

## **AJUSTE REGIONAL DE PREDICTORES DE EROSIÓN EN LECHOS COHESIVOS**

**Gerardo A. Riccardi** <sup>(1),(4)</sup>, **Pedro A. Basile** <sup>(2),(4)</sup>, **Hernán Stenta** <sup>(2),(4)</sup>,  
**Gerardo Riesco** <sup>(3)</sup> y **Pablo Baglietto** <sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup>Consejo de Investigaciones Universidad Nacional de Rosario (CIUNR)

<sup>(2)</sup>Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

<sup>(3)</sup>Departamento de Hidráulica. FCEIA. UNR

<sup>(4)</sup>Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales. FCEIA. UNR

José Hernández 986, (2000) Rosario, Argentina. Telefax: 0341 4808541. E-mail: riccardi@fceia.unr.edu.ar

**RESUMEN:** Los procesos de erosión en suelos cohesivos comprenden mecanismos que involucran la interacción de factores físicos, químicos y electroquímicos muy complejos. Para estimar la erosión en dichos suelos se recurre generalmente a ecuaciones de origen empírico. Por otro lado, en los cursos de agua sobre lechos cohesivos de la región (Rosario, Santa Fe) no es habitual la recolección sistemática y posterior procesamiento y análisis de datos acerca de procesos erosión-sedimentación. Estas cuestiones hacen que la problemática del diseño y/o verificación de obras hidráulicas a lo erosión englobe un margen relativamente grande de incertidumbre, por lo que el ingeniero proyectista recurre a las clásicas formulaciones con parámetros ajustados en otros contextos regionales y en la mayoría de los casos conservadores. Con el objeto de aportar al mejoramiento de la adopción de los parámetros de diversas formulaciones que permiten evaluar la erosión esperable en lechos cohesivos se ha realizado el presente trabajo. Concretamente se ha realizado el ajuste de parámetros de metodologías probadas para suelos cohesivos como Lischtvan-Lebediev, Rossinsky y Fuerza tractiva en un tramo del Arroyo Ludueña, curso de agua de la región de Rosario. El método de determinación utilizado fue del tipo de deducción indirecta de parámetros, donde conocidos los caudales máximos que han transitado por un determinado tramo y conocida la erosión producida mediante relevamientos de la sección transversal antes y después del tránsito de caudales es posible deducir los parámetros de las formulaciones de predicción de erosión. El período de tiempo en el cual fue aplicado el método fue una serie temporal desde 1986 a 1995 en el cual la serie de caudales fue reconstruida mediante transformación lluvia-caudal, contando con la serie completa de lluvias y series parciales de alturas y caudales. Se concluye que todas las metodologías sobrevaloran la erosión si se utilizan los parámetros originales sugeridos por los métodos asociados al tipo de suelo del curso. Se comprueba que los parámetros determinados mediante deducción indirecta son todos superiores a los sugeridos en un rango entre 30-50 %. La erosión observada en el período en análisis fue nula por lo cual los parámetros determinados pueden considerarse como umbrales mínimos.

**PALABRAS CLAVE:** erosión, suelos cohesivos, estimación de parámetros, arroyo Ludueña.

## INTRODUCCION

Los suelos compuestos por significantes fracciones de material de granos finos en el rango de limos y arcillas tienen mayor resistencia a entrar en movimiento que los sedimentos gruesos compuestos solamente por arenas. La característica de soportar altas velocidades críticas por parte de los materiales de fondo finos es atribuida mayormente a la cohesión que actuando conjuntamente con el peso de las partículas se oponen a la entrada en movimiento. El comportamiento de suelos cohesivos bajo la acción del flujo es complejo y depende de muchos factores incluyendo factores electroquímicos del sedimento.

Las propiedades físico-químicas fundamentales de los suelos cohesivos que influyen en la resistencia de los mismos a la erosión son los siguientes (Pouey, 1998):

- peso específico;
- porosidad;
- humedad;
- plasticidad;
- cohesión;
- ángulo de fricción interna;
- hinchamiento;
- heterogeneidad;
- integridad;
- tamaño de los agrupamiento de partículas y de las partículas;
- dispersión;
- temperatura;
- estructura química

Además se puede afirmar que las fuerzas que resisten la acción erosiva del flujo también dependen de parámetros de calidad del flujo (pH) y del tiempo (impermanencia de factores con influencia en la resistencia).

El diseño de canales en suelos cohesivos que no fueran expuestos a erosiones indeseables o a deposiciones de sedimentos ha sido siempre un importante y complejo problema a resolver en el campo de la ingeniería hidráulica.

Existe en la literatura una abundante propuesta de formulaciones semiempíricas (por ejemplo Breusers y Raudkivi, 1991; Chow, V. T. , 1994; Hoffmans y Verheij, 1997; Juárez Badillo y Rico Rodríguez , 1984; Kiseliev, 1972; May et al., 2002; Maza Alvarez 1994; Pouey, 1998) adecuadas para resolver el problema de la erosión en suelos cohesivos. Sin embargo es deficitaria la información acerca de parámetros con representatividad regional en la zona de Rosario.

Fue objetivo evaluar el grado de representatividad de un grupo de predictores de erosión generalizada en suelos cohesivos en un curso de agua de la zona y ajustar los parámetros en función de procesos de erosión observados.

