

# DISEÑO DE PROTECCIONES: ANÁLISIS DE EROSIÓN Y ESTABILIDAD DE TALUDES

Marcela Reynares, Felipe Franco, Norberto Morbidoni y Mario Schreider

## Resumen:

La definición de la extensión de una protección de margen en su desarrollo transversal a la corriente debe resultar siempre un compromiso entre la necesaria estabilidad que la obra debe tener a lo largo de su vida útil y las limitantes económicas propias de cualquier proyecto de ingeniería. El desequilibrio entre estos aspectos promueve diseños en oportunidades conservativos, y consecuentemente antieconómicos y en otras subdimensionados, lo que puede significar la destrucción de la obra, con los consecuentes daños y perjuicios económicos que ello acarrea. Ambas situaciones involucran costos que exceden los que corresponderían a un diseño ajustado en virtud de una apropiada estimación de las solicitaciones reales a las que estará expuesta la estructura.

En este trabajo se propone un análisis integrado de los procesos erosivos que actúan al pie de las obras de protección durante la ocurrencia de crecidas extraordinarias, conjuntamente con la valoración de la estabilidad geotécnica del talud. La adecuada vinculación de estas herramientas las convierte en instrumentos útiles que permiten estimar el grado de riesgo a que estará sometida una estructura ya construida o definir la extensión a dar a la cubierta en la instancia de dimensionamiento, de modo de asegurar la estabilidad del conjunto estructura-suelo.

**Palabras clave:** Erosión, protecciones, estabilidad, taludes.

## INTRODUCCIÓN

La extensión de una protección marginal, en su desarrollo transversal a la corriente, resulta siempre un compromiso a asumir entre la necesaria estabilidad que debe tener la estructura a lo largo de su vida útil y las limitantes económicas que toda obra de ingeniería posee.

Dos factores resultan fundamentales a la hora de definir la extensión de una protección: la erosión esperable al pie de la misma, luego de colocada, y la estabilidad del conjunto estructura-suelo una vez ocurridas las erosiones del lecho y deformada la protección. Como contrapartida de estas definiciones, la realidad de la práctica ingenieril indica que en muchos casos las erosiones son calculadas sin tener en cuenta la presencia de la protección y, más aún, las longitudes de éstas no son evaluadas a partir de un análisis de estabilidad que involucre una adecuada descripción del proceso de deformación de la cubierta.

En este trabajo se presentan evidencias de laboratorio y de campo que demuestran cómo una adecuada estimación de las erosiones en las proximidades de la margen, ante la ocurrencia de crecidas extraordinarias, y el cálculo de la estabilidad del conjunto estructura-suelo en secciones críticas del emplazamiento, podrían resultar indicadores útiles del peligro de destrucción de obras de protección ya construidas. Estas consideraciones han sido, asimismo, la base para el desarrollo de una metodología que permite estimar la extensión a dar a una protección de margen en su desarrollo transversal a la corriente.

## EVIDENCIAS DE LABORATORIO

Estudios antecedentes (Franco et al., 2002; Zanardi et al., 2002) han demostrado, en base a experimentación de laboratorio, la incidencia que tiene la protección sobre el desarrollo de erosiones al pie de la misma. La Figura 1, tomada de Franco et al. (2002),

Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas - Universidad Nacional del Litoral (UNL) - Santa Fe - Argentina - E-mail: reynares@fich1.unl.edu.ar

Artículo recibido el 20 de mayo de 2004, recibido en forma revisada el 20 de septiembre de 2004 y aceptado para su publicación el 4 de octubre de 2004. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo siguiendo lo indicado en las "Instrucciones para autores". En el caso de ser aceptadas, éstas serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores.

pone en evidencia cómo la presencia de la cubierta, si bien impide las erosiones en el sector de la margen protegida, promueve mayores erosiones al pie de la misma respecto de las que se observaron para igual condición hidráulica cuando la margen no fue recubierta. Ello se tradujo en una deformación de la protección distinta de la estimada a partir de las erosiones teóricas (calculadas sin la presencia de la protección). Como resultado de ello, los factores de estabilidad del conjunto estructura-suelo, calculados en base a las erosiones estimadas tomando en consideración la presencia de la protección, fueron entre un 15% y un 20% menores que los obtenidos para la protección deformada acorde a una erosión calculada que no tuvo en cuenta la existencia de la cubierta.

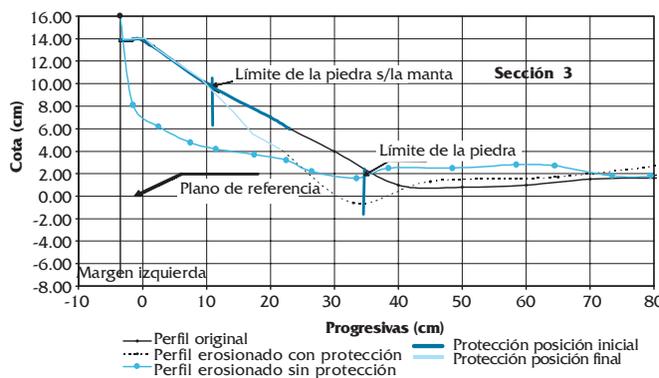


Figura 1. Evidencias de laboratorio: Situación final de la sección de erosión con y sin protección.

