

## UMBRALES DE DESBORDE PROCEDIMIENTOS GEOMÉTRICOS DE IDENTIFICACIÓN

Laura Colladon<sup>1,2</sup> y Gabriel Caamaño Nelli<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Centro de la Región Semiárida (CIRSA), <sup>2</sup>Instituto Nacional del Agua (INA)

<sup>3</sup>Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)  
Medrano 235, V<sup>o</sup>Carlos Paz, Córdoba. [lauracolladon@gmail.com](mailto:lauracolladon@gmail.com). Tel.: 03541-430443

### RESUMEN

Los ríos son sistemas naturales dinámicos y complejos. Cuentan con una enorme capacidad estructurante y articuladora del territorio, lo cual ha sido siempre en beneficio del ser humano, pero también implica una excesiva presión desde éste. (Ollero, García, 2007).

En las márgenes de los ríos, con vista a la planificación territorial integral, hay diversos umbrales que son de interés al momento de definir las diferentes áreas de ocupación. Los autores, en trabajos anteriores identificaron, para puntos de observación bien definidos, umbrales de interés legal y se asociaron con restricciones de uso. Existe un umbral físico, formado por el río, que se denomina nivel de margen llena o bankfull. A partir de este umbral se supone que una crecida provoca un desbordamiento.

Teniendo como objetivo aplicado una ordenación del territorio, es de gran importancia conocer ese nivel, poder asociarle una frecuencia de ocurrencia y encontrar correspondencias con los umbrales de interés legal.

### ABSTRACT

Rivers are dynamic and complex natural systems. They have an enormous capacity to structure and articulate the territory, which has always been in benefit of human beings, but it also implicates an excessive pressure from this one. (Ollero, García, 2007).

On the banks of rivers, aiming to integrated spatial planning, there are several thresholds that are of interest when defining the different areas of occupation. The authors identified, in previous studies, for well-defined observation points, thresholds of legal interest which were associated with use restrictions. There is a physical threshold, formed by the river, called bankfull. From this threshold on, it is assumed that flooding causes an overflow.

Having as an applied objective land management, it is of great importance to know that level, to be able to associate a frequency of occurrence to it and to find correlations with thresholds of legal interest.

### INTRODUCCIÓN

Los ríos son sistemas naturales dinámicos y complejos. Su principal función es el transporte de agua, sedimentos, nutrientes y seres vivos, pero además conforman corredores de gran valor ecológico, paisajístico, bioclimático y territorial. Cuentan con una enorme capacidad estructurante y articuladora del territorio, lo cual ha sido siempre en beneficio del ser humano, pero también implica una excesiva presión desde éste. (Ollero, García, 2007).

En las márgenes de los ríos, con vista a la planificación territorial integral, hay diversos umbrales que son de interés al momento de definir las diferentes áreas de ocupación. Los autores, en trabajos anteriores identificaron, para puntos de observación bien definidos, umbrales de interés legal y se asociaron con restricciones de uso. Existe un umbral físico, formado por el río, que se denomina nivel de margen llena o bankfull. A partir de este umbral se supone que una crecida provoca un desbordamiento.

Teniendo como objetivo aplicado una ordenación del territorio, es de gran importancia conocer ese nivel, poder asociarle una frecuencia de ocurrencia y encontrar correspondencias con los umbrales de interés legal.

Fijar este umbral es laborioso, teniendo en cuenta las diferentes morfologías de los cauces y la existencia de obstáculos naturales o antrópicos asociados a los mismos.

Se puede encontrar el nivel de margen llena a través de la Geometría Hidráulica, que se

refiere a relaciones existentes entre el caudal y el ancho del cauce, la profundidad, la velocidad y la carga de sedimentos entre otros.

En las relaciones geométricas no se especifica cual es el caudal que debe emplearse. El río transporta un caudal siempre variable, el que debe emplearse es el que da lugar a la geometría hidráulica que se estudia. Esto significa reconocer que la geometría es consecuencia del caudal y que si su geometría es permanente se debe a que ciertos caudales por su magnitud o por su frecuencia o por una combinación de ambas, se convierten en los caudales determinantes (J.P.M. Vide, 2005).

El caudal y la recurrencia del nivel de desborde, interesan en hidrología por ser herramientas que ayudan a la comprensión de las relaciones entre las características físicas y el régimen hidrológico de los cursos de agua (Dasso, Bertoni, 1985).

## ÁREA DE ENSAYO

La cuenca del Río San Antonio, de 500 km<sup>2</sup> (Figura 1) sirvió como sistema hidrológico para realizar el ensayo. Se encuentra dentro de las Sierras Pampeanas de la Provincia de Córdoba, al sur del Valle de Punilla entre los 64° 29' 21" y 64° 51' 17" de longitud oeste y entre los 31° 26' 51" y 31° 23' 23" de latitud sur. Su altitud decae 1.700 m en menos de 30 Km, medidos en línea recta, desde los 2374 m s.n.m del Cerro Los Gigantes, al NW de la cuenca, hasta la estación de aforos que constituye el cierre artificial de la misma (Estación 600-B° El Canal en Figura 1).

