



METODOLOGIA DE DISEÑO HIDRÁULICO DE ESPIGONES PARA PROTECCIÓN DE MÁRGENES FLUVIALES

Angel N. Menéndez, Pablo E. García, Marcos Pittau, Alejo Sarubbi, Gustavo Salerno y Gabriel Amores

INMAC S.A.
J. Ingenieros 3417, San Isidro, Prov. Buenos Aires
E-mail: peg@hotmail.com.ar - Web: <http://www.inmac.com.ar>

RESUMEN:

Se presenta una metodología para asistir en el diseño de espigones, la cual se basa en el uso de un modelo integrado hidrodinámico-sedimentológico-morfológico bidimensional. Esta metodología se aplicó en un brazo del Río Pescado, el mayor tributario del río Bermejo, perteneciente a la cuenca del Plata, la segunda mayor cuenca en Sudamérica. La importancia de la subcuenca del Bermejo radica en que es la mayor productora de sedimentos de la cuenca del Plata. La zona de estudio es adyacente a una zona de explotación agraria, la cual ha sufrido fuertes erosiones en sus márgenes, y cuenta ahora con una batería de espigones diseñados, implementados y mantenidos por INMAC.

La metodología es aplicada para optimizar la performance de la presente configuración de los espigones, sugiriendo la extensión de algunos de ellos. Luego se la usó para producir una configuración óptima, como una forma de presentar los potenciales beneficios del uso de la misma en la etapa de diseño.

ABSTRACT:

A methodology to assist in groins design is presented, which is based on the use of a 2D hydrodynamic/sedimentologic/morphologic model. It is applied to a stretch of the Pescado River, the main tributary of the Bermejo River, belonging to the Plata Basin, the second largest basin in South America. The particular stretch of Pescado River under study, in Argentina, is adjacent to an agrarian zone which has suffered bank erosion, and has now a series of groins designed, implemented and maintained by INMAC.

The methodology is applied to optimize the performance of the present groins configuration, suggesting extensions for some of the groins. It is later used to produce an optimal configuration irrespective of present conditions, as a way to show the potential benefit of its application at the design stage.

PALABRAS CLAVES:

Diseño de espigones; Modelación Numérica; Erosión fluvial; Indicadores de vulnerabilidad a la erosión de márgenes

INTRODUCCIÓN

El uso de espigones para proteger márgenes de ríos se constituye esencialmente como una técnica empírica. Existen ciertas reglas generales referidas al diseño de espigones (longitud, espaciamiento, peso, etc.). Contrariamente, las técnicas basadas en modelos numéricos (las cuales son relativamente accesibles, y pueden proveer una importante cantidad de información relevante a la hora del proyecto) no son usadas prácticamente en el diseño de los mismos.

En este trabajo se presenta una metodología para asistir en el diseño de espigones, la cual se basa en el uso de un modelo integrado hidrodinámico-sedimentológico-morfológico bidimensional. Esta metodología se aplicó en un brazo del Río Pescado (Figuras 1 y 2), el mayor tributario del río Bermejo, perteneciente a la cuenca del Plata, la segunda mayor cuenca en Sudamérica. La importancia de la subcuenca del Bermejo radica en que es la mayor productora de sedimentos de la cuenca del Plata. La zona de estudio es adyacente a una zona de explotación agraria, la cual ha sufrido fuertes erosiones en sus márgenes, y cuenta ahora con una batería de 27 espigones diseñados, implementados y mantenidos por INMAC, los cuales totalizan 1110 m de longitud (Figuras 3 y 4).



Figura 1.- Ubicación de la zona de estudio

EL USO DE ESPIGONES

La implementación de espigones respecto a otras alternativas para el control de la erosión en márgenes y zonas costeras surge como resultado de un balance técnico-económico. Su utilización se enmarca dentro de la corrección y/o regulación de ríos para encauzar la corriente, proteger las márgenes y promover la sedimentación de las costas. La efectividad de los diques o espigones depende básicamente de un buen diseño a saber: longitud, coronamiento, ángulo respecto a la corriente, espaciamiento, material de construcción, mantenimiento, etc. Para este caso en particular, el uso de espigones para el control y estabilización de las márgenes trajo importantes beneficios:

- Se construyeron con el material del lugar, produciendo una considerable reducción en los costos de los materiales y en el traslado de los mismos.
- Poseen una gran adaptabilidad a los cambios que va tomando el lecho con las erosiones, deformándose sin perder su funcionalidad.
- En caso de tener que modificar su configuración (ubicación, inclinación, longitud) para mejorar el funcionamiento de los mismos, dichos cambios pueden efectuarse con relativa facilidad, lo que permite la reutilización de las estructuras ya implementadas.



Figura 2.- Detalle de la ubicación del río Pescado



EL RÍO PESCADO

El Río Pescado nace en las sierras de Santa Victoria, a 4000 metros de altura. Su más importante tributario es el Río Iruya, el cual transporta una pesada carga de sedimentos. El Río Pescado es a su vez el mayor tributario del Río Bermejo, el cual sirve como límite internacional entre Argentina y Bolivia. El área de la cuenca del Pescado-Iruya es de 5000 km².

En la zona de estudio, el Río Pescado tiene una pendiente que varía entre los 10 a 6 m/km. La deposición de sedimentos gruesos en el lecho del río, después de las crecidas, incrementan su valor, por lo que las corrientes activas buscan canales laterales secundarios para poder escurrir. Debido a esto, durante las próximas crecidas se generarán grandes velocidades en zonas cercanas a las márgenes.

Basados en los datos medios mensuales en Colonia Colpana, se realizó un análisis de crecidas obteniéndose el período de retorno para distintos caudales, como se muestra en la Tabla 1. Posteriores análisis con datos horarios (provistos por INMAC) llevó a la estimación de un caudal pico horario de 8200 m³/s asociado a una crecida con un período de retorno de 50 años. La duración de la correspondiente crecida se estimó en una hora.

