

BALANCE SEDIMENTOLOGICO SIMPLIFICADO PARA EL RÍO CUARTO, CÓRDOBA **Corral M.¹, Baldissone M.¹, Farias H.D.², Rodriguez A.¹ y López F¹.**

¹Universidad Nacional de Córdoba. Av. Velez Sarsfield 1611. TE: 4334446. mcorral@com.uncor.edu

²Inst. de Rec. Hídr, FCEyT, Universidad Nacional de Santiago del Estero. Argentina. hdf@unse.edu.ar

RESUMEN

En las últimas décadas se ha observado en el cauce natural del Río Cuarto un continuo proceso de profundización del cauce, erosión y desestabilización de márgenes, movimientos de meandros, afectando obras de infraestructura como los puentes de la ciudad y por lo tanto requiriendo importantes inversiones para asegurar la estabilidad de las obras, como por ejemplo las obras de los azudes de los puentes Carretero y Ferroviario de la ciudad de Río Cuarto. En este trabajo se ha evaluado la presión de la extracción de áridos, actividad que se realiza con intensidad sobre el cauce del Río Cuarto, mediante un balance sedimentológico simplificado del tramo en estudio. Para esto ha sido necesario cuantificar la erosión en el fondo con el apoyo de un modelo a largo plazo (Corral et. al, 2007), estimar la tasa de erosión lateral con el apoyo de fotografías aéreas e imágenes satelitales de alta resolución y relevar las explotaciones existentes.

ABSTRACT

Along the last decades it was observed that the Rio Cuarto river channel experienced a remarkable process of bed degradation. This phenomenon was combined with morphological processes such as bank erosion and meander migration, which affected important infrastructure works located along the channel. The main problems were observed at the bridges which are important communication ways in the Rio Cuarto City. Important investments were necessary to control the river activity. Among the main works, two weirs were constructed in order to fix the river bed and avoid damages to road and railway bridges. This paper is focused in evaluate the effect of sand and gravel mining on the river behavior. A methodology based on a simplified sediment balance is applied to the river reach, with the aim of estimate the river degradation in the long time scale. Also, the lateral migration processes are estimated from a multi-temporal analysis of aerial photographs and satellite images. The predictions were compared with volumetric estimations based on site measurements of mining places, and the results were reasonable.

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas se ha observado en el cauce natural del Río Cuarto un continuo proceso de profundización del cauce, erosión y desestabilización de márgenes, movimientos de meandros, entre otros. Esto ha generado la afectación de obras de infraestructura como los puentes de la ciudad requiriéndose importantes inversiones para asegurar la estabilidad de las obras, como por ejemplo las obras de los azudes de los puentes Carretero y Ferroviario. En la Figura 1 se muestra una serie de perfiles transversales sobre el Puente Malvinas, en donde se puede apreciar un descenso del lecho del orden de 5 m en 45 años (0,11 m/año).

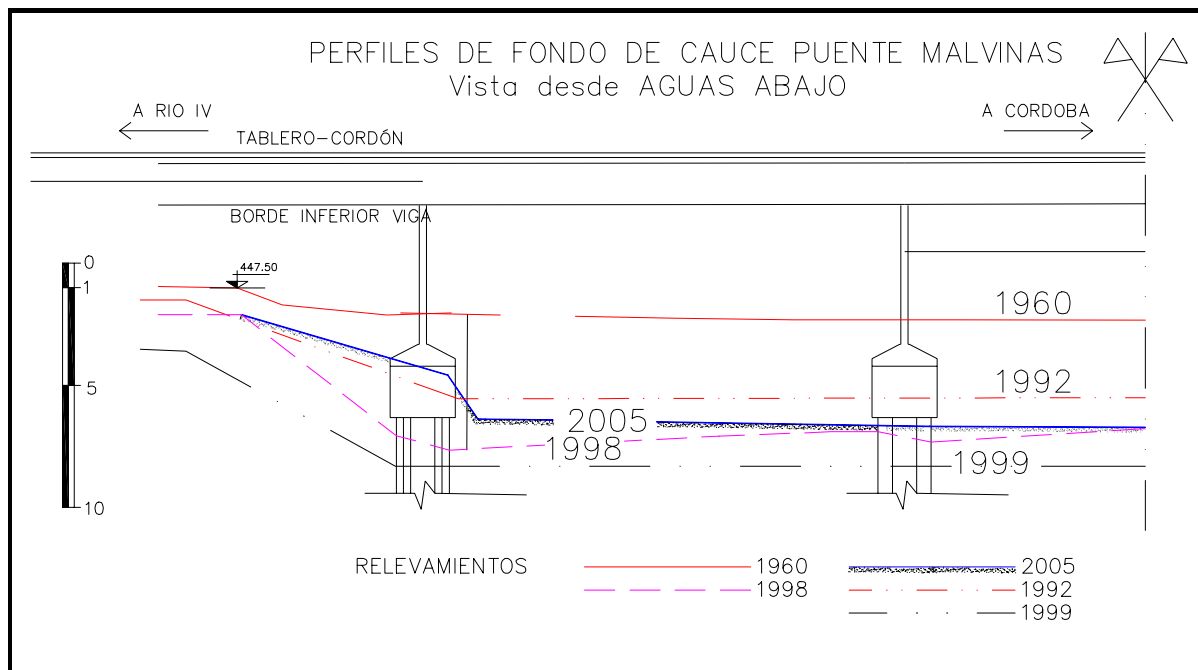


Figura 1.- Perfiles transversales sobre Puente Malvinas.

