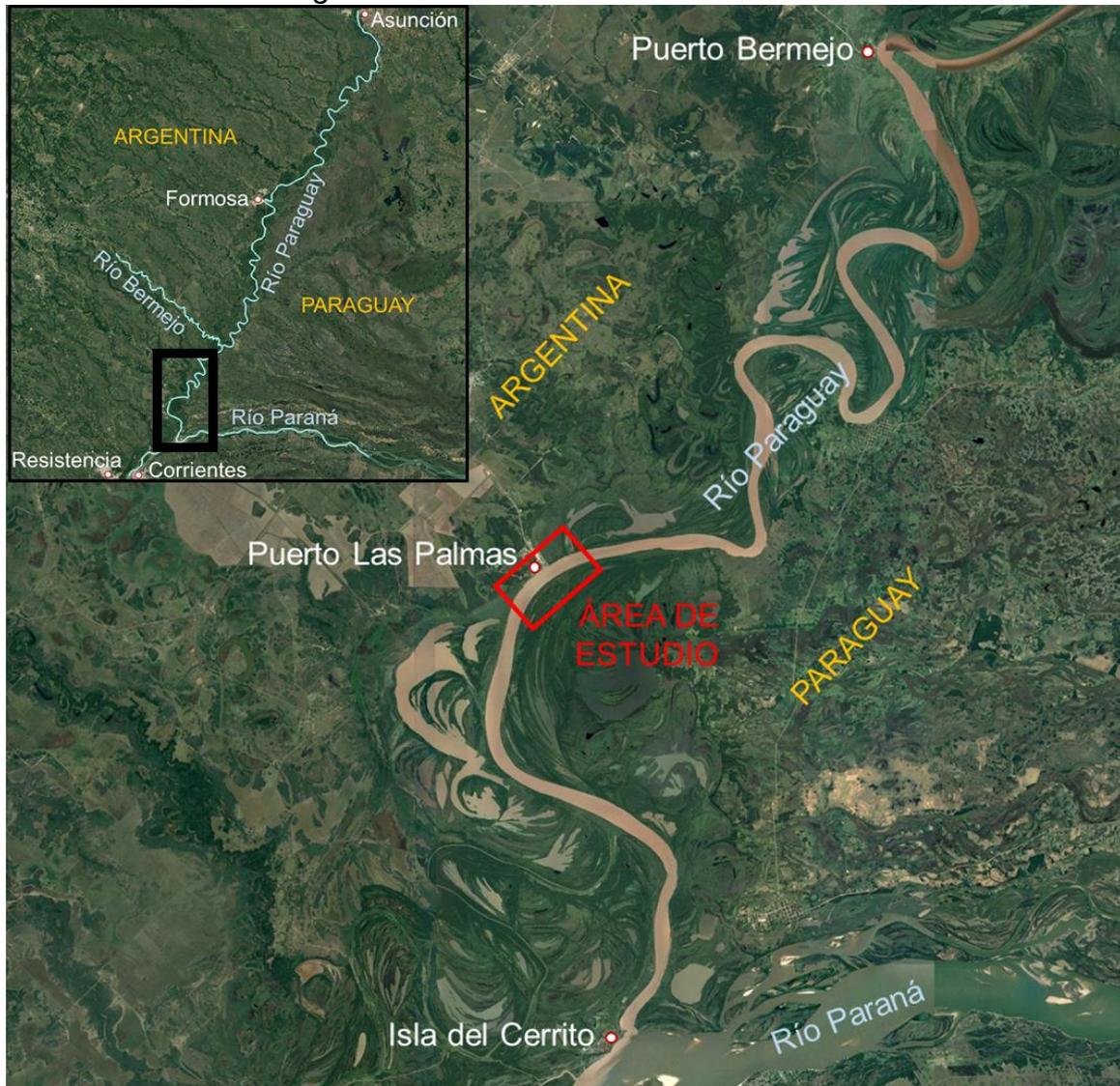
¹ Drago, E. (1990). "Geomorphology of large alluvial rivers: Lower Paraguay and Middle Paraná". *Interciencia* 15, 378-387.

² Ponce, M. (1995). "Hydrological and environmental impact of the Paraná-Paraguay Waterway on the Pantanal of Mato Grosso, Brazil". San Diego State University, San Diego.



Paraguay que abarca aproximadamente 2,5 km aguas arriba y 2,5 km aguas abajo de Puerto Las Palmas. En la Figura 1 se observa la ubicación del área de estudio.

Figura 1: Ubicación del área de estudio



3.0 ANÁLISIS DE ANTECEDENTES

Para la realización de los estudios, la primera tarea consistió en la compilación y análisis de la información antecedente. A tal fin se obtuvo la siguiente información:

- Estudios de suelos, Informe técnico, Gauto, 2015
- Estudio de suelos, Informe técnico, J.C. Rosados & Asociados, 2010
- Batimetría, C.G. Diez, 2015
- Batimetría, Dirección de Vías Navegables, Junio 2017

- Planos de proyecto
- Niveles de río y aforos (Puerto Bermejo), Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación (serie histórica)
- Modelo de elevación de terreno, IGN
- Croquis de río Paraguay, Dirección de Vías Navegables
- Imágenes satelitales de Google Earth

De estas informaciones es de destacar que:

- Los estudios de suelo incluyeron cuatro perforaciones en tierra en el caso de Gauto, y cinco perforaciones, tres en agua, en el caso de Rosados. Estos últimos son los de mayor interés para el estudio. Ubicados a metros de la margen, en las tres perforaciones se encontraron, a nivel del lecho, suelos arcillosos plásticos con porcentajes de finos mayores al 85%. Sin embargo, estos ensayos tuvieron por objeto la determinación de parámetros mecánicos no aplicables al estudio de erosión y sedimentación.
- Las batimetrías permiten observar que las profundidades en la línea del frente de ataque se encontrarían a alrededor de nueve metros respecto del cero del hidrómetro de Puerto Bermejo (conste que en 2015 el muelle todavía no estaba construido). También se puede observar que el fondo aparece como muy plano, salvo en la costa donde se presenta un talud que eleva la topografía 11 m en 15 m. Cabe notar que los sondajes realizados por la SSPyVN fueron referidos al cero del hidrómetro de Río Bermejo, pero que se consigna equivocadamente la cota del cero del Riachuelo de dicha regla. Por otro lado, la batimetría de 2015 refleja los sondajes respecto del cero del Riachuelo, pero la batimetría sólo abarcó hasta el talweg del río. Finalmente, respecto de las batimetrías, debe indicarse que sólo pueden utilizarse de modo referencial, ya que sólo se extienden unos pocos cientos de metros y, consecuentemente, no son suficientes para armar la grilla del modelo.
- Los niveles de río en conjunto con las imágenes satelitales de Google, el croquis del río, y los modelos digitales del terreno fueron utilizados para completar la topografía de las márgenes y obtener isobatas de zonas que, al momento del relevamiento, tenían profundidades menores a 1,0 m. Asimismo, los croquis del río permitieron completar la delineación de las márgenes.
- Los aforos obtenidos de la Subsecretaría de Recursos Hídricos brindan curvas H-Q que permiten la calibración del modelo.



4.0 ESTUDIOS DE CAMPO

Para estudiar los procesos de erosión y sedimentación y calibrar un modelo hidrodinámico se procedió a realizar una serie de estudios *in situ*. Los mismos consistieron en:

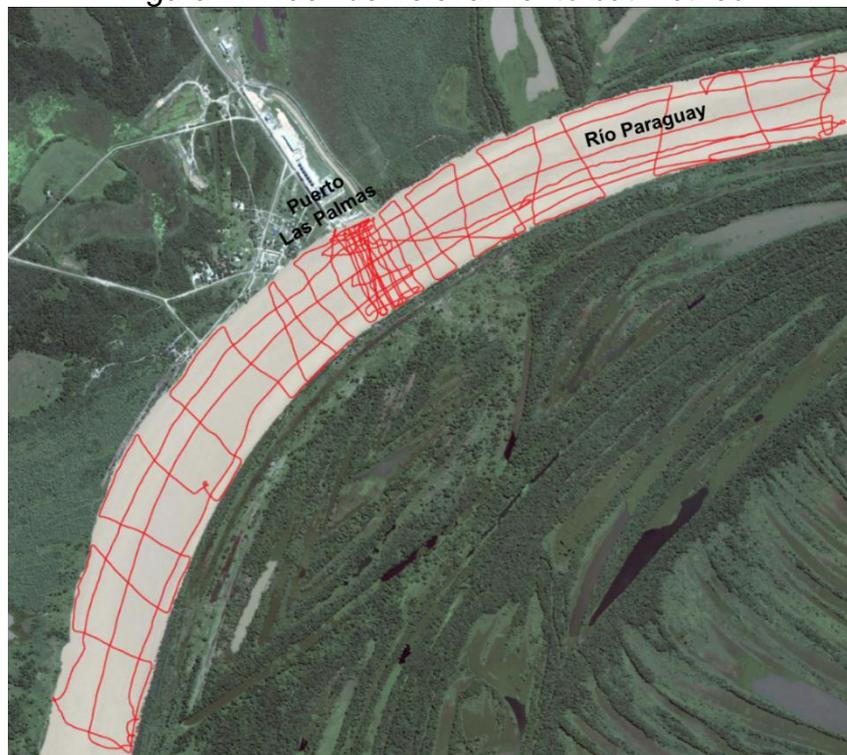
- Ejecución de una batimetría y medición de elevaciones de puntos sobre las márgenes
- Relevamiento fotográfico de márgenes
- Toma de muestras de sedimentos
- Medición de corrientes mediante corrida de flotadores

A continuación se describen las tareas realizadas.

4.1 BATIMETRÍA

Para alimentar al modelo hidrodinámico, los días 6 y 7 de septiembre de 2018 se realizó una batimetría de un tramo de río que se extendió aproximadamente 2.500 m hacia aguas arriba y 2.500 m hacia aguas abajo del muelle de Las Palmas. El relevamiento se realizó trazando perfiles transversales aproximadamente cada 400 m. En la zona de muelle la densidad de perfiles fue aumentada reduciendo la separación entre perfiles a alrededor de 25 m. La Figura 2 muestra el track de los relevamientos batimétricos realizados.

Figura 2: Track del relevamiento batimétrico



El relevamiento se realizó mediante la utilización de una lancha con motor fuera de borda, una ecosonda Navman y dos GPS, Garmin y MobileMapper 50 4G con corrección diferencial (Figura 3).

Figura 3: Ejecución del relevamiento



Los datos fueron posprocesados en gabinete para corregir por el nivel del río y el *offset* de quilla y referir los resultados al cero de Puerto Bermejo (no existiendo regla hidrométrica en Las Palmas se optó por adoptar este cero para todo el estudio).

