

MODELACIÓN FÍSICA TRIDIMENSIONAL DE LA OBRA DE PROTECCIÓN DE LA CÁRCAVA SUCO.

**Horacio Herrero, Pablo Castro, Gonzalo Moya, Augusto Díaz, Carlos M. García y
Andrés Rodríguez**

Instituto Superior de Recursos Hídricos - U.N.C. Av. Filloy s/n – Ciudad Universitaria, Córdoba
E-mail: hsherrero@yahoo.com.ar

RESUMEN

La laguna de Suco, ubicada a 40 Km. de la localidad de Río Cuarto, Córdoba, Argentina, posee como drenaje natural un arroyo que lleva el mismo nombre. Sobre el cauce natural del arroyo, se ha formado una cárcava retrogradante a unos 2 Km. de la laguna, con un salto hidráulico de aproximadamente 4 metros. Una obra de estabilización de la cárcava ha sido diseñada para controlar el proceso erosivo existente. Esta obra está compuesta por una serie de saltos de 1 m. de altura, llevados a cabo con gaviones y colchonetas, y cubiertos con una delgada capa de hormigón, para salvar el desnivel ocasionado por el proceso de carcavamiento.

Para el diseño definitivo de este tipo de estructuras se ha desarrollado un modelo físico no distorsionado (escala de longitud, $E_L = 15$) con similitud de Froude, que a escala reducida, permite analizar el comportamiento de las diversas configuraciones de las obras de control. Los objetivos de las mediciones realizadas en el modelo físico fueron los siguientes: a) Caracterización de los perfiles de velocidad media y de la energía turbulenta (varianza), en la zona del canal de entrada aguas arriba de la obra. b) Determinación de los patrones de flujo medio en el ingreso de la obra, y de las presiones hidrostáticas a la que la misma está sometida. c) Determinación de patrones medios de recirculación del flujo en la zona del cuenco disipador. d) Análisis de la turbulencia remanente aguas abajo del cuenco disipador. En virtud a los resultados y conclusiones obtenidos en los ensayos se propuso una alternativa para disipar mejor la energía en el cuenco disipador mediante el uso de dos deflectores.

ABSTRACT

The Suco lagoon, located 40 Km way from Río Cuarto city, in the Córdoba province, Argentina, has a stream (called Suco) as a natural drainage system. An intensive degradation process (generating an step of about 4m on the river bed) occurs in this stream, 2 km downstream from the lagoon. An hydraulic structure has been designed to control the mentioned degradation process. This structure is composed of four one meter high steps. To define the final design of the hydraulic structure, an undistorted physical model was built (length scale, $E_L = 15$) using Froude similitude. This physical model is used to verify the behavior of the structure for different flow conditions. The objectives of the laboratory measurements performed in the physical model were: a) characterization of the mean velocity and turbulence intensity profiles in the region located upstream of the structure; B) Characterization of the mean flow velocity patterns and the hydrostatic pressure on the structure region; c) Characterization of the mean flow velocity patterns in the energy dissipation basin; and d) Analysis of the turbulence intensity values downstream of the energy dissipation basin. Finally, a new design of the hydraulic structure is proposed based on the observations performed in the physical model.

INTRODUCCIÓN

En la región Sur de la provincia de Córdoba se encuentran numerosos cursos y arroyos afectados por procesos erosivos del tipo encarcavamiento, que consisten fundamentalmente en una erosión vertical del cauce natural por efecto de la inestabilidad del suelo de la zona (Loess pampeano). Dadas las características evolutivas del proceso, éste se define como retrogradante, materializándose mediante la formación, crecimiento y desplazamiento aguas arriba de un "escalón" en el lecho fluvial debido a diversas causas, como por ejemplo:

- Descenso del nivel de base en el curso inferior del arroyo.

- Cambio en el uso de suelo en la cuenca aguas arriba.
- Incremento en las precipitaciones y caudales.
- Disminución de tiempos de concentración.
- Combinación de los mismos.

La ocurrencia de alguno de estos fenómenos puede llegar a erosionar el cauce hacia aguas arriba en el orden de varios metros durante la ocurrencia de un único evento hidrológico.