Tabla 1.- Caudales medios mensuales para diferentes períodos de retorno

Período de retorno [años]	Caudal [m ³ /seg]
2	1091
5	1630
10	1990
25	2444
50	2780

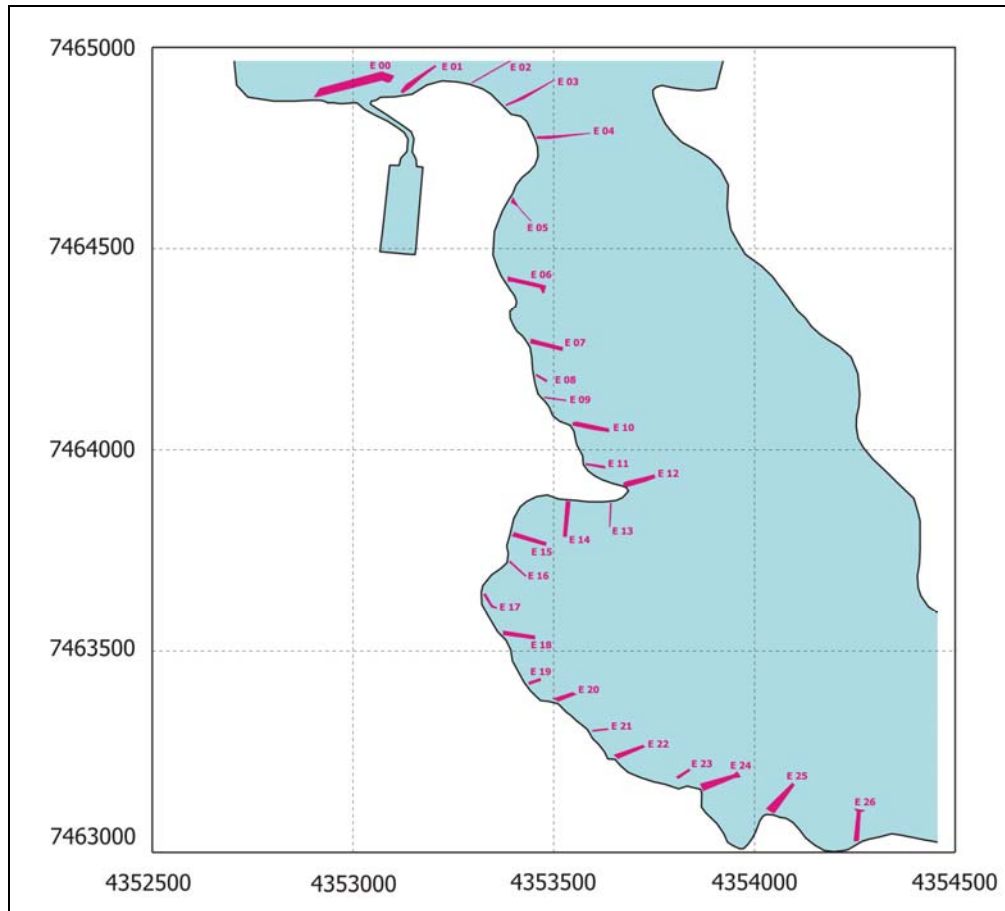


Figura 3.- Ubicación de los espigones



Figura 4.- Vista de un espigón en condiciones secas y durante la pasada de la onda de crecida

MODELO NUMÉRICO INTEGRADO

En vista de la relativa extensión de la onda de crecida en comparación con la dimensión longitudinal de la zona de estudio, es posible describir el flujo con un modelo bidimensional (integrado en la vertical). Se usó el software DOSDE, desarrollado por uno de los autores (Menéndez 1990).

Debido al hecho de que, durante las grandes crecidas, el flujo en la zona de estudio se divide en dos brazos, se implementaron dos modelos hidrodinámicos: un modelo “regional” que contiene a las islas adyacentes, y un modelo “local” concentrado en la margen amenazada (cuyas condiciones de borde provienen del modelo “regional”) (Figura 5).