Para completar la batimetría y agregar datos topográficos de la planicie de inundación también se realizaron tareas adicionales. Primero, se desembarcó en distintos puntos de ambas márgenes para obtener los niveles de los albardones con el GPS diferencial. En segundo lugar, se procesaron curvas de nivel utilizando el modelo digital de terreno del IGN para el área de estudio. Tercero, se delinearon las márgenes de las imágenes satelitales históricas ofrecidas por Google Earth de fechas para las cuales se contaba con niveles de río (no se tienen datos de niveles de río para todas las fechas). De esta manera se alcanzó una buena densidad de puntos y una cobertura de elevaciones suficiente para la modelación. Las Figuras 4 y 5 muestran, respectivamente, los sondajes reducidos y el mapa de profundidades obtenido.

Figura 4: Sondajes reducidos

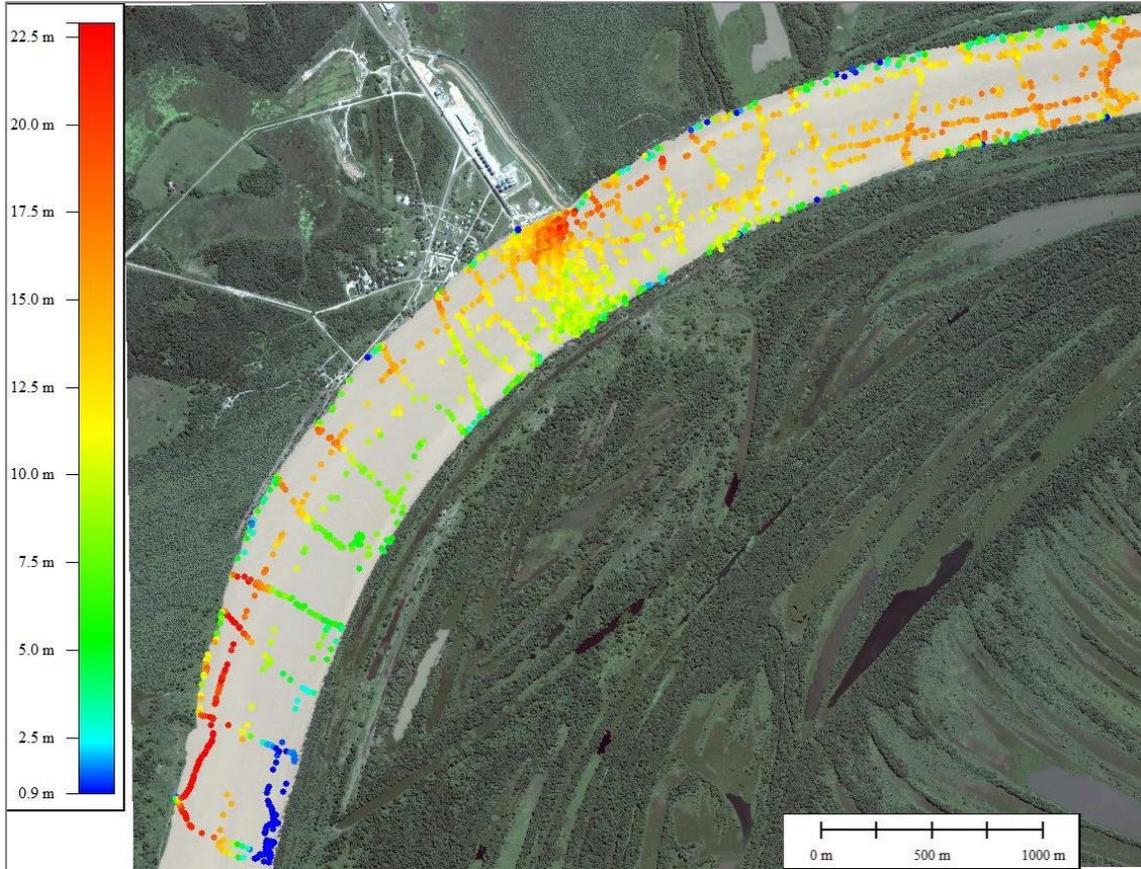
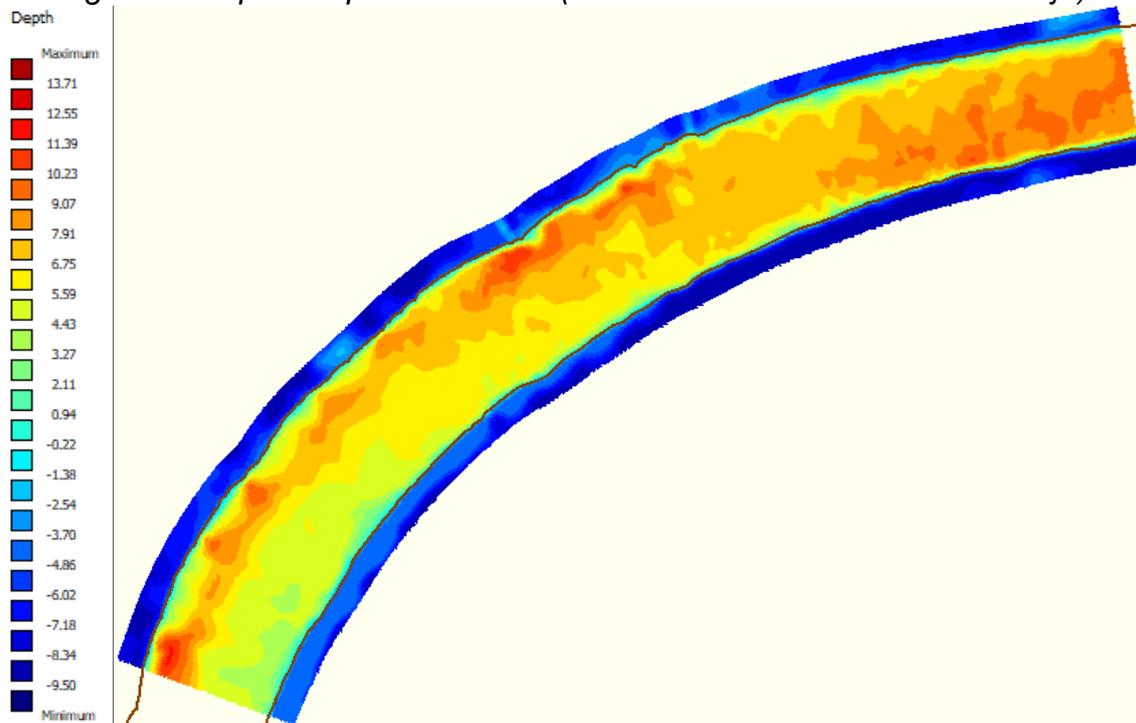


Figura 5: Mapeo de profundidades (referidas al cero de Puerto Bermejo)



4.2 RELEVAMIENTO FOTOGRÁFICO

El relevamiento también incluyó un registro fotográfico y videográfico para identificar las características de las márgenes, su cobertura de vegetación, altura, y materiales que la componen. Estos datos sirven para la corrección de la grilla y la puesta a punto del modelo. En este sentido, en general la altura y el material de los albardones se mantienen bastante estable a lo largo de ambas márgenes, al igual que su perfil escarpado. La altura de los albardones varía entre los tres y cuatro metros.

Durante el relevamiento fue posible observar indicios de erosión y un suelo arcilloso. Los indicios de erosión comprendían fracturas de los taludes y árboles caídos hacia el agua sobre la margen. Estos indicios de erosión se observaron de ambos lados del río en la zona norte del área de estudio (aguas arriba del muelle) y en la margen derecha hacia el sur. En cambio, se observó un talud más tendido que indica procesos de sedimentación en la margen izquierda hacia aguas abajo del muelle. Las Figuras 6 a 11 ilustran las características mencionadas.

Figura 6: Margen derecha, aguas arriba. La ribera cubierta por material arcilloso con vegetación arbustiva y arbórea dependiendo del sector.



Figura 7: Margen izquierda, aguas arriba. Con más presencia de árboles y también arcillosa, es un poco más alta que la margen contraria. La presencia de árboles caídos demuestran los efectos erosivos del río.



Figura 8: Margen derecha, aguas arriba, frente al muelle. Se observa el corte que el río produce sobre la margen exponiendo las raíces.



Figura 9: Margen izquierda, muelle. La costa fue modificada con la instalación del tablestacado posterior.



Figura 10: Margen izquierda, agua abajo. Esta zona es más baja que las anteriores, aunque es notoria la presencia de árboles caídos y el corte del talud que muestran un efecto erosivo durante las crecidas.



Figura 11: Margen derecha, aguas abajo. Esta zona es un poco más alta. Por detrás de la fila de árboles se desarrolla un camino de ripio paralelo al río.



4.3 EXTRACCIÓN DE SEDIMENTOS DE FONDO

Para estudiar los procesos de erosión y sedimentación se debe conocer el diámetro de los granos de sedimentos. Para esta determinación se realizaron extracciones de muestras en distintos puntos del área de estudio. Se eligieron tres estaciones sobre el eje del río y tres estaciones sobre las márgenes, dos de la margen izquierda y una de la derecha. Las extracciones fueron realizadas utilizando una grampa tipo Van Been registrando con GPS la posición de la estación. La Figura 12 muestra el proceso de extracción y la Figura 13 las estaciones de muestreo.

Del eje del río se extrajeron arenas con una fracción fina prácticamente insignificante (1%). Además resultaron de una graduación pobre. A las muestras de las márgenes sólo se les realizó la granulometría de la fracción media y gruesa (mayores al tamiz #200). Las Figuras 14 a 16 muestran las curvas granulométricas de las arenas y las Tablas 1 a 3 presentan la distribución de diámetros de las muestras de las márgenes.