En esta zona las lluvias generalmente breves e intensas, se producen en primavera-verano, sobre vegetación degradada y terrenos someros de alta pendiente, así los tiempos de formación y tránsito de las crecidas son de pocas horas. El tiempo de traslado de la onda, entre el nacimiento del Río San Antonio (puesto 700 en Figura 1) y la Estación 600, en el ingreso a la ciudad de Villa Carlos Paz, varía entre 2 horas, para crecidas superiores a 3 metros (563,7 m<sup>3</sup>/s) y 13 horas, para picos menores a 1 metro (18,6 m<sup>3</sup>/s). Los hidrogramas presentan tiempos al pico que van desde minutos a 2,5 horas y tiempo base de 12 a 24 horas. En los meses de estiaje (abril-octubre) los caudales son menores a 1m<sup>3</sup>/s, en tanto que el módulo del río es de 6,7 m<sup>3</sup>/s para la serie 1951-1979.

El tramo de estudio, salvo en un punto, corresponde a los 20 Km finales del Río San Antonio entre la población de Cuesta Blanca y barrio El Canal en el sur de la ciudad de Villa Carlos Paz. El puesto adicional está ubicado en la confluencia del Río El Cajón con el Río Icho Cruz en el sitio identificado como 700 en la Figura 1. Una ubicación más precisa de los perfiles se observa en la Figura 2.

La elección de estos sitios obedece a la disponibilidad de información, geomorfológica, hidrológica y topográfica. Además, en las secciones adoptadas se encuentran los principales balnearios del Valle de Punilla, una región con fuerte perfil turístico. La ubicación específica de cada punto en el río se define en la Tabla 1, con progresivas referidas al cero ubicado en el cierre artificial de la Cuenca y medidas sobre el curso del río.

Los datos de las secciones transversales presentados en la Tabla 1 provienen de relevamientos topográficos, que sirvieron de base para el cálculo de las relaciones geométricas.

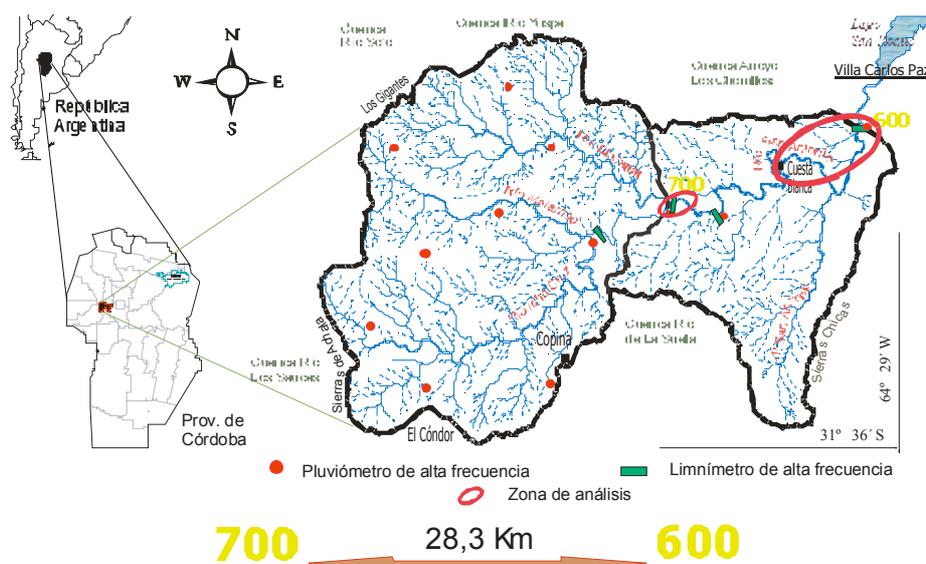


Figura 1.- Ubicación de la Cuenca del Río San Antonio en Argentina. Indicación de puestos de medición hidrológica y de la zona de estudio.