Este fenómeno se produce debido a la energía del chorro líquido, el cual es impulsado casi verticalmente desde el extremo de la cárcava de la cárcava hacia el lecho fluvial aguas abajo, generando una fosa de socavación de magnitud considerable, la cual a su vez genera inestabilidad en los taludes constitutivos de las márgenes fluviales hasta que se produce una falla de los mismos (Farias et al., 2002; y Castelló et al., 2003).

Todo ello se traduce en un súbito desplazamiento de ese escalón hacia aguas arriba, con un gran incremento de la carga sólida transportada por la corriente hacia aguas abajo, en virtud de las grandes masas de suelo removidas por la mecánica del proceso (Stein et al., 1997; Farias, 1988).

La inestabilidad del proceso compromete la seguridad de aquellas poblaciones asentadas en proximidades de la cárcava, comprometiendo además la estabilidad de las obras de infraestructura presente en el tramo, afectando importantes superficies productivas, además de los considerables impactos ambientales sobre toda el área de influencia.

Evidentemente la identificación, caracterización y desarrollo de medidas preventivas de control, es una acción necesaria para prevenir futuros daños estructurales, sociales y económicos, además de los perjuicios ambientales que se podrían generar en caso de no actuar con medidas tendientes a su estabilización. Entre los daños y perjuicios asociados al fenómeno de carcavamiento podemos identificar, como ejemplo, la destrucción y afectación de la infraestructura vial (puente y camino) construida a la vera de los arroyos y el impacto en la actividad agrícola ganadera en la región;

La laguna de Suco, ubicada a 40 Km. de la localidad de Río Cuarto, posee como drenaje natural un arroyo que lleva el mismo nombre. Sobre el cauce natural del arroyo, se ha formado una cárcava retrogradante a unos 2 Km. de la laguna, con un salto hidráulico de aproximadamente 4 metros.

El proceso erosivo, ensancha el cauce hacia aguas abajo y hacia los laterales por la acción del chorro con el fondo por efecto de un torbellino de eje horizontal. De acuerdo a relevamientos realizados por especialistas de la Dirección Provincial de Agua y Saneamiento (DiPAS) la inestabilidad de la cárcava compromete la seguridad de poblaciones asentadas en proximidades del arroyo, en posible caso de que la cárcava continúe con su evolución abrupta hasta la laguna.

Como consecuencia del proceso erosivo existente y para evitar los daños mencionados anteriormente, se diseñó una obra de estabilización de la cárcava (ver Figura 1), la cual está compuesta por una serie de saltos de 1 m. de altura, llevados a cabo con gaviones y colchonetas, y cubiertos con una delgada capa de hormigón, para salvar el desnivel ocasionado por el proceso de carcavamiento.