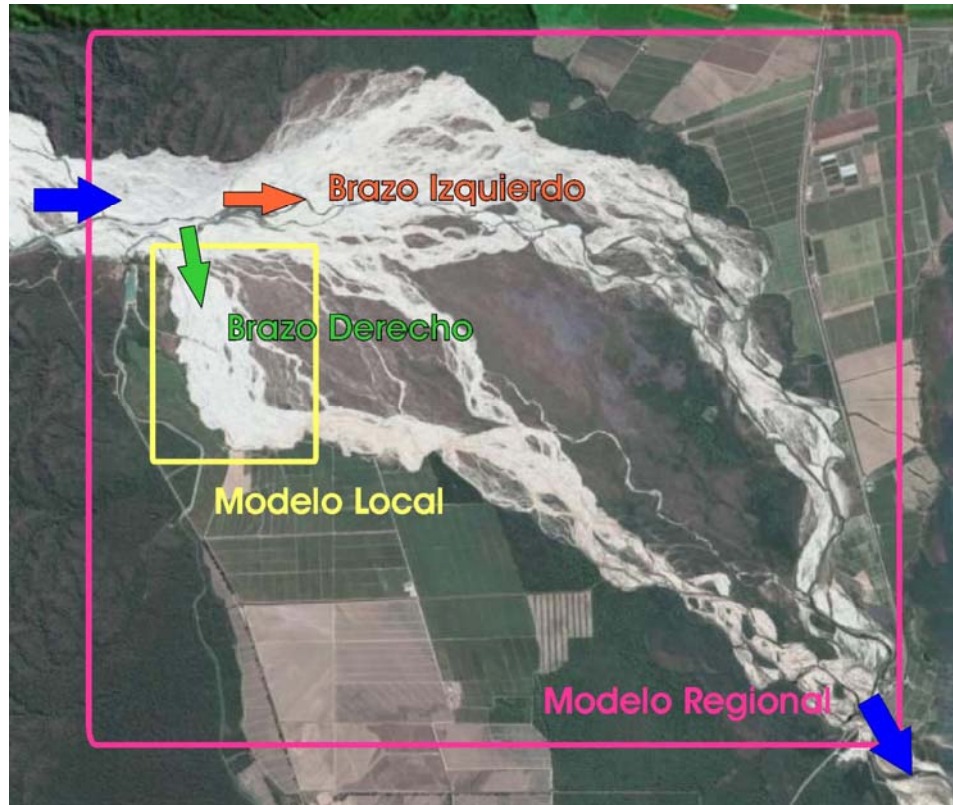


Figura 5.- Diagrama de los dominios de los dos modelos hidrodinámicos

Para construir los modelos digitales del terreno para cada uno de los modelos hidrodinámicos se dispusieron los datos topográficos obtenidos en diversas campañas realizadas por INMAC. Para el modelo regional se usó una grilla de 20 x 20 m (Figura 6), en cambio, para el modelo local la grilla usada fue de 5 x 5 m (Figura 7). La resistencia hidráulica fue parametrizada con el coeficiente de rugosidad de Manning. Se usó un valor uniforme de 0.045, basado en observaciones (Ven Te Chow 1959). El forzante es el caudal del río, impuesto en el borde superior del modelo. El nivel de agua fue dado en el borde inferior. Este nivel de agua está relacionado con el caudal mediante una correlación realizada con mediciones en la estación Cuatro Cedros, en el Río Pescado.

El modelo sedimentológico está basado en la fórmula de transporte de sedimentos de fondo de Meyer-Peter & Mueller (Martín Vide, 2003). El modelo morfológico usa la ecuación de Exner para calcular la evolución del fondo del río (Raudkivi, 1990). Ambos modelos fueron incorporados al software DOSDE, operando interactivamente para cada paso de tiempo de cálculo.

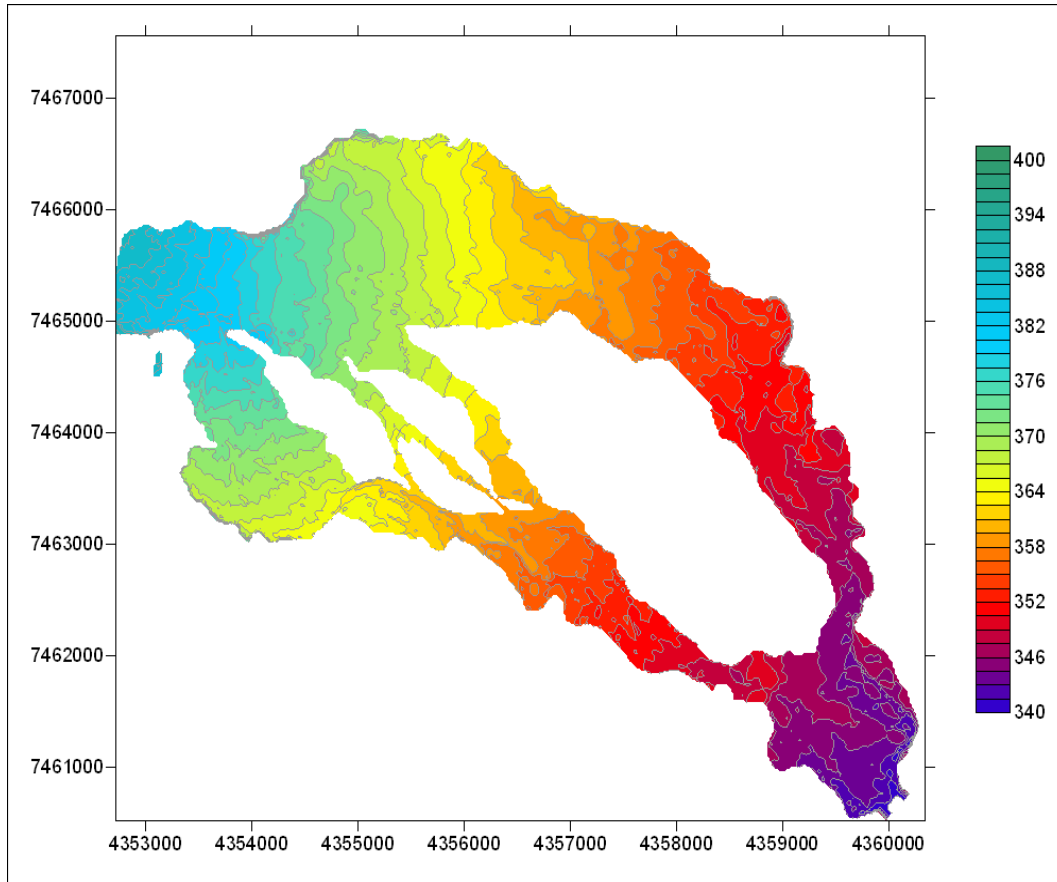


Figura 6.- Modelo digital del terreno (en metros) para el Modelo Hidrodinámico Regional