Existen causas naturales y antrópicas que son atribuidas a este problema. Entre las primeras se incluyen la modificación geomorfológico natural del cauce y cuenca de aporte, como aquellas derivadas de un cambio general del régimen de aporte de caudales al río. Entre las antrópicas pueden mencionarse modificaciones del uso del suelo en la cuenca (desmonte de bosque natural), intervención sobre el escurrimiento natural del río (azudes), o bien modificaciones en las tasas de aporte sedimentológico (extracción de áridos).

Los objetivos principales del presente trabajo han sido, en primer lugar determinar el aporte sólido al tramo urbano del río mediante el análisis de las mediciones topográficas, hidrométricas y sedimentológicas realizadas.

En segundo lugar ha sido evaluar la presión de la extracción de áridos sobre el cauce del Río Cuarto, mediante un balance sedimentológico simplificado. Para esto ha sido necesario cuantificar la erosión en el fondo con un modelo a largo plazo presentado en Corral et. al (2007), estimar la tasa de erosión lateral con el apoyo de fotografías aéreas e imágenes satelitales de alta resolución y relevar las explotaciones existentes.

APORTE AL TRAMO URBANO

Para la medición de caudales líquidos se han utilizado las técnicas convencionales de aforos con molinetes, como así también se ha emplazado un limnómetro en una de las secciones consideradas claves del estudio. La frecuencia de muestreo de éstas variables ha sido bimensual y en el período de estiaje y en cada evento de crecida.

Para la medición de caudales sólidos se ha desarrollado instrumental similar a la trampa para sedimentos diseñada por Helley y Smith (1971) con modificaciones ad hoc. Estos aforos sólidos han también una frecuencia bimensual y se han realizado en forma simultánea al aforo líquido. Para la medición del caudal sólido en suspensión se ha utilizado el muestreador US-DH48, en forma simultánea a los aforos de carga de fondo. Desde el punto de vista teórico se han comparado las mediciones con expresiones de la literatura.

A partir de los aforos líquidos y sólidos durante las crecidas se ha seleccionado como estimador para el caudal sólido la función de transporte de MPM modificada por Engelund-Fredsoe (Corral et al., 2006), la cual se presenta en la Figura 2.

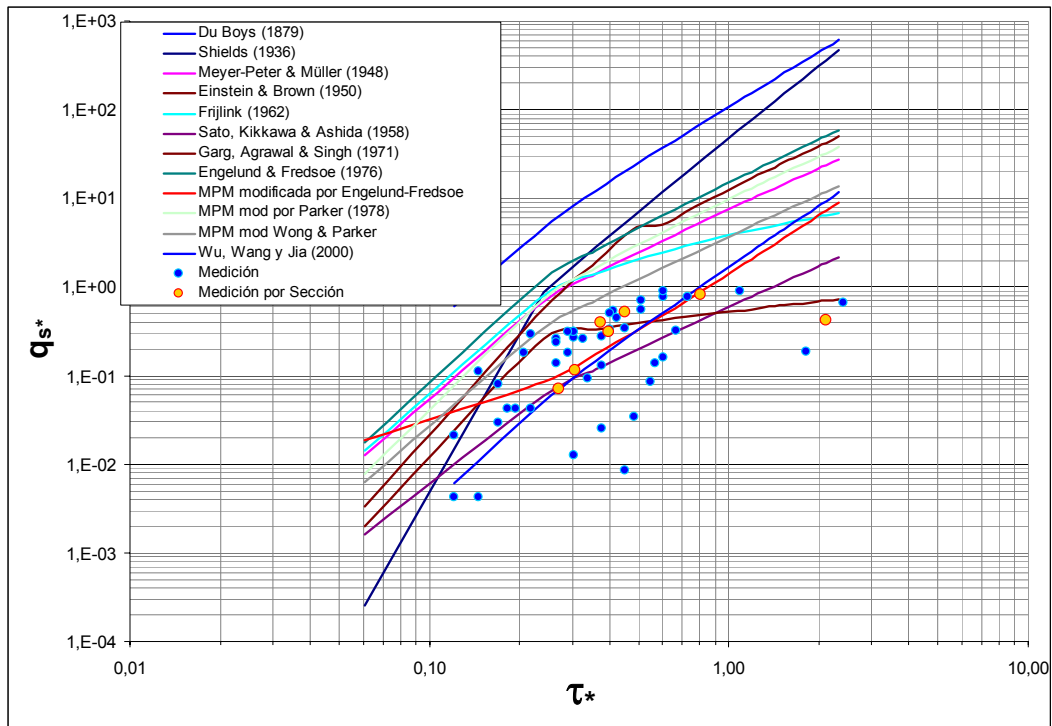


Figura 2.- Comparación de las estimaciones y mediciones para transporte sólido.