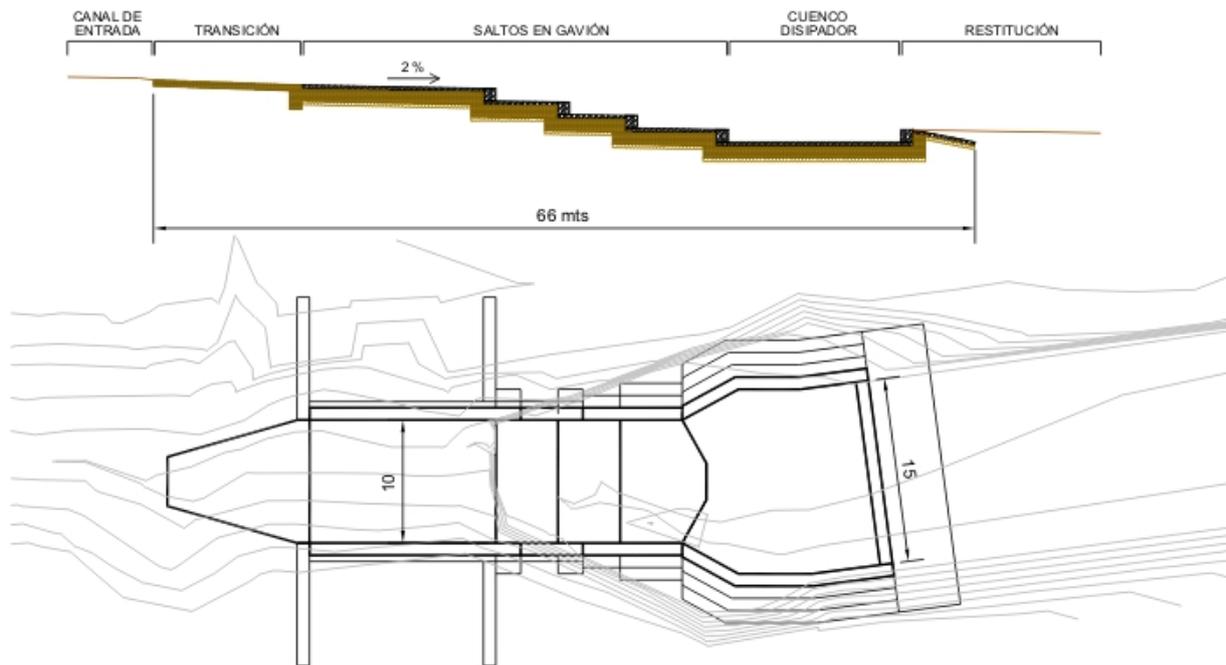


Figura 1: Planta y perfil longitudinal de la obra de protección

Aguas abajo del tramo escalonado se dispuso un cuenco amortiguador, cuya finalidad es la de disipar la energía de la corriente para restituir el flujo al cauce del arroyo con niveles de turbulencia y velocidades medias menores a las velocidades admisibles del material del suelo, evitando así la erosión y la socavación aguas abajo. Aguas arriba del canal de entrada, se previeron muros de encauzamiento a los fines de generar la transición entre el cauce aguas arriba y la serie de saltos.

Para el diseño definitivo de este tipo de estructuras se ha planteado la necesidad de desarrollar un modelo físico, que a escala reducida, permite analizar el comportamiento de las diversas configuraciones de las obras de control, estableciendo su óptimo técnico-económico que asegure su correcto desempeño durante la ocurrencia de los eventos para la cual fue proyectada.

METODOLOGÍA

El estudio hidrológico de la cuenca de aporte a las cárcavas de Suco fue realizado por el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Nacional de Córdoba UNC. Como resultado se obtuvo una cuenca con dimensión longitudinal predominante, con pendiente principal orientada en dirección Noroeste – Sureste y que presentó las siguientes características físicas: área: $A = 116 \text{ Km}^2$, longitud del cauce principal: $L = 21,2 \text{ Km}$, altura máxima: $H_{\text{máx}} = 930 \text{ m}$, altura mínima: $H_{\text{mín}} = 640 \text{ m}$, pendiente máxima de la cuenca: $S_{\text{máx}} = 1,37 \%$. Como resultado de la modelación hidrológica de la cuenca se obtuvieron los hidrogramas de diseño para los diferentes tiempos de recurrencia, 5, 25, 50, 100 y 500 años. Para el período de diseño de 25 años adoptado para la obra de estabilización, el caudal de diseño en el prototipo es de $35,7 \text{ m}^3/\text{seg}$.

El modelo físico no distorsionado (escala de longitud, $E_L = 15$) con similitud de Froude construido en el Laboratorio de Hidráulica de la UNC se observa en la Figura 2, y consiste en dos cuencos con distintos niveles para materializar el salto a salvar con la estructura a ensayar, el de aguas arriba, a fondo fijo, cuyas dimensiones permitirán reproducir distintas condiciones de ingreso a la estructura (canal de llegada, transición, etc.). El de aguas abajo de

fondo móvil, cuyas dimensiones permitirán representar distintas condiciones de salida, realizando pequeñas modificaciones en su configuración. Los distintos niveles de restitución se podrán obtener, variando la altura de una compuerta de eje horizontal instalada al final del modelo.



Figura 2: Vista general del modelo físico.

El sistema de aforo, consta de un vertedero en canal, cuyas dimensiones de instalación, y tolerancia de construcción cumplen las normas habituales. La placa de vertedero de medición de duraluminio plana de sección triangular, con ángulo al centro de 90° , biselada en su parte superior a efecto de cumplir con las condiciones de vertedero en pared delgada según las especificaciones típicas, asegura una exactitud del 1% en la medición de los caudales.