Figura 2: detalle de la zona analizada, con los puntos de análisis

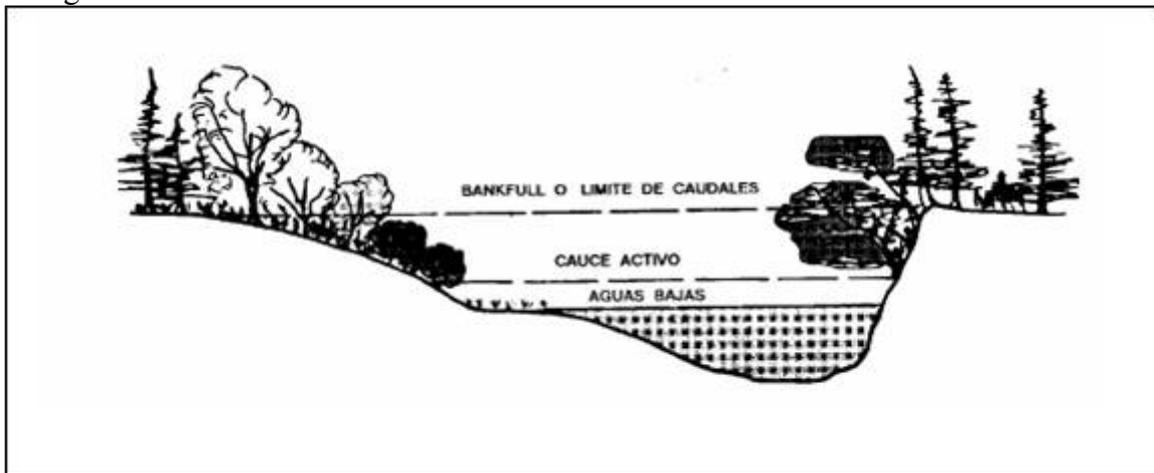
Tabla 1.- Ubicación de los perfiles transversales

Nº	Ubicación	Progresiva (m)	Altitud de talweg (m snm)
1	Villa Carlos Paz - Barrio El Canal –Estación 600	0	639,99
2	Villa Carlos Paz-Vª Independencia	387	642,14
3	Villa Carlos Paz-Playas de Oro	1039	646,00
4	San Antonio de Arredondo –vado	3311	657,46
5	San Antonio de Arredondo – puente	4894	666,15
6	San Antonio de Arredondo - balneario	5605	667,13
7	Mayu Sumaj	7659	675,13
8	Icho Cruz - Tala Huasi	14847	716,01
9	Cuesta Blanca	18006	729,11
10	Conf. Icho Cruz-El Cajón – Estación 700	28261	928,82

## METODOLOGIA

Un río es una corriente de agua que forma su cauce ajustando libremente el ancho, la profundidad y el recorrido. El caudal es formador de la geometría del cauce y si una geometría es permanente se debe a que ciertos caudales, por su magnitud, por su frecuencia o por una combinación de ambas cosas se convierten en los caudales dominantes. (Vide, 2005). Estos caudales pueden considerarse como los más efectivos, sin disipación por desbordamiento, donde se logra la mayor eficacia de conducción de la sección. Hay un término inglés que lo define: bankfull cuyo significado literal es "estado de margen llena", que podría traducirse como "nivel (escalón o umbral) de canal pleno (desborde o márgenes cubiertas). Al caudal de desborde le corresponde una altura o umbral de desborde. (Figura 3)

Este umbral representa una discontinuidad en las tendencias de variación, tanto de la geometría como de la resistencia al flujo del canal, cabe esperar que las leyes que vinculan estas características de la sección con la altura, no sean las mismas a ambos lados del estado de márgenes llenas.



**Figura 3.-** Esquema de un perfil transversal, ilustrando el concepto de bankfull.

Esta altura de desborde puede identificarse en base a: reconocimiento de superficies de sedimentos fluviales, por observación o medición de ciertos límites o rasgos característicos como límite inferior de vegetación perenne, límite superior de partículas de arena en márgenes y por último en base a mediciones en la sección transversal del cauce. (Dasso, Bertoni, 1985)

Este último enfoque es el que se aplicará en el presente trabajo. A partir de los perfiles topográficos de las secciones transversales, se obtienen los datos de área, perímetro, ancho de boca y altura respecto del fondo del cauce para cada punto nivelado. Y con esos datos se calculan las relaciones, como se indica a continuación.

## PROCEDIMIENTOS GEOMÉTRICOS DE IDENTIFICACIÓN

Se describe el procedimiento para realizar las estimaciones geométricas del umbral de desborde, basado en la tendencia del radio hidráulico, la relación de forma e Índice de margen.

*Tendencia del Radio Hidráulico (R):* consiste en detectar un máximo relativo del radio

hidráulico. La altura para la cual esto se verifica es considerada el umbral de desborde. En los casos en que se detecte más de un máximo relativo se debe considerar el correspondiente a la menor altura. En las secciones donde no se verifique un máximo se sugiere analizar la tasa del radio hidráulico como medio para detectar una modificación destacable en la geometría de la sección (TR).

*Relación de forma* (ancho de boca-tirante hidráulico (**B/D**)): este procedimiento analizado inicialmente por Wolman en 1955, consiste en evaluar en los puntos de quiebre del perfil topográfico, la relación entre el ancho de boca B y el tirante hidráulico D, definido este último como el cociente entre el área transversal y el ancho. La relación B/D experimenta a partir del fondo un continuo decrecimiento con la altura. En el nivel para el cual se verifica el brusco crecimiento de B, al no ocurrir lo mismo con D, la relación crece y se produce así un mínimo relativo de B/D. Un comportamiento similar puede ocurrir posteriormente para alturas mayores si eventualmente se presenta un nuevo abatimiento de las márgenes. Efectuando el análisis a partir del fondo se determina el umbral de desborde como la mayor altura para la cual se verifica un mínimo relativo de la relación. Una variante de este método, es utilizar la altura de agua desde el fondo (H) en lugar del tirante hidráulico, quedando B/H, dando similar información.