Figura 12: Extracción de muestras de sedimentos



Figura 13: Ubicación de las estaciones de muestreo

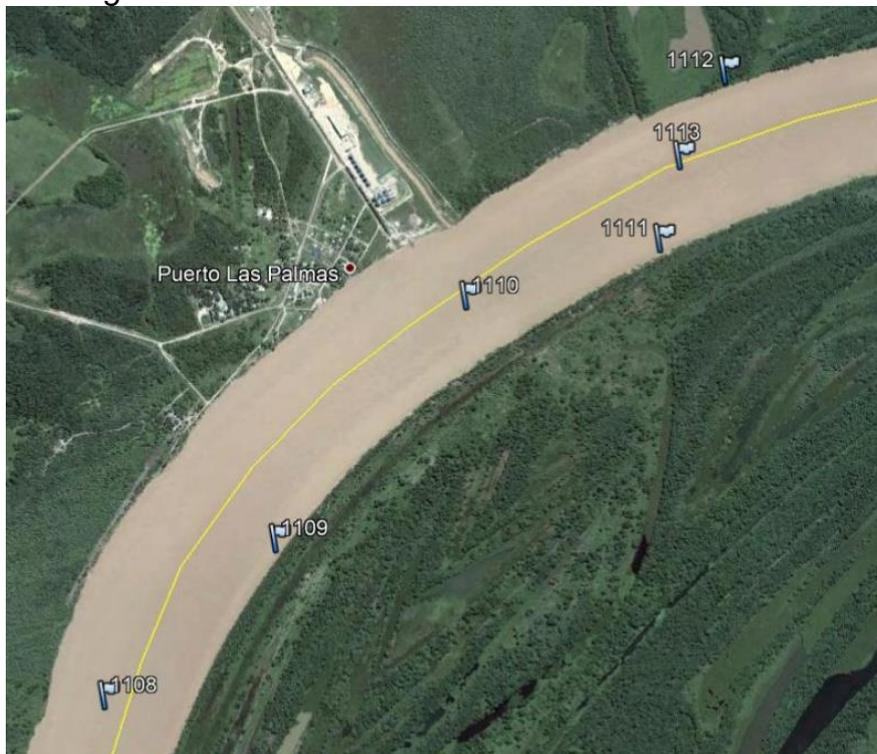


Figura 14: Granulometría de la muestra 1113 (eje de canal), μm

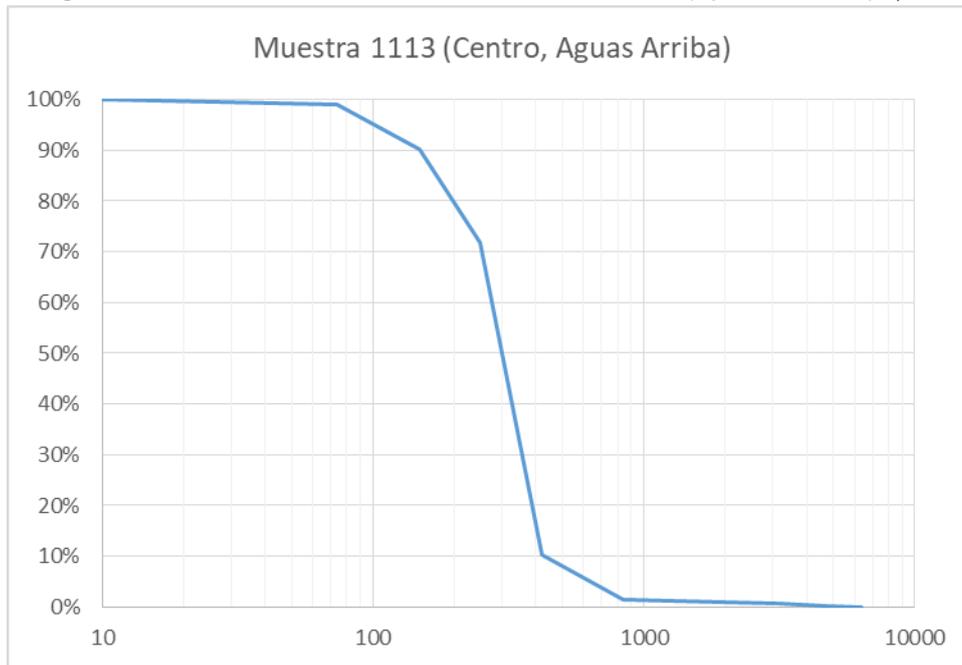


Figura 15: Granulometría de la muestra 1110 (eje de canal), μm

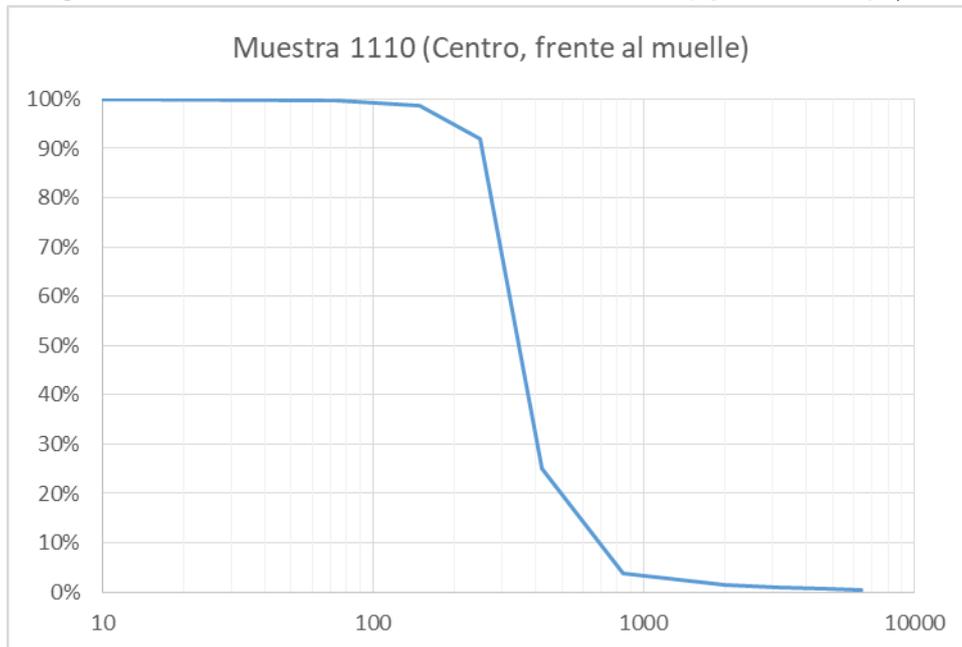
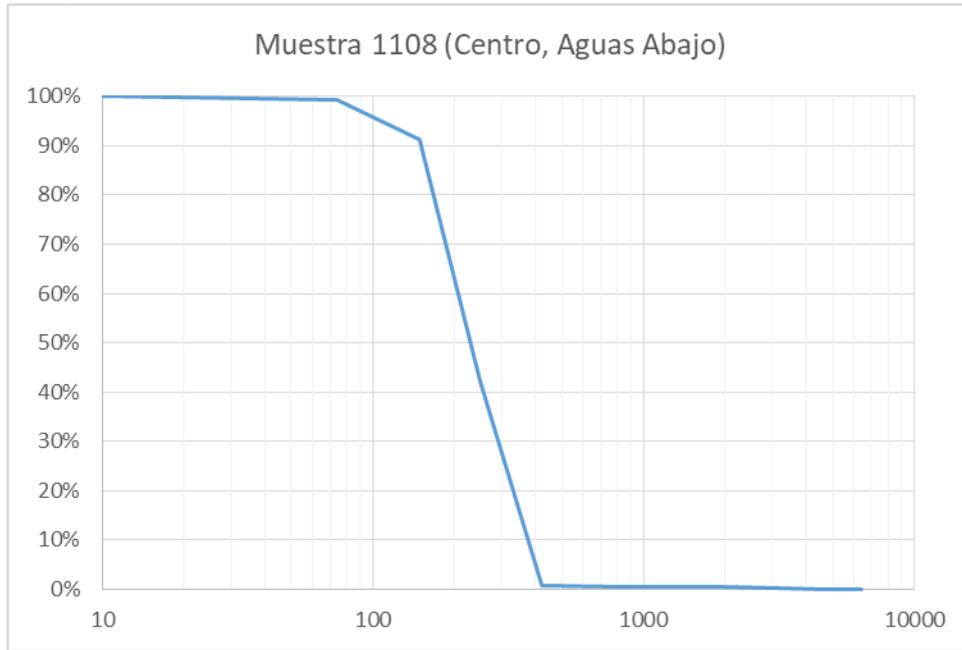


Figura 16: Granulometría de la muestra 1108 (eje de canal), μm 

En los tres casos, el material pasante el tamiz #200 es menor al 1%; y entre el tamiz #60 y #100 queda retenido más del 74%. La muestra obtenida frente al muelle fue la que demostró mayor contenido de granos más gruesos, con un porcentaje retenido en el tamiz #40 del 21%. Los diámetros D_{50} resultaron, de aguas arriba a aguas abajo, 300, 350 y 220 μm , respectivamente.

Tabla 1: Granulometría de muestra 1112, margen derecha, aguas arriba

Tamiz	Abertura μm	% Retenido	% Retenido Acum
1/4	6350	0%	0%
4	4760	0%	0%
1/8	3175	0%	0%
10	2000	0%	0%
20	840	0%	0%
40	420	0.4%	0.4%
60	250	0.4%	0.7%
100	149	0.7%	1.4%
200	74	3.2%	4.6%
Pasante T#200		95.4%	100.0%

Tabla 2: Granulometría de muestra 1111, margen izquierda, aguas arriba

Tamiz	Abertura μm	% Retenido	% Retenido Acum
1/4	6350	0%	0%
4	4760	0%	0%
1/8	3175	0%	0%
10	2000	0%	0%
20	840	0%	0%
40	420	0.3%	0.3%
60	250	0.6%	1.0%
100	149	1.3%	2.2%
200	74	7.0%	9.2%
Pasante T#200		90.8%	100.0%

Tabla 3: Granulometría de muestra 1109, margen izquierda, aguas abajo

Tamiz	Abertura μm	% Retenido	% Retenido Acum
1/4	6350	0%	0%
4	4760	0%	0%
1/8	3175	0%	0%
10	2000	0%	0%
20	840	0%	0%
40	420	0.4%	0.4%
60	250	0.4%	0.7%
100	149	0.4%	1.1%
200	74	4.2%	5.3%
Pasante T#200		94.7%	100.0%

Como se puede apreciar, las muestras indican suelos muy finos, plásticos en todos los casos.

4.4 CORRIDA DE FLOTADORES

Finalmente, entre los estudios de campo también se midieron las corrientes en un tramo del río. Luego, conociendo la altura del río y el perfil batimétrico, se estima el caudal del mismo durante el relevamiento.

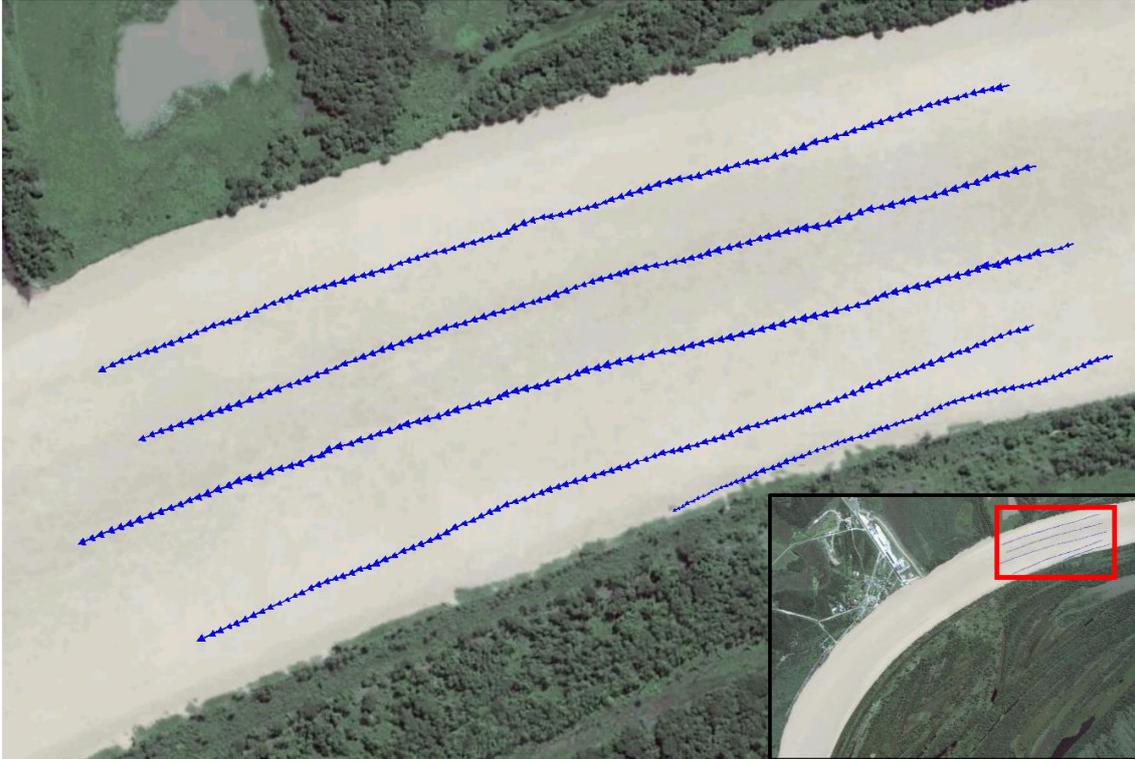
Para estudiar las corrientes se preparó una boya de muy baja superficie vélica donde se colocó un GPS. Se lanzó esta boya y se la dejó a la deriva durante 10-15 minutos. Se realizaron cinco corridas lanzando la boya desde distintos puntos distribuidos a lo ancho del río.

