

**XXIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
CARTAGENA DE INDIAS COLOMBIA, SEPTIEMBRE 2008**

**UNA ALTERNATIVA DE PROTECCIÓN DE MÁRGENES EN CURSOS
FLUVIALES**

G. Amores⁽¹⁾, J.D. Brea⁽²⁾, M. Pittau⁽¹⁾, P. Spalletti⁽²⁾, G. Salerno⁽¹⁾.

⁽¹⁾INMAC S.A. Argentina

⁽²⁾Laboratorio de Hidráulica - Instituto Nacional del Agua, Argentina

gamores@inmac.com.ar, dbrea@ina.gov.ar, mpittau@inmac.com.ar, pspallett@ina.gov.ar, gsalerno@inmac.com.ar

RESUMEN:

El trabajo tiene como objetivo presentar los estudios efectuados para llegar al diseño hidráulico de un sistema de protección de costas sometidas a la acción de las corrientes en cursos de agua, utilizando una alternativa de elementos de protección a las tradicionales utilizadas para resolver este tipo de problemas en la Argentina. En efecto, los tipos más comunes de sistemas de protección de márgenes más utilizados en el país son los gaviones y colchones de alambre rellenos de piedra, las mantas de bloques de hormigón unidos a geotextiles, tablestacas metálicas y de hormigón, entre otros. En este caso se plantea un esquema que incluye terraplenes, tablestacas de vinilo, y bloques de hormigón vinculados a malla de alambre, cuyo conjunto configura una alternativa válida de protección en zonas con escasa disponibilidad de piedra.

Los estudios para llegar a la configuración final de la obra proyectada incluyeron modelaciones matemáticas y físicas, que son también aquí presentadas.

ABSTRACT:

The object of this paper is to present the studies to reach the hydraulic design of a system to protect fluvial coasts under the action of currents, using alternative protection elements to the traditional ones to solve such problems in Argentina. Indeed, the most common types of protection systems used in margins over the country are wire mattresses and gabions filled with stones, blankets of concrete blocks tied to geotextiles, concrete and metal sheet piling, among others. In this case the scheme raised includes embankments, vinyl sheet piling, and concrete blocks tied to a wire mesh, which set up an alternative set of protection in areas with limited availability of stone.

Studies to reach the final configuration of the proposed work included physical and mathematical models, which are also presented here.

PALABRAS CLAVES:

Protección costas fluviales

INTRODUCCIÓN

La ingeniería fluvial moderna ofrece al proyectista una amplia gama de posibilidades de elementos estables a la acción de las corrientes, a partir de los cuales pueden diseñarse y ejecutarse obras que cumplan con los objetivos propuestos.

Los sistemas tradicionales de protección, tales como el enrocado, gaviones y colchones de alambre rellenos de piedra, las mantas de bloques de hormigón unidos a geotextil, tablestacas metálicas y de hormigón, entre otros, presentan dificultades de uso en algunos ambientes, generalmente por la falta de disponibilidad de algunos de los elementos constitutivos (por ejemplo, falta de piedra para gaviones, o falta de agua para hormigón). Resulta necesario en estos casos aplicar el criterio ingenieril, ya sea para salvar las dificultades que presentare la utilización de un elemento determinado, o para elaborar alternativas de protección, que no necesariamente dependan de un único tipo de producto, pudiendo involucran más de un elemento para la conformación de la estructura de protección.

Se presenta el problema del proyecto de obras de defensa y encauzamiento a que se están ejecutar en el puente vial de la Ruta Nacional No 5, sobre el río San Francisco, y en el terraplén y puente del FFCC Belgrano.

La zona de obra se encuentra emplazada en la Cuenca de Río San Francisco. La misma posee una extensión aproximada de 25.000 Km². La región que drena es de aproximadamente 7.250 km² con una longitud total de cauces de 1.900 km², lo que produce una gran densidad de escurrimiento. Esta cuenca es parte de la alta cuenca del Río Bermejo que a su vez forma parte de la vertiente del Atlántico.

Se ubica en el noroeste argentino, provincia de Salta, y presenta una alta actividad fluviomorfológica, que afecta especialmente la zona de emplazamiento de los puentes. Este efecto puede apreciarse en las Figuras 1 a 4, que corresponden a imágenes satelitales de la zona de los años 1984, 1989, 1997 y 2001, respectivamente.