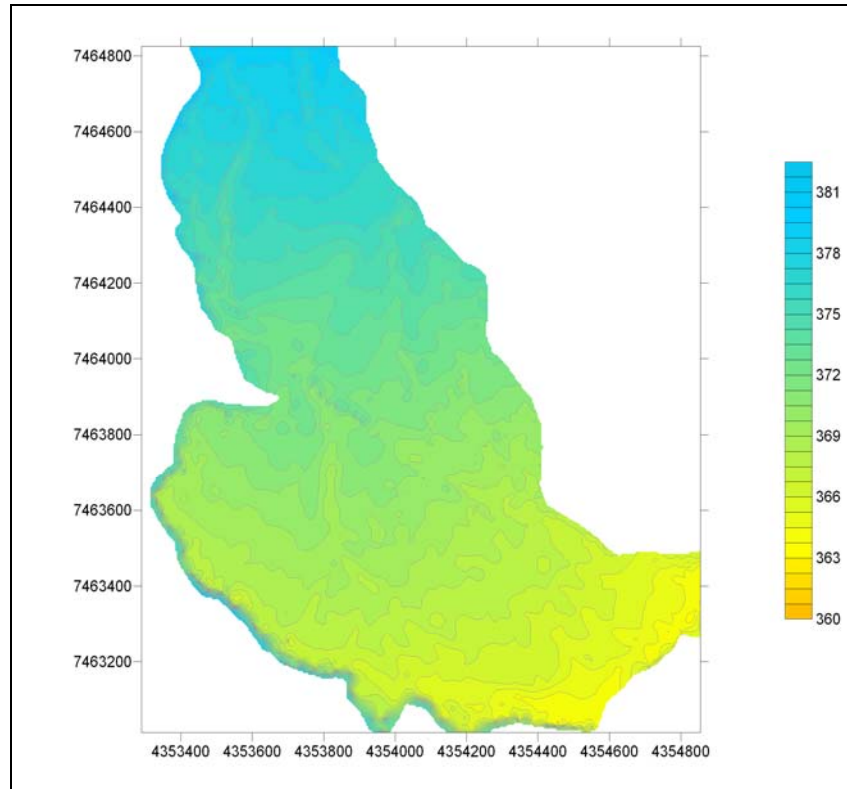


Figura 7.- Modelo digital del terreno (en metros) para el Modelo Hidrodinámico Local

INDICADORES DE LA VULNERABILIDAD A LA EROSIÓN DE MÁRGENES

De distintas observaciones y análisis del problema en cuestión, se concluyó que la falla en las márgenes esta generada por la erosión del lecho en zonas cercanas a la margen. Se construyeron diversos indicadores de potencial erosión, basados todos estos en el flujo de corriente, a fin de seleccionar el más apropiado para este caso.

Potencia de la Corriente

A partir del campo de velocidades obtenido del modelo hidrodinámico, se calculó la distribución espacial de la Potencia de la Corriente o “Strem Power” como primer indicador de la potencial vulnerabilidad a la erosión de márgenes. La Potencia de la Corriente esta definida como

$$P = \tau_f U \quad [1]$$

donde

$$\tau_f = \frac{\gamma n^2 U^2}{h} \quad [2]$$

es el módulo de la tensión de corte contra el fondo, U el módulo la velocidad media vertical, γ el peso específico del agua, n el coeficiente de rugosidad de Manning y h la profundidad. La potencia de la corriente representa la tracción potencial sobre el material del lecho.

La figura 8 muestra la distribución de la Potencia de la Corriente para el caudal de 10 años de recurrencia ($2000 \text{ m}^3/\text{s}$), para dos casos distintos, sin espigones y con la configuración actual de espigones. Se puede observar que la presencia de los espigones se manifiesta como una disminución general de la Potencia de la Corriente. Esto está asociado al hecho de que el caudal a través de ese brazo del río disminuye al aumentar su resistencia. Sin embargo, no se pueden apreciar cambios significativos cerca de las márgenes, por lo que se concluyó que este no es un adecuado indicador de la vulnerabilidad a la erosión de márgenes para el problema en consideración.

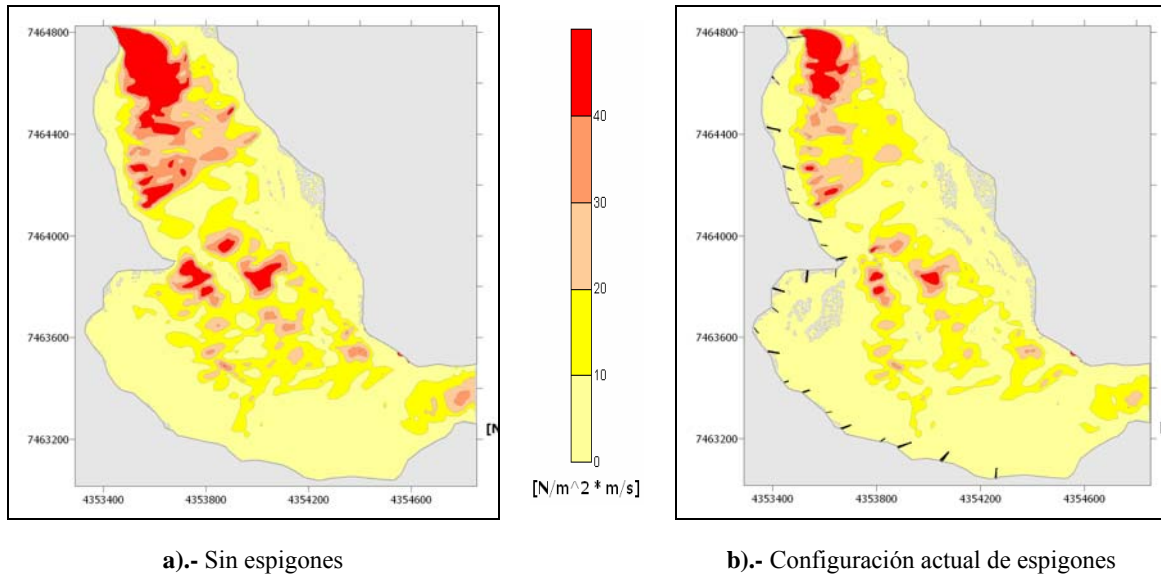


Figura 8.- Mapas de la Potencia de la Corriente para un caudal de 10 años de recurrencia ($2000 \text{ m}^3/\text{s}$)

Coefficiente de estabilidad de la Coraza

En ríos con material sedimentario de granulometría extendida, como el presente, las componentes más finas tienen una tendencia a ser arrastradas por la corriente, mientras que las más gruesas tienden a permanecer, formando un acorazamiento natural del lecho.