Para verificar la calidad del estimador de caudal sólido seleccionado se analizaron los hidrogramas más significantes del período en estudio, los cuales tuvieron caudales pico entre 100 y 1.000 m³/s y se estimaron los parámetros de los mismos (caudal máximo, duración, volumen, caudal medio, etc.). Se presentan a continuación los hidrogramas más relevantes.

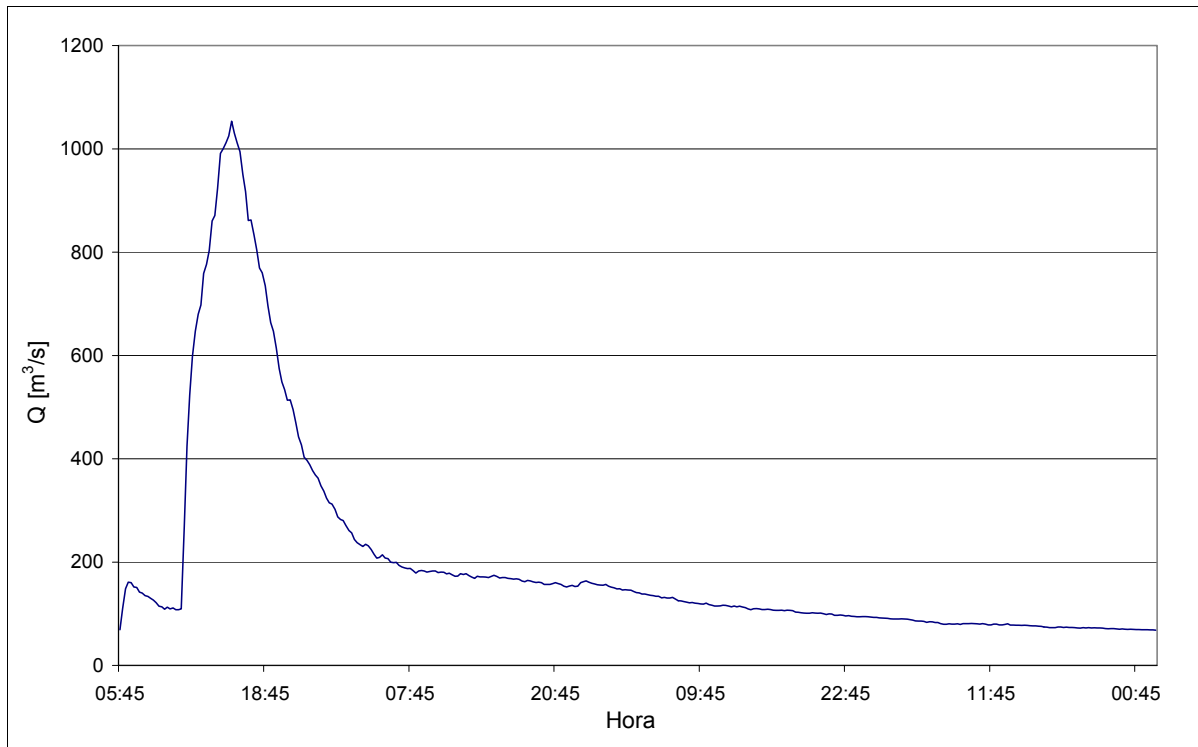


Figura 3.- Hidrograma crecida 07-01-2007.