Estas evidencias constituyen una primera alerta respecto de la necesidad de reproducir, de la manera más fiel posible, las erosiones al pie de la protección, teniendo en cuenta la incidencia que el revestimiento tiene sobre el resto de la sección erosionada. Asimismo, se pudo vislumbrar cómo el análisis de estabilidad del conjunto se constituyó en una herramienta válida para identificar adecuadamente estos efectos.

## EVIDENCIAS DE CAMPO

Se presentan dos situaciones de campo donde se reflejan las consideraciones efectuadas acerca del análisis relativo al conjunto de erosiones y estabilidad de taludes.

### Caso I: Río Salado, Sector INALI.

#### • Ubicación del área de estudio:

El río Salado tiene sus nacientes en las provincias de Salta y Catamarca (Argentina) (Figura 2a), a partir de las cuales desarrolla un recorrido total de 1500 km. En su tramo inferior escurre completamente en la provincia de Santa Fe. Posee un caudal medio anual de 145.6 m<sup>3</sup>/s, habiéndose registrado un caudal pico de 3900 m<sup>3</sup>/s en la crecida extraordinaria de abril/mayo de 2003. El río Salado descarga en el Riacho Santa Fe para luego dar origen al río Coronda (Figura 2b). Próximo a su desembocadura, su recorrido se encuentra delimitado por las ciudades de Santa Fe y Santo Tomé, ésta última emplazada sobre la margen derecha del cauce principal (Figura 2c). En las últimas décadas, la costanera de la ciudad de Santo Tomé ha sufrido un intenso proceso erosivo y de evolución morfológica, lo cual ha afectado numerosas viviendas particulares y otras obras civiles ubicadas en el lugar (Figura 2c). Un ejemplo de ello lo constituye el edificio del Instituto Nacional de Limnología (INALI), instituto de investigaciones dependiente del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y de la Universidad Nacional del Litoral, el cual ha visto parte de sus estructuras seriamente afectadas por este proceso.

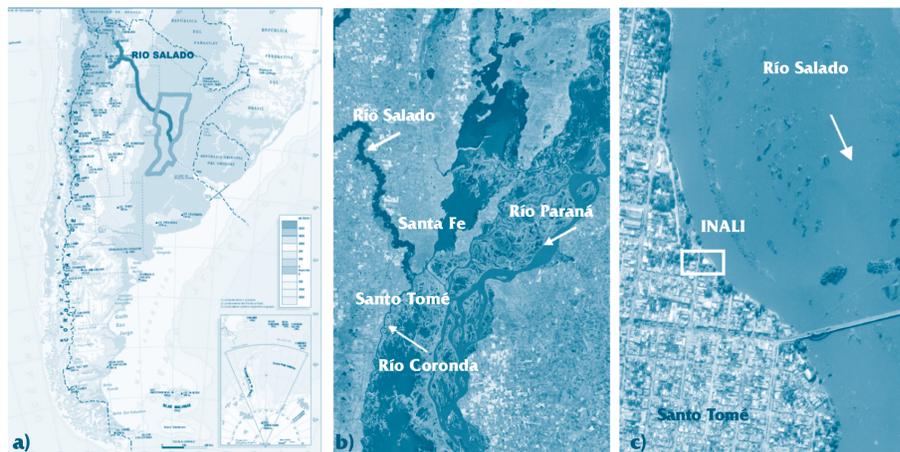


Figura 2. Ubicación del área de estudio

• *Análisis de los procesos erosivos y de estabilidad de la margen:*

Con el objeto de implementar el diseño de una obra de protección de margen, la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH, 2002) evaluó las erosiones esperables, ante la ocurrencia de una crecida extraordinaria, en el tramo del río Salado donde se ubican las instalaciones del INALI, antes mencionadas (Figura 2c).

El análisis de estabilidad (Morbidoni, 2002) demostró que para el caso en que se consideraron los perfiles del terreno sin erosión, los mismos resultaban estables con un factor de seguridad ( $F_s$ ) que, en el caso del perfil tipo presentado en Figura 3, fue 1.20. Sin embargo, este mismo perfil se volvió inestable al considerar la margen erosionada ( $F_s = 0.95$ ). El cálculo de la estabilidad de la margen se llevó a cabo empleando el modelo computacional PCSTBL5 (Siegel, 1978), el cual, a partir de la configuración geométrica del terreno, determina los círculos críticos y los factores de seguridad asociados a éstos. Se define como factor de seguridad  $F_s$  a la relación entre las fuerzas estabilizantes y desestabilizantes. Para este análisis se consideraron tanto el nivel del río Salado y el de saturación del suelo en cota 12.50 m IGM. La información geotécnica para el cálculo se detalla en Tabla 1.

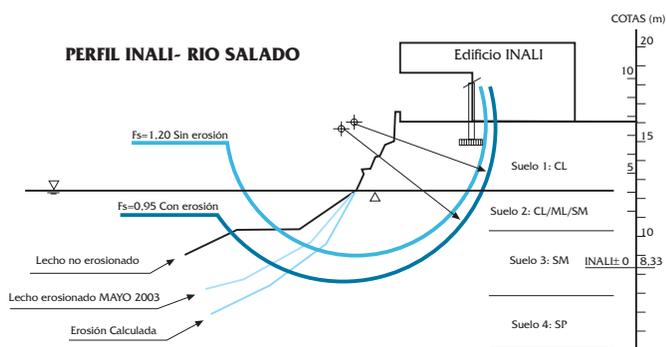


Figura 3. Círculos de deslizamiento del talud en las inmediaciones del INALI

Tabla 1. Características geotécnicas del suelo.