Para poder asegurar la entrada del agua al modelo en forma uniforme y no perturbado, se usó un dissipador con junta libre.

Los objetivos de las mediciones realizadas en el modelo físico son los siguientes:

- Caracterización de los perfiles de velocidad media y de la energía turbulenta (varianza), en la zona del canal de entrada aguas arriba de la obra.
- Determinación de los patrones de flujo medio en el ingreso de la obra, y de las presiones hidrostáticas a la que la misma está sometida.
- Determinación de patrones medios de recirculación del flujo en la zona del cuenco dissipador.
- Análisis de la turbulencia remanente aguas abajo del cuenco dissipador.

Para llevar a cabo las mediciones previstas, se dividió al modelo físico de la obra de protección en cuatro sectores o zonas (ver Figura 3):

ZONA A: Canal de aproximación.

ZONA B: Obra propiamente dicha.

ZONA C: Cuenco dissipador.

ZONA D: Sector de erosión aguas abajo del cuenco dissipador.

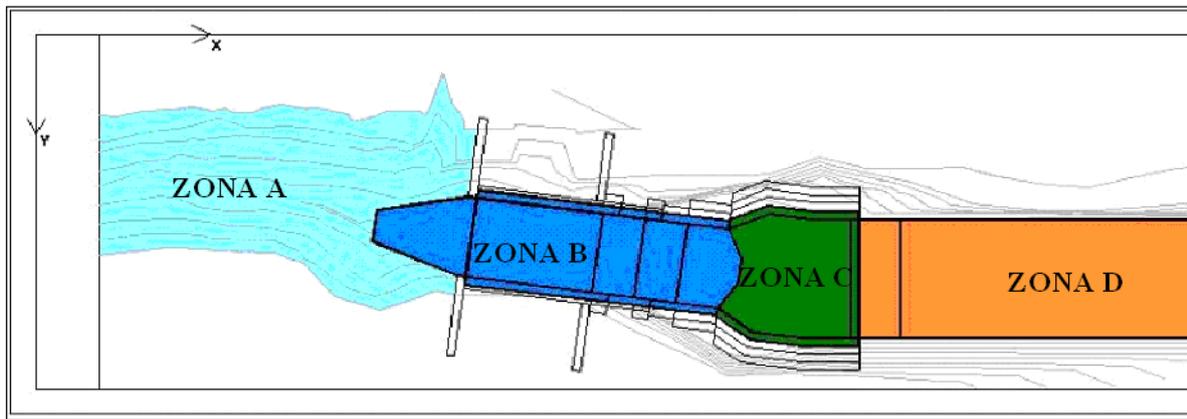


Figura 3: Zonificación del modelo físico para llevar a cabo las mediciones.

Las mediciones de velocidad que se comentaron anteriormente, se llevó a cabo siguiendo la metodología propuesta por Herrero et al. (2007) la cual incluye los siguientes actividades:

- 1) Definir los objetivos del estudio.
- 2) Definir las zonas de flujo que se desea caracterizar.
- 3) Verificar el adecuado posicionamiento del instrumento.
- 4) Determinar los parámetros físicos del fluido a medir.
- 5) Estimar a priori los parámetros Uc y L en cada zona de flujo a analizar. Estimar la mayor escala de tiempo T del proceso turbulento analizado ($T = L/Uc$).
- 6) Determinar longitud de registro Tm para cada zona de flujo de interés
- 7) Determinar la frecuencia de registro óptima en cada región de flujo a analizar. (satisfacer $F = f_R L / Uc > 20$).
- 8) Definir la configuración de registro óptima.
- 9) Procesamiento de la señal
- 10) Calcular los parámetros de la turbulencia requeridos en el estudio.
- 11) Determinar los intervalos de confianza de cada uno de los parámetros de la turbulencia.

En la **Zona A** se midieron velocidades con un MicroADV Sontek de 10 MHz en cinco progresivas distribuidos a lo largo de la zona. En cada una de las progresivas se midieron velocidades en 4 puntos de la vertical.