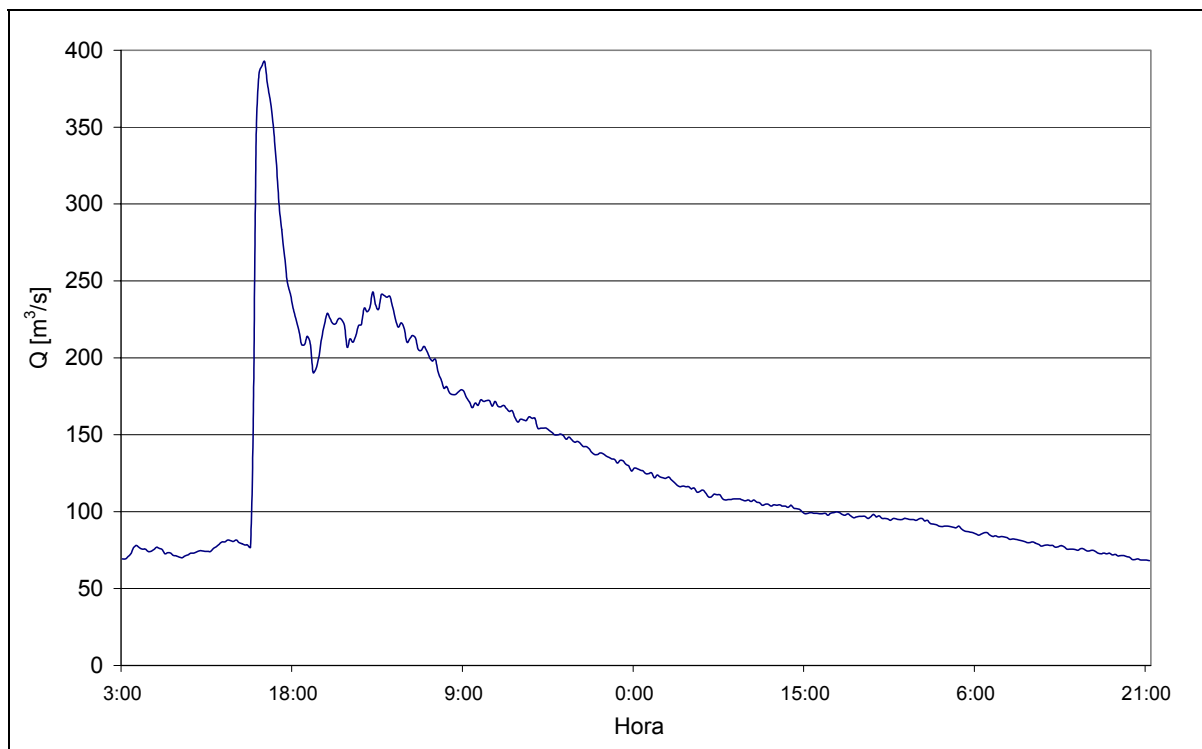


Figura 4.- Hidrograma crecida 11-01-2007.

Se han analizado los parámetros de los hidrogramas medidos los cuales se presentan en la Tabla 1. Además debido a la disponibilidad de la serie continua de caudales líquidos (limnómetro) se ha confeccionado la correspondiente serie de caudal sólido que ingresa al

tramo y se ha integrado en el tiempo para estimar el volumen depositado en el tramo (última fila en Tabla 1). Es importante comentar que en el tramo en estudio se han emplazado dos azudes para la retención de sedimentos, los cuales retienen prácticamente la totalidad de los sedimentos que llegan al tramo, particularmente las fracciones que son de interés para su extracción y sobre las cuales se basa este trabajo.

Se adjunta además en la última columna de la Tabla 1 el resultado de las mediciones topográficas realizadas, el cual comprende el seguimiento temporal de 16 secciones transversales antes y después de la época de crecidas. Como se puede observar la suma de los volúmenes aportados estimados es del mismo orden que la obtenida por mediciones de campo y por lo tanto se considera que para los propósitos del presente cumple con la precisión buscada.

Tabla 1.- Resumen de Hidrogramas

Parámetro	Unidad	07-01-07	11-01-07	Relev. Top.
Qmax	(m³/s)	1.060	393	
Recurrencia	(años)	20	10	
Duración	(días)	1,0	1,5	
Volumen	(Hm³)	40	30	
Qmedio	(m³/s)	460	230	
Vol. Sólido	(m³)	54.000	35.000	90.000

Con el apoyo de herramientas estadísticas se ha determinado el aporte medio anual de sedimentos al tramo en estudio, basado en las mediciones de caudal líquido y con el empleo de la función de transporte seleccionada para el Río Cuarto.

Para determinar el aporte medio anual en forma estadística, se ha considerado la curva de frecuencia de caudales la cual vincula la probabilidad de ocurrencia con el caudal líquido y con la función de transporte el caudal sólido. Del análisis estadístico ha surgido que el valor esperado del caudal sólido es del orden de **50.000 m³/año**, el cual se compone de un promedio de **18.250 m³ anuales para caudales bajos y 31.274 m³ aportados por crecidas**.

ACTIVIDADES DE EXTRACCIÓN

Se ha relevado la actividad extractiva con mediciones volumétricas en las areneras que realizan la explotación. Por ejemplo el volumen extraído por areneras que poseen medios mecánicos (Figura 5) es de aproximadamente 4.000 m³/mes, mientras que con medios manuales o tracción con caballos es de 600 m³/mes.



Figura 5.- Extracción de arena del cauce con medios mecánicos

Con el apoyo del catastro de la DIPAS, se han tipificado los medios de cada arenera emplazadas en el sector y se ha estimado la extracción individual, lo que en resumen resultó en 22 areneras con un volumen total de extracción de 28.600 m³ mensuales o **343.200 m³ anuales**.