## **DESARROLLO DEL TRABAJO**

### **Metodología**

La metodología seguida en el trabajo fue la siguiente:

- Selección de tramo a estudiar y período temporal de análisis
- Recopilación de información topobatimétrica del tramo previa al período temporal en estudio
- Trabajos de campaña: relevamiento de perfiles topobatimétricos actualizados, toma de muestras de suelo y de agua.
- Generación de información hidrológica en términos de caudales mediante transformación lluvia-caudal.
- Reconstrucción de perfil de superficie libre en el tramo para los caudales máximos
- Comparación de perfiles transversales pronosticados y observados al cabo del período temporal de estudio
- Predicción de erosiones mediante formulaciones de Fuerza Tractiva, Lischtván-Lebediev y Rossinsky. Ajuste de parámetros de predictores en base a erosiones reales observadas.

### **Descripción del tramo en estudio y del período de tiempo de análisis**

El análisis fue realizado en el Arroyo Ludueña en un tramo de aproximadamente 900 m, comprendido entre el puente de la Autopista Rosario-Córdoba al sur y el Puente de la calle Calasanz al norte. La ubicación del tramo estuvo fundamentada en un sector del arroyo donde se contaba con información topobatimétrica e hidrológica histórica y con un comportamiento hidráulico sin mayores influencias producidas por puentes u otras obras de arte. El tramo estaba en un estado completamente natural sin ningún tipo de canalización o alteración de su morfología en por lo menos 10 años anteriores.

Se utilizaron 7 perfiles transversales para caracterizar el tramo con una separación promedio de 1150 m, desde la progresiva 2344.90 m hasta progresiva 3244.20 m, teniendo en consideración que el cero de las progresivas está ubicado en la actual localización de la presa de retención de crecidas. En la Figura 1 se esquematiza la ubicación del tramo en estudio, en tanto que en la Figura 2 se presentan algunos de los perfiles considerados más representativos del tramo. Por otro lado en la Tabla 2 se presentan las coordenadas de todos los perfiles considerados, obtenidas por la Unidad Técnica de Inundaciones durante 1986 (UTI, 1987).

El período temporal de análisis comprendió desde el año 1986, año de relevamiento de los perfiles transversales, hasta el año 1995 donde el régimen de caudales fue modificado fuertemente debido a la construcción de una presa de retención de crecidas aguas arriba.

### **Descripción del suelo constituyente del lecho y márgenes**

De acuerdo a información recolectada de diferentes ensayos de suelo en el lecho del arroyo Ludueña en las cercanías del tramo en estudio puede concluirse que el material constitutivo del cauce se trata de una asociación de limos y arcillas (> 95%). En su gran mayoría se trata de suelos tipificados como ML y CL, con baja plasticidad (IP = 8-10%), con concentración de calcáreos y consistencia firme. En el caso de profundidades superiores a 3.00-3.50 m se encuentran limos con cementación calcárea, que superan en promedio los 40-50 golpes en ensayos normalizados de

penetración. La capacidad de carga para profundidades entre 2.50 m y 3.50 es de  $3.60 \text{ kg/cm}^2$ , en tanto que para el rango de profundidades entre 3.50 a 4.50 m es superior a  $8.5 \text{ kg/cm}^2$  y entre 4.50 a 7.50 m supera los  $14 \text{ kg/cm}^2$ .

El ángulo de fricción interna establecido en ensayos tiene un valores entre  $15\text{-}30^\circ$  en tanto que la cohesión alcanza valores entre  $0.40$  a  $0.90 \text{ kg/cm}^2$ .

La aplicación del test de dispersividad ha determinado que se trata de arcillas no dispersivas.

El peso específico seco tiene valores en el rango de  $\gamma_s = 1.40 - 1.50 \text{ t/m}^3$  en tanto que el peso específico húmedo registra valores en el rango de  $\gamma_h = 1.80 - 1.90 \text{ t/m}^3$ .