*Índice de Margen (I.M.)*: propuesto por Riley en 1972, consiste en analizar el grado de abatimiento que poseen los tramos del perfil de la sección transversal comprendidos entre quiebres topográficos sucesivos. La expresión para el cálculo es:

$$I.M.(i) = \frac{B(i+1) - B(i)}{H(i+1) - H(i)} \quad (1)$$

Siendo i el orden del quiebre topográfico, considerado creciente desde el fondo. El último máximo de este índice indica la altura H(i) correspondiente al nivel de desborde. Una variante de este método (IMD), consistente en la sustitución de H por el tirante hidráulico D, se analiza aquí a modo de complemento en virtud del comportamiento semejante de H y D.

## RESULTADOS OBTENIDOS Y SU ANALISIS

En el presente trabajo se presenta la determinación de las relaciones hidráulicas en 10 perfiles del Río San Antonio identificados en la Figura 2 y Tabla 1.

En cada uno se calcularon: radio hidráulico, ancho, tirante hidráulico, índice de margen con resultados presentados en la Tabla 2. Como dato adicional se incluye: la recurrencia del nivel de desborde, que se obtuvo de las funciones H-T que posee cada sección. (Rodríguez, Caamaño. 2004).

Para las secciones de Villa Independencia – Pte Juncal y San Antonio de Arredondo – vado, no se encontró un máximo en la tendencia del Radio Hidráulico.

Los gráficos con los resultados obtenidos en cada puesto, para todas las alturas del perfil nivelado se muestran en las figuras siguientes.

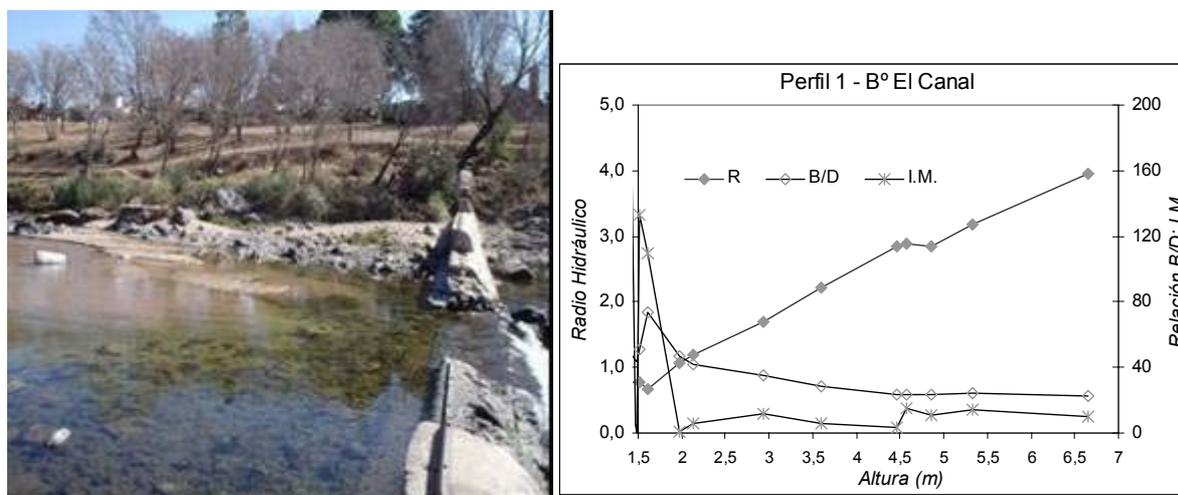
El perfil 1 corresponde al cierre artificial de la cuenca, sitio donde se construyó una estructura de aforo (Figura 3). La forma artificial, no es representada por las relaciones aquí presentadas, por ello se muestran resultados a partir de 1,50 m, donde se deja de percibir la fuerte influencia del muro.

**Tabla 2.** Altura de desborde en metros, en función de diferentes relaciones geométricas del perfil

Sección transversal		Altura (m) según la relación geométrica			Recurrencia
N°	Lugar	R	B/D	IM	(años)
1	B° El Canal - muro	4,6	4,5	4,6	5/4 / 5
2	Pte. Juncal	----	2,5	5,2	1/3
3	Pl. de Oro	4,4	4,4	4,4	2
4	S.A.A. - vado	----	3,7	3,7	1
5	S.A.A. - puente	4,3	4,1	4,3	2/1/2
6	S.A.A. - balneario	2,3	2,3	2,3	1
7	Mayu Sumaj	2,6	3,5	3,5	1
8	Icho Cruz	1,7	1,7	1,7	1
9	Cuesta Blanca	5,2	5,2	5,2	12
10	Confl. El Cajón	4,5	4,5	4,5	2

Resultados en cada uno de los perfiles:

Los perfiles 1, 2 y 3 se ubican dentro del ejido de la ciudad de Villa Carlos Paz; los tres siguientes corresponden a la comuna de San Antonio de Arredondo y los numerados 7, 8 y 9 tienen el nombre de la localidad donde se encuentran, en tanto que el último está fuera de toda zona urbana, en la confluencia de los ríos que dan origen al San Antonio.