La descripción matemática del proceso erosivo del lecho puede ser tratado desde un punto de vista probabilístico. Siguiendo a Gessler (1971), la estabilidad del fondo puede caracterizarse a partir del valor medio de la probabilidad de que los granos de la coraza permanezcan inmóviles; más específicamente, se define el factor de estabilidad de la forma siguiente:

$$\bar{q} = \frac{\int_{k_{\min}}^{k_{\max}} q^2 p_o(k) dk}{\int_{k_{\min}}^{k_{\max}} q p_o(k) dk} \quad [3]$$

donde k es el tamaño de grano, k_{\min} y k_{\max} sus valores mínimo y máximo, respectivamente, $p_o(k)$ la distribución granulométrica inicial (es decir, la correspondiente a la capa inmediatamente inferior a la coraza) y $q(k)$ la probabilidad de que granos de hasta ese tamaño permanezcan en la coraza. Esta probabilidad se calcula suponiendo que la distribución de tensiones de corte alrededor del valor medio es normal, con una desviación estándar

adimensional $\sigma = 0,57$, obtenida en base a ajustes a datos experimentales. Específicamente, si se define la variable

$$T = \frac{\left(\frac{\tau_c - I}{\tau_f} \right)}{\sqrt{2\sigma}} \quad [4]$$

donde τ_c es la tensión de corte crítica de arrastre, entonces

$$q = \frac{1}{2} [1 + \text{signo}(T) \text{erf}(|T|)] \quad [5]$$

donde *erf* es la función error. Para determinar τ_c (*k*) se utilizó la curva de Shields.

Es interesante hacer notar que el producto $q \cdot p_0$ es, esencialmente, la distribución granulométrica final de la coraza.

El valor crítico teórico del coeficiente de estabilidad es 0,5. Si supera ese valor el lecho se considera que el lecho es estable (hay acorazamiento) y, a la inversa, valores menores que 0,5 significan inestabilidad.

En el caso estable, la evolución del lecho desde una distribución granulométrica igual a la inicial hasta la formación de la coraza significa sólo una degradación relativamente menor, suficiente para arrastrar a las partículas más pequeñas. En cambio, en el caso inestable no existe equilibrio posible para esa tensión de corte, de modo que se producirá erosión hasta disminuir la pendiente y, en consecuencia, la tensión de corte, generando, así, las condiciones para llegar eventualmente a un estado de equilibrio.

El cálculo del coeficiente de estabilidad requiere, en adición a los resultados del modelo hidrodinámico (que determinan la tensión de corte contra el lecho), la especificación de la granulometría del material de fondo. (Figura 9)

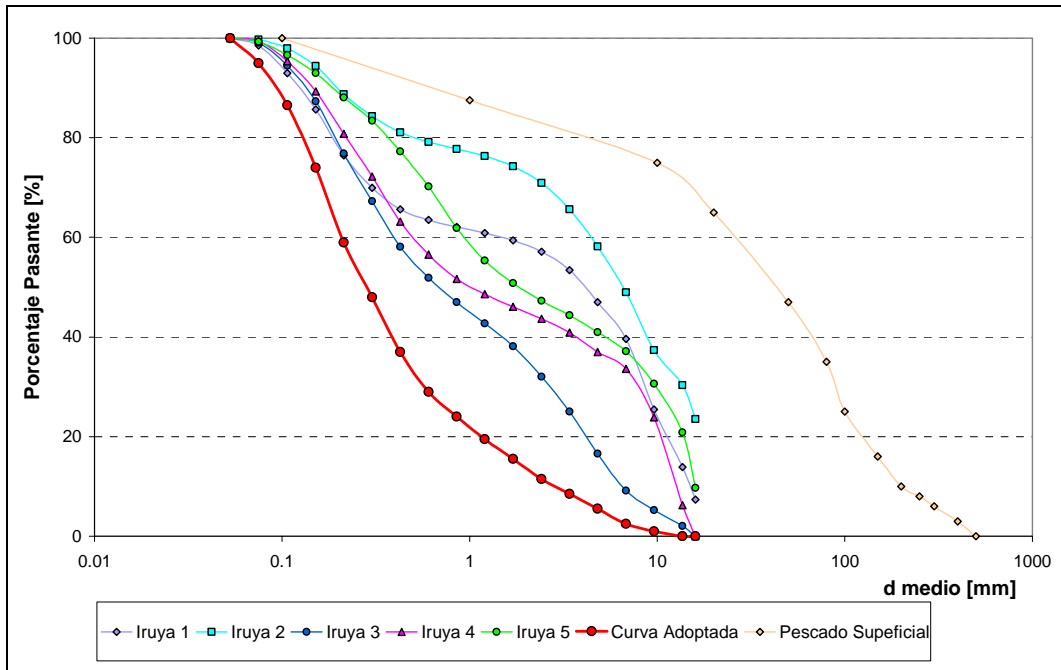
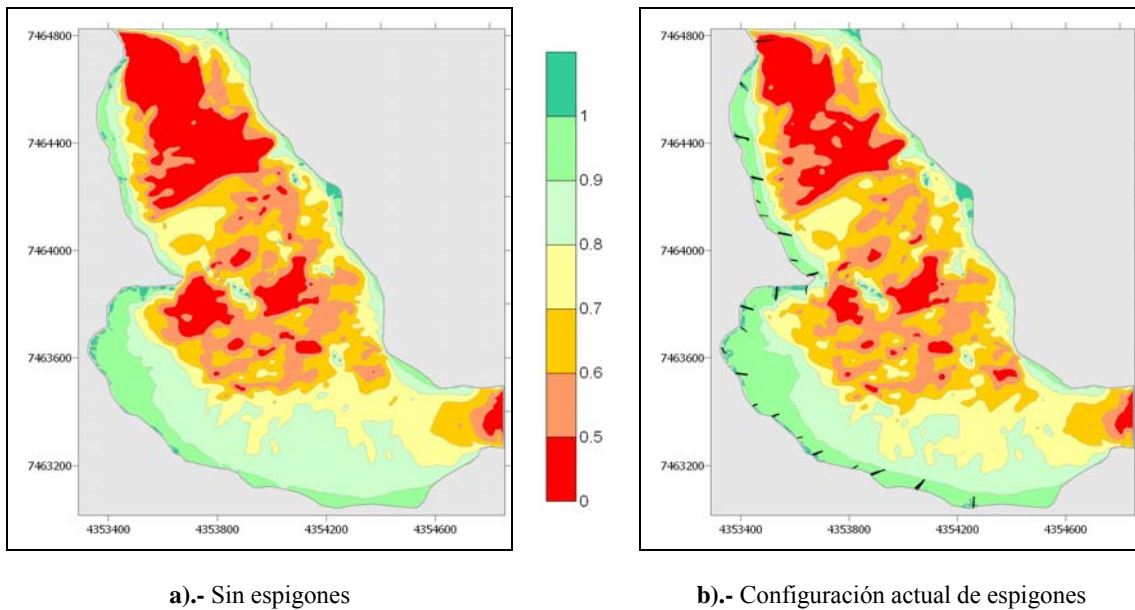