Tipo de Suelo		Peso Específico Húmedo ( $\gamma_h$ )	Peso Específico Saturado ( $\gamma_{sat}$ )	Cohesión	Ángulo de Fricción
No.	Clase	(Kg./dm <sup>3</sup> )	(Kg./dm <sup>3</sup> )	(ton./m <sup>2</sup> )	(grados)
1	CL	1.95	2.10	2.50	12
2	CL / ML / SM	1.90	1.95	1.10	5
3	SM	1.80	2.00	0.00	28
4	SP	1.80	2.00	0.00	35



Figura 4. Sector del INALI afectado por el deslizamiento

La crecida extraordinaria del río Salado, ocurrida en abril/mayo de 2003 (FICH, 2003), encontró al sector aún sin proteger, provocando erosiones en las proximidades a la margen derecha del río que resultaron próximas a las estimadas (Figura 3). En tales circunstancias era esperable que los factores de seguridad disminuyesen por debajo de la unidad, dando lugar al deslizamiento del talud, tal como efectivamente sucedió (Figura 4). Ello obligó a la evacuación del edificio central del INALI, ubicado parcialmente dentro del área de afectación del círculo de deslizamiento (Figura 3).

Se puede concluir, en este caso, que la aplicación del análisis de estabilidad para la condición de lecho erosionado se constituye en una herramienta válida no sólo para determinar el grado de riesgo de falla sino también para delimitar zonas de afectación en el coronamiento del talud, de especial interés en áreas urbanas con fuerte desarrollo de infraestructura en las proximidades de los márgenes de los ríos.

**Caso II: Río San Javier, Sector “Ruinas de Santa Fe La Vieja”.**

• *Ubicación del área de estudio:*

La localidad de Cayastá (Figura 5a) se encuentra situada a 80 km al norte de la ciudad de Santa Fe, provincia de Santa Fe, Argentina.

Inmediatamente al sur de Cayastá, sobre la margen derecha del río San Javier se encuentran las “Ruinas de Santa Fe La Vieja”, sitio donde fundara primitivamente la ciudad de Santa Fe el conquistador español Juan de Garay en 1573. En dicho lugar se preserva un valioso patrimonio arqueológico, fiel testimonio de la vida de la ciudad hasta mediados del siglo XVII, en que se produjo su traslado.



Figura 5. Río San Javier, sector de estudio correspondiente a las Ruinas de Santa Fe



Figura 6. Vista general de la obra de protección en las Ruinas de Santa Fe

El río San Javier se ubica sobre la margen derecha de la planicie aluvial del río Paraná (Figura 5b). Su condición de brazo del cauce principal hace que su régimen hidrológico se encuentre estrechamente ligado al del sistema en general. Las sucesivas crecidas del río San Javier han provocado erosiones sobre la margen derecha que pusieron en riesgo las ruinas allí existentes. En respuesta a esta situación, el Gobierno de la Provincia de Santa Fe construyó un sistema de defensa que no brindó los resultados esperados, siendo necesaria su reparación y reconstrucción en varias oportunidades.

En este trabajo se analizan los motivos de falla de la última de estas obras inaugurada en 1989. La obra consistía en un muro de contención seguido de una combinación de piedra suelta, gaviones y colchonetas (Figura 6).

• *Análisis de Estabilidad:*

Se consideró como situación inicial un relevamiento realizado en el año 1988 por la Dirección Provincial de Obras Hidráulicas (DPOH) de Santa Fe, sobre el cual se colocó la obra de referencia (Figura 7a). Esta condición de partida, sumada a la información geotécnica que se dispuso (Tabla 2), y a otros factores condicionantes, como el nivel hidrométrico del río San Javier y la condición de saturación del suelo, permitió llevar a cabo el cálculo de estabilidad del conjunto estructura-suelo en la condición inicial. En este caso se tomó un nivel bajo del pelo de agua, correspondiente a cota 15.00 m IGM (Reynares, 2002), con el objeto de obtener mayor seguridad en los cálculos. La línea piezométrica se presenta de manera simplificada y fue confeccionada con valores obtenidos de piezómetros cercanos al lugar. El círculo de deslizamiento resultante se presenta en la Figura 7a. El valor del factor de seguridad  $F_s = 0.99$  hace presagiar que el talud deslizaría provocando la deformación de la protección. Tal hecho puede confirmarse en la Figura 7b, donde se presenta el relevamiento realizado en el año 2001. Para representar fielmente el deslizamiento ocurrido, se restringió el alcance de los círculos de falla de manera que no involucren el tablestacado, ya que la porción de la sección que deslizó no incluía a este sector.

Al analizar ahora la condición de funcionamiento de la protección en el estado actual, parcialmente destruida (Figura 7b y 8), se concluye que no sólo no contribuye a la estabilidad de la sección sino que resulta contraproducente. Ello se comprueba al calcular los círculos de deslizamiento para las situaciones con y sin protección en la porción de talud por debajo de la línea de tablestacado.

Tabla 2. Parámetros adoptados para cada tipo de suelo.