**Figura 4.** B° El Canal. Derecha relaciones geométricas en función de la altura e izquierda imagen de la sección de aforo.

Hay una mínima diferencia entre los valores de 10 cm, que a su vez dan tiempos de retorno entre 4 y 5 años.

En el segundo perfil, (Figura 5), el Radio Hidráulico no muestra ningún máximo. La relación de forma (B/D), presenta un mínimo para la altura 2,48 m en tanto que el punto crítico buscado del I.M, está para una altura de 5,19 m.

No encontrar un punto para el R, sumado a la disparidad en los otros dos índices, puede significar que el valor de desborde se encuentra por encima del último valor nivelado. O que la sección esté modificada, dada su cercanía del puente, en el momento de la construcción de éste.

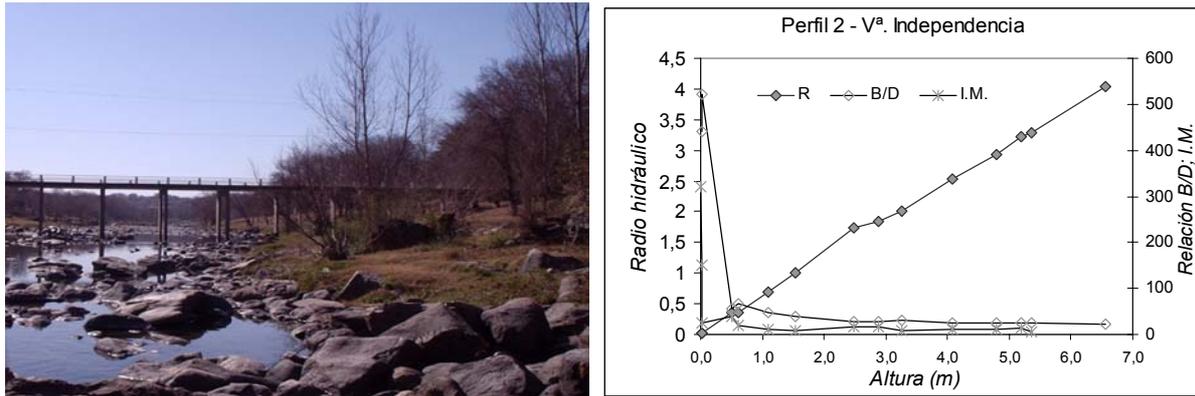


Figura 5. Zona del perfil 2, Puente Juncal en Vª Independencia. Comportamiento de los métodos.

En el perfil 3 (Figura 6), los puntos están bien identificados además de ser coincidentes para las relaciones calculadas.

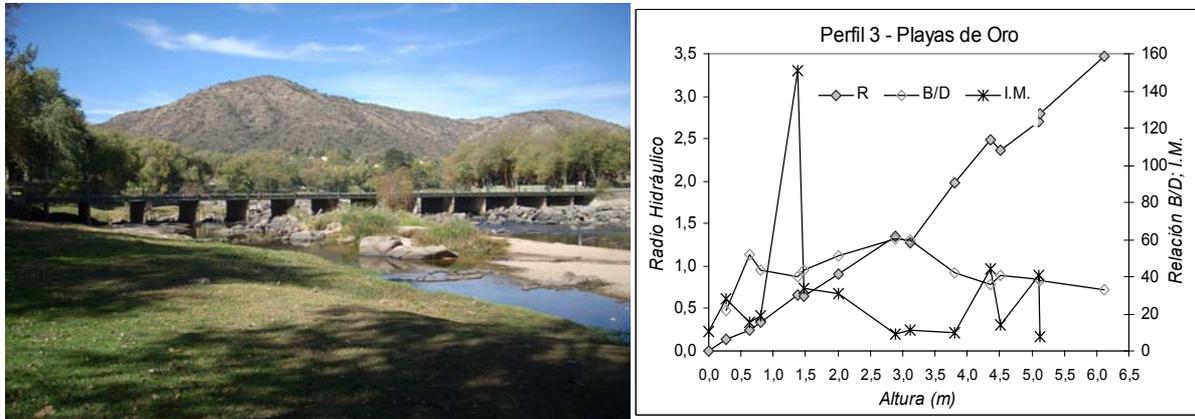


Figura 6. Zona del perfil 3, Bº Playas de Oro. Comportamiento de los métodos.

Dentro del ejido de la localidad de San Antonio de Arredondo hay tres perfiles analizados y se denominan en función de la estructura más cercana que existe sobre el río.