Figura 9.- Granulometría adoptada

La figura 10 muestra el coeficiente de estabilidad para el caudal pico horario con una recurrencia de 50 años ($8200 \text{ m}^3/\text{s}$) para los casos en que no existan espigones y con la configuración actual de espigones. Se puede ver que, aún sin espigones, la zona inestable esta lejos de las márgenes, indicando que, en las zonas cercanas a la margen, existen condiciones de acorazamiento. Por lo tanto, se concluyó que tampoco este es un indicador apropiado de vulnerabilidad a la erosión de márgenes para el presente problema.



a).- Sin espigones

b).- Configuración actual de espigones

Figura 10.- Mapas del Coeficiente de Estabilidad para un caudal pico de 50 años de recurrencia ($8200 \text{ m}^3/\text{s}$)

Erosión del lecho del río

La erosión del lecho durante el pasaje del caudal pico horario con 50 años de recurrencia, actuando durante una hora, fue calculada usando el modelo hidrodinámico-sedimentológico-morfológico.

El modelo hidrodinámico DOSDE puede funcionar secuencialmente con un modelo sedimentológico/morfológico. El submodelo sedimentológico está basado en fórmulas de transporte. Para el presente problema, tratándose de material grueso, se adoptó la fórmula de transporte de Meyer Peter & Muller (Martín Vide, 2003)

$$\left(\frac{ns}{n}\right)^2 \tau_f = 0,0047 + 0,25\phi^2 \quad [6]$$

donde ns es el coeficiente de rugosidad del grano, n es el coeficiente de rugosidad total (grano más forma). Cuando no se tienen formas de fonda el coeficiente (ns/n) es igual a 1, τ_f tensión de corte adimensional y ϕ el parámetro de caudal sólido adimensional, que se expresa como

$$\phi = \frac{q^2}{g \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho}\right) D^3} \quad [7]$$

con q es el caudal sólido (expresado en volumen neto), g la aceleración de la gravedad, ρ_s la densidad del grano, ρ la densidad del agua y D el diámetro representativo del grano.

El caudal sólido en las direcciones x e y se obtiene de

$$q_x = q \frac{u}{U} \quad q_y = q \frac{v}{U} \quad [8]$$

El submodelo morfológico resuelve la ecuación de Exner, que representa el principio de conservación de masa de los sedimentos (Raudkivi, 1990):

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left[\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \right] = 0 \quad [9]$$

donde z es la elevación del lecho, t es la coordenada del tiempo, λ la porosidad del sedimento de fondo, q_x y q_y son las cargas volumétricas de sedimento por unidad de ancho en sentido longitudinal y transversal respectivamente.

Los resultados obtenidos se muestran en la figura 11. Se puede observar que el modelo indica importantes erosiones en la mayoría de las zonas cercanas a las márgenes en el caso de no existir espigones, lo que significa que esta magnitud constituye un apropiado indicador de la vulnerabilidad a la erosión de márgenes. La presencia de los espigones se traduce en la aparición de zonas muertas inmediatamente aguas debajo de cada uno de ellos evitando la erosión de fondo (y consecuentemente la erosión de márgenes). Se puede notar también que en algunas zonas la configuración de los espigones no es efectiva para evitar la erosión cerca

de las márgenes. El modelo fue usado para analizar distintas estrategias de implementación de espigones a fin de mejorar su performance. Todo este análisis se encuentra en la siguiente sección.