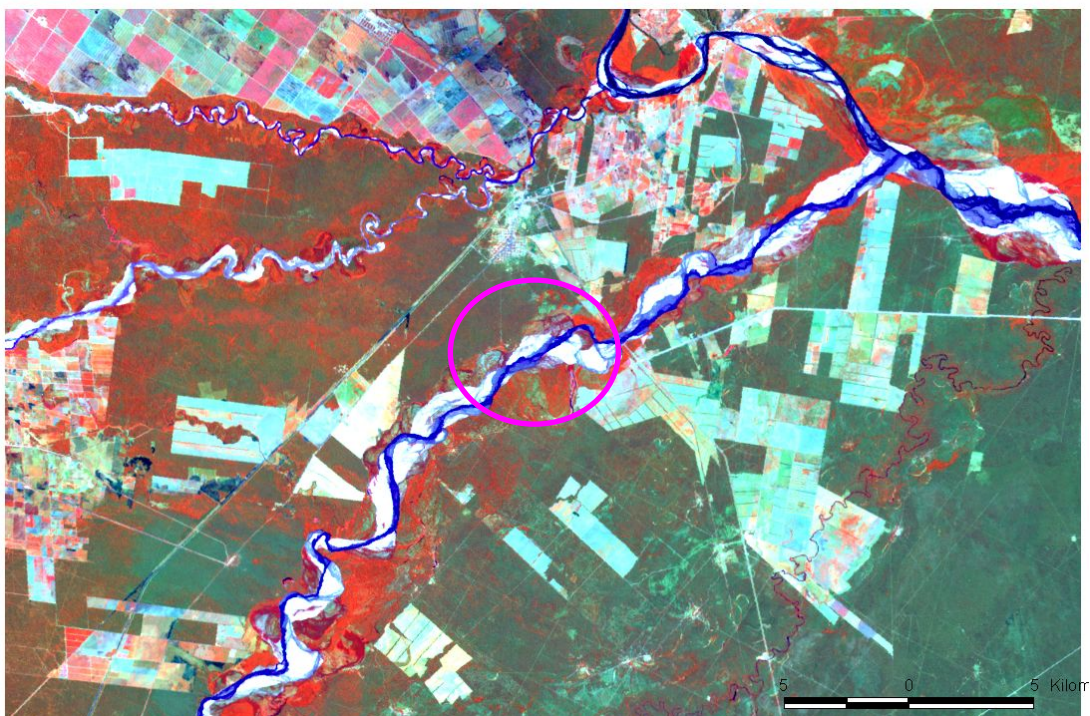


Figura 1.- Imagen satelital 1984

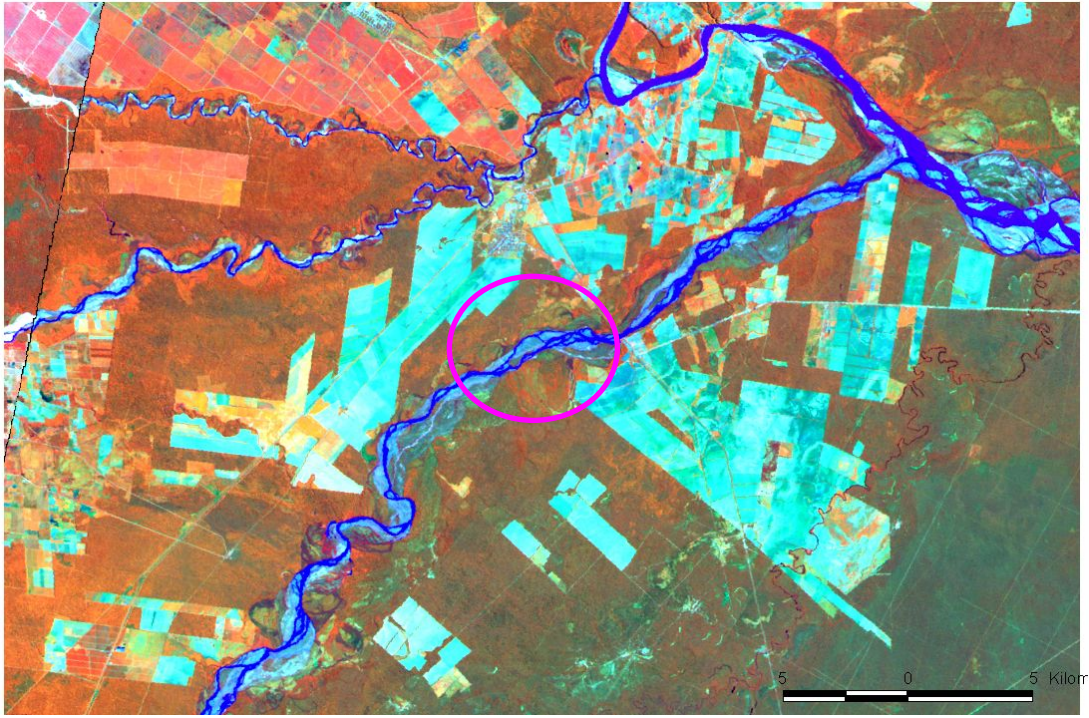


Figura 2.- Imagen satelital 1989

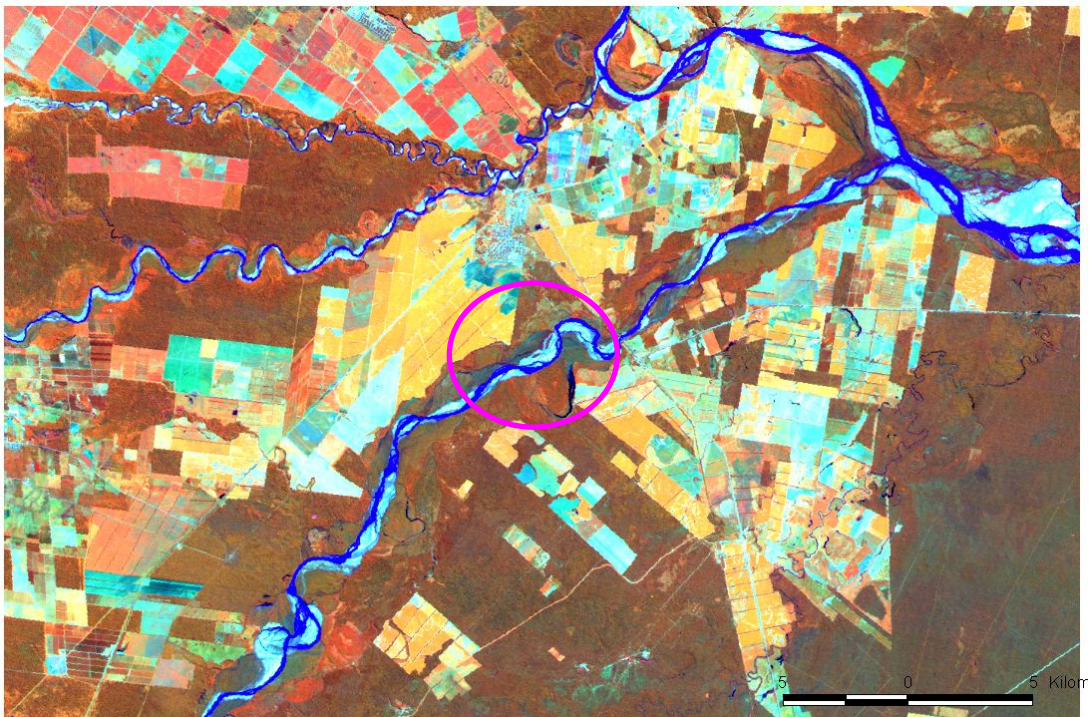


Figura 3.- Imagen satelital 1997

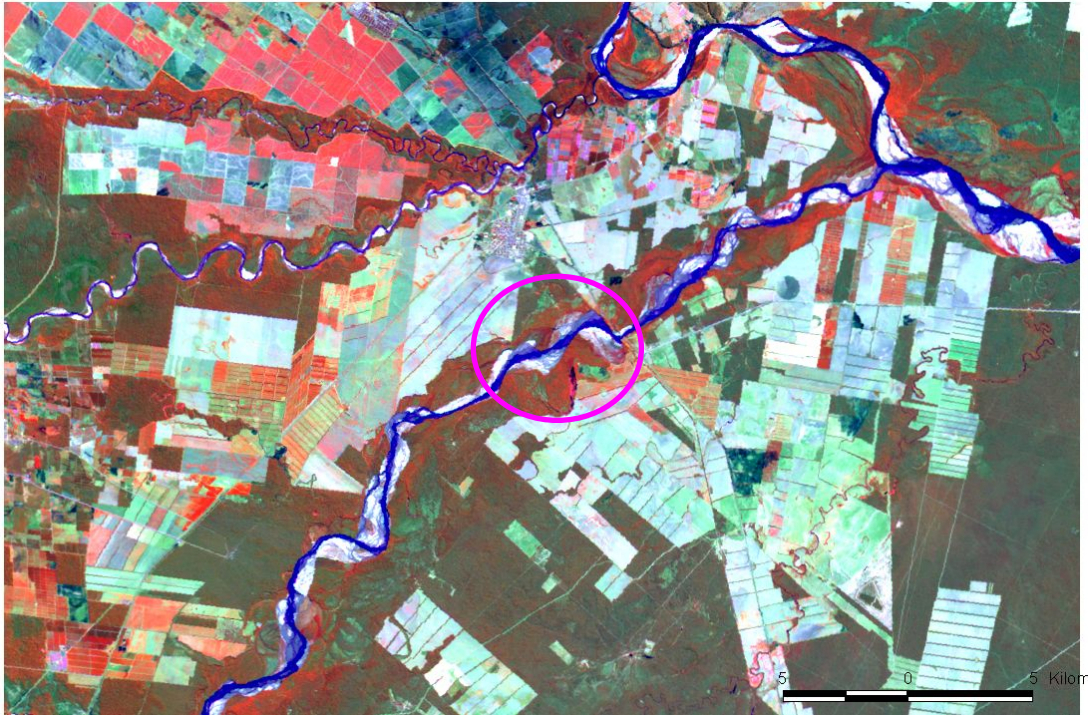


Figura 4.- Imagen satelital 2001

Los estribos de ambos puentes vienen sufriendo constantes intervenciones en los últimos años por las grandes erosiones que se producen. Estas intervenciones resultan insuficientes, sin un proyecto integral que no solo contemple el mantenimiento de las rutas y puentes, sino que también otorgue al río un cruce ordenado.

En las Figuras 5 y 6 se presentan fotografías en las que pueden apreciarse tanto las consecuencias de la crecida del año 2006 como una serie de acciones en la zona de cruce.



Figura 5.- Fotografía febrero de 2006.



Figura 6.- Fotografía noviembre de 2006.

DISEÑO DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN

Con el objetivo de poder otorgar seguridad y estabilidad a los puentes y generar un escurrimiento uniforme, ordenado y perpendicular a los ejes del puente, se proyectaron sobre ambas márgenes diques de encauzamientos.

Con ellos se busca encauzar las líneas de corriente en la sección de cruce de tal forma que su dirección en esa sección no varíe aunque el río cambie de posición y dirección aguas arriba de los diques, controlar la erosión local al pie de estribos, pilas y de fondo del cruce por reducción de la sección hidráulica efectiva, evitar que el flujo ataque al terraplén de acceso y lograr uniformidad del flujo en la sección de cruce.

De la proyección de estos lineamientos sobre la topografía y configuración del cauce actual, resulta la configuración que se adoptó como proyecto para los diques de encauzamiento en el Río San Francisco cuya planta puede apreciarse de manera esquemática en la Figura 7.