MODELO DE LARGO PLAZO

Con el objetivo de determinar la evolución del fondo del río, se ha utilizado un modelo de erosión a largo plazo ya calibrado para el Río Cuarto (ver detalles en Corral et. al, 2007). La propagación, debido a un flujo a superficie libre, de una perturbación en un fondo móvil puede ser investigada usando las ecuaciones de Saint - Venant - Exner:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + h \frac{\partial U}{\partial x} + U \frac{\partial h}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} + g \frac{\partial z}{\partial x} = -gSe \quad (2)$$

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \frac{\partial q_s}{\partial x} = \pm q_e \quad (3)$$

Estas ecuaciones describen la evolución temporal y espacial de las variables que cuantifican la velocidad y profundidad media del flujo y la posición vertical del lecho. Las variables $U(x,t)$, y $h(x,t)$ son, respectivamente, la velocidad y profundidad promedio de flujo de la fase líquida compuesta por la mezcla agua – sedimento (si las concentraciones de sedimento son pequeñas). La variable $z(x,t)$ representa la elevación del fondo del canal. En la ecuación (3), el término “ q_e ” representa el caudal sólido entrante o saliente al tramo, por lo que de ésta manera pueden ser representadas las extracciones en el lecho. El parámetro λ en la ecuación (3) es la porosidad de los sedimentos en el fondo, siendo definida como la relación del volumen de espacio de vacíos (ocupado por agua y el volumen total). Las variables Se (pendiente de la línea de energía) y q_s (caudal sólido por unidad de ancho) se determinan usando relaciones semi empíricas:

$$Se = f(C_f, U, h) \tag{4}$$

$$q_s = f(U, h, sed) \tag{5}$$

Donde “sed” sintetiza las características del sedimento presente en el fondo. La relación (4) se determina para condiciones de flujo uniforme usando el concepto de coeficiente de fricción Cf. Las fases líquidas y sólidas están acopladas por las relaciones (4) y (5).

Se puede asumir razonablemente que para flujos a superficie libre con números de Froude pequeños ($Fr=U/(gh)0.5 < 0.6$), las celeridades de la onda en la superficie serán mucho más grandes que la celeridades de las ondulaciones en el fondo. Es por ello que es posible considerar el flujo de la fase líquida como cuasi estacionario cuando se analiza la evolución de las perturbaciones. Si además se asume que el flujo a superficie libre es cuasi uniforme (ver detalles en Corral et. al, 2007) se puede obtener la siguiente ecuación de difusión (ec. parabólica), la cual permite evaluar la evolución temporal y espacial de una perturbación en un fondo móvil generado por un flujo a superficie libre cuasi estacionario y cuasi uniforme.

$$\frac{\partial z}{\partial t} - K \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = \pm q_e \tag{6}$$

Donde K es el coeficiente de difusión dado por:

$$K = \frac{1}{3(1-\lambda)} \frac{C_c^2 q_w}{U^2} \frac{\partial q_s}{\partial U} \tag{7}$$

Para la implementación del modelo al Río Cuarto se incluyó la extracción de sedimentos en un tramo de 9 Km comenzando a partir de 1000 m del Puente Malvinas y hacia aguas arriba, distribuido en 6 nodos de acuerdo a la posición real de las canteras. En la siguiente figura se muestra la disposición y los porcentajes sobre el total extraído que le corresponde a cada nodo.

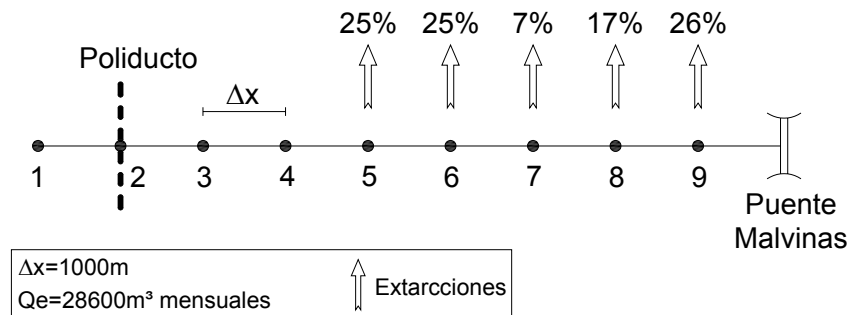


Figura 6: Esquema de la ubicación y magnitud relativa entre areneras.

Para la calibración del modelo numérico se recopilaron diversas fuentes de información, con el objetivo de determinar los descensos históricos registrados en puntos destacados en los últimos cuarenta años anteriores al año 2000. A modo de ejemplo se presentan en las

siguientes figuras los descensos en la zona del poliducto (7 Km aguas arriba del Puente Malvinas), en el puente Carretero (sector central de la ciudad de Río Cuarto) y en la siguiente tabla un resumen con los descensos históricos reconstruidos para cada sección.