Así el perfil 4 (Figura 7) corresponde a un vado. El R es monótono creciente, el B/D presenta un mínimo casi imperceptible, en cambio el valor para I.M. está bien definido y es coincidente con B/D. La frecuencia de desborde es anual.

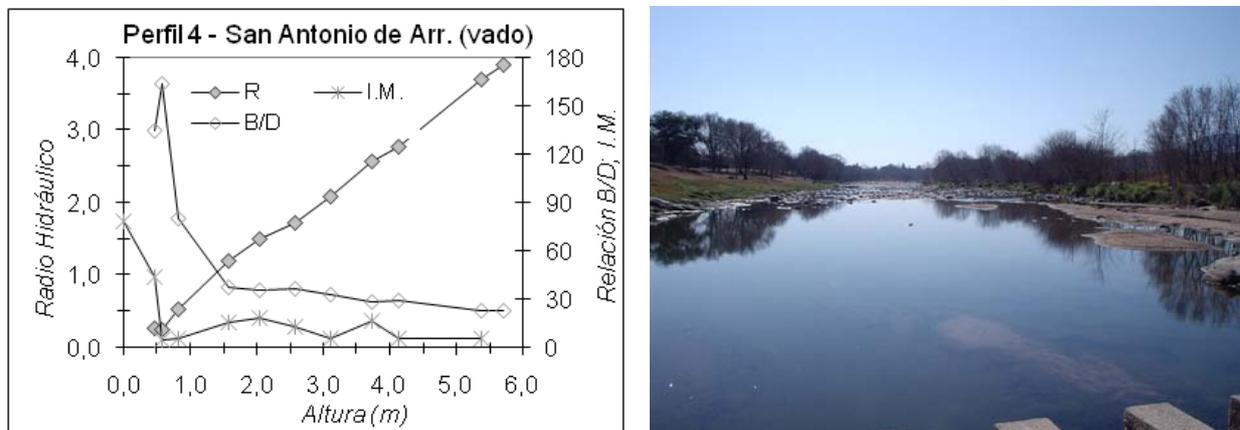


Figura 7. Zona del perfil 4, vado en Playas de Oro de San Antonio de Arredondo. Comportamiento de los métodos.

El perfil 5 (Figura 8), tiene bien identificados los niveles de desborde, aunque hay una pequeña diferencia para el B/D, lo que en términos de frecuencia se traduce en ocurrencia anual, en lugar de bianual para las otras dos relaciones.

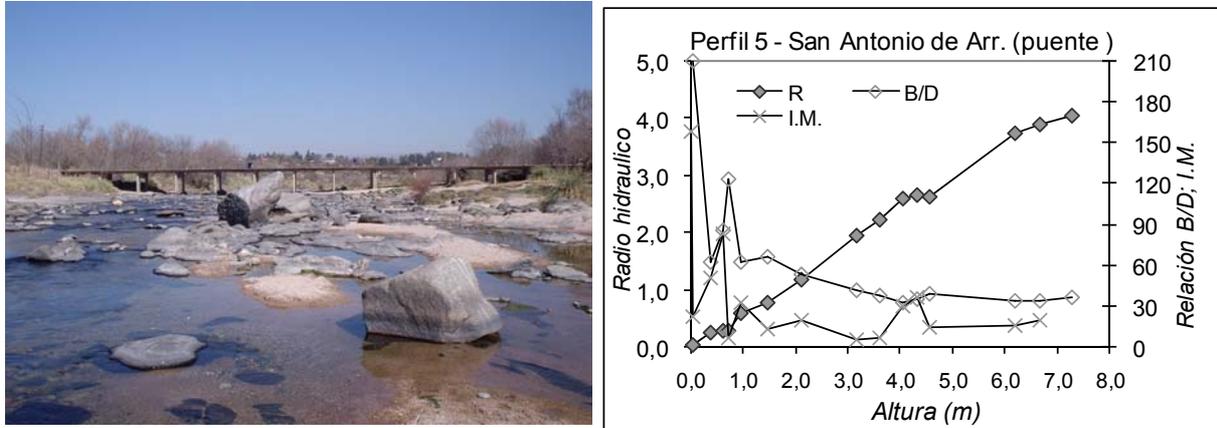


Figura 8. . Zona del perfil 5, puente en Playas de Oro de San Antonio de Arredondo. Comportamiento de los métodos.

El perfil 6 (Figura 9), ubicado sobre el balneario, tiene una fuerte presencia antrópica sobre su margen derecha.

Si bien los índices indican un único valor de nivel de desborde y de frecuencia anual no se debe dejar de lado la invasión sobre su margen y la alteración sufrida. El nivel del río en la fotografía está cercano al nivel de desborde encontrado.