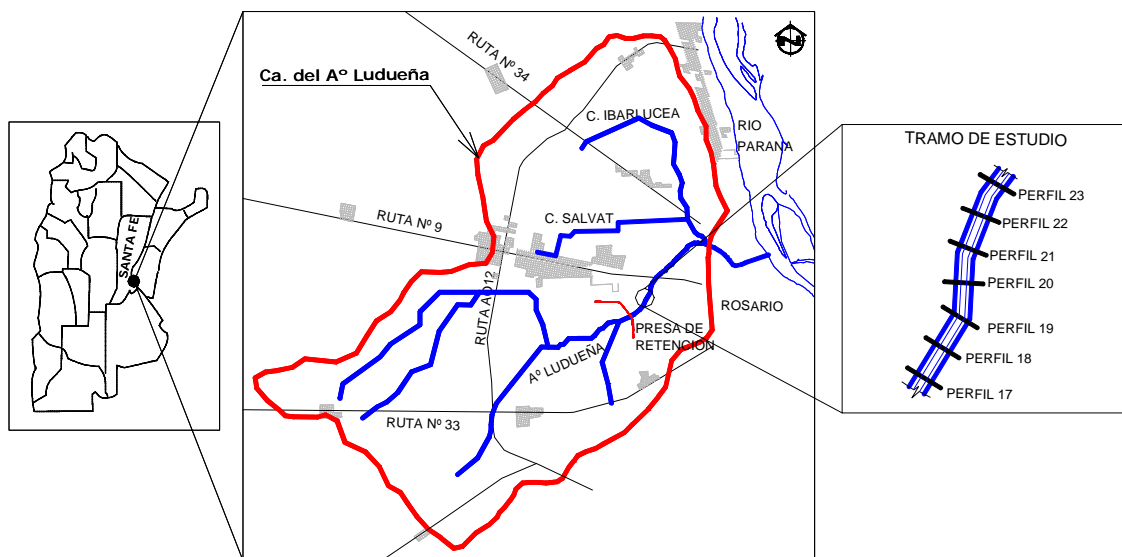


Figura 1. Ubicación del Tramo de Estudio

### **Generación de Información Hidrológica**

La demanda de información hidrológica para la realización del estudio fue el la determinación de serie de caudales máximos de crecidas relevantes durante el período 1986-1995. En función de que en las cercanías del borde aguas abajo del tramo se contó durante los años 1994 y 1996 con una estación limnimétrica (Golf), la información hidrológica necesaria se conformó mediante caudales máximos generados mediante transformación lluvia-caudal y generados mediante la transformación H-Q a partir de limnigramas observados.

La transformación lluvia-caudal fue llevada a cabo mediante técnicas de hidrograma unitario, teniendo en consideración el desarrollo del hidrograma unitario en trabajos previos (Zimmerman et al., 2001). La relación H-Q para convertir los datos limnimétricos en caudales fue llevada a cabo mediante ecuaciones desarrolladas en trabajos previos (Zimmerman y Riccardi, 2000; Riccardi, 2000).

De todos los eventos producidos y a los efectos de hacer factible un análisis de frecuencias se seleccionó una serie parcial de excedencia anual de 9 valores, resultando un valor base de precipitación de 66 mm.

Para la determinación de la lluvia neta se utilizó el método del número de curva considerado de acuerdo con modelaciones anteriores (Zimmermann y Riccardi 2000) y modificado en función de la precipitación antecedente.

Los valores de láminas de lluvia, duraciones, precipitación en 5 días anteriores y caudales máximos producidos, se presentan en la Tabla 1 de acuerdo a un ordenamiento descendente de caudales.

A los efectos de estimar una probabilidad de ocurrencia a los caudales determinados para cada lluvia se le asignó a cada caudal un valor de frecuencia experimental igual a  $n/(1+N)$  donde  $n$  es el número de orden y  $N$  el número total de datos. La frecuencia experimental fue asociada a la probabilidad de igualación o superación del valor de caudal.

Tabla 1. Eventos lluviosos considerados.

Orden	Fecha	Duración (hs)	Total (mm)	Lluvia 5 días antes (mm)	Qmax (m <sup>3</sup> /s)
1	03/04/94	8	133.2	2.8	141 <u>o</u>
2	19/11/90	10	131.0	18.5	176 <u>c</u>
3	17/03/94	18	117.0	17.9	112 <u>o</u>
4	08/01/95	8	79.3	38.9	108 <u>o</u>
5	03/10/95	9	107.5	0	96 <u>o</u>
6	25/12/93	11	100.2	0	84 <u>c</u>
7	30/03/87	16	89.5	9.7	67 <u>o</u>
8	20/03/92	8	81.1	0	55 <u>c</u>
9	25/02/87	4	66.0	8.3	35 <u>c</u>

Nota Tabla 1: o caudal con tirante observado y c calculado

### **Formulaciones de erosión general en cauce**

Las formulaciones de erosión general de cauce utilizadas fueron: Fuerza Tractiva, Lischtvan-Lebediev y Rossinsky.

#### **Fuerza Tractiva**

Plantea el equilibrio entre la tensión de corte ejercida por el flujo y la tensión resistente del suelo constitutivo del cauce. La expresión clásica utilizada para la determinación de la tensión de corte ejercida por el flujo tanto en el fondo de un canal trapecial o rectangular (Chow, 1994):

$$\tau_0 = K \gamma_a R S \quad (1)$$

donde  $\tau_0$  (kg/m<sup>2</sup>) es la tensión de corte,  $K$  (adim) es un coeficiente de distribución que depende de la relación entre el ancho del cauce y el tirante y de la forma del cauce,  $\gamma_a$  (kg/m<sup>3</sup>) es el peso específico del agua,  $R$  (m) es el tirante que puede ser sustituido por el tirante si el ancho del curso es mucho mayor a el tirante y  $S$  (m/m) la pendiente de la línea de energía.

El parámetro ajustado para esta formulación es la tensión admisible que ha resistido el material del curso.

**Lischtvan-Lebediev**

En este caso fue considerada la formulación para erosión general en cauce definido, para suelos cohesivos con distribución de material de fondo homogénea y rugosidad uniforme. En este método la velocidad erosiva o velocidad media que se requiere para erosionar un determinado material esta dado por la expresión:

$$V_e = C \gamma_s^{1.18} \beta h_s^x \quad (2)$$

donde  $V_e$ (m/s) es la velocidad máxima admisible sin erosión, C un coeficiente que en el método original se propuso igual a 0.60 si el peso específico seco del material  $\gamma_s$  se expresa en  $t/m^3$ , en tanto que el valor original de C corresponde a 0.000173 si  $\gamma_s$  se expresa en  $kg/m^3$ ;  $\beta$  (adim) es un coeficiente que depende de la probabilidad de ocurrencia de la crecida (variando desde 0.77 para una probabilidad anual de ocurrencia del 100 % hasta 1.07 para una probabilidad anual de ocurrencia de 0.10 %);  $h_s$  (m) es el tirante asociado a  $V_e$  hasta donde llegará la erosión y x (adim) es un coeficiente que depende del peso específico seco (variando desde  $x = 0.52$  para  $\gamma_s = 0.80 t/m^3$  hasta  $x = 0.28$  para  $\gamma_s = 1.89 t/m^3$ ).