Finalmente, se recuperaron los *tracks* del GPS, compuestos por puntos registrados a intervalos regulares de tiempo. Cada uno de estos puntos está identificado con coordenadas geográficas y una marca de tiempo. Entonces, se procedió a la conversión de las coordenadas para medir la distancia entre ellos. Conociendo estas distancias y el intervalo de tiempo entre registros sucesivos, se obtuvieron velocidades que se aproximan a las instantáneas. La Figura 17 muestra una de las corridas de flotador y la Figura 18 grafica las líneas de corrientes obtenidas a partir de las mediciones.

Figura 17: Flotador a la deriva con GPS registrando el track



Figura 18: Gráfico de vectores de velocidades de corriente

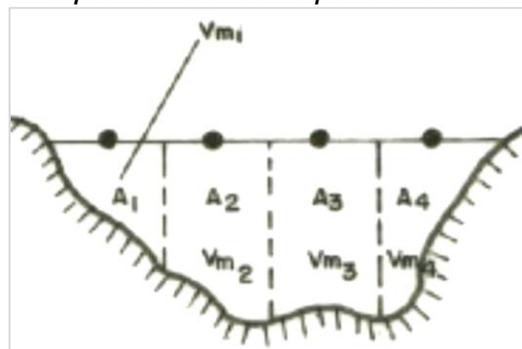


Las velocidades se mostraron muy uniformes, salvo en las cercanías a las márgenes. Las velocidades variaron alrededor de 1 m/s.

El caudal del río durante la corrida se aproxima a partir de las mediciones a través del siguiente procedimiento: se divide el área de la sección transversal del flujo en varias secciones de área (A_i), para las cuales se tienen velocidades superficiales (V_{Si}), y se estiman velocidades medias (V_{mi}) a partir de velocidades superficiales:

$$V_m = \frac{2}{3} V_s$$

Figura 19: Esquema ilustrativo para aforo con flotadores



Luego, el caudal total se determina como la sumatoria de los caudales parciales (q_i), de la siguiente manera:

$$Q = \sum_{i=1}^n q_i = V_{m1} A_1 + V_{m2} A_2 + \dots + V_{mn} A_n$$

El caudal aproximado a partir de los relevamientos es de 2.800 m³/s. Este caudal es similar al estimado en Puerto Bermejo para el mismo día, de 2.500 m³/s. La diferencia del 12% puede deberse errores propios de la medición y de los métodos de aproximación de caudales, aunque también podría explicarse por aporte de tributarios entre ambas secciones.

5.0 CARACTERIZACIÓN MORFO-HIDROSEDIMENTOLÓGICA DEL ÁREA DE ESTUDIO

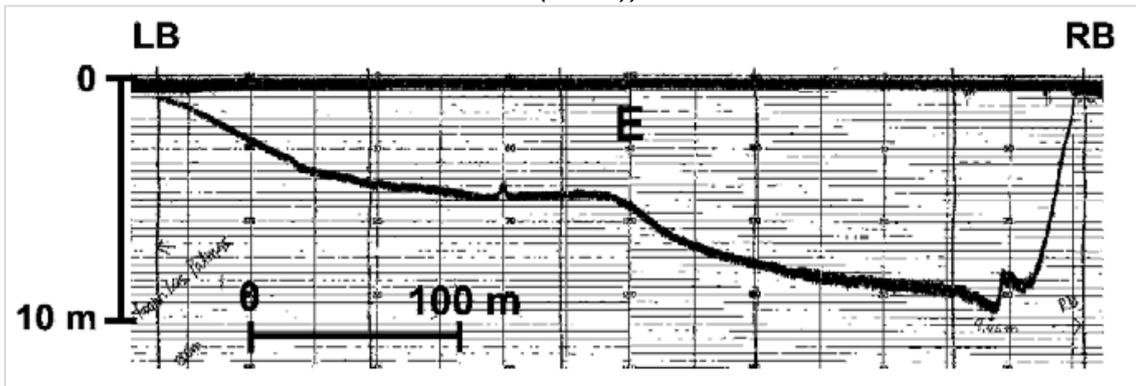
5.1 CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA

El Bajo Paraguay presenta un cauce meándrico, con una alta sinuosidad. El efecto de embalse del Pantanal retrasa las crecidas y permite la deposición de una gran cantidad de sedimentos. Así, el río fluye con una baja carga sólida aguas abajo del humedal. Este hecho contribuye a la estabilidad del canal principal y llanura de inundación del río Paraguay. Sin embargo, después de la desembocadura del río Bermejo, la inestabilidad del canal principal aumenta debido al enorme aporte de sedimentos del afluente.

En relación al tramo correspondiente a Puerto Las Palmas, Drago et al. (2008)³ lo señalan como un meandro extendido, posiblemente de doble cabeza actualmente en formación. La sección transversal (Figura 20) muestra una margen izquierda poco profunda y de bajo gradiente (barra de punta). El levée o dique natural está cubierto de bosques jóvenes de sauces (*Salix humboldtiana*) y alisos (*Tessaria integrifolia*), y grandes barras laterales emergen durante las etapas bajas del río. La margen cóncava es muy empinada y con el talweg cercano a la misma. La baja tasa de erosión de esta margen y su alto gradiente se deben a la composición resistente del limo-arcilla del levée, con numerosos tapones de arcilla.

³ Drago, E.C., Paira, A.R., Wantzen, K.M. (2008). "Channel-floodplain geomorphology and connectivity of the Lower Paraguay Hydrosystem". *Ecohydrology & Hydrobiology* Vol 8 N°1.

Figura 20: Sección cercana a Puerto Las Palmas (km 1265). (Fuente: Drago et al. (2008)).



En la Figura 21 puede observarse la evolución morfológica de la zona de Puerto Las Palmas, entre los años 2003 y 2017. Ambas imágenes pueden compararse ya que el nivel del río es similar en ambos casos: el nivel medio el día 17/01/2003 fue de +3,50 m, mientras que el día 19/03/2017 fue de +3,42 m (niveles registrados en Puerto Bermejo).

Figura 21: Evolución morfológica entre 2003 y 2017



Las imágenes muestran la aparición de una barra en la margen izquierda del río (margen convexa). Por otro lado, la margen derecha aguas arriba de Puerto Las Palmas no evidencia procesos de desplazamiento; mientras que desde Puerto Las Palmas y aguas abajo sí se observa erosión en la margen cóncava, midiéndose un retroceso máximo de alrededor de 70 metros. El detalle de la evolución morfológica en Puerto Las Palmas se muestra en la Figura 22. El retroceso de la margen es de 15 a 30 metros en la zona a proteger.

Figura 22: Evolución morfológica entre 2003 y 2017. Detalle Puerto Las Palmas

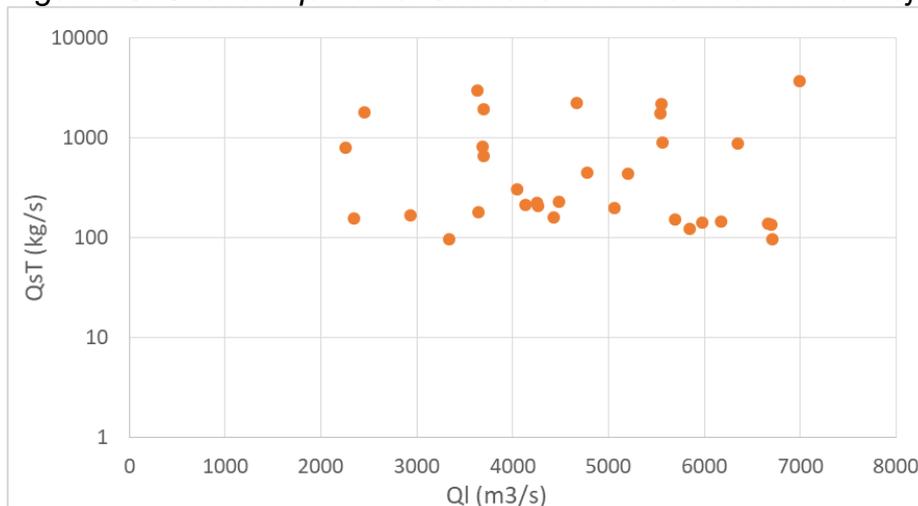


5.2 CARACTERIZACIÓN DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Los sedimentos transportados en suspensión por el río Paraguay son aportados en su gran mayoría por el río Bermejo, que descarga 16 km aguas arriba de Puerto Bermejo. Según el informe del Instituto Nacional del Agua para el Programa Estratégico de Acción de la Cuenca del Río Bermejo (1999), la alta carga de sedimentos suspendidos (carga de lavado) aportada por el río Bermejo constituye casi el 90% de los sólidos suspendidos del Paraná en Corrientes.

Como se mencionó en el apartado anterior, el gran aporte de sedimentos del río Bermejo influye sobre el comportamiento hidrosedimentológico del río Paraguay aguas abajo de su desembocadura, incrementando la inestabilidad de su cauce. Para evaluar las características hidrosedimentológicas de dicho tramo se cuenta con aforos de caudales líquidos y sólidos en Puerto Bermejo, medidos entre 2015 y 2018. Los mismos se plotean en la Figura 23.

Figura 23: Caudal líquido vs. Caudal sólido total. Puerto Bermejo



La débil relación entre caudal líquido y sólido se explica por el hecho de que este último está estrechamente relacionado al caudal líquido aportado por el río Bermejo, el cual -naturalmente- tiene su propio régimen, independiente del régimen hidrológico del río Paraguay. La Figura 23 sirve para ilustrar el amplio rango de variación que puede presentar el caudal sólido en el área de estudio.