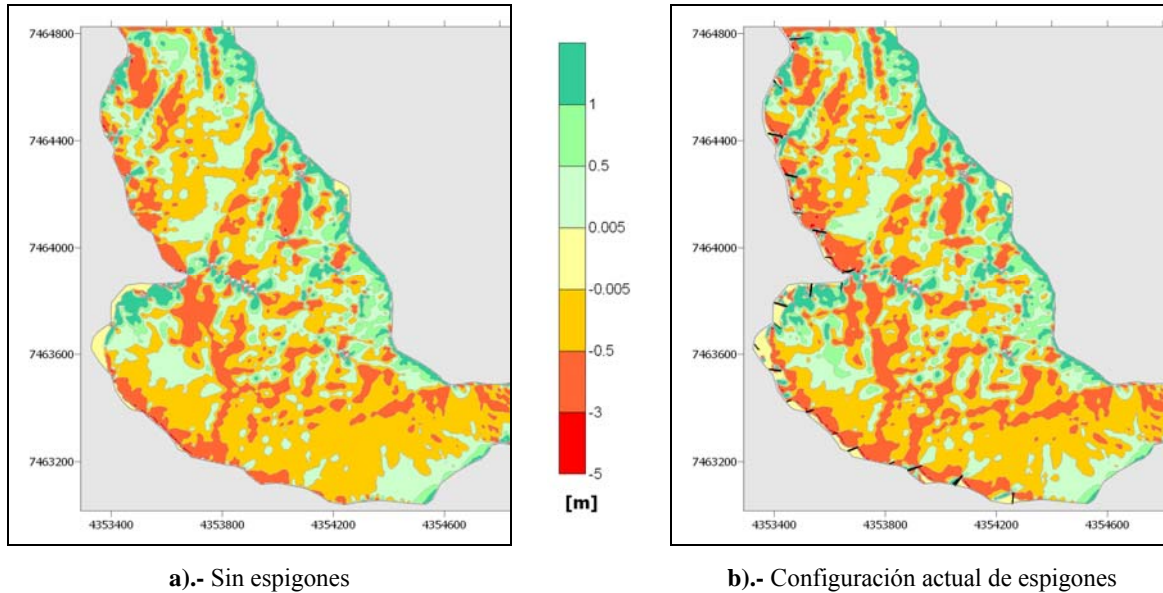


Figura 11.- Mapas de la erosión del lecho para un caudal pico de 50 años de recurrencia actuando una hora (8200 m³/s)

MEJORAS EN LA FUNCIONAMIENTO DE LOS ESPIGONES

Se adoptaron dos estrategias a fin de mejorar el funcionamiento de la batería de espigones implementada. En primer lugar, se adoptó la actual configuración de espigones y se realizaron correcciones en las longitudes de algunos de ellos y se sacaron otros (“estrategia condicionada”). En la segunda estrategia se procedió a variar la ubicación y el ángulo de los espigones con mayor libertad, viendo el uso que puede dársele a este modelo como asistente en el diseño de baterías de espigones (“estrategia racional”).

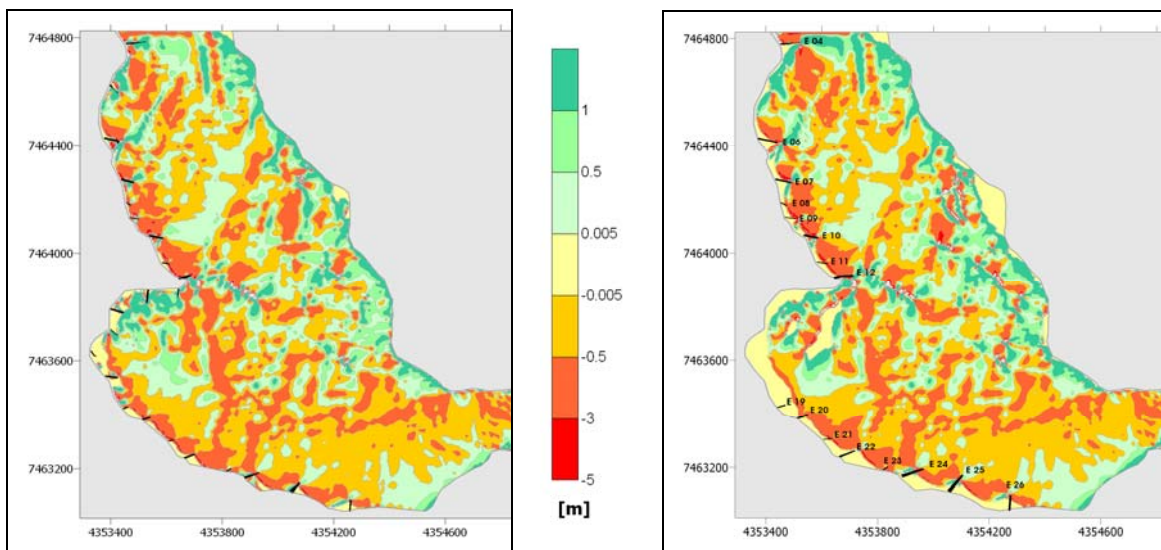
Estrategia “Condicionada”

Los cambios en la extensión de los espigones, comenzando por el espigón #04, fueron realizados uno a la vez, desde aguas arriba hasta aguas abajo. Los cambios están resumidos en la Tabla 2. Se puede ver que 8 espigones fueron dejados tal como están, mientras que 12 se alargaron en total 195 m (lo cual representa aproximadamente el 18% de la longitud total presente). Como una suerte de compensación, 7 espigones fueron eliminados (y su material reusado) ya que no tenían ninguna funcionalidad. La figura 12 muestra una comparación entre la situación presente y otra con los espigones extendidos. El significativo aumento de zonas sin erosión de lecho cercanas a las márgenes da una idea de las mejoras en la performance de la nueva configuración de espigones en la protección de la margen.