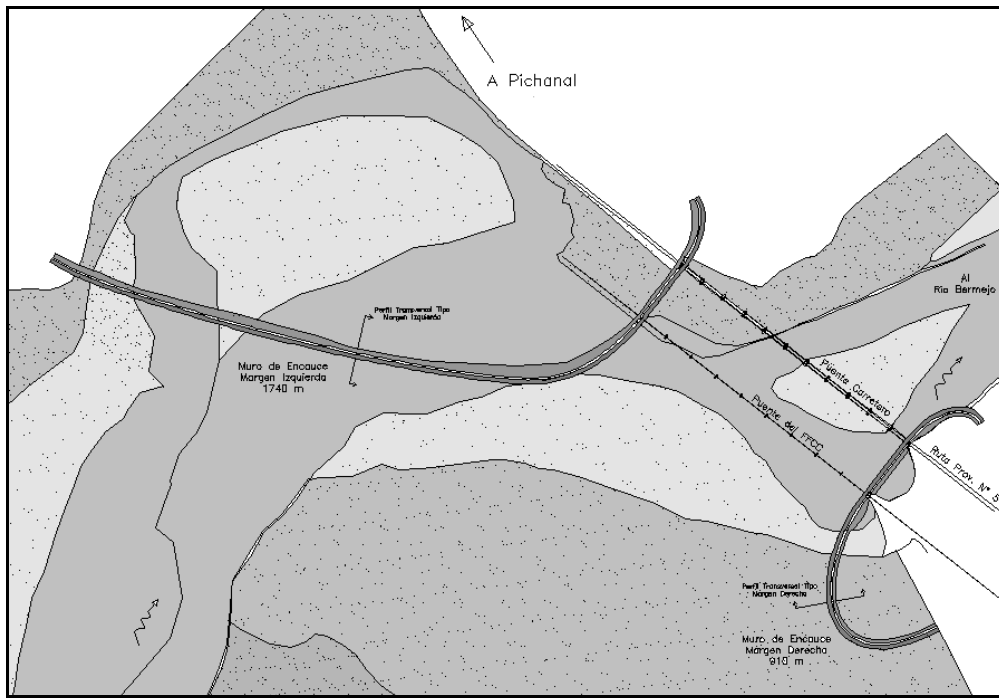


Figura 7.- Disposición esquemática en planta de los muros de encauzamiento.

El dique de encauce sobre margen izquierda es de 1740 m de longitud total, la misma abarca los estribos de los dos puentes y su extensión hacia aguas arriba tiene la finalidad de provocar el corrimiento del cauce hacia la parte central de los puentes para poder restituir el terraplén de la ruta provincial librándolo de los efectos erosivos que sobre ese sector estaban produciéndose y por consiguiente, poder reconstituir el terraplén y vías del ferrocarril. Sobre la margen derecha (910 m de longitud), el dique de encauce mantiene la forma resultante del cálculo, empotrándose aguas arriba en una pantalla de protección existente.

El perfil transversal consta de una sección de terraplén de suelo compactado de 4,50 m de ancho de coronamiento, el talud exterior se dispone en 1:2 (V:H) a fines garantizar su estabilidad y su cara expuesta al escurrimiento será protegida de las altas velocidades y de las consecuentes erosiones locales por un tendido de tablestacas y sobre el pie de las mismas, por una manta de bloques de hormigón interconectados mediante una malla de doble torsión o alambre galvanizado. La misma presentará en su extremo un contrapeso de hormigón armado a fines de garantizar la perfecta adhesión de la manta de bloques al suelo, favoreciendo así la protección al pie de todo el perfil del dique de encauce. Lo antes mencionado puede observarse en las Figuras 8, 9 y 10.

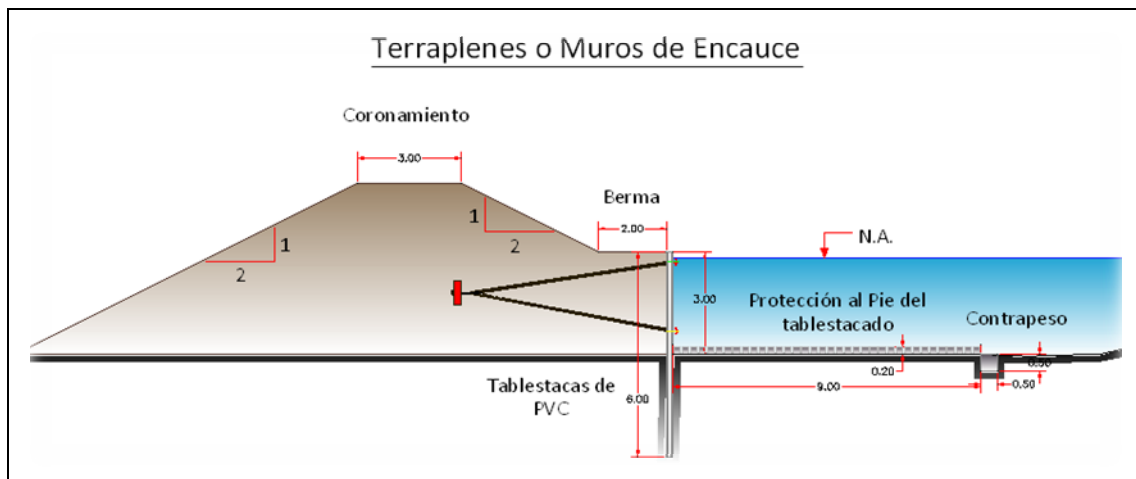


Figura 8.- Esquema del corte transversal del muro de encauzamiento.