Tipo de Suelo	Peso Específico Húmedo ( $\gamma_h$ )	Peso Específico Saturado ( $\gamma_{sat}$ )	Cohesión	Ángulo de Fricción
No.	(Kg./dm <sup>3</sup> )	(Kg./dm <sup>3</sup> )	(ton./m <sup>2</sup> )	(grados)
1	1.80	1.90	1.0	26
2	1.80	2.00	2.0	12
3	1.90	2.10	0.0	28
4	1.90	2.10	0.0	32
5	1.90	2.10	0.0	42

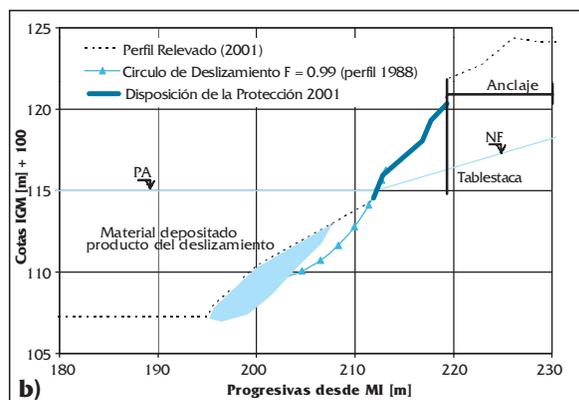
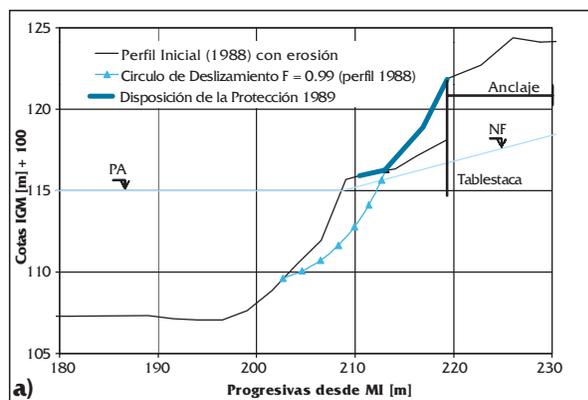


Figura 7. Río San Javier, Cayastá, perfil tipo relevado en 1988 y 2001, con sus respectivas longitudes de protecciones.

En efecto, para el caso de la situación sin protección se obtuvo un  $F_s = 1.96$ , sustancialmente mayor al calculado para igual círculo pero en presencia de la obra,  $F_s = 1.69$ . Ello demuestra que la sobrecarga que representa la cubierta en la parte superior del talud resulta inconveniente para la estabilidad de la margen.

Si ahora se toma la sección completa para realizar el análisis de estabilidad, incluyendo el muro de contención y su anclaje, se puede observar que los coeficientes disminuyen sustancialmente. Esto estaría demostrando que, si bien la sección ha buscado su posición más estable mediante el deslizamiento del talud en su parte inferior, la consideración del tablestacado y el material por él contenido, influye negativamente tanto en el caso de la presencia del enrocado de la protección como sin él, con coeficientes de seguridad de  $F_s = 1.22$  y  $F_s = 1.23$ , respectivamente.



Figura 8. Protección colapsada de la defensa de Cayastá relevada en el año 2001

Debe señalarse que el hecho de que los coeficientes de estabilidad hayan resultado superiores a 1 para la situación de la protección parcialmente destruida obedecería al depósito de material que se produce al pie del talud, luego del deterioro de la

margen (sector sombreado en Figura 7b), ya que el mismo trabajaría como “contrapeso” del material que se encuentra en la parte superior. Sin embargo, es razonable pensar que dado que el material deslizado desde el talud presenta características granulares, el mismo podrá ser arrastrado por la corriente durante el pasaje de la próxima crecida, desapareciendo así el efecto de contrapeso antes referido. En esta nueva situación los factores de seguridad se reducirían nuevamente, promoviendo el progresivo deterioro de la margen y el riesgo para las instalaciones ubicadas en su entorno.

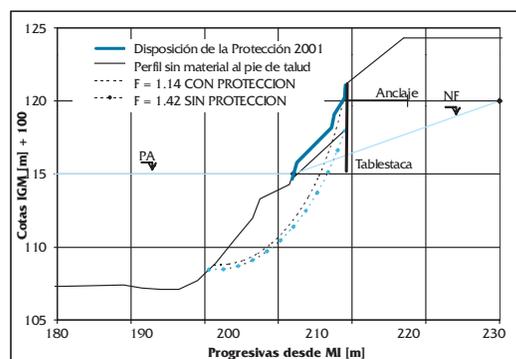


Figura 9. Círculos de deslizamiento de la sección parcial, sin el material al pie del talud

En efecto, al calcular los valores de los coeficientes de seguridad al deslizamiento bajo la hipótesis de que la corriente removió el material depositado al pie, se puede observar una disminución importante de los mismos. Nuevamente, si el análisis involucra a la porción inferior del talud, la margen resulta mucho más estable sin la protección ( $F_s = 1.42$ ), respecto de lo que se obtiene si se considera su presencia ( $F_s = 1.14$ ). Este hecho estaría ratificando que si la protección no se encuentra correctamente colocada y no cuenta con las dimensiones adecuadas en el sentido transversal a la corriente su efecto resulta perjudicial para la estabilidad del conjunto (Figura 9).

Si el análisis contempla a la sección completa, incluyendo el tablestacado y su anclaje (Figura 10), entonces los coeficientes  $F_s$  adoptan los siguientes valores:

- $F_s$  con protección = 1.03
- $F_s$  sin protección = 1.02

Nuevamente disminuye el factor de seguridad. Esto estaría demostrando que el talud se encontraría en una situación crítica, próxima a la inestabilidad ( $F_s < 1$ ), demandando una reconstrucción de la protección con dimensiones apropiadas que provoque un incremento de los factores de seguridad, compatibles con las características del sector a proteger.