En la **Zona B** se midieron velocidades con el empleo de un tubo Pitot debido al escaso tirante existente a lo largo de la obra. La velocidad se midió en 5 progresivas distribuidas a lo largo de la transición y del primer tramo de la obra de protección antes del primer salto. En cada progresiva se midieron velocidades sobre la margen derecha, margen izquierda y centro del mismo. También se midieron las presiones a las que está sometida la totalidad de la obra mediante 38 piezómetros distribuidos a lo largo de la misma.

En la **Zona C** se midieron velocidades en el cuenco dissipador con el uso del Micro ADV, discretizando dicho cuenco en dos grillas, una sobre la margen izquierda y la otra sobre la margen derecha. En el centro del cuenco dissipador no se realizaron mediciones con el Micro ADV debido a la gran cantidad de burbujas presentes en el flujo que disminuyen notablemente la calidad de la señal. Estas condiciones de registro no reportan datos representativos del fenómeno analizado. Las mediciones en la grilla se realizaron en dos planos diferentes, uno de ellos ubicado a 5 cm. y el otro a 2,5 cm. del fondo del cuenco.

En la **Zona D** se midieron velocidades en cinco progresivas separadas cada 30 centímetros. En cada progresiva se midieron tres valores de velocidades: al centro, y sobre las márgenes

derecha e izquierda, a una distancia de 10 cm. de la frontera lateral. La totalidad de los puntos de medición en esta Zona D se encuentran a una distancia del fondo de 1.5 cm.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la **Zona A** se obtuvo los perfiles de velocidades a distintas progresivas. La Figura 4 muestra el perfil de velocidad medido en la progresiva 2 (109cm desde la entrada).

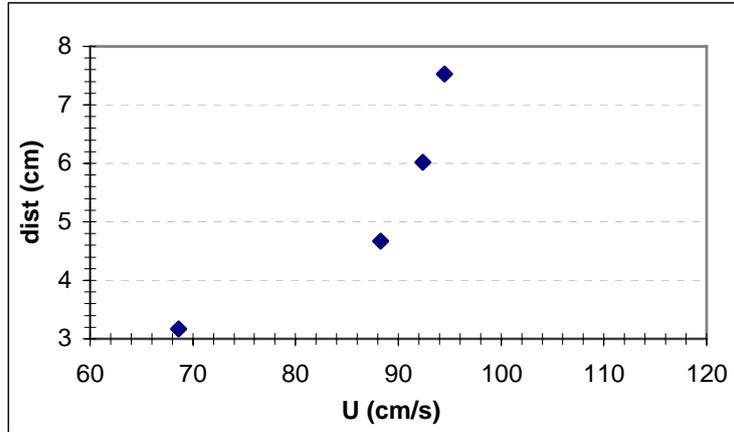


Figura 4: Perfil de velocidad en progresiva 2 (109cm de la entrada).

El perfil se asemeja a un perfil logarítmico, por lo que se puede decir que la condición del flujo es uniforme, con una velocidad media que varía entre 70 y 100 cm/seg en modelo. La Figura 5 muestra la variación de las velocidades medidas en las 4 progresivas a una distancia de 4.5 cm del fondo.

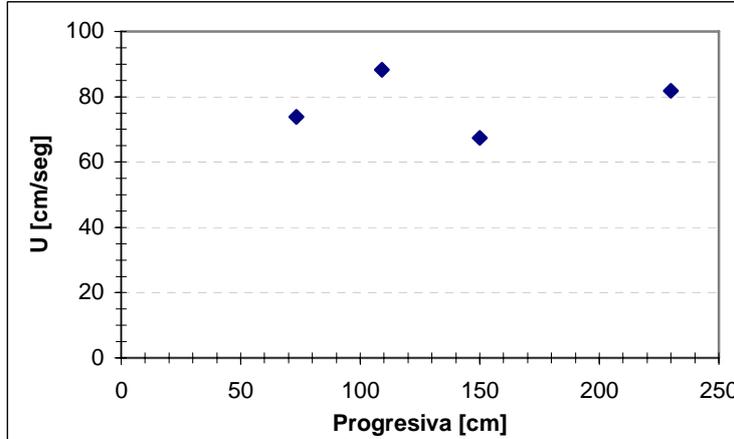


Figura 5: Variación de U en las 4 progresivas a una distancia de 4.5 cm del fondo.