El parámetro ajustado en esta formulación fue el coeficiente C originariamente definido en  $C = 0.60$  (o 0.000173 según el caso).

**Rossinsky**

La formulación de Rossinsky (Rossinsky y Kuz'min, 1950) permite estimar el tirante que se alcanzará al cabo de la erosión (si es que existe) mediante la expresión:

$$h_s = k_p \left( \frac{q}{v_{e1m}} \right)^{0.833} \quad (3)$$

donde  $h_s$  (m) es el tirante erosivo,  $k_p$  (adim) coeficiente que depende de la distribución de velocidades (variando desde 1.00 para velocidades distribuidas normalmente según la profundidad de flujo hasta 1.70 para flujo con velocidades pulsantes significativas);  $q$  ( $m^3/s/m$ ) el caudal específico en el cauce o canal y  $v_{e1m}$  la velocidad máxima admisible sin erosión para un tirante de 1.0 m.

El parámetro ajustado en la formulación de Rossinsky fue la velocidad sin erosión para un tirante de 1.0 m.

**Comparación entre Perfiles Transversales Iniciales y Finales**

El relevamiento de los perfiles transversales al final del período de análisis y su comparación con los perfiles al inicio ha mostrado pequeñas variaciones, considerando a efectos del cálculo como positivas a la erosión y negativa a la sedimentación. El promedio total de modificaciones de las secciones transversales del tramo se ha estimado en alrededor de 0.02 m correspondiendo a predominio de una leve sedimentación.

Los pequeños valores promedios de ambos procesos hacen suponer que las secciones han

estado escasamente alteradas en el período o que la diferencia observada puede encuadrarse dentro de los posibles errores debido a lo dificultoso de posicionarse exactamente en el mismo lugar durante ambos relevamientos batimétricos.

En la Figura 2 a los efectos ilustrativos se muestran 4 perfiles representativos al inicio y al final del período.

En la Tabla 2 se presentan conjuntamente el perfil inicial, el perfil final, las erosiones/sedimentaciones en cada vertical los promedios por secciones y el promedio total del tramo.

Tabla 2. Perfiles Transversales Iniciales y Finales

<b>Perfil 17</b>													
x (m)	0	4	6	10	14	18	22	26	30	46			
y_inicial (m)	21.47	21.45	21.21	18.98	18.62	17.9	19.08	19.26	21.33	21.44			
y_final (m)	21.5	21.39	21.26	19.2	18.86	17.82	18.7	19.1	21.2	21.33		Prom.	Prom.
Erosión (m)	0	0.06	0	0	0	0.08	0.38	0.16	0.13	0.11		0.092	Perfil
Sedim. (m)	0.03	0	0.05	0.22	0.24	0	0	0	0	0		0.054	0.04 e
<b>Perfil 18</b>													
x (m)	0	5	15	17	22	27	31	37	39	45	57		
y_inicial (m)	21.42	21.48	21.18	19.06	18.75	17.47	18.51	18.82	20.72	21.24	21.40		
y_final (m)	21.4	21.41	20.81	19.37	18.73	17.48	18.15	19.42	20.28	21.16	21.70	Prom.	Prom
Erosión (m)	0.02	0.07	0.37	0	0.02	0	0.36	0	0.44	0.08		0.12	Perfil
Sedim. (m)	0	0	0	0.31	0	0.01	0	0.6	0	0		0.11	0.01 s
<b>Perfil 19</b>													
x (m)	0	10	18	20	28	32	35	41	43	45	45		
y_inicial (m)	21.03	21.16	21.11	19.67	17.57	17.78	18.18	19.24	21.07	21.3	21.3		
y_final (m)	21.14	21.26	20.6	19.5	17.48	17.83	18.83	19.21	21.26	21.3	21.3	Prom.	Prom
Erosión (m)	0	0	0.51	0.17	0.09	0	0	0.03	0	0	0	0.07	Perfil
Sedim. (m)	0.11	0.1	0	0	0	0.05	0.65	0	0.19	0	0	0.06	0.01 e
<b>Perfil 20</b>													
x (m)	0	2	6	9	12	13	17	21	22	28	32		
y_inicial (m)	21.09	21.06	21.04	18.86	18.31	17.62	17.47	17.75	18.45	18.72	21.1		
y_final (m)	21.1	21.09	20.6	19	18.77	17.89	17.7	18	18.56	19.14	20.64		Prom
Erosión (m)	0	0	0.44	0	0	0	0	0	0	0	0.46	0.08	Perfil
Sedim. (m)	0.01	0.03	0	0.14	0.46	0.27	0.23	0.25	0.11	0.42	0	0.17	0.09 s
<b>Perfil 21</b>													
x (m)	0	3	6	9	12	14	19	24	30	32	40		
y_inicial (m)	21.25	21.08	20.96	20.87	18.84	18.26	17.58	18.42	18.92	21.04	21.2		
y_final (m)	21.25	21.2	21.1	20.89	19.19	18.4	17.63	18.4	19.12	20.76	21.2	Prom.	Prom
Erosión (m)	0	0	0	0	0	0	0	0.02	0	0.28	0	0.03	Perfil
Sedim. (m)	0	0.12	0.14	0.02	0.35	0.14	0.05	0	0.2	0	0	0.10	0.07 s
<b>Perfil 22</b>													
x (m)	0	7	12	19	26	31	36	42	45				
y_inicial (m)	21.14	21.14	20.89	19.4	17.8	17.23	18.13	18.98	20.78				
y_final (m)	21.14	21.03	20.7	19.04	17.27	17.22	18.93	18.5	20.79			Prom.	Prom
Erosión (m)	0	0.11	0.19	0.36	0.53	0.01	0	0.48	0			0.19	Perfil
Sedim. (m)	0	0	0	0	0	0	0.8	0	0.01			0.09	0.10 e
<b>Perfil 23</b>													
x (m)	0	4	8	16	20	24	30	34	38				
y_inicial (m)	21.17	20.94	18.45	17.78	16.7	17.63	18.36	21.03	21.31				
y_final (m)	21.46	20.3	18.8	17.72	17.11	18	18.5	21	21.3			Prom.	Prom.
Erosión (m)	0	0.64	0	0.06	0	0	0	0.03	0.01			0.07	Perfil
Sedim. (m)	0.29	0	0.35	0	0.41	0.37	0.14	0	0			0.15	0.08 s