La pantalla de tablestaca en los diques de encauce será de PVC y estará anclada al terraplén mediante placas de anclaje de hormigón armado, tensores y vigas de acero. Sobre el extremo inferior de las tablestacas se incorporará un refuerzo de hormigón pobre a fines de reducir las deformaciones generadas en la ficha por efecto del suelo.

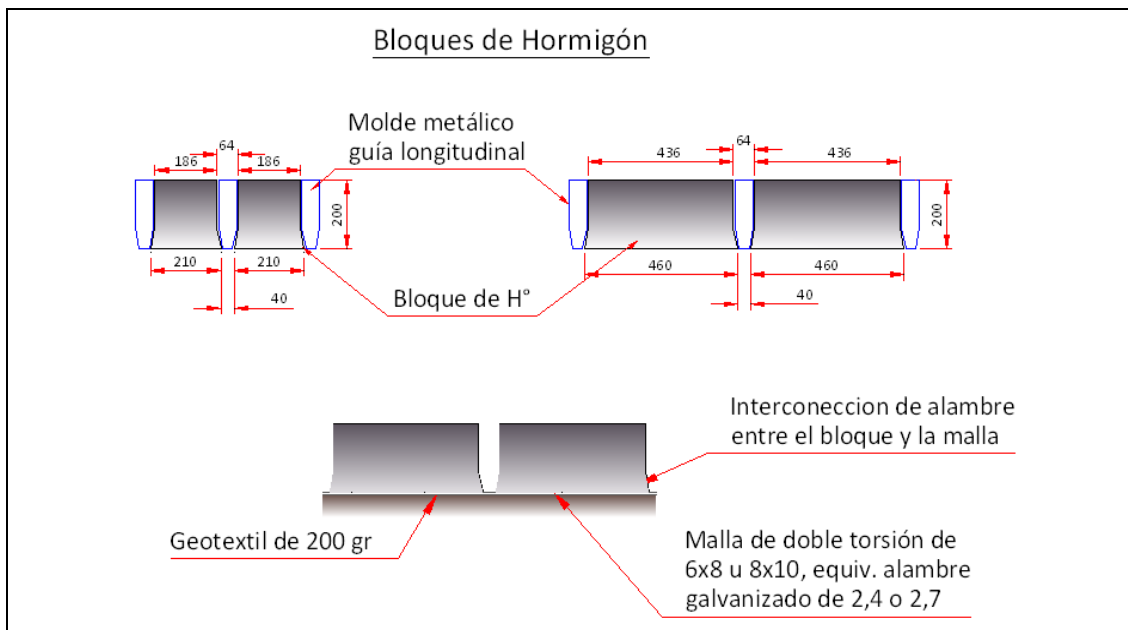


Figura 9.- Detalles de los bloques de hormigón – Medidas en (mm).

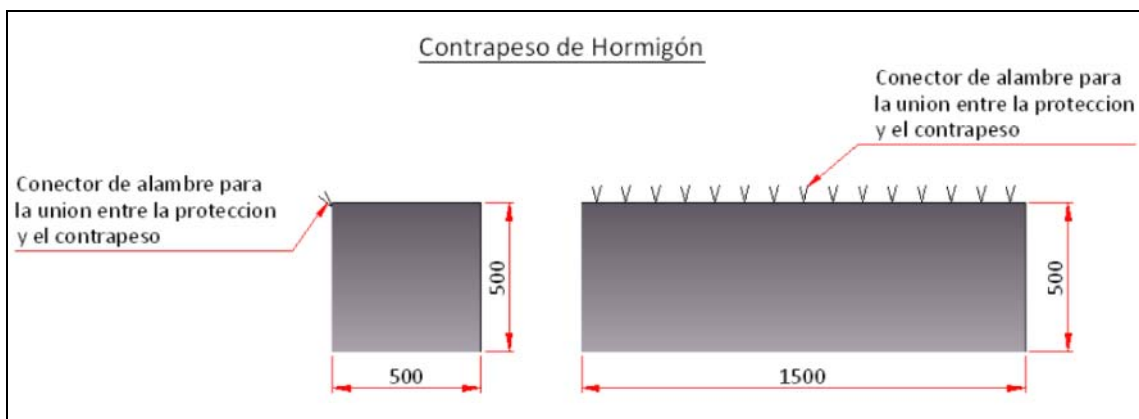


Figura 10.- Detalles del contrapeso de hormigón – Medidas en (mm).

Para los bloques de hormigón se adoptó una altura de 20 centímetros a partir de la adopción del criterio de Pilarczyk, 1995. Los mismos estarán unidos entre si mediante una malla de doble torsión tipo 6x8 o 8x10 o su equivalente en alambre galvanizado, y bajo los mismos se prevé la incorporación de una manta de geotextil.

ESTUDIOS EN MODELO MATEMÁTICO

Para caracterizar las condiciones hidrodinámicas del tramo, se aplicó un modelo matemático bidimensional hidrodinámico del U.S. Army Corps, ampliamente utilizado en E.E.U.U. y otros países, para simular posibles escenarios hidráulicos y así caracterizar las condiciones típicas del escurrimiento. Se trata del modelo matemático hidrodinámico Bidimensional RMA2 (USACE, 2003).

Para modelar la zona de estudio se definieron las cotas del lecho fluvial referidas al cero IGM, en base a un relevamiento efectuado en 2007, y se implementó una malla de cálculo utilizando elementos cuadrados y triangulares de 8 y 6 nodos respectivamente, con una discretización variable en la sección transversal. La grilla desarrollada se extiende en sentido longitudinal en un tramo del curso de aproximadamente 4400 m.