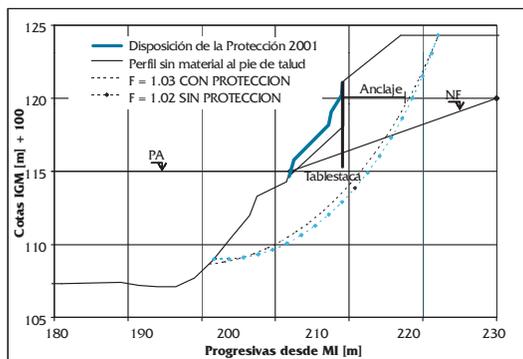


Figura 10. Círculos de deslizamiento de la sección tipo completa, sin el material al pie del talud

Merece destacarse que el análisis, aquí efectuado, sólo contempló la remoción del material deslizado, sin evaluar las erosiones que se podrían verificar en la sección, producto del pasaje de una crecida. Ello, sin lugar a dudas, profundiza el lecho al pie del talud volviéndolo aún más inestable.

Se concluye así que el análisis de la condición de estabilidad de una margen protegida no se agota en la consideración de la situación actual, sino que debe involucrar una hipótesis de erosión, tal como se describió al presentar el caso del Río Salado. A continuación se presenta un procedimiento general para el cálculo de la extensión de protecciones marginales mediante el cual se evalúan conjuntamente erosiones y su relación con la estabilidad del talud.

### CÁLCULO DE LA EXTENSIÓN DE UNA PROTECCIÓN MARGINAL

El estudio de casos presentado hasta aquí ha puesto de manifiesto cómo un dimensionamiento

incorrecto de la extensión de la protección marginal en el sentido transversal a la corriente puede resultar determinante en el colapso de la obra. El análisis de estabilidad del conjunto estructural-suelo y los procesos erosivos a que está sujeta la sección fueron las herramientas empleadas para ello. Estas mismas herramientas serán utilizadas aquí para presentar una metodología que posibilita establecer “a priori” la extensión que debería tener el revestimiento marginal (“ $L_A$ ” en Figura 11) para garantizar su estabilidad en el momento en que se produzcan las erosiones de la crecida de diseño. El grado de estabilidad se determina mediante un factor de seguridad, cuyo valor se establece de acuerdo a la importancia de la obra.

La secuencia de cálculo que involucra la metodología propuesta se puede resumir del siguiente modo:

1. Se calcula la erosión general en el tramo en estudio para la crecida de diseño, correspondiente a la condición de la margen no protegida, situación sin obra. Para ello se pueden aplicar alguna de las formulaciones que se encuentran en la literatura. Resulta conveniente el uso de expresiones que ya hayan sido validadas en aplicaciones anteriores a tramos de ríos con características semejantes al del caso en estudio. A los fines de este trabajo se habrá de aplicar la fórmula de Lischtvan y Lebediev en la forma que fuera expresada por Schreider et al. (2001).

$$h_{si} = \left[ \frac{q_i}{0.68 \times d_{50}^{0.28} \times \beta} \right]^{\frac{1}{x+1}} \quad (1)$$

donde

$h_{si}$ : profundidad al final del proceso erosivo en la vertical i [m]

$q_i$ : caudal específico en la vertical i [ $m^2/s$ ] ( $q_i = \Delta Q_i / \Delta B_i$ )

$\Delta Q_i$ : caudal parcial correspondiente a un ancho  $\Delta B_i$  [ $m^3/s$ ]

$d_{50}$ : diámetro medio del material del lecho [mm]

$\beta$ : coeficiente que depende de la frecuencia de la crecida de análisis

$x$ : exponente variable que depende del diámetro del material del fondo

La expresión (1) demuestra que ante las mismas características sedimentológicas, las profundidades de equilibrio dependen exclusivamente del caudal específico actuante, razón por la cual la forma de la sección erosionada responde a la distribución trasversal de dicho parámetro.

Conocido el caudal total ( $Q$ ) en la sección, se propone distribuirlo mediante una metodología basada en la expresión de Manning, esto es:

$$Q = \sum \Delta Q_i = \sum \left( \frac{1}{n} I^{1/2} \Delta B_i h_i^{5/3} \right) \quad (2)$$

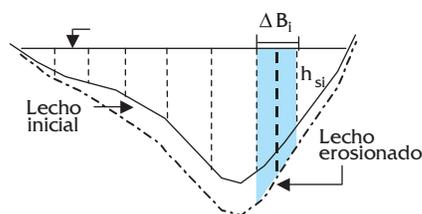
donde

$n$ : coeficiente de rugosidad de Manning

$I$ : pendiente

$h_i$ : tirante en la vertical  $i$

Dado que  $I^{1/2}/n$  se supone constante, es posible obtener el valor de  $\Delta Q_i$



$$\Delta Q_i = \frac{1}{n} I^{1/2} \Delta B_i h_i^{5/3} \quad (3)$$

$$(\%) \Delta Q_i = \frac{\Delta Q_i}{Q} \times 100 = \frac{\Delta B_i h_i^{5/3}}{\sum (\Delta B_i h_i^{5/3})} \times 100 \quad (4)$$

El caudal específico  $q_i$  se mantendrá constante durante todo el proceso erosivo, obteniéndose de esta forma, una sección final que copia la forma inicial, sólo que magnificada.