Nota Tabla 2: e erosión y s sedimentación

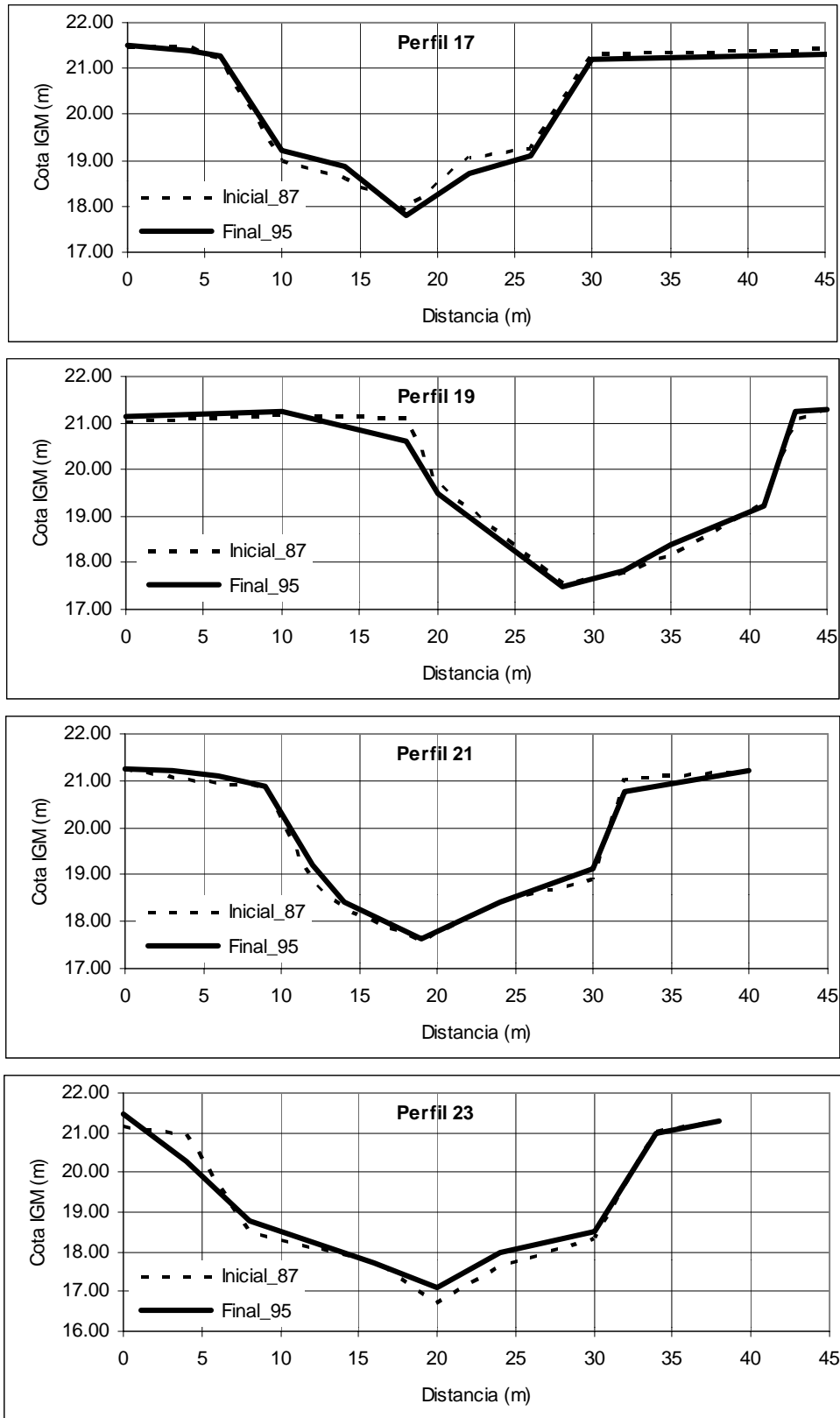


Figura 2. Perfiles Transversales Iniciales y Finales

### Reconstrucción de perfiles de flujo

Para cada caudal máximo fue reconstruido el perfil de flujo a través de modelación matemática hidrodinámica. A tal efecto fue utilizado un modelo bidimensional constituido y explotado en trabajos previos (Riccardi et al., 2001). Cabe destacar que fue necesario el uso de esta herramienta debido a que para caudales superior a 70-80 m<sup>3</sup>/s el arroyo se desborda adquiriendo el flujo características fuertemente bidimensionales. La pendiente de fricción fue estimada a partir de la formulación de Manning. El coeficiente de Manning ajustado de trabajos previos fue  $\eta = 0.037$ . La pendiente de fricción promedio para aguas altas resultó en el entorno de  $S_f = 0.0087$ . El tirante fue asumido horizontal dentro de la sección transversal. En el caso de desborde de la sección del cauce se utilizó la aproximación de considerar como sección de conducción del cauce aquella delimitada por la prolongación imaginaria de los taludes laterales. En la Tabla 3 se presentan los valores de caudales máximos circulantes por el cauce en conjunto con el caudal máximo circulante por toda la sección y los tirantes máximos promedio en el tramo.

Tabla 3. Repartición de caudales en el cauce

Caudal Máximo en toda la sección transversal (m <sup>3</sup> /s)	Caudal Máximo en el cauce (m <sup>3</sup> /s)	Tirante Máximo promedio en el Tramo (m)
176	109	3.94
141	101	3.80
112	91	3.57
108	90	3.55
96	85	3.48
84	80	3.38
67	67	3.09
55	55	2.85
33	35	2.40

Resulta de interés remarcar las modificaciones en las propiedades estadísticas en la serie de caudales sobre el cauce respecto a la serie de caudales totales circulantes por la sección transversal que se manifiestan al producirse desbordes. En este sentido al aplicar análisis de incertidumbre a la variable caudal generado por la cuenca, pudo establecerse que asumiendo una incertidumbre del 20% en el caudal total circulante, desciende al 8% en la variable caudal que circula por el cauce. Además, disminuye la diferencia entre caudal máximo y caudal mínimo (disminuye la varianza). Estas modificaciones contribuyen en alguna manera a la confiabilidad de los resultados de este estudio de erosión ya que se acortan los períodos de repetición de caudales y aumenta la permanencia de caudales necesarios para verificar procesos erosivos.