Como condiciones de borde se impusieron los caudales aguas arriba calculados en base al ajuste estadístico de los valores máximos anuales registrados en una estación de aforos cercana (Caimancito) y el nivel de agua en la frontera de aguas abajo.

De esta manera se implementó el modelo para la situación actual, y a partir de allí se fue evaluando el funcionamiento hidráulico del sistema para diferentes alternativas de obra, hasta llegar al esquema de proyecto adoptado, presentándose en la Figura 11 la malla de elementos finitos para la situación de proyecto.

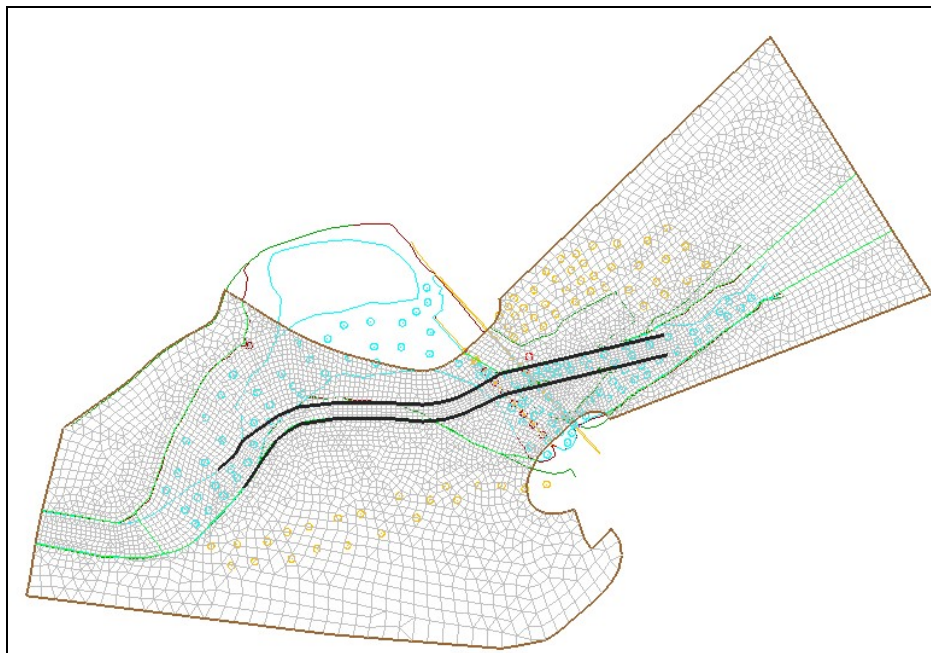


Figura 11.- Malla de elementos finitos.

En la Figura 12 se muestra un resultado de la modelación para una crecida de 100 años de recurrencia, en la que se presenta la distribución espacial de las velocidades. Estos parámetros fueron utilizados para el proyecto de las obras y como condiciones de sollicitación en el modelo físico de la protección del muro de encauzamiento.

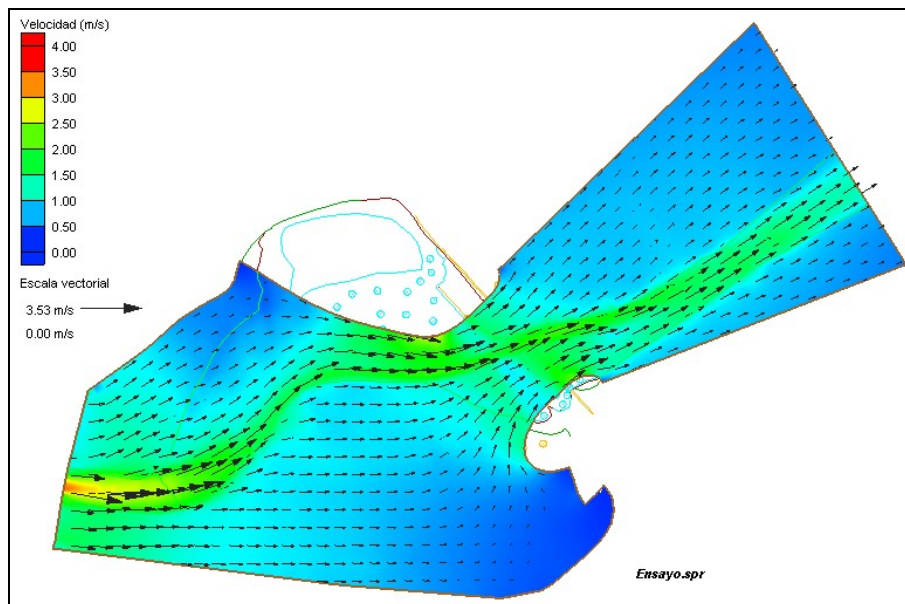


Figura 12.- Distribución espacial de velocidad para un caudal de 100 años de período de retorno.

ESTUDIOS EN MODELO FÍSICO

En el Instituto Nacional del Agua y dentro del Programa de Hidráulica Fluvial, se llevaron a cabo los estudios en modelo físico a fondo móvil, concernientes a determinar la estabilidad de dicha estructura frente a las solicitaciones que surgen del modelo matemático bidimensional y en particular observar el comportamiento de la protección de bloques frente a los procesos erosivos al pie de la estructura.

De acuerdo con el equipamiento disponible en el LHA y buscando obtener una buena reproducción de los fenómenos a estudiar se adoptó una escala de longitudes $e_L=10$.