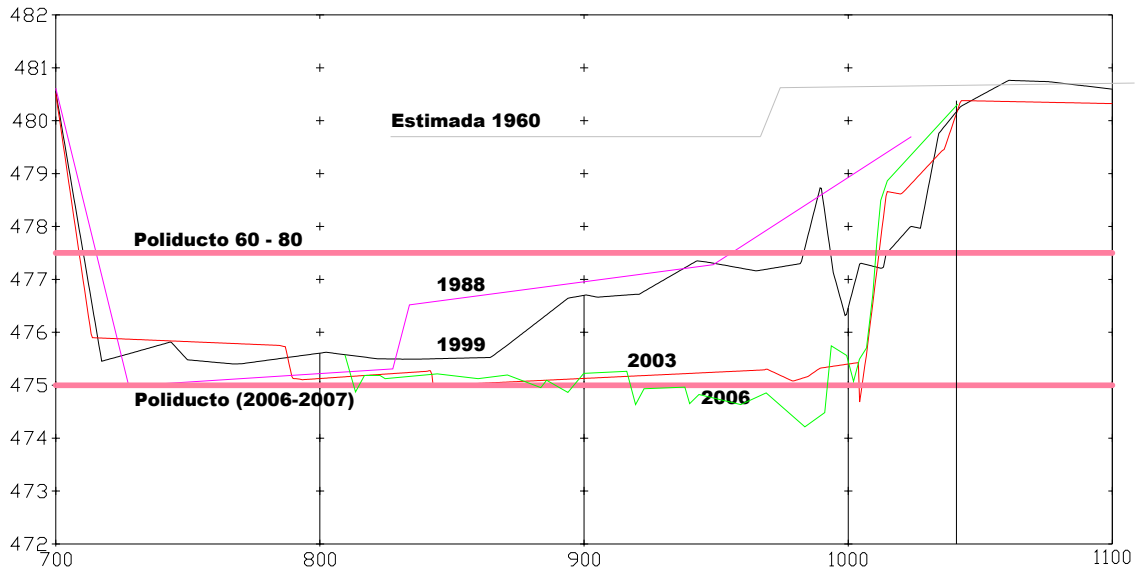


Figura 7: Perfiles transversales zona Poliducto



Figura 8.- Descalce de pilas del Puente Carretero por descenso del cauce del Río Cuarto (Año 2001).

Tabla 2.- Descensos reconstruidos de 40 años.

Tres Acequias	-2.00
Poliducto	-4.60
Pte. Malvinas	-4.60
Pte. Carretero	-2.00
Pte. Ferroviario	-2.20
Pte. Antártida	1.80

Un aspecto importante a tener en cuenta es que el modelo a largo plazo incorpora la influencia espacial que produce una perturbación en el lecho, por lo que permite estimar la extensión del impacto y su magnitud. Para verificar el comportamiento de este modelo en los extremos se ha analizado los sectores en donde ya no se observa influencia de la actividad de extracción, como ejemplo se puede observar en la siguiente figura, 40 Km aguas arriba de la ciudad de Río Cuarto no se observa influencia de la actividad extractiva, este sector ha sido visitado durante campañas y se ha verificado que el cauce no se encuentra erosionado o con signos de inestabilidad.