2. Se propone como longitud inicial de la protección, una extensión igual a la del talud no erosionado " $L_T$ " más una extensión adicional sobre el lecho " $L_A$ " (Figura 11), donde  $L_A$  es calculada de acuerdo a las definiciones clásicas dadas en la literatura (Przedwojski et al., 1995).

$$L_A = 1.5 Y_E \quad (5)$$

donde  $Y_E$  es la erosión medida desde el lecho inicial al pie de la protección propuesta (Figura 11).

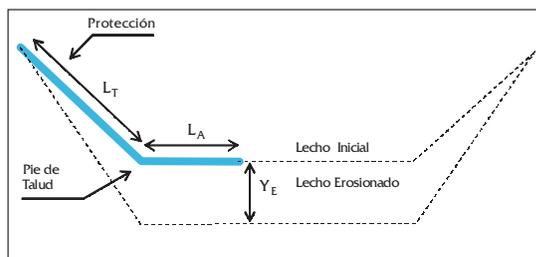


Figura 11. Ubicación de la protección, corte transversal

3. Con la sección de erosión calculada en 1) y la extensión de la protección definida en 2) se construye una nueva sección transversal del cauce, conformada por un sector no erosionable en coincidencia con la zona revestida, y a partir de allí la sección erosionada calculada en 1) (Figura 12). A los efectos de simplificar el proceso de cálculo, no se ha considerado en este paso la necesaria deformación de la cubierta que resulta una vez ocurridas las erosiones al pie de ésta. Ello se debe a que el cambio que produce en el área de la sección es pequeño como para generar diferencias significativas en el cálculo de las erosiones resultantes del proceso.

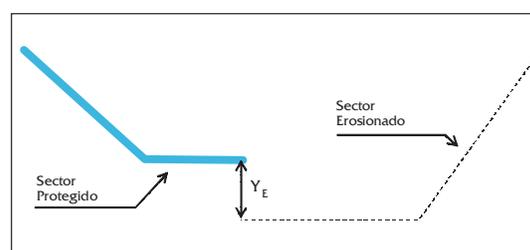


Figura 12. Sección de erosión compuesta

4. El cambio en la forma de la sección transversal (Figura 12) respecto de la sección inicial sin erosión modifica las condiciones hidráulicas. Entonces, resulta necesario determinar la nueva distribución de caudales acorde a esta nueva geometría.

5. Con la distribución de caudales obtenida en 4, se recalculan las profundidades de erosión, en el sector no protegido de la sección. Para tal fin, se emplea la misma expresión de cálculo utilizada en el paso 1.

6. Se determina el nuevo  $Y_E$  y se adopta una hipótesis de deformación de la protección (Figura 13).

7. Una vez erosionado el lecho y deformada la protección se efectúa el análisis de estabilidad para el conjunto estructura-suelo, identificando el círculo crítico y el factor de seguridad  $F_s$  correspondiente.

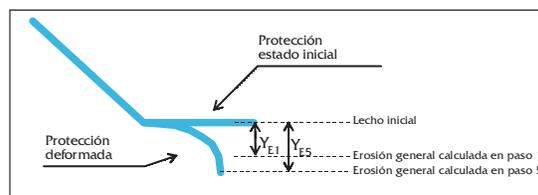


Figura 13. Sección de erosión final y protección deformada

8. Si el factor de seguridad ( $F_s$ ) resultante es mayor que el adoptado se podrá reducir la extensión  $L_A$  de la protección. Si por el contrario, el  $F_s$  resulta menor que el admisible, se debe incrementar la longitud de la cubierta.

9. Definida la nueva extensión se repite el procedimiento de cálculo desde el paso 3, para obtener un nuevo valor de  $F_s$  y compararlo con el dado como referencia.

10. El proceso se detiene cuando el  $F_s$  calculado resulta próximo al  $F_s$  de referencia.

A modo de ejemplo la metodología propuesta se aplicó al caso de la protección marginal del río San Javier, en el sector de las ruinas de Santa Fe La Vieja. Para ella fue necesario considerar los siguientes parámetros hidráulicos y sedimentológicos, obtenidos de estudios anteriores desarrollados en el lugar (Reynares, 2002):

- Caudal: 2562 [m<sup>3</sup>/s].
- Cota pelo de agua: 20.95 [m] IGM.
- Diámetro medio del sedimento: 0.200 [mm]
- Las características geotécnicas son las presentadas en la Tabla 2.

Se consideró un valor mínimo del factor de seguridad de 1.25, dado el carácter histórico que resguarda la obra en estudio. La longitud de zampeado " $L_A$ " obtenida con el cálculo propuesto en el paso 2 fue de 9.50 m. El factor de seguridad resultante al calcular el círculo crítico de deslizamiento resultó de  $F_s = 1.11$ , menor que el valor mínimo requerido. Estas circunstancias obligaron a extender la protección, de modo de lograr un  $F_s$  próximo al valor mínimo requerido. Se aplicó, para ello, el procedimiento antes descrito para las siguientes longitudes de zampeado o extensión de la cubierta sobre el lecho  $L_A$ : 10, 15, 18, 19 y 20 metros. En la Tabla 3 se puede observar el incremento de los coeficientes de seguridad al deslizamiento en la medida en que aumenta la longitud de la protección, cuando los círculos parten desde el pie del talud, tal como se puede observar en la Figura 14, para el círculo correspondiente a un valor de  $L_A = 19$  metros. Se han incluido los cálculos de  $F_s$  para  $L_A = 9.50$  m (obtenido del paso 2 de la metodología) y  $L_A = 0$  m. Se observa que cuanto más corta es la extensión de la protección sobre el lecho menor es el factor de seguridad, resultando absolutamente inestable ( $F_s < 1$ ) si la cubierta llega sólo al pie del talud ( $L_A = 0$  m).