5.3 CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA

En relación al régimen hidrológico, las crecidas anuales transitan el Bajo Paraguay generalmente en invierno y alcanzan a cubrir con una lámina de agua de un metro o más sobre la planicie de inundación. En Neiff et al. (2005)⁴ se reconocen tres fases hidrológicas: a) de flujo encauzado (aguas bajas); b) de desborde (cuando el río supera el albardón y el flujo es interferido por la vegetación del valle y c) cuando la crecida es de tal magnitud se sobrepasa el nivel de atenuación que ejerce la vegetación, y el río no sufre el efecto retardador de la planicie.

Los afluentes del Bajo Paraguay son el río Tebicuary, el Bermejo y una decena de arroyos y ríos de bajo caudal. Durante crecidas, la magnitud de sus aportes adquiere menor relevancia respecto a los caudales que transitan el río.

A pesar de que las cabeceras de los ríos Paraguay y Paraná están bajo el mismo régimen de lluvias, el efecto retardador del Pantanal retrasa la llegada a la confluencia del pico de inundación del Paraguay con respecto al pico del Paraná. Este retraso puede influir sobre la hidrodinámica del tramo inferior del río Paraguay: dada la baja pendiente de su lecho, cuando el río Paraná se encuentra en crecida y el Paraguay está bajo, se genera un remanso en este último, que puede extenderse cientos de kilómetros. El presente estudio se enfoca en escenarios de crecida del Paraguay, por lo que no se tendrá en cuenta ese efecto.

Cuando el Bajo Paraguay escurre sin la obstrucción del Paraná, la onda de crecida arriba a la confluencia tres días más tarde. Por lo tanto, la velocidad media es del orden de 1,1-1,5 m/s, si bien pueden registrarse valores puntuales de hasta 2,2 m/s próximo a la confluencia con el Paraná.

Ya que no se dispone de series de mediciones en Puerto Las Palmas, se analizarán los niveles hidrométricos registrados en localidades cercanas sobre el río Paraguay. En particular, se dispone de niveles hidrométricos y aforos en Puerto Bermejo, y datos de niveles en Isla del Cerrito. Los datos están disponibles en la base de datos hidrológicos de la Subsecretaría de Recursos

⁴ Neiff, J. J., C.A.E. Patiño y S.L. Casco. (2005). "Atenuación de las crecidas por los humedales de la Subsecretaría de Recursos Hídricos del Bajo Paraguay", 261-276 p. *Humedales fluviales de América del Sur. Hacia un manejo sustentable*. Capatto, J. y J. Peteán (eds.). Fundación Proteger. 350 p.

Hídricos de la República Argentina. A continuación se analizan las series con el objetivo de aproximar el comportamiento del río Paraguay en el área de estudio.

5.3.1 Niveles de río

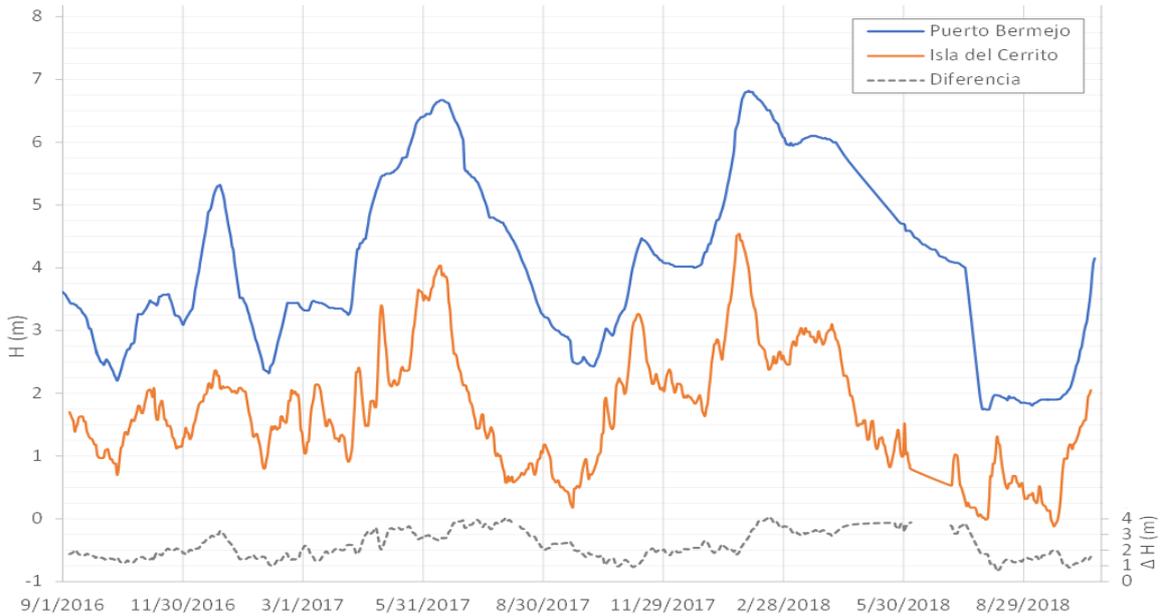
Los registros de nivel en Puerto Bermejo abarcan desde 1910 hasta la actualidad. En este caso, se trabajará con los datos correspondientes a los últimos 44 años (1975-2018). Por su lado, los registros en Isla del Cerrito corresponden al período 2016-2018. Ambas series se pueden observar en la Figura 24. A los efectos de comparar ambas series, los niveles están expresados con respecto al cero de Puerto Bermejo, ubicado a cota 46,25 m MOP.

Figura 24: Series de nivel medio diario del río Paraguay en Puerto Bermejo e Isla del Cerrito



La diferencia en el nivel entre ambos puertos se presenta en el eje secundario de la Figura 25. El nivel en Isla del Cerrito es entre 1 y 4 metros más bajo, lo que significa que la pendiente hidráulica del río Paraguay en dicho tramo puede variar entre 0,01 y 0,06 m/km. En aguas altas, para los picos de crecida de los años 2016 a 2018 la diferencia fue de 2 a 3 metros, como puede observarse en la Figura 25. Esto significa que la pendiente hidráulica del río Paraguay durante los picos de crecida fue de 0,03 a 0,04 m/km.

Figura 25: Diferencia de nivel de agua del río Paraguay entre Puerto Bermejo e Isla del Cerrito

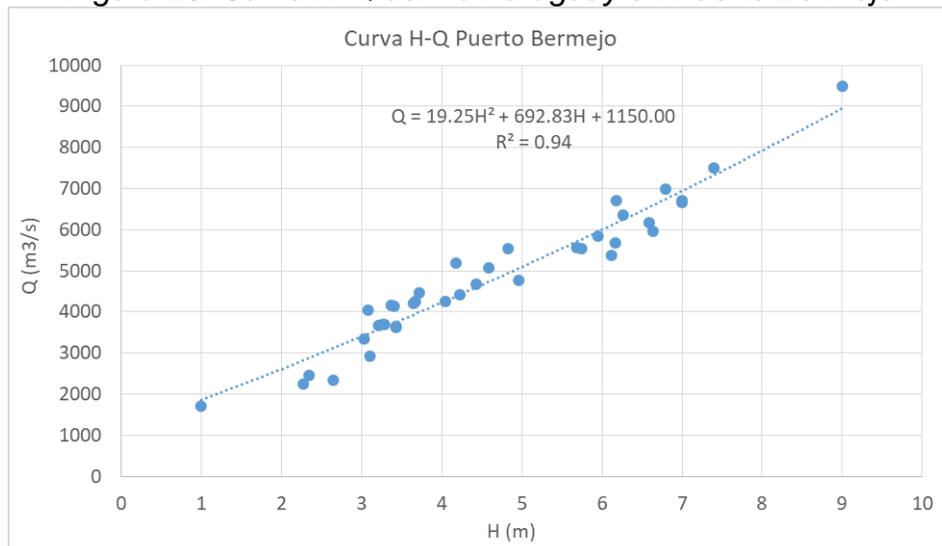


Como aproximación para estimar niveles durante crecidas en Puerto Las Palmas, y a falta de mediciones, se supondrá que la pendiente hidráulica del río Paraguay varía linealmente entre Puerto Bermejo e Isla del Cerrito y el nivel del río Paraguay en Puerto Las Palmas se ubicará entre ambos.

5.3.2 Relación altura-caudal

Para la estación de Puerto Bermejo para este informe se construyó la curva altura-caudal a partir de 36 aforos realizados entre 2015 y 2018 (Figura 26).

Figura 26: Curva H-Q del río Paraguay en Puerto Bermejo



Entre Puerto Bermejo y Puerto Las Palmas el afluente de mayor jerarquía es el Río de Oro, cuyo caudal se considera de menor importancia comparado con el que transita por el río Paraguay.

Para escenarios de crecida, y al no disponer de mediciones locales, el caudal en Puerto Las Palmas se adopta igual al caudal en Puerto Bermejo. Luego, la altura en Puerto Las Palmas se determina a partir del nivel derivado de la curva H-Q de Puerto Bermejo, considerando una pendiente hidráulica del río Paraguay de 0,04 m/km, como se explicó en el apartado anterior.

5.3.3 Recurrencia de caudales

Para analizar la recurrencia de caudales en Puerto Bermejo se utilizaron los niveles diarios máximos anuales correspondientes al período 1975-2018 medidos en esa estación. En realidad, esta metodología no sería exacta, aunque al no contarse con otras mediciones se la asume válida (se estaría asumiendo que la sección de aforo de Puerto Bermejo no sufrió cambios a lo largo del tiempo y que es hidrodinámicamente estable).

Los niveles de 2, 5, 20 y 50 años de recurrencia y sus correspondientes caudales se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4: Recurrencia de niveles hidrométricos y caudales en Puerto Bermejo

<i>Recurrencia (años)</i>	<i>Caudal (m³/s)</i>	<i>Nivel (m)</i>
2	6.200	6,2
5	7.300	7,4
20	8.800	8,8
50	9.800	9,8

Consecuente con las apreciaciones de Neiff mencionadas más arriba, los caudales de baja recurrencia en Puerto Las Palmas se adoptarán sin atenuaciones con respecto a los de Puerto Bermejo (desborde), mientras que para las crecidas recurrentes (2-5 años) se adoptará una atenuación del 5%. En la Tabla 5 se muestran los caudales de 2, 5, 20 y 50 años de recurrencia para Puerto Las Palmas. Sus alturas correspondientes se calculan a partir de las consideraciones expuestas en el apartado anterior.

Tabla 5: Recurrencia de niveles hidrométricos y caudales en Puerto Las Palmas

<i>Recurrencia (años)</i>	<i>Caudal (m³/s)</i>	<i>Nivel (m)</i>
2	6.200	4,2
5	7.300	5,4
20	8.800	6,8
50	9.800	7,8

6.0 MODELACIÓN HIDRODINÁMICA

6.1 INTRODUCCIÓN

La modelación hidrodinámica del área de estudio se realizó a través del modelo Delft3D. Delft3D (Deltares, 2017)⁵ permite la modelación hidrodinámica permanente y no permanente del flujo, en dos o tres dimensiones. Dicho programa incorpora también los efectos de mareas, vientos, presión atmosférica, diferencias de densidad (debidas a gradientes en salinidad y temperatura), olas, turbulencia y permite la simulación del flujo con o sin transporte de sedimentos, teniendo en cuenta una morfología fija o variable.