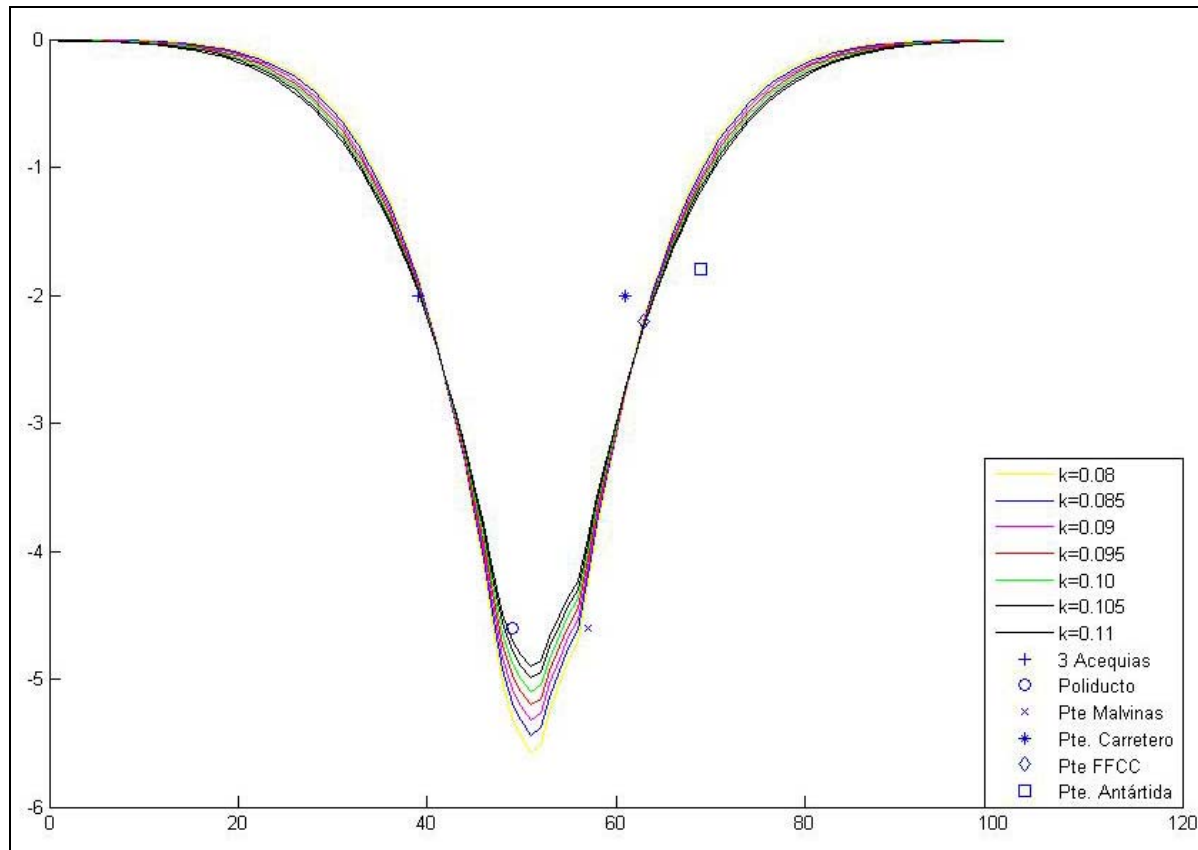


Figura 9: Descensos en Modelo de corto plazo (eje x en Km, eje y en m).

De la aplicación del modelo sedimentológico desarrollado, el cual ha sido calibrado con las mediciones de campo, ha permitido estimar una tasa anual de erosión del lecho de **212.200 m³/año.**

VOLÚMENES DE EROSIÓN Y SEDIMENTACIÓN LATERAL

Para cuantificar la erosión lateral se ha realizado el análisis comparativo de dos escenas de la zona de estudio correspondientes al año 1970 y 2003. En el primer caso se contó con fotografías aéreas y para el año 2003 las imágenes fueron obtenidas por el programa Google Earth. En ambos casos se georeferenciaron al Sistema Gauss Krüger de coordenadas planas en AutoCAD®.

En primer lugar se definieron 13 puntos de inflexión a partir de las cuales se calcularon los

volúmenes de erosión y sedimentación tanto en la parte cóncava como convexa de cada curva de meandro. En la siguiente tabla se tiene en la primera columna los tramos establecidos, en la segunda y tercera las áreas de depositación o erosión según corresponda (con rojo se resaltaron anomalías, por ejemplo depositación en parte cóncava de la curva). En la cuarta columna se encuentra la altura media del tramo obtenida a partir del análisis de los perfiles transversales y en las últimas cuatro los volúmenes correspondientes (VS: volumen de sedimentación, VE: volumen de erosión).

Tabla 3.- Cálculo de Volumen de Erosión y Sedimentación

Tramo	Area cóncava	Area convexa	Hm	VEAConcava	VSAConcava	VEAConvexa	VSAConcava
1V - 2V	53758 m ²	-25753 m ²	2,86	153987	0	73768	0
	76543 m ²	21662 m ²	2,86	219253	0	0	62050
	m ²	-583 m ²	2,86	0	0	1670	0
2V - 3V	74336 m ²	-601 m ²	2,86	212931	0	1722	0
	m ²	14207 m ²	2,86	0	0	0	40695
	m ²	-154 m ²	2,86	0	0	441	0
3V - 4V	59506 m ²	-40978 m ²	2,86	170452	0	117379	0
	-712 m ²	m ²	2,86	0	2039	0	0
4V - 5V	91122 m ²	-474768 m ²	2,86	261014	0	1359947	0
	-331646 m ²	1097 m ²	2,86	0	949982	0	3142
5V - 6V	85656 m ²	5132 m ²	4,48	383739	0	0	22991
	m ²	-36107 m ²	4,48	0	0	161759	0
	m ²	4455 m ²	4,48	0	0	0	19958
	m ²	-2682 m ²	4,48	0	0	12015	0
6V - 7V	163951 m ²	208759 m ²	4,48	734500	0	0	935240
	-1412 m ²	m ²	4,48	0	6326	0	0
7V - 8V	-11011 m ²	-12141 m ²	4,48	0	49329	54392	0
	283139 m ²	217181 m ²	4,48	1268463	0	0	972971
8V - 9V	-6204 m ²	11887 m ²	4,48	0	27794	0	53254
	178119 m ²	-85817 m ²	4,48	797973	0	384460	0
	m ²	622 m ²	4,48	0	0	0	2787
9V - 10V	187875 m ²	-1384 m ²	4,48	841680	0	6200	0
	-34750 m ²	210639 m ²	4,48	0	155680	0	943663
	23219 m ²	-118820 m ²	4,48	104021	0	532314	0
	m ²	34569 m ²	2,79	0	0	0	96275
	m ²	-18226 m ²	2,79	0	0	50759	0
10V - 11V	99623 m ²	75867 m ²	3,54	352167	0	0	25065
	-81 m ²	-2568 m ²	3,54	0	286	9078	268190
11V - 12V	127481 m ²	168711 m ²	3,54	450645	0	0	596393
	-19166 m ²	-4913 m ²	3,84	0	73674	18886	0
	39141 m ²	m ²	6,64	259896	0	0	0
12V - 13V	2709 m ²	-609 m ²	6,64	17988	0	4044	0
	5663 m ²	652 m ²	6,64	37602	0	0	4329
	-4062 m ²	-2214 m ²	3,09	0	12538	6834	0
	m ²	-3273 m ²	3,09	0	0	10103	0
TOTALES				6266312 m3	1277648 m3	2805770 m3	4047003 m3