Tabla 3. Variación del  $F_s$  para distintas longitudes de protección

Longitud de Zampeado $L_A$ [m]	Coefficiente de Seguridad ( $F_s$ )
0.00	0.87
9.50	1.11
10.00	1.15
15.00	1.17
18.00	1.21
19.00	1.25
20.00	1.31

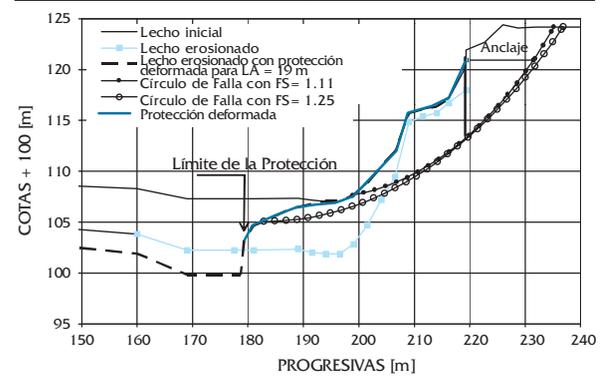


Figura 14. Círculos de falla para una longitud de zampeado de 19 m.

Para valores de  $L_A$  mayores que 10 metros, el círculo crítico se desplaza a la parte superior del talud, proporcionando un  $F_s = 1.11$  (Figura 14) por debajo del mínimo admisible, el cual no se modificó cualquiera sea la extensión de  $L_A$  adoptada. Esta situación indicaría que la geometría del talud está influenciando negativamente en la estabilidad de sectores localizados de la margen.

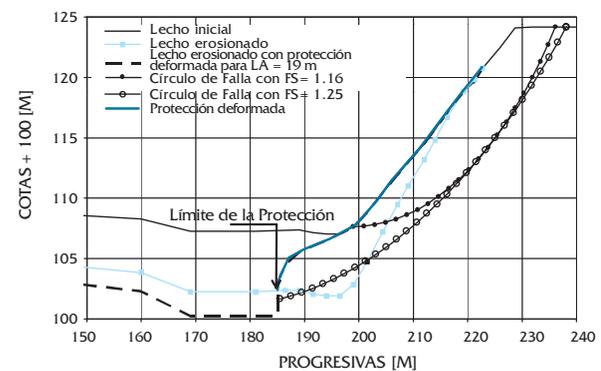


Figura 15. Círculos de falla para una longitud de zampeado de 15 m con perfilado de la margen

A los efectos de evaluar la incidencia que la geometría del talud pudiera tener sobre la estabilidad del mismo, se procedió a perfilar la margen, con un talud aproximadamente 1:2 (Figura 15),

el cual resultó ser el más tendido que pudiera conformarse, teniendo en cuenta la infraestructura y el patrimonio arqueológico existente en el lugar.

Los valores estimados indican que el perfilado resultó, por un lado, beneficioso para mejorar la condición de estabilidad de la parte superior del talud, en donde el círculo crítico aumentó su coeficiente de seguridad  $F_s$  de 1.11 a 1.16, y por otro, contribuyó a mejorar la estabilidad global de la margen, permitiendo obtener los factores de seguridad exigidos con menores longitudes de protección.

En efecto, si se comparan longitudes de protección  $L_A$  versus factores de seguridad  $F_s$ , se observa que para obtener la seguridad mínima en la situación del talud sin perfilar, se requiere una extensión del delantal  $L_A$  de 19 metros, en tanto que con el talud perfilado, esa longitud se reduce a 15 metros con el consecuente ahorro de costos (Tabla 4).

Tabla 4. Variación del  $F_s$  para distintas longitudes de protección con y sin perfilado del talud

Longitud de Zampeado $L_A$ [m]	Coficiente de Seguridad $F_s$ (con perfilado)	Coficiente de Seguridad $F_s$ (sin perfilado)
0.00	0.95	0.87
9.50	1.18	1.11
10.00	1.23	1.15
15.00	1.25	1.17
18.00	1.36	1.21
19.00	1.37	1.25
20.00	1.39	1.31

## CONCLUSIONES

### ▪ *Análisis de laboratorio*

1. Los resultados expuestos como evidencias de laboratorio, tomados de Franco et al. (2002), se han presentado a los fines de demostrar cómo la presencia de una protección de margen, si bien impide la erosión en el sector revestido, promueve mayores erosiones al pie de la misma, respecto de las que se observaron en dicho sitio para igual condición hidráulica cuando la margen no fue recubierta. Ello se traduce en deformaciones mayores del extremo de la protección y en factores de seguridad para la estabilidad del conjunto estructura-suelo menores que los resultantes si se consideran

erosiones calculadas que no tienen en cuenta la presencia de la protección. Este comportamiento se puede considerar como una referencia para los estudios de campo presentados a posteriori, ya que los mismos fueron realizados en condiciones controladas con clara identificación de los parámetros intervinientes.

### ▪ *Río Salado – Sector “INALI”*

2. La crecida extraordinaria del río Salado de abril /mayo de 2003 permitió comprobar que las erosiones estimadas por la FICH (2002) en el sector del INALI se verificaron en las proximidades de la margen. En estas condiciones el análisis de estabilidad predijo que la margen se encontraría en situación de falla, tal como efectivamente sucedió ante la ocurrencia de la crecida.