La Figura 6 muestra la variación de u'/U (desvío estándar/velocidad media) en las 4 progresivas a una distancia de 4.5 cm del fondo. Esta relación u'/U corresponde al del cauce natural y presenta valores del orden de 18%. Se puede observar que como la velocidad media no tiene grandes variaciones (Figura 5), podemos decir que la forma de la Figura 6 se debe a la influencia de la obra sobre los niveles de turbulencia en el flujo (la turbulencia aumenta a medida que nos acercamos a la obra).

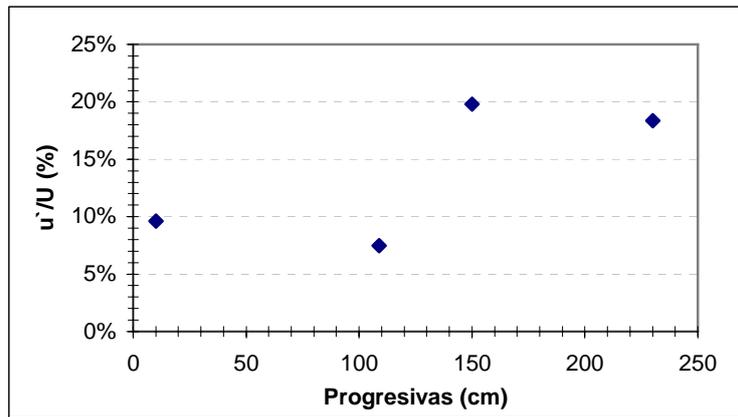


Figura 6: Variación de u'/U en las 4 progresivas a una distancia de 4.5 cm del fondo.

En la **Zona B** se registraron a lo largo de la obra los valores de presiones graficados en la Figura 7.

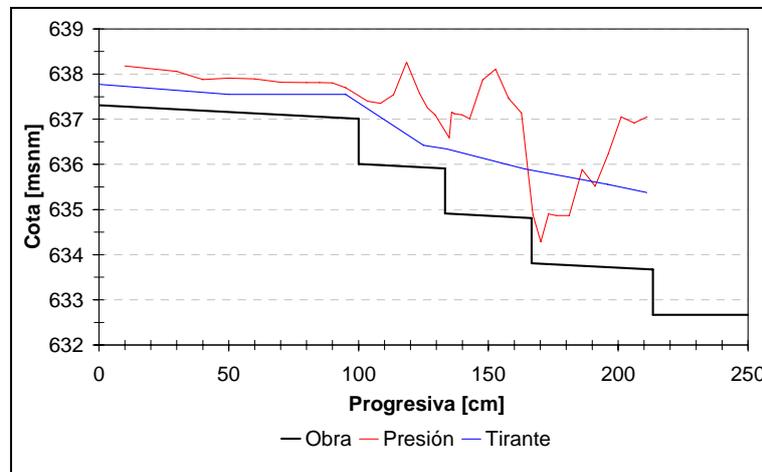


Figura 7: Distribución de presiones a lo largo de la obra de protección. La progresiva 0 corresponde al inicio del primer tramo de la obra.

Podemos observar que los picos que se presentan en el gráfico, aproximadamente a la mitad de los saltos 2, 3 y 4 corresponden a la progresiva donde la lámina de agua del salto anterior pega en el salto siguiente, provocando picos de presión, que pueden ser perjudiciales para la obra. Por otro lado se observa que en el último salto se tiene las presiones más bajas, esto es debido a la lámina de agua que se despega del salto anterior, provocando succión y así tenemos presiones mas bajas que también pueden ser perjudiciales para la obra.

En lo que se refiere a la medición de velocidades en esta zona, podemos observar que el flujo es cercano al crítico a lo largo de todo este trayecto con velocidades entre 5 y 6 m/s en prototipo, estas velocidades en el tramo de la transición que es de material natural sin vegetación representa un problema ya que la velocidad admisible de ese material es de aproximadamente 1 m/s. Por ende el material se erosionará provocando socavación en la transición y por ende el fallo de la obra. En el primer tramo de la obra las velocidades admisibles son 3.5 a 4 m/s y estas también son inferiores a las que se presentan en este tramo por lo tanto el material utilizado tampoco resiste dichas velocidades.