En la Tabla 4 se presentan los valores de cotas, tirantes y velocidades calculadas para el caudal máximo de 176 m<sup>3</sup>/s. En este caso el caudal circulante por la sección de cauce fue calculada por el modelo matemático 109 m<sup>3</sup>/s, en tanto que el resto circuló por sobre el valle de inundación.

La velocidad máxima en cada perfil fue estimada en base a la desagregación del caudal en fajas verticales.

Tabla 4. Perfil de Flujo para Caudal Máximo de 176 m<sup>3</sup>/s (109 m<sup>3</sup>/s en cauce)

	Prog. (m)	Cota Superficie Agua (m)	Máximo Tirante en faja	Radio Hidráulico Máximo en Faja (m)	Pendiente de fricción (m/m)	Velocidad Media (m/s)	Velocidad Máxima (m/s)
Perfil 17	2344.9	21.78	3.52	3.47	0.001151	1.47	1.98
Perfil 18	2495.2	21.65	3.67	3.09	0.000842	1.31	1.66
Perfil 19	2645.1	21.49	3.86	3.51	0.000783	1.33	1.75
Perfil 20	2795.1	21.36	3.88	3.80	0.000776	1.38	1.83
Perfil 21	2944.2	21.23	3.45	2.80	0.001321	1.71	1.95
Perfil 22	3094.2	21.10	3.58	2.92	0.000843	1.34	1.60
Perfil 23	3244.2	21.00	3.84	3.57	0.000659	1.30	1.62

### Ajuste de Parámetros de Predictores

El ajuste de los predictores de erosión se había planificado a priori de modo tal de lograr que la sucesión de caudales máximos estimados produzcan sucesivas erosiones que culminaban en la erosión final observada.

Al hallarse una clara evidencia de que no hubo un proceso de erosión generalizado se procedió a ajustar los predictores de modo tal que al paso de la mayor de las crecidas observadas se produjera la erosión observada (en muchos casos nula). El análisis fue realizado por fajas en cada perfil transversal del cauce.

En la Tabla 5 se presentan los valores máximos de los parámetros de los predictores hallados en cada perfil, conjuntamente con el promedio de máximos y los valores máximo y mínimo de los máximos.

En el caso de fuerza tractiva la tensión admisible promedio de 2.90 kg/m<sup>2</sup> y con un valor máximo de 3.66 kg/m<sup>2</sup>.

La aplicación del predictor de erosiones de Rossinsky determinó un valor de la velocidad máxima sin erosión para un tirante de 1.00 con un valor medio de 1.37 y un máximo de 1.54 m/s.