3. El análisis de estabilidad y la definición de los círculos críticos de deslizamiento permitieron determinar el grado de riesgo a que estaba expuesta la edificación del INALI y decidir, en consecuencia, qué parte de las instalaciones debían ser evacuadas.

### ▪ *Río San Javier, sector “Ruinas de Santa Fe la Vieja”*

4. El cálculo de estabilidad del conjunto estructura-suelo para la condición inicial con obra, en un sector de la margen del río San Javier en coincidencia con las ruinas de Santa Fe La Vieja, demostró que el diseño de la protección resultó inadecuado, ya que no contempló la reconstrucción del talud y la extensión de la misma resultó insuficiente. Prueba de ello son la posterior destrucción de la obra y la consecuente desestabilización de la margen.

5. El análisis de estabilidad efectuado sobre la sección representativa del relevamiento del año 2001, permitió comparar los factores de seguridad resultantes para las situaciones con y sin obra. Los resultados obtenidos señalan la inconveniencia de mantener la protección parcialmente destruida. La situación de estabilidad del talud mejora notablemente, si en el análisis no se considera la presencia de la cubierta,  $F_s = 1.96$ , en tanto que para la situación con protección el coeficiente se reduce a 1.69.

6. Si bien pareciera ser que aun en presencia de la protección destruida, la situación resulta estable, ello obedece al material depositado al pie del talud luego del deslizamiento.

Es razonable pensar que ese material suelto será removido en presencia de una crecida de magnitud. Si ello ocurriera y sin considerar erosiones adicionales, los coeficientes de seguridad se reducen prácticamente a la unidad, tanto para la situación sin obra, como con la obra parcialmente destruida.

7. El inadecuado diseño de la protección de margen del río San Javier en el sector de las "Ruinas de Santa Fe La Vieja", o la permanencia de parte del revestimiento una vez que ha sido parcialmente destruido, pueden haber contribuido a la inestabilidad del talud favoreciendo su colapso, en lugar de evitarlo.

▪ **Propuesta de una metodología de cálculo**

8. Se propone una metodología de cálculo que permita dimensionar adecuadamente la extensión a dar a una protección marginal, en el sentido transversal a la corriente, basada en una adecuada valoración de las erosiones resultantes en presencia de la protección y en el análisis de estabilidad del conjunto estructura-suelo.

9. El caso de estudio planteado a los fines de ejemplificar la metodología de diseño propuesta, puso en evidencia cómo la geometría del talud incide indirectamente sobre la extensión de la protección. Asimismo, se pudo demostrar que una regularización de la margen contribuyó a reducir la longitud de zampeado " $L_A$ " a colocar sobre el lecho, para igual factor de seguridad requerido " $F_S$ ".

▪ **Síntesis.**

10. Las conclusiones alcanzadas permiten afirmar que el análisis de estabilidad y el cálculo de erosiones son dos herramientas de análisis que, trabajando en forma interrelacionada, brindan elementos de juicio, tanto para estimar la estabilidad de una margen y su influencia sobre la seguridad de las obras implantadas en su entorno, como para definir el diseño de la extensión de una protección en la dirección transversal a la corriente.

## AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional del Litoral quien financió, por medio de los Cursos de Acción para la Investigación (CAID+D), el Proyecto de Investigación en el marco del cual se desarrolló este trabajo.

A la Ingeniera Graciela Scacchi y a la Doctora Marta Roca Collell por su revisión crítica del manuscrito original y del resumen en inglés.

## REFERENCIAS

- Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (2002). "Estudio de erosiones en un tramo del río Salado frente al Instituto Nacional de Limnología (INALI)". Convenio: Instituto Nacional de Limnología (CONICET) - Universidad Nacional del Litoral (UNL), Santa Fe.
- Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (2003). "La crecida extraordinaria del Río Salado: Causas naturales y antrópicas que provocaron la inundación de la ciudad de Santa Fe". Resolución de CD: 085/03. Junio de 2003.
- Franco, F.; Romano, C.; Morbidoni, N. y Schreider, M. (2002). "Erosión y estabilidad de taludes en márgenes protegidas", Revista Ingeniería del Agua, Vol. 9, Número 2, pp. 135-142.
- Morbidoni, N. (2002). "Análisis de estabilidad general de un tramo del río Salado frente al INALI en su situación actual y con obras". Comunicación Personal, 2002.
- Przedwojski, R.; Blazejewski, R. y Pilarczyk, K.W. (1995). "River training techniques, fundamentals, design and applications", A.A. Balkema Ed. Rotterdam.
- Reynares, M. (2002). "Proyecto de obras de defensa en las Ruinas de Santa Fe La Vieja". Proyecto Final de Carrera. Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas. Universidad Nacional del Litoral. Santa Fe, Argentina.
- Siegel, R. A. (1978). "Stable User Manual". Joint Highway Research Project, Project N° C-36-36k, File N° 6-14-11. Purdue University- Indiana State Highway Commission.
- Schreider, M.; Scacchi, G.; Franco, F.; Fuentes, R. y Moreno C. (2001). "Aplicación del método de Lischtván y Lebediev al cálculo de la erosión general", Revista Ingeniería Hidráulica en México, Vol. XVI, num. 1, pp. 15-26.
- Zanardi, L.; Franco, F.; Scacchi, G.; Romano, C. y Schreider, M. (2002). "Erosión al pie de una protección marginal", Anales del XIX Congreso Nacional del Agua. Villa Carlos Paz.