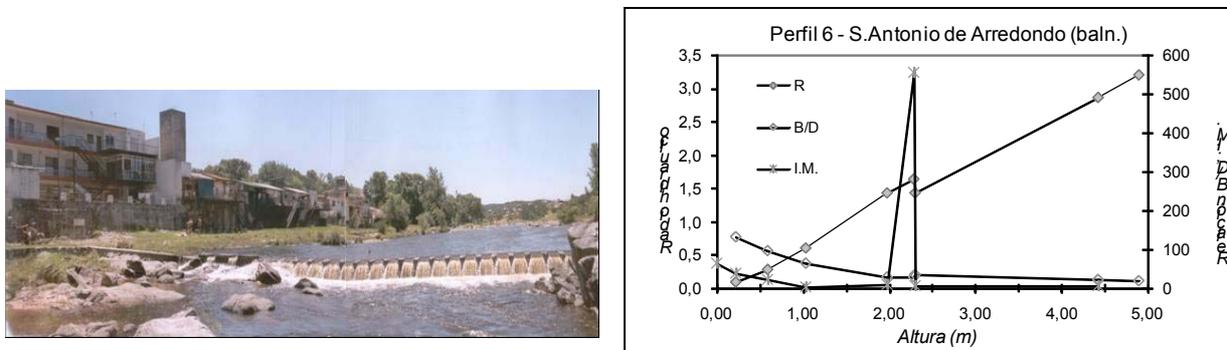


Figura 9. Zona del Perfil 6. Pasarela sobre balneario, en San Antonio de Arredondo, edificación comprometida sobre la margen derecha Comportamiento de los métodos.

El perfil 7 (Mayu Sumaj, Figura 10), en este perfil la calle costanera está incluida dentro de la nivelación. El menor valor de R, puede deberse al abatimiento ficticio ocasionado por la apertura de la calle, al tener que considerar, porque lo impone el método, el máximo R correspondiente a la menor altura. La altura es menor que para los otros dos indicadores. Para ambos valores la frecuencia de alcanzar este nivel es anual.

En los perfiles 8, 9 (Figura 11) y 10 (Figura 12) para los tres métodos ensayados se obtuvo el mismo valor de umbral de desborde, dentro de cada sección. Los Tiempo de retorno fueron 1, 12 y 2 años respectivamente.

En Icho Cruz ocurre anualmente, en Confluencia IchoCruz-El Cajón ocurre cada dos años, en tanto que Cuesta Blanca es la sección más dispar en este sentido, ya que el tiempo de retorno

del umbral de desborde es 12 años.

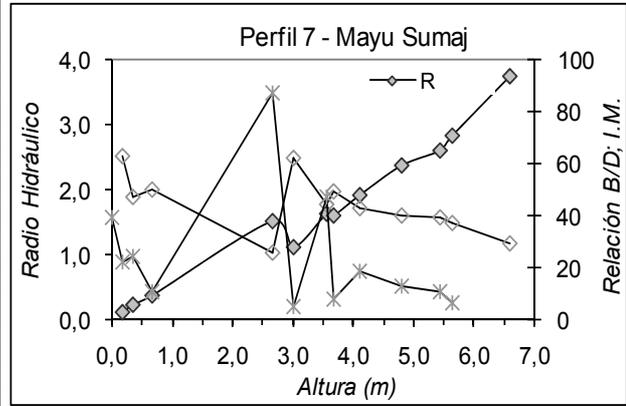


Figura 10. Zona del Perfil 7. Puente en Mayu Sumaj. Comportamiento de los métodos.

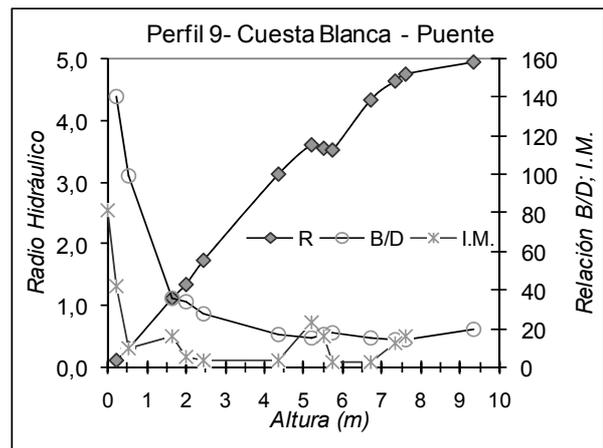
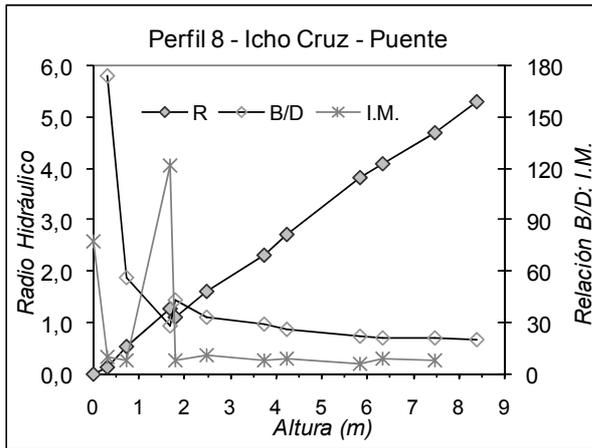