Los ensayos se realizaron en un canal de 2,50 metros de ancho, 0,70 metros de profundidad y 30 metros de longitud, ubicado en la Nave 6 de modelos físicos del Laboratorio de Hidráulica del Instituto Nacional del Agua (LH-INA). Este cuenco dispone además de un carro porta instrumentos con movimiento longitudinal, que fue utilizado para la sujeción del equipo de medición constituido por un ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) y sobre el cual se realizaron los desplazamientos para relevar topográficamente el fondo móvil luego de cada experiencia.

Se adaptó la entrada del canal de ensayos buscando lograr una mejor transición entre las secciones de la cámara de ingreso y la sección de ensayos. Esto se hizo mediante la construcción de curvas de transición que hacen converger el flujo logrando direcciones paralelas a la longitudinal del canal al ingresar el agua a éste. Inmediatamente aguas abajo de la zona de transición se conforma, en fondo fijo, el perfil de acuerdo al proyecto en una longitud de 3,8 metros, donde el flujo se adapta a la sección de ensayo logrando así distribuciones de velocidades prácticamente rectilíneas sin trayectorias transversales.

Aguas abajo del tramo a fondo fijo, se constituyó la zona a fondo móvil donde se evaluó la respuesta de las mantas frente a la acción de las corrientes. Esta zona se compone de una capa de arena de 38 centímetros de altura, una longitud de 9,30 metros y 2,50 metros de ancho. El material granular utilizado para conformar el fondo móvil consistió en una arena bien graduada con un d_{50} de 400 μm . Se definió la sección de ensayo tal como se muestra en la Figura 13, presentándose en la Figura 14 fotografías del canal con las protecciones antes del inicio de los ensayos.

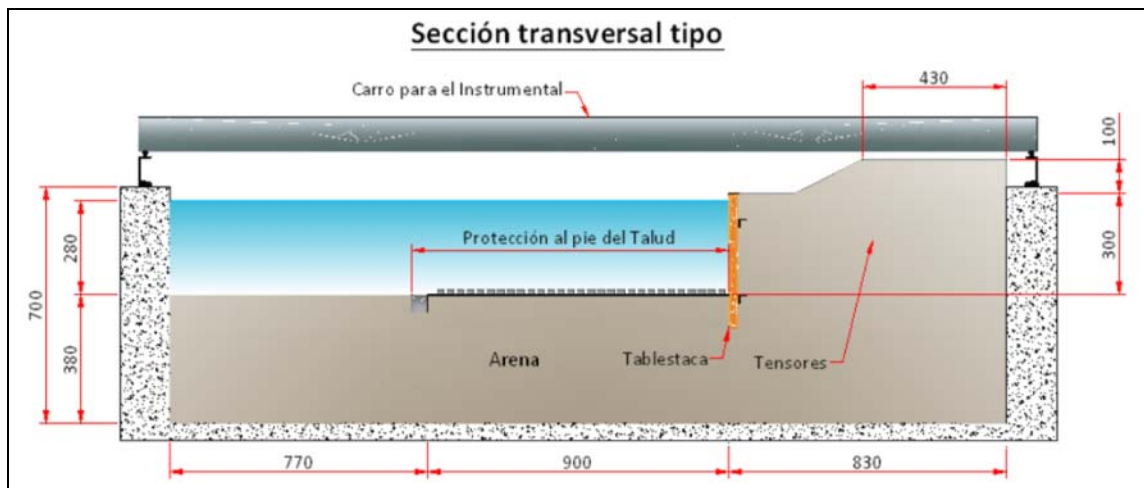


Figura 13.- Sección esquemática del canal de ensayo.



Figura 14.- Fotografías del canal antes de los ensayos.

Los ensayos se agruparon en dos etapas. Una de ellas, la primera, consistió en una serie de experiencias donde se incrementó la velocidad progresivamente sin restituir el fondo del modelo con lo cual se acumuló la erosión producida hasta llegar al ensayo de máxima sollicitación a la protección. La segunda etapa se correspondió con un único ensayo donde se hizo circular agua en el modelo con la máxima velocidad. En total se llevaron a cabo cinco experiencias de aproximadamente 7 horas de duración cada una (Tabla 1).

Tabla 1.- Esquema de ensayos.

Ensayo	Caudal	Velocidad	Tirante
1	200 l/s	0,42 m/s	0,28 m
2	300 l/s	0,63 m/s	0,28 m
3	400 l/s	0,84 m/s	0,28 m
4	452 l/s	0,95 m/s	0,28 m
5	452 l/s	0,95 m/s	0,28 m

En todos los ensayos se pudo verificar que sobre la manta, en la zona próxima al pie de las tablestacas, la velocidad media en la vertical fue, en promedio, un 40% menor que en el sector de mayor velocidad para cada sección.

Para observar el comportamiento de la protección, se presentan a modo de ejemplo algunos de los resultados para el ensayo 4. En la Figura 15 se ha graficado la configuración final del fondo, y en la Figura 16 una serie de fotografías de la deformación de la protección observada.