La herramienta de pre-procesamiento RGFGRID permite generar de un dominio de cálculo con mallas de diferentes grados de refinamiento. La herramienta de modelación hidrodinámica del software Delft3D es el módulo Delft3D-FLOW. Este módulo resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas en la escala temporal de Reynolds (RANS) para un fluido incompresible sobre un esquema de diferencias finitas en coordenadas rectangulares o curvilíneas.

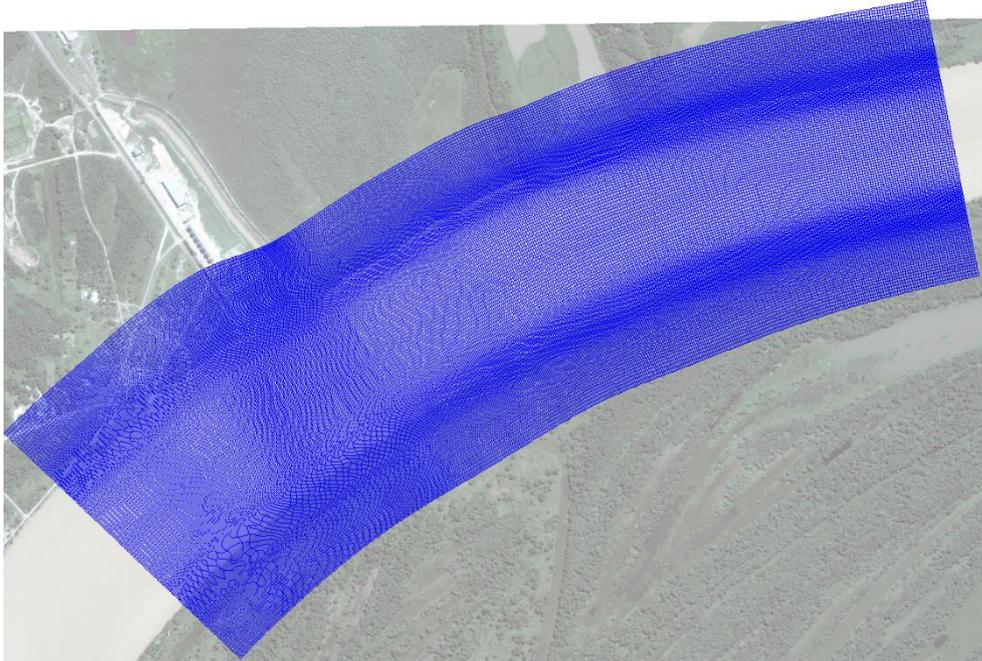
En este caso, la modelación hidrodinámica tiene por objeto evaluar el campo de velocidades en la zona costera de Puerto Las Palmas durante eventos de crecida. Considerando que los pulsos de inundación del río Paraguay duran meses, y que las variaciones de nivel durante el pico no son de gran magnitud, se operó el modelo a régimen permanente.

A continuación se describe el modelo hidrodinámico bidimensional y a fondo fijo del área de estudio, operado bajo régimen permanente.

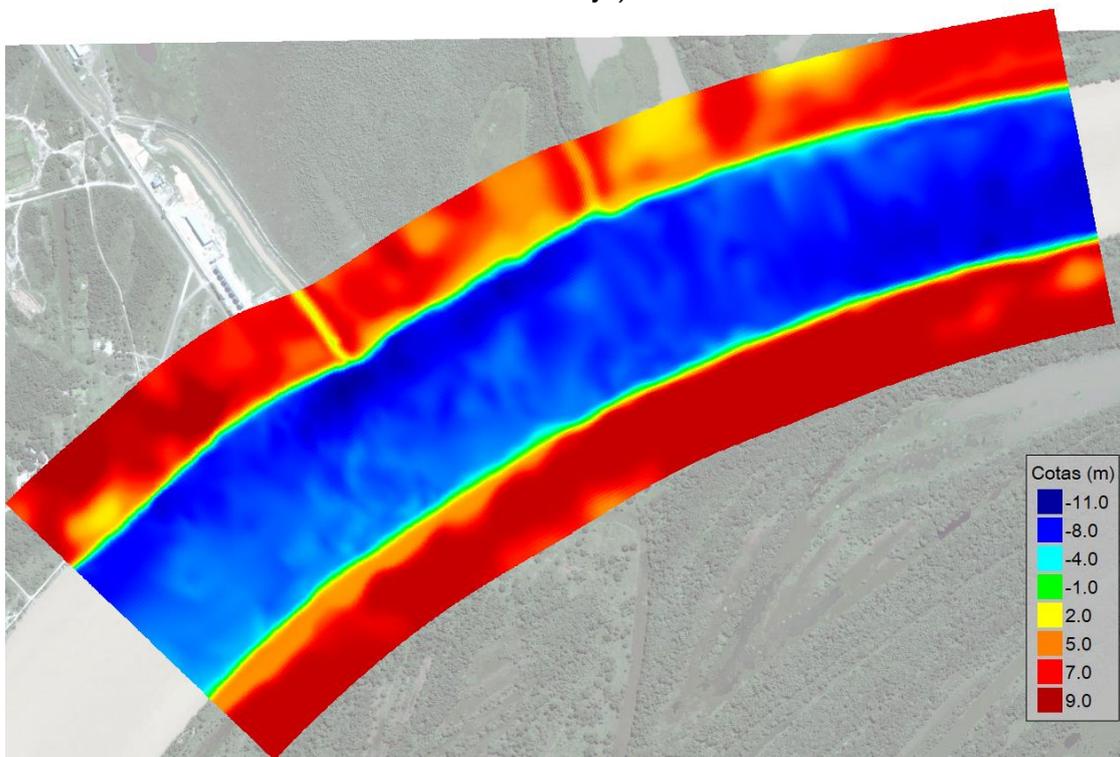
6.2 CONFIGURACIÓN DEL MODELO

El dominio de cálculo abarca una longitud de 3,5 km (2,5 km aguas arriba y 1 km aguas abajo de Puerto Las Palmas). La Figura 27 presenta la grilla de cálculo generada. El tamaño de las celdas varía entre 4 y 8 metros, siendo mayor la densificación en la zona de márgenes y frente a Puerto Las Palmas.

⁵ Deltares (2017). "User manual Delft3D-FLOW". Deltares, Delft: 682 pp.

Figura 27: Grilla generada en dominio de cálculo

Las profundidades se obtuvieron a partir de la batimetría realizada, complementada con mediciones del GPS Diferencial e información extraída del modelo digital de elevaciones SRTM IGN. El mapeo de profundidades obtenido para el dominio se muestra en la Figura 28.

Figura 28: Mapeo de cotas topobatimétricas (referidas al cero de Puerto Bermejo)

6.3 AJUSTE DEL MODELO

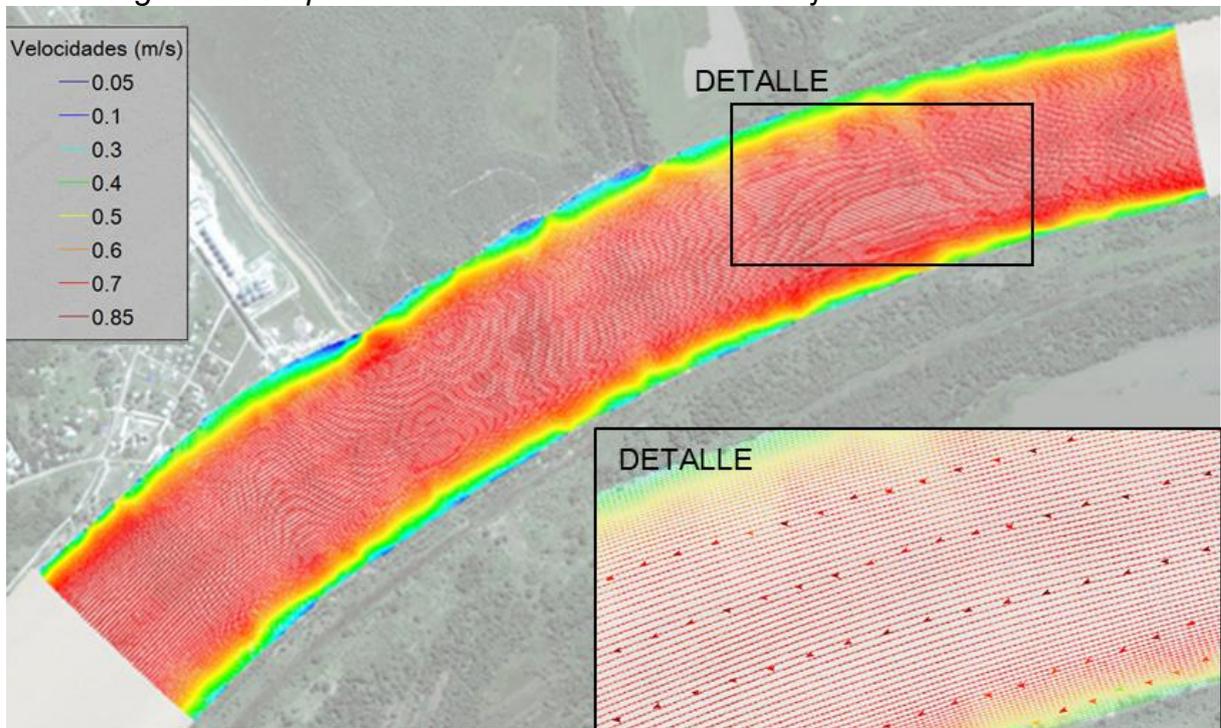
Mediante el ajuste del modelo se busca que las velocidades calculadas por el modelo presenten una adecuada aproximación a valores medidos para una determinada situación hidrodinámica del río.

Para ello se utilizaron los datos registrados durante la corrida de flotadores, que permitieron calcular las velocidades medias promediadas en la vertical a lo largo de la trayectoria de los flotadores y un caudal de 2.800 m³/s. Además, en ese día se registró el nivel del río en el muelle de Puerto Las Palmas, que fue de 47,37 m MOP, equivalente a cota +1,12 m con respecto al cero de Puerto Bermejo.

Por otro lado, el principal parámetro de calibración en el modelo es la rugosidad del fondo, expresada a través del coeficiente de Manning. En este caso se utilizó una distribución espacial de los valores de dicho coeficiente variando entre 0,018 y 0,022 para el cauce principal, 0,028 en llanura de inundación y 0,035 para llanura de inundación con abundante vegetación.