Figura 11. Comportamiento de los métodos en perfiles de las localidades de Icho Cruz y Cuesta Blanca

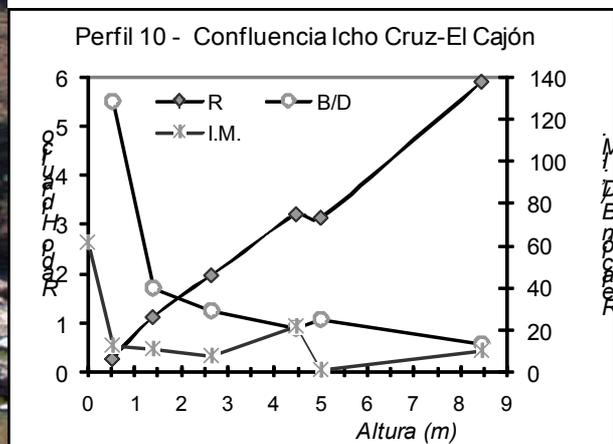


Figura 12. Zona del Perfil 10, aguas debajo de la confluencia de los ríos El Cajón e Icho Cruz. Comportamiento de los métodos.

## DISCUSION FINAL

El presente estudio se realizó sobre diferentes perfiles del río, el seguimiento es espacial y está enfocado en examinar el comportamiento de las relaciones geométricas de secciones transversales del Río San Antonio.

Los valores de Tiempo de retorno hallados se ubican dentro del rango de los obtenidos en zonas áridas y semáridas. Diversos autores sitúan este tiempo entre 1,5 a 7 años, siendo los valores más altos correspondiente a ríos de mayor irregularidad hidrológica. (Vide, 2005)

En las Sierras cordobesas, Dasso y Bertoni en 1985, para perfiles de la misma sección realizados en diferentes épocas, calcularon el tiempo de retorno de los umbrales de desborde en la Estación de aforo del Río de La Suela, obteniendo valores entre 1,5 y 16 años.

Del análisis de los resultados sobre el río San Antonio se puede concluir:

Se analizaron secciones con diferentes estados de invasión antrópica.

El Tiempo de retorno (T), salvo en una sección, es menor a 5 años. En seis secciones es anual.

La altura de desborde en la mitad de las secciones es la misma para las tres relaciones calculadas. En tres hay diferencias mínimas y ocurre para la Relación de Forma (B/D) en los perfiles 1 y 5. En el perfil 7, la diferencia está en el radio hidráulico.

En dos secciones no se pudo establecer la tendencia del radio hidráulico.

Con vistas al ordenamiento de la ocupación de márgenes, definir este umbral es un primer paso para delimitar las áreas totalmente vedadas a cualquier tipo de ocupación.

El bankfull, para la zona estudiada, se encuentra siempre por debajo de la Línea de Ribera (definida por la Provincia como la crecida de T=25 años).

## LISTA DE SÍMBOLOS

B:	ancho del cauce
D:	tirante hidráulico
H:	altura de agua desde el fondo
IM:	índice de margen
IMD:	índice de margen, con tirante hidráulico
R:	radio hidráulico
T:	tiempo de retorno
TR:	tasa de radio hidráulico

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**Dasso, Clarita y J.C. Bertoni.** (1985) "Identificación del umbral de desborde (bankfull)". *XII Congreso Nacional del Agua. Mendoza. Argentina.*

**Colladon, Laura Gabriel Caamaño Nelli, Graciela Felici, Clarita Dasso** (2007). "Márgenes Inundables en la Zona Turística del Río San Antonio. Córdoba" *.XXI Congreso Nacional del Agua. CPCNA. Tucumán.*

**Colladon Laura, Graciela Felici, Gabriel Caamaño Nelli, Osvaldo Barbeito** (2007) "Complementación de procedimientos geomorfológicos e hidrológicos para identificar umbrales de inundación". *En Hidráulica de Ríos: fundamentos, procesos e ingeniería. Edit.*

*A. Rodríguez y otros. Memorias del III Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos. Pp.75-76. ISBN 978-987-23472-1-5-Trabajo en CD. Córdoba.*

**Ollero Ojedo, Alfredo** (2002) *Crecidas e Inundaciones como Riesgo Hidrológico un Planteamiento Didáctico*

**Ollero Ojedo, Alfredo; Rafael Romero García.** (2007), “Las alteraciones geomorfológicas de los ríos”. *Estrategia Nacional de restauración de Ríos*. Madrid. España

**Rodríguez Raúl Matías** (2004). “*Estimación de Umbrales de Inundación a partir de las Lluvias de Diseño. Desarrollo Metodológico y Aplicación en el Río San Antonio.*” Trabajo Final. Escuela de Ingeniería Civil-FCEFYN- UNC. Córdoba.

**Vide, Juan P. Martín** (2005) *Ingeniería de Ríos*. Ediciones UPC. Alfaomega Grupo Editor. ISBN 970-15-0819-X. Barcelona. España