Tabla 4.- Resumen Volumen de Erosión y Sedimentación

Para el período estudiado (1970 - 2003)		
VOLUMEN TOTAL DE SEDIMENTACION =	5324652	m ³
VOLUMEN TOTAL DE EROSION =	9072082	m ³
$\Delta V =$	3747431	m ³
		(EROSION)
Valores medios anuales		
VOLUMEN MEDIO ANUAL DE SEDIMENTACION =	161353	m ³ /año
VOLUMEN MEDIO ANUAL DE EROSION =	274912	m ³ /año
$\Delta V =$	113559	m ³ /año
		(EROSION)

Del análisis en planta del río entre los años 1970 y 2003 se establece que las márgenes se han erosionado con un volumen del orden de **114.000 m³/año**.

BALANCE SEDIMENTOLÓGICO (RESUMEN)

Para analizar el impacto de la actividad extractiva en el cauce, se ha realizado un balance sedimentológico con escala de tiempo anual, el que se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 5.- Resumen de Balance Sedimentológico

Aporte del río ~	+ 50.000 m ³
Extracciones laterales ~	- 343.000 m³
Déficit ~	- 293.000 m³
Erosión fondo ~	- 212.000 m ³
Erosión lateral ~	- 114.000 m ³
Suma Erosión ~	-326.000 m³

Como se observa, el volumen de extracción lateral es 6 o 7 veces mayor al aporte del río, por lo que se produce un déficit de sedimentos en el tramo en estudio. Este déficit se manifiesta en el ambiente fluvial por un lado con erosión del fondo (65%), es decir un continuo proceso de profundización del cauce y por otro con desestabilización de las márgenes y consecuentemente erosión lateral (35%).

Si bien el balance realizado es muy simplificado, se considera que para propósitos prácticos resulta de una precisión adecuada para el objetivo del trabajo.

CONCLUSIONES

Se han calibrado estimadores del caudal sólido para el Río Cuarto, los que han permitido hacer estimaciones del volumen de sólidos que ingresan al tramo urbano. Del análisis estadístico ha surgido que el valor esperado del caudal sólido que ingresa al tramo es del orden **50.000 m³/año**.

Con el apoyo del catastro de la DIPAS, se han tipificado los medios de cada arenera emplazadas en el sector y se ha estimado la extracción individual, lo que en resumen resultó en 22 areneras con un volumen total de extracción de 28.600 m³ mensuales o **343.200 m³ anuales**.

Para estimar la erosión en el fondo del cauce se ha utilizado un modelo sedimentológico de largo plazo, el cual ha permitido estimar una tasa de erosión del lecho de **212.200 m³/año**. Además del análisis temporal de fotografías entre los años 1970 y 2003, se ha estimado que las márgenes se han erosionado con un volumen medio del orden de **114.000 m³/año**.

Del balance en el tramo surge que el volumen de extracción lateral es 6 o 7 veces mayor al aporte del río, por lo que se produce un déficit de sedimentos que se manifiesta en el ambiente fluvial por un lado con erosión del fondo, es decir un continuo proceso de profundización del cauce, y por otro con desestabilización de las márgenes y erosión lateral.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Corral M., Baldissone M., Díaz A., Farías H., Pagot M., Rodriguez A., Lopez F., González J., Plenkovich G., Bartolomei R., Bazán G. y Muratore H. (2006): *Influencia de la extracción de áridos en el Río IV, Córdoba*. III Congreso Iberoamericano sobre Control de la Erosión y los Sedimentos, Buenos Aires, Argentina.

Corral M., Baldissone M., García C., Díaz A., Gonzalez J., Rodriguez, Farías H. D. (2007): *“Modelo de onda difusiva para procesos erosivos a largo plazo. Caso de estudio: Río Cuarto, Córdoba”*. Tercer Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos. 2007, Córdoba.

García C. M. (2002). *Numerical approximations to a model of propagation of perturbations on a mobile bed*. University of Illinois at Urbana-Champaign (UIUC).

Helley, E.J. y Smith, W. (1971): *“Development and calibration of a pressure difference bedload sampler”*. USGS Water Resources Division Open-file report. 18 p.

Rosati, J.D. and N.C. Kraus. (1989): *“Development of a portable sand trap for use in the nearshore”*. Technical Report CERC-89-11, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.