En la **Zona C**, una vez procesados los datos de las mediciones con ADV, se calcularon los valores medios de las componentes de velocidades en dirección X e Y, el modulo de la resultante y su orientación, esto para cada punto de las grillas y para cada plano de medición

(5 cm y 2.5 cm del fondo). Luego mediante el programa Surfer 8 se realizó una interpolación por triángulos para obtener una muestra de la recirculación que existe en los dos laterales del cuenco como así también en los dos planos.

La Figura 8 muestra la recirculación existente como así también los rangos observados de velocidad mediante la escala inferior. En la margen izquierda del cuenco se tienen velocidades menores a las del margen derecho, además se observa que la mayoría del flujo en esa sección va en sentido contrario de la dirección del flujo principal, esto puede ser perjudicial ya que podría introducir dentro del cuenco partículas, que dependiendo de su tamaño puede ser abrasivo para el material del cuenco.

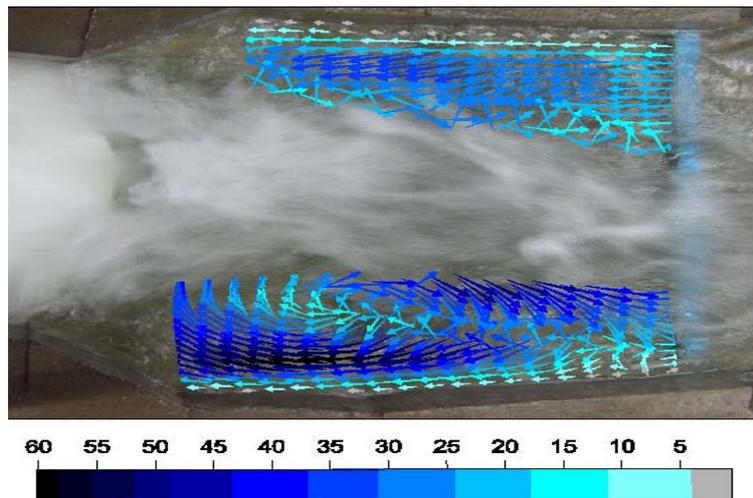


Figura 8: Patrones medios de recirculación a 5 cm del fondo del cuenco dissipador. Los valores se miden en cm/s y corresponden al modelo.

Las dos zonas de recirculación observadas en las márgenes del cuenco provocan una disminución del ancho efectivo del cuenco concentrándose el flujo en la zona central y por ende aumentando la velocidad del flujo en esta zona, haciendo al cuenco dissipador ineficiente.

La Figura 9 muestra para la **Zona D**, como varía la relación u'/U entre el desvío estándar y la velocidad media a la salida del cuenco dissipador, al centro, a la derecha y a la izquierda (Figura 9). También se muestran vectores de velocidades medias (Figura 10) curvas de igual valor de TKE (Figura 11), y curvas de nivel de la erosión medida en este sector (Figura 12).

La relación u'/U va de mayor a menor sobre la margen derecha debido a que el flujo se concentra inicialmente en ese lado, luego rebota sobre los laterales del canal y se dirige hacia la izquierda. Por eso es que al centro y en la margen izquierda la relación u'/U aumenta hacia aguas arriba.

El efecto de la salida cruzada del flujo también se aprecia en las Figuras 10, 11 y 12 con mayores valores velocidad media y de TKE , y por ende mayores erosiones sobre la margen derecha.

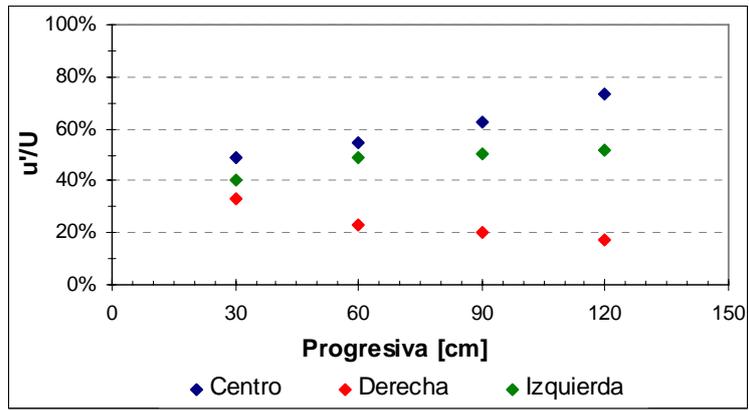


Figura 9: Variación de u'/U al centro, margen derecha y margen izquierda.