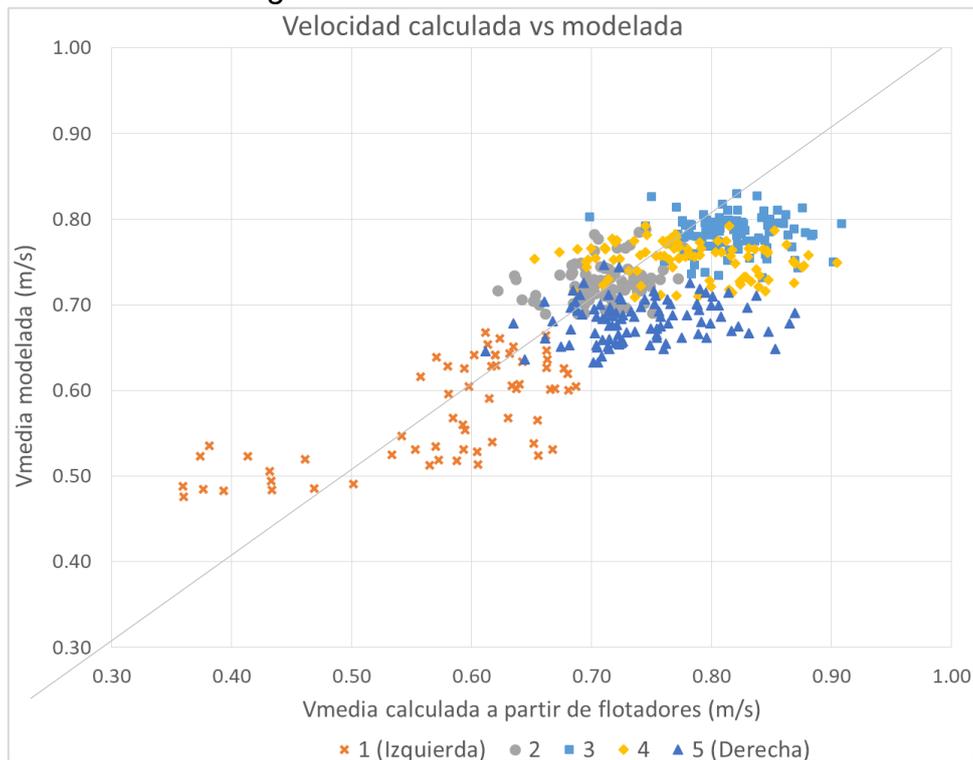
El modelo fue operado con el caudal indicado de 2.800 m³/s ingresante por su borde norte y con un nivel de +1,1 m establecido en el extremo sur. La Figura 29 muestra el mapa obtenido de velocidades promediadas en la vertical. En el detalle se muestran superpuestas las velocidades medias obtenidas a partir de los flotadores.

Figura 29: Mapa de Velocidades. Resultado del ajuste del modelo



La Figura 30 muestra las velocidades obtenidas de la modelación superpuestas a la nube de puntos correspondiente a las velocidades medias aproximadas a partir de los flotadores. Se diferenciaron las velocidades correspondientes a las cinco corridas del flotador, desde la más próxima a la margen izquierda (corrida 1) a la más cercana a la margen derecha (corrida 5). En general, se observa un buen ajuste entre las velocidades medias calculadas a partir de los flotadores y las obtenidas por modelación. Para cada corrida se destaca que el rango de variación de velocidad es mayor para la calculada a partir de flotadores que para la modelada; sin embargo la velocidad promedio no presenta importantes diferencias.

Figura 30: Relación de velocidades



6.4 ESCENARIOS DE MODELACIÓN

Para el estudio se modelaron diversos escenarios de prueba para conocer los impactos de distintas alternativas de protecciones costeras. Esto permitió identificar aquellas que resultaban más significativas para modelar y analizar en más profundidad. A continuación se presentan dichos escenarios seleccionados.

6.4.1 Escenario 0: Escenario actual

Este escenario se refiere a la situación actual, sin obras, pero con distintas situaciones de niveles y caudales en coincidencia con las crecidas de 5, 20 y 50 años de recurrencia. El escenario sí tiene en cuenta el tablestacado ya construido posterior al muelle.

Las situaciones de crecida se caracterizan mediante el caudal ingresante aguas arriba y el nivel en el borde aguas abajo del modelo. Dichos datos son obtenidos a partir de la caracterización hidrológica realizada, y se sintetizan en la Tabla 6.

Tabla 6: Niveles hidrométricos y caudales de crecidas modeladas

<i>Recurrencia (años)</i>	<i>Caudal (m³/s)</i>	<i>Nivel (m)</i>
5	7.300	5,4
20	8.800	6,8
50	9.800	7,8

6.4.2 Escenario 1: Protección longitudinal

Este escenario considera la construcción de una protección longitudinal continua e impermeable a lo largo de la zona costera de Puerto Las Palmas, con una longitud de 260 metros (la protección puede ser materializada con piedraplén, tablestacado, geotubos, u otros). La cota de coronamiento de la protección sería similar a la del tablestacado existente, a cota 52,0 m MOP, lo que equivale a cota +5,75 m con respecto al cero de Puerto Bermejo. La Figura 31 muestra el esquema en planta del escenario modelado.

Figura 31: Esquema de protección longitudinal. Escenario 1



Nuevamente se corrió el modelo para las crecidas de 5, 20 y 50 años de recurrencia con las condiciones de borde presentadas en la Tabla 6.

6.4.3 Escenario 2: Protección transversal

Se plantea la protección a través de tres espigones transversales que se extienden desde la zona elevada de la costa y se adentran unos 12 m desde la barranca hacia el cauce. Se adoptó una separación de 50 m entre espigones.

El esquema de la protección transversal modelada para el Escenario 2 se muestra en la Figura 32.

Figura 32: Esquema de protección transversal. Escenario 2



Se opera el modelo del Escenario 2 para crecidas de 5, 20 y 50 años de recurrencia, y las condiciones de borde son las presentadas en la Tabla 6.

6.5 RESULTADOS DE LA MODELACIÓN HIDRODINÁMICA

A continuación se muestran los resultados de la modelación para los distintos escenarios. En particular, se exponen los resultados de una crecida de 20 años de recurrencia ya que, en este caso, se considera adecuada para evaluar alternativas de protección costera. Los resultados correspondientes a crecidas de 5 y 50 años de recurrencia se exponen en el Anexo 1.

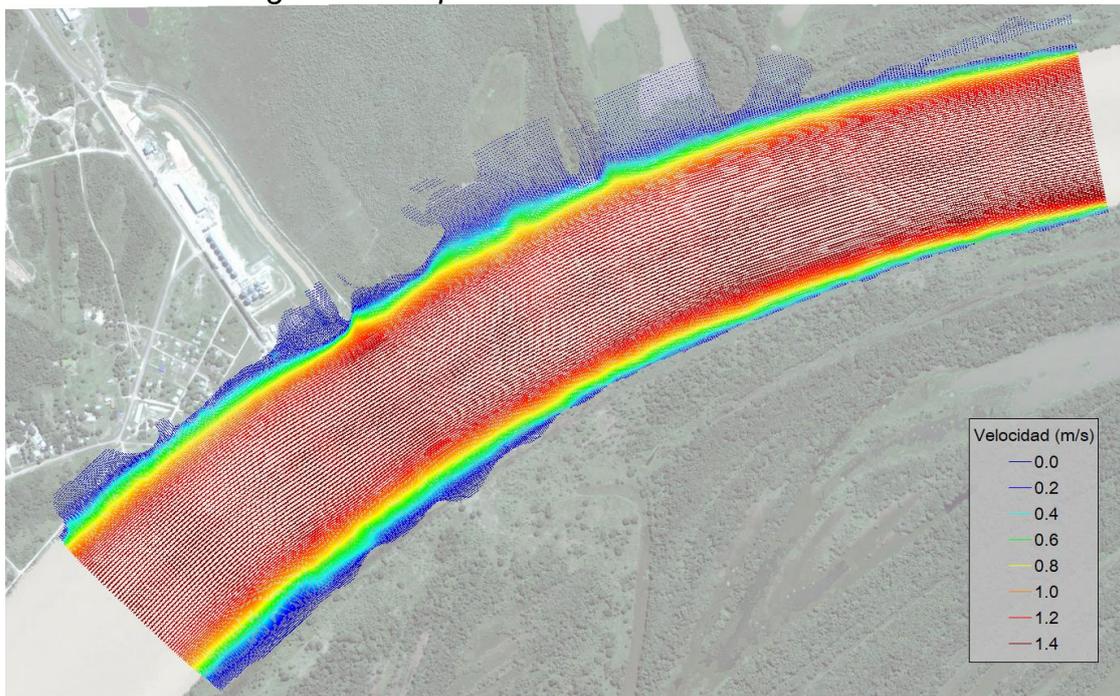
6.5.1 Resultados de la modelación del Escenario 0

Los mapeos de profundidades y velocidades para el escenario sin obras se muestran en las Figuras 33 y 34.

Figura 33: Mapa de Profundidades. Escenario 0

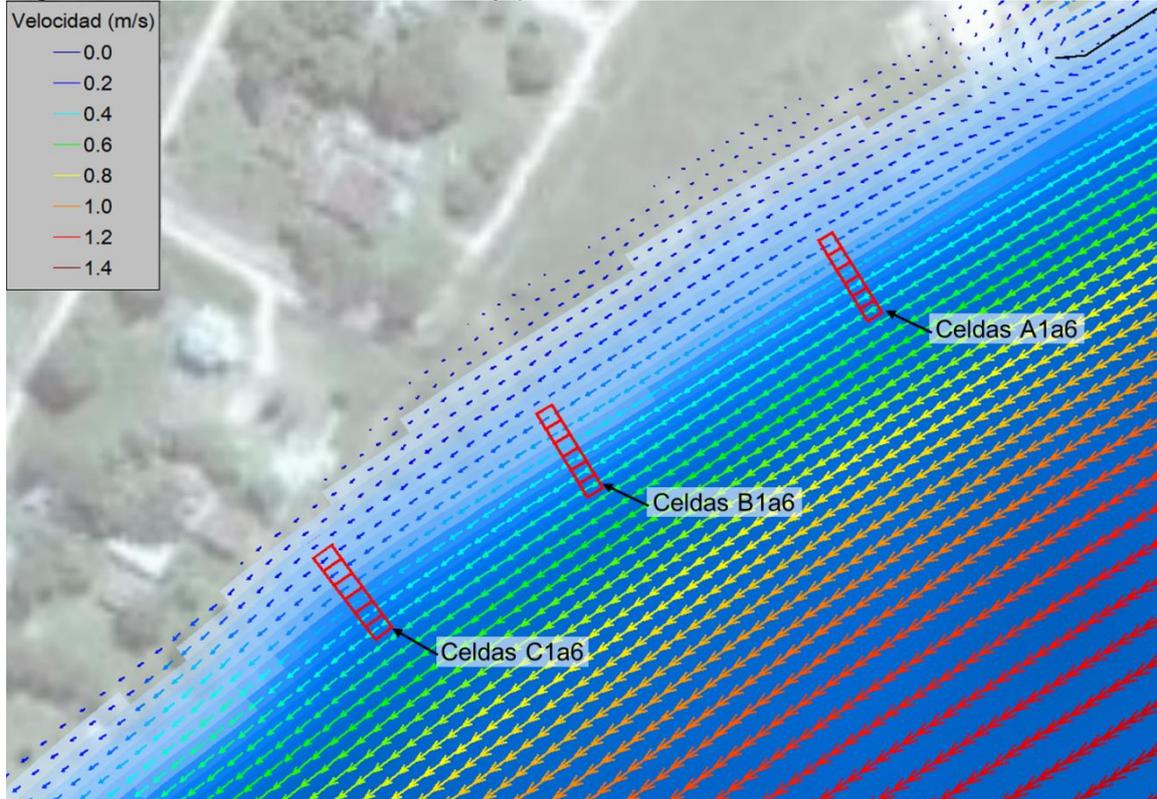


Figura 34: Mapa de Velocidades. Escenario 0



La Figura 35 muestra un detalle de las velocidades y profundidades en la zona costera de Puerto Las Palmas. Debe notarse que durante la crecida de 20 años de recurrencia se supera la cota superior del tablestacado existente (aproximadamente un metro).