Tabla 2.- Cambios en los espigones para la Estrategia “Condicionada”

<i>Espigon #</i>	<i>Cambio</i>	<i>Espigon #</i>	<i>Cambio</i>
00	Ninguno	14	Eliminado

01	Ninguno	15	Eliminado
02	Ninguno	16	Eliminado
03	Ninguno	17	Eliminado
04	Ninguno	18	Eliminado
05	Eliminado	19	+ 10 m
06	+ 15 m	20	+ 10 m
07	+ 10 .	21	+ 10 m
08	+ 5 m	22	+ 25 m
09	+ 25 m	23	Ninguno
10	Ninguno	24	+ 25 m
11	+ 10 m	25	+ 25 m
12	Ninguno	26	+ 25 m
13	Eliminado		



a).- Configuración actual de espigones

b).- Configuración estrategia “condicionada”

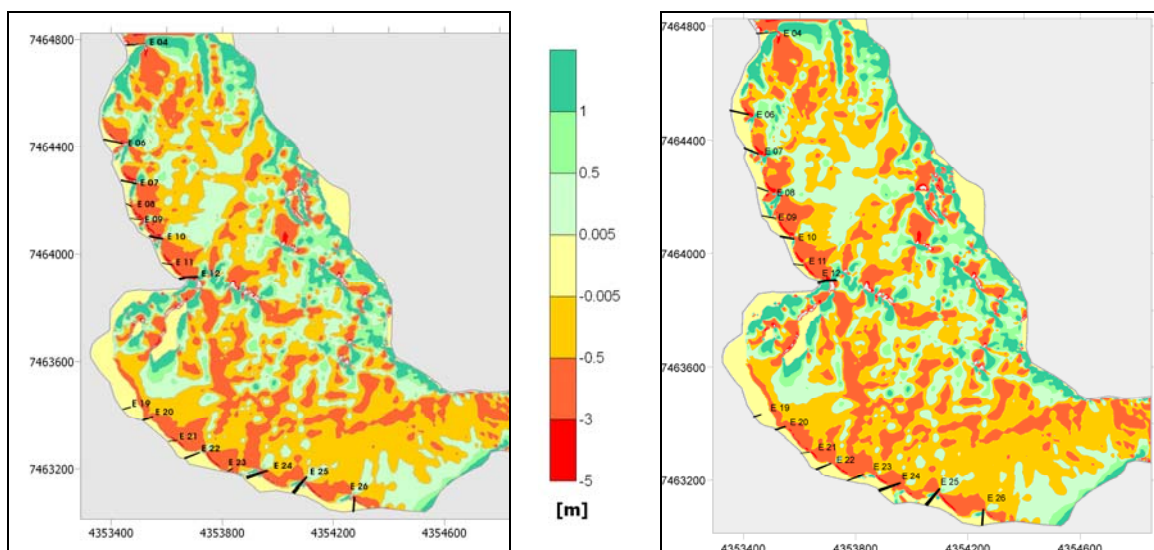
Figura 12.- Mapas de la erosión del lecho para un caudal pico de 50 años de recurrencia actuando una hora (8200 m³/s)

Estrategia “Racional”

La nueva configuración de espigones se realizó usando como referencia la configuración obtenida con la estrategia condicionada. Como antes, los cambios comienzan desde el espigón #04 hacia aguas abajo. Estos cambios se presentan resumidos en la Tabla 3. Es de notar que el número de espigones es igual a los empleados en la estrategia condicionada (20 espigones); 14 de ellos no tienen cambios; 5 se extienden, la longitud adicional es de 85 metros, con lo cual la configuración tendría 1065 metros de longitud total, 4% menos que la configuración original (actual); 4 sufren modificaciones con respecto a su actual ubicación, y solo 2 se rotan en relación con la dirección de la corriente. En la figura 13 se presenta una comparación entre las configuraciones asociadas a las estrategias condicionada y racional. Se puede ver como con la estrategia racional se mejora notablemente la performance en las márgenes de la batería aguas arriba.

Tabla 3.- Cambios en los espigones para la Estrategia “Racional”

Espigón #	Extensión	Localización	Rotación
00	–	–	–
01	–	–	–
02	–	–	–
03	–	–	–
04	–	–	–
06	–	80 m aguas abajo	–
07	+ 10 m	60 m aguas arriba	–
08	+ 20 m	20 m aguas arriba	10° en sentido contrario a las agujas del reloj
09	+ 10 m	–	–
10	–	–	–
11	–	–	–
12	–	–	–
19	–	–	–
20	–	–	–
21	–	–	–
22	+ 15 m	–	–
23	+ 30 m	20 m aguas arriba	10° en sentido de las agujas del reloj
24	–	–	–
25	–	–	–
26	–	–	–



a).- Configuración estratégica “condicionada”

b).- Configuración estratégica “racional”

Figura 13.- Mapas de la erosión del lecho para un caudal pico de 50 años de recurrencia actuando una hora (8200 m³/s)

CONCLUSIONES

- Esta metodología basada en modelos numéricos es capaz de asistir a ingenieros y técnicos en el diseño de la configuración de espigones (longitud, ángulo, espaciamento) para



proteger márgenes de ríos de la erosión, proveyendo una estrategia racional que puede complementar en forma eficiente las técnicas empíricas y el conocimiento de los expertos.

- Cuando la falla de la margen es accionada por la erosión del lecho en el pie de la misma, el uso de este modelo integrado hidrodinámico-sedimentológico-morfológico es apropiado para generar un indicador de la vulnerabilidad a erosión de la margen.
- Para la particular aplicación presentada en este trabajo, en el Río Pescado (Argentina), la metodología fue usada para optimizar la configuración de la batería existente de espigones.

REFERENCIAS

Gessler, R., (1971). "Aggradation and Degradation", Chapter 8 in *"River Mechanics"*, Volume I, Shen, H.W. (editor), Fort Collins, Colorado.

Martín Vide, J.P., (2003). *"Ingeniería de ríos"*, 2º edición, Alfaomega, México.

Menéndez, A. N., (1990), "Sistema HIDROBID II para simular corrientes en cuencos", *Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería*, vol. 6, 1.

Raudkivi, A. J., (1990). "Loose Boundary Hydraulics", 3rd Edition. Pergamon Press, New York.

Ven Te Chow, (1959). *"Open-Channel Hydraulics"*