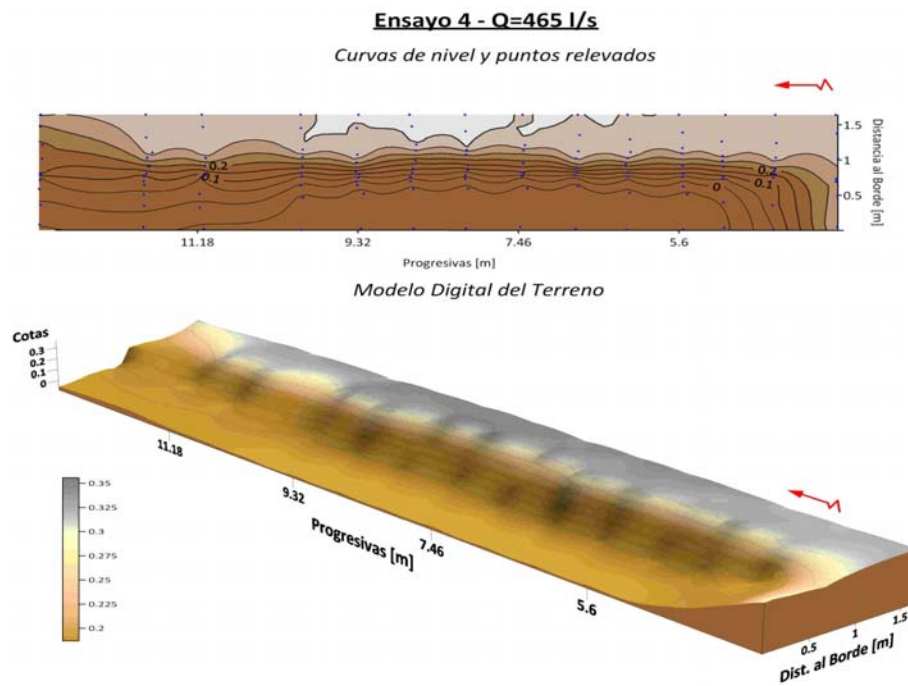


Figura 15.- Lecho relevado tras el ensayo 4.



Figura 16.- Fotografías tras el ensayo 4.

Puede notarse la forma en que la protección de bloques acompaña el descenso del lecho al pie de la estructura, persistiendo en la zona cercana a las tablestacas un tramo horizontal a la cota original de proyecto. Se ve con claridad que la manta funciona satisfactoriamente como defensa del pie de las tablestacas asegurando su estabilidad.

En la Figura 17 se han graficado para una sección localizada a aproximadamente 4 metros del inicio de la zona a fondo móvil, los perfiles resultantes de cada experiencia para su comparación visual, de lo que surge la evolución del lecho para las distintas condiciones de ensayo.

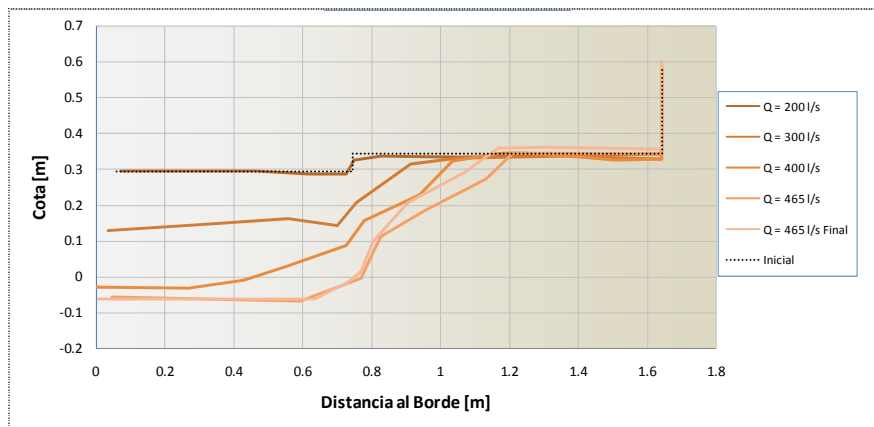


Figura 17.- Perfiles transversales para los diferentes ensayos.

CONCLUSIONES

Se presenta una alternativa de protección de márgenes en cursos fluviales, utilizando elementos no convencionales y obras constituidas por combinaciones de elementos estructurales.

Para las distintas etapas del proyecto de las obras han sido utilizados como herramientas tanto modelos matemáticos como modelos físicos a fondo móvil, que han permitido arribar a un proyecto de obra eficiente y seguro.

La implementación del modelo matemático bidimensional permitió por un lado evaluar el funcionamiento hidráulico del sistema, verificando que se cumplan las pautas de proyecto respecto a las características del flujo en la zona de los puentes, y por otro definir los parámetros hidráulicos de diseño de los elementos constitutivos de los muros de encauzamiento y su protección.

El modelo físico a permitido estudiar la estabilidad de las obras proyectadas. En ese sentido puede afirmarse que para todas las condiciones de ensayo estudiadas se observó que la longitud de la protección al pie que se deformó acompañando la erosión del lecho, nunca supero el 50% de la longitud de manta medida transversalmente a la dirección de la corriente.

De los resultados de los ensayos puede concluirse que aún para las condiciones hidráulicas más críticas, las mantas de protección y los contrapesos funcionaron eficientemente para controlar la deformación del talud de las fosas de erosión al pie de la estructura. De esta manera, se observa que el pie de las tablestacas no se ve afectado por la acción erosiva de la corriente, asegurando la estabilidad de la estructura del muro de encauzamiento.

REFERENCIAS

Przedwojski, B.; Blazjewski, R.; Pilarczyk, K.W. (1995). *River Training Techniques. Fundamentals, Design and Applications*. A.A.Balkema. Rotterdam. Brookfield.

US Army, Engineer Research And Development Center Waterways Experiment Station Coastal and Hydraulics Laboratory (2003a): *Users Guide To SED2D WES Version 4.5*.