En el caso de la formulación de Lischvan-Lebediev el coeficiente C resultó con un promedio de 0.80 y un máximo de 0.91.

Tabla 5. Resultados de Ajuste de Predictores de Erosión.

	Perfil 17	Perfil 18	Perfil 19	Perfil 20	Perfil 21	Perfil 22	Perfil 23	Valor Medio	Máxi- mos	Míni- mos
Fuerza Tractiva $\tau_{adm}$ (kg/m <sup>2</sup> )	3.62	2.58	2.72	2.92	3.66	2.44	2.33	2.90	3.66	2.33
Rossinsky $Ve_{v=1m}$ (m/s)	1.54	1.28	1.33	1.40	1.52	1.24	1.24	1.37	1.54	1.24
Lischvan-Lebediev C	0.91	0.76	0.78	0.82	0.90	0.73	0.73	0.80	0.91	0.73

Cabe destacar que el valor máximo no significa que necesariamente si se superan las velocidades deducidas a partir de estos parámetros se produzca erosión. El valor hallado indica que aun en situación de máximo caudal circulante por la sección en los 9 años no se ha producido una

erosión generalizada en el tramo, sin indicios tampoco de erosión incipiente. Debido a que a partir del año 1995 comenzó a funcionar una presa de retención de crecidas aguas arriba, es escasamente probable que se produzcan caudales superiores al máximo estimado en 1990 ( $176 \text{ m}^3/\text{s}$ ), ya que este valor en el tramo para el nuevo régimen de caudales tiene un período medio de retorno superior a 500 años.

### Extrapolación de resultados de predictores a otras profundidades hidráulicas y velocidades

A los efectos de generar una herramienta para el diseño a la erosión de canales, se han elaborado las relaciones entre velocidades no erosivas y tirantes medios en fajas asociadas a partir de los ajustes de los predictores aquí expuestos.

En la Figura 3 se presentan las relaciones elaboradas a partir de los valores mínimos y máximos hallados para cada formulación de erosión. Cabe destacar como en el entorno de profundidades hidráulicas entre 3.50-4.00 m los valores son sumamente semejantes dado que es precisamente el rango donde se ajustaron los predictores en las secciones en estudio. En la zona grisácea se encuadra el rango de alturas del flujo en el cual fueron ajustados los parámetros máximos de los predictores.

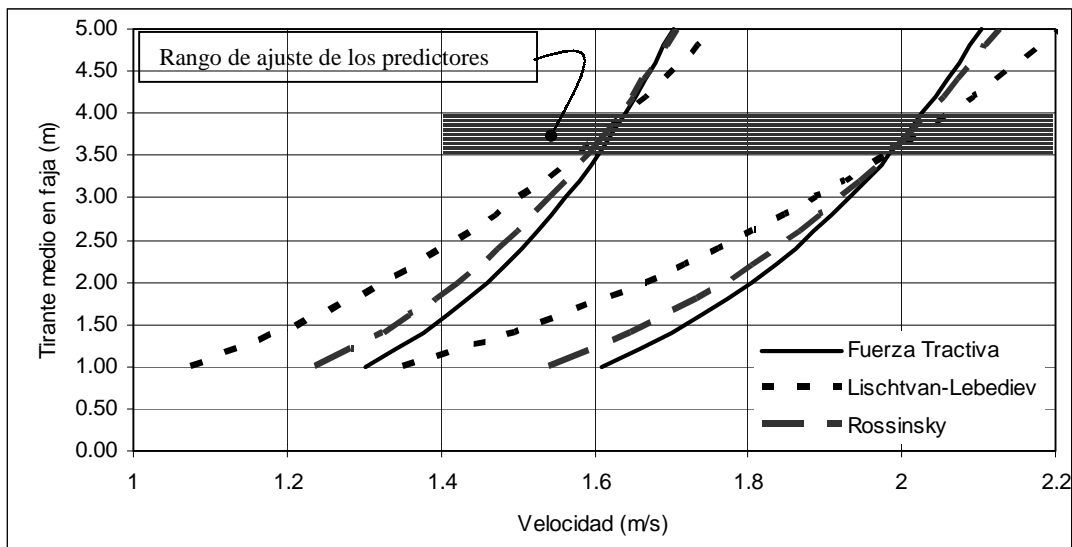


Figura 3. Relaciones Velocidad sin Erosión-Profundidad Hidráulica en Arroyo Ludueña

## CONCLUSIONES

Se ha presentado la aplicación de una metodología para la determinación indirecta de parámetros de predictores de erosión generalizada en un curso de agua con lecho cohesivo de la región de Rosario.

Las formulaciones de erosión generalizada ajustadas fueron las de Fuerza Tractiva, Lischtván-Lebediev y Rossinsky. En la formulación de Fuerza Tractiva se determinó el valor de tensión admisible del lecho, en Rossinsky se determinó la velocidad sin erosión para un tirante de 1.00 m en tanto que para la formulación de Lischtván-Lebediev se ajustó el parámetro C originariamente establecido en 0.60.

Los valores hallados fueron superiores a los valores hallados en la bibliografía para los tipos de suelo con características semejantes a los del tramo estudiado (limos arcillosos compactos).