Figura 35: Detalle de velocidades y profundidades en zona costera. Escenario 0



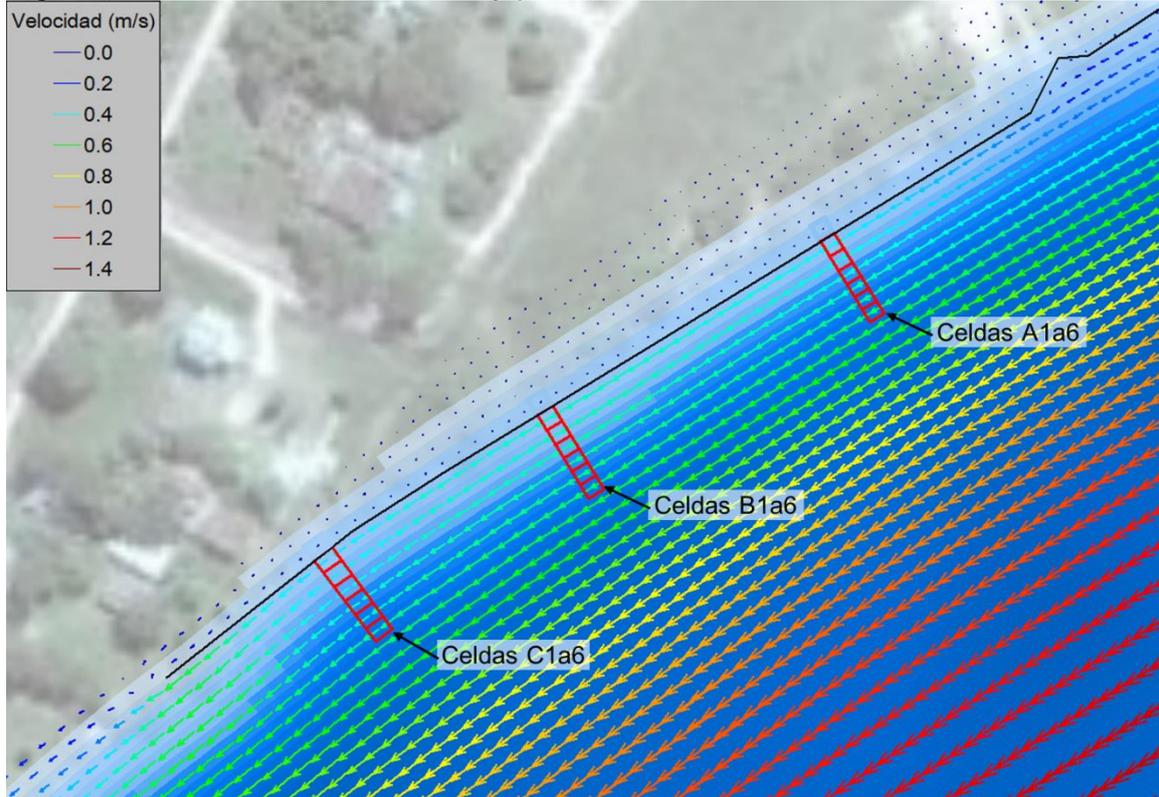
La velocidad media en la zona más cercana a la costa es de 0,2 a 0,4 m/s, mientras que en el centro del cauce presenta valores cercanos a 1,4 m/s. Esta variación de las velocidades se da en correspondencia con un notable incremento de profundidades: de 1 m a 14 m en 50 m, aproximadamente.

Para la posterior comparación de alternativas, se registran las velocidades en tres zonas que se evalúa proteger a lo largo de la zona intermedia entre el muelle de Puerto Las Palmas y las dependencias de la PNA (Celdas A1 a A6, B1 a B6 y C1 a C6, ver Figura 35).

6.5.2 Resultados de la modelación del Escenario 1

En un plano general, los mapeos de profundidades y velocidades para este escenario serán similares a los del Escenario 0 (Figuras 33 y 34). Pero al observar en detalle, la protección longitudinal incrementa las velocidades en la zona de la margen a 0,5 m/s (Figura 36).

Figura 36: Detalle de velocidades y profundidades en zona costera. Escenario 1

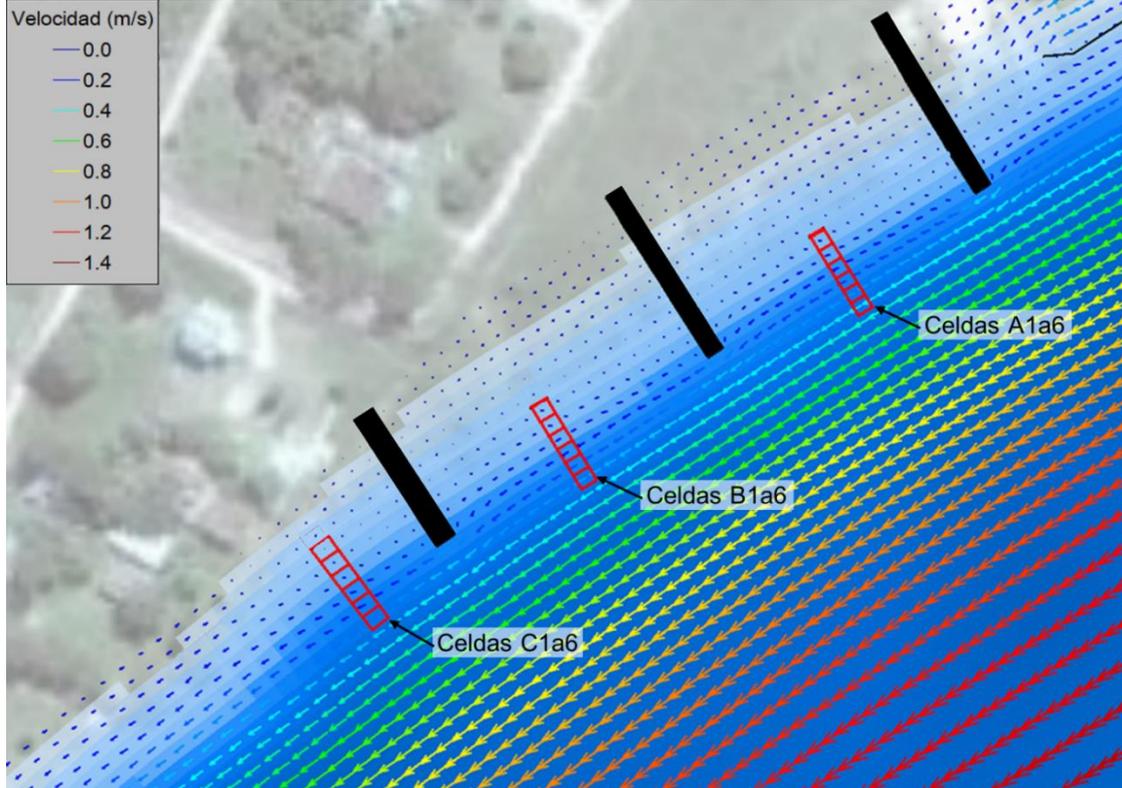


6.5.3 Resultados de la modelación del Escenario 2

La corrida del modelo para el Escenario 2 muestra como los espigones modifican el patrón de velocidades a nivel local, en la zona costera de Puerto Las Palmas, como se observa en la Figura 37.

El efecto más notorio es la reducción de las velocidades en la costa, inmediatamente aguas abajo de los espigones. También se observa una leve aceleración del flujo en la sección de los espigones, debido a la contracción que genera su presencia.

Figura 37: Detalle de velocidades y profundidades en zona costera. Escenario 2



6.5.4 Comparación de resultados

A continuación, en la Tabla 7, se presentan las velocidades promediadas en la vertical para los distintos escenarios y las distintas celdas identificadas como puntos de control en la Figuras 35, 36 y 37.

En el Escenario 1 se genera un incremento de las velocidades al avanzar hacia la protección longitudinal propuesta. El máximo incremento se da en la celda contigua a la protección, en el tramo final de la misma (celda C6) y es del 82%. Si bien un incremento de velocidades significa un incremento en el poder erosivo del flujo, la margen estará defendida por la obra de protección.

En comparación, las obras del Escenario 2 producen una significativa disminución de las velocidades cerca de la costa que, por lo tanto, sufrirá menos el proceso erosivo del flujo.

Tabla 7: Velocidades medias en celdas indicadas. Escenarios 0, 1, y 2

Celda	A1	A2	A3	A4	A5	A6
Escenario 0	0,48	0,44	0,40	0,36	0,32	0,28
Escenario 1	0,52	0,49	0,46	0,43	0,41	0,40
Variación %	+8%	+11%	+15%	+21%	+29%	+45%
Escenario 2	0,38	0,32	0,25	0,19	0,13	0,07
Variación %	-20%	-27%	-37%	-47%	-60%	-73%
Celda	B1	B2	B3	B4	B5	B6
Escenario 0	0,48	0,44	0,40	0,37	0,33	0,29
Escenario 1	0,52	0,50	0,48	0,46	0,45	0,44
Variación %	+10%	+14%	+19%	+26%	+36%	+51%
Escenario 2	0,33	0,26	0,20	0,15	0,09	0,05
Variación %	-32%	-40%	-50%	-60%	-72%	-84%
Celda	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Escenario 0	0,41	0,39	0,34	0,30	0,25	0,21
Escenario 1	0,49	0,46	0,43	0,41	0,39	0,39
Variación %	+17%	+18%	+26%	+38%	+56%	+82%
Escenario 2	0,29	0,21	0,14	0,08	0,04	0,00
Variación %	-31%	-45%	-58%	-72%	-85%	-100%

Las alternativas evaluadas protegen a la costa de la erosión a través de diferentes mecanismos. En el primer caso (Escenario 1) se impide la erosión de la barranca al protegerla mediante una pantalla o tablestacado vertical o revestimiento. En tanto, en el Escenario 2 se genera una reducción de las velocidades en la orilla mediante la incorporación de espigones transversales al flujo, que son elementos que penetran en el cauce.

En la siguiente sección se procede con el análisis de los aspectos relacionados a la erosión para cada uno de los escenarios modelados.