Se han establecido los siguientes valores máximos sin erosión generalizada incipiente para aguas altas: Fuerza Tractiva  $\rightarrow \tau_{adm} = 3.66 \text{ kg/m}^2$ ; Lischtván-Lebediev  $\rightarrow C = 0.93$  y Rossinsky  $\rightarrow V_{e1m} = 1.54 \text{ m/s}$ .

Resulta evidente que los resultados de los estudios en el lecho del arroyo Ludueña indican que el predictor de Lischtván-Lebediev en su formulación original se aleja de manera importante de los valores observados, hallándose velocidades sin erosión para aguas altas un 50% superiores a la que resulta de aplicar la formulación original ( $C = 0.60$ ). En este sentido se concluye que, en la formulación original para este tipo de suelos la caracterización del mismo mediante su peso específico seco resulta sumamente conservadora y no debe ser utilizada sin un tipo de corrección como la aquí propuesta.

En lo que respecta a los predictores de Fuerza Tractiva y Rossinsky si bien los valores hallados se encuentran dentro de los rangos establecidos en la bibliografía específica puede afirmarse que son en general superiores a los que se fijan para limos arcillosos de baja plasticidad (por ej. en Chow, 1984, para arcillas pesadas muy compactas el valor límite máximo de fuerza tractiva es de  $3.36 \text{ kg/m}^2$ ; por otro lado en Rossinsky y Kuz'min, 1950; para suelos limosos arcillosos compactos la velocidad sin erosión para 1.00 m recomendada es de 1.20 m/s).

En términos de balance de procesos erosión-sedimentación el tramo muestra una muy pequeña sedimentación (alrededor de un promedio de 0.02 m) lo que pone en evidencia la ausencia de procesos de erosión generalizada y también indica que los valores hallados no necesariamente son umbrales máximos de resistencia sino que existe la probabilidad de ser superados.

Debido al notorio grado de cementación calcárea debe tenerse en cuenta que cualquier alteración del perfil (canalizaciones, perfilado, etc.) podría alterar la actual resistencia a la erosión hídrica.

## BIBLIOGRAFÍA

- Chow, V. T.** (1994) *Hidráulica de los Canales Abiertos*, McGraw-Hill Interamericana, Colombia.
- Breusers, H. and A. Raudkivi** (1991) *Scouring, IAHR Hydraulics Structures Design Manual 2*, Balkema, Rotterdam, Netherlands.
- Hoffmans, G. and H. Verheij** (1997) *Scour Manual*, Balkema, Rotterdam, Netherlands.
- Juárez Badillo, L. y A. Rico Rodríguez** (1984) *Mecánica de Suelos, Tomo III: Flujo de Agua en Suelos – Apéndice III Socavación*, Editorial Limusa, México.
- Kiseliev, A.** (1972) *Manual de Cálculos Hidráulicos, Tomo 3*. Moscú, Rusia.
- May, R. J. Ackers and A. Kirby** (2002) *Manual on scour at bridges and other hydraulic structures*, CIRIA, London.
- Maza Alvarez, J.** (1994) *Erosión y Obras de Protección*, Material de Curso, XV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Asociación Internacional de Investigaciones Hidráulicas División Latinoamericana, Santiago, Chile.
- Pouey, N.** (1998) *Erosión Hídrica en Cursos de Llanura sobre Lechos Cohesivos*, UNR Editora, Rosario, Argentina.

- Riccardi, G.** (2000) “*Un Sistema de Simulación Hidrológica-Hidráulica Cuasi-2D Multicapa para Ambientes Rurales y Urbanos*”, en Libro de publicación Memorias del XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Asociación Internacional de Investigaciones Hidráulicas División Latinoamericana, Tomo II , pag. 159-168 , Córdoba, Argentina
- Riccardi, G., E. Zimmermann, R. Navarro, C. Scuderi, H. Stenta y A. Zanfagnini** (2001) *Áreas Inundables en el Sistema Hídrico del Arroyo Ludueña en el Distrito Rosario*, Convenio de Servicios a Terceros Facultad de Cs. Ex., Ing. y Agrim.- Municipalidad de Rosario, Departamento de Hidráulica, FCEIA, UNR. Rosario.
- Rossinsky, K. I. y I. Kuz'min** (1950), Vnutrennie techeniya rechhykh potokov [Corrientes Internas en ríos] en *Gidrologicheskie osnovy rechnoi gidrotekhniki*, Akademii Nauk SSSR, Moscú, Rusia. (Traducción Pouey N, 1986, Departamento de Hidráulica, UNR, Rosario).
- UTI** (1987), *Legajo de Planos Proyecto de Canalización Arroyo Ludueña Tramo Presa de Retención-Entubamientos* , Unidad Técnica de Inundaciones Dirección Provincial de Obras Hidráulicas Regional Sur, Rosario.
- Zimmermann, E., P. Basile y G. Riccardi** (2001) “*Análisis de la Modificación en la Respuesta Hidrológica del Sistema del Arroyo Ludueña*”, Seminario Internacional sobre Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas, Rosario, Argentina. Pag. 103.
- Zimmermann, E. y Riccardi, G.** (2000) “*Modelo de Simulación Hidrológica Superficial y Subterránea para Areas de Llanura*” en Libro de publicación Memorias del XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Asociación Internacional de Investigaciones Hidráulicas División Latinoamericana, Tomo II , pag. 169-178, Córdoba, Argentina.