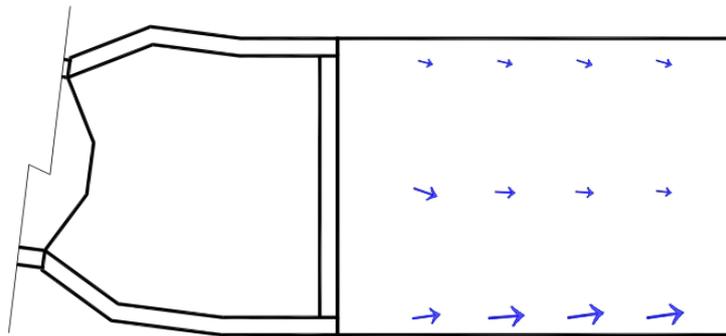


Figura 10: Vectores de velocidades medias.

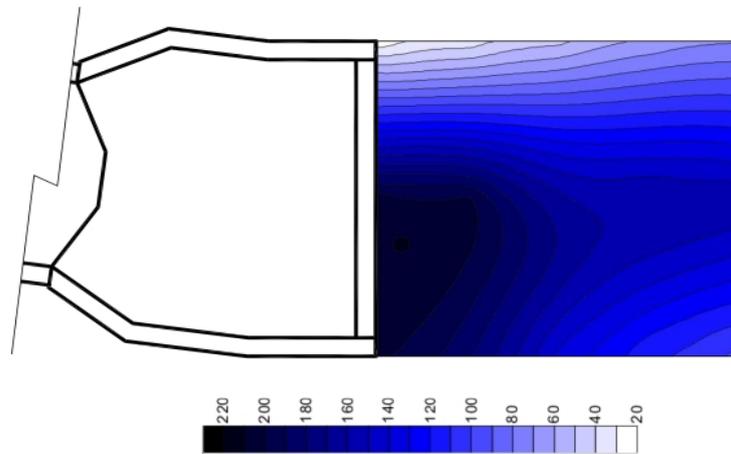


Figura 11: Isolíneas de TKE a la salida del cuenco disipador. TKE [cm^2/seg^2].

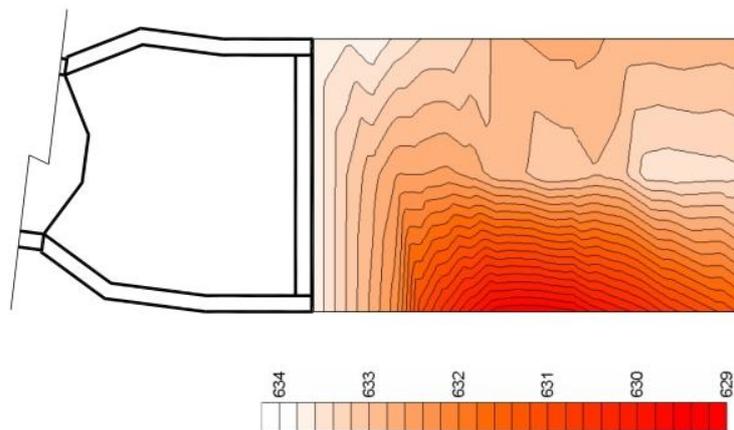


Figura 12: Curvas de nivel de la erosión medida en la zona D. Las cotas son [msnm]

En virtud a los resultados y conclusiones obtenidos en los ensayos anteriores se propuso una alternativa para disipar mejor la energía en el cuenco disipador mediante el uso de dos deflectores en el cuenco disipador.

Esta alternativa consiste en colocar dos deflectores en el último tramo de la obra (**Zona C**), con el fin de poder canalizar el flujo en tres sectores dentro del cuenco para eliminar las recirculaciones y así poder utilizar toda la sección del cuenco para disipar en mayor medida la energía que trae el flujo.

Mediante una prueba de visualización, se colocaron los dos deflectores en distintas posiciones llegando a la conclusión que la disposición que mejor respondía es la que se presenta en la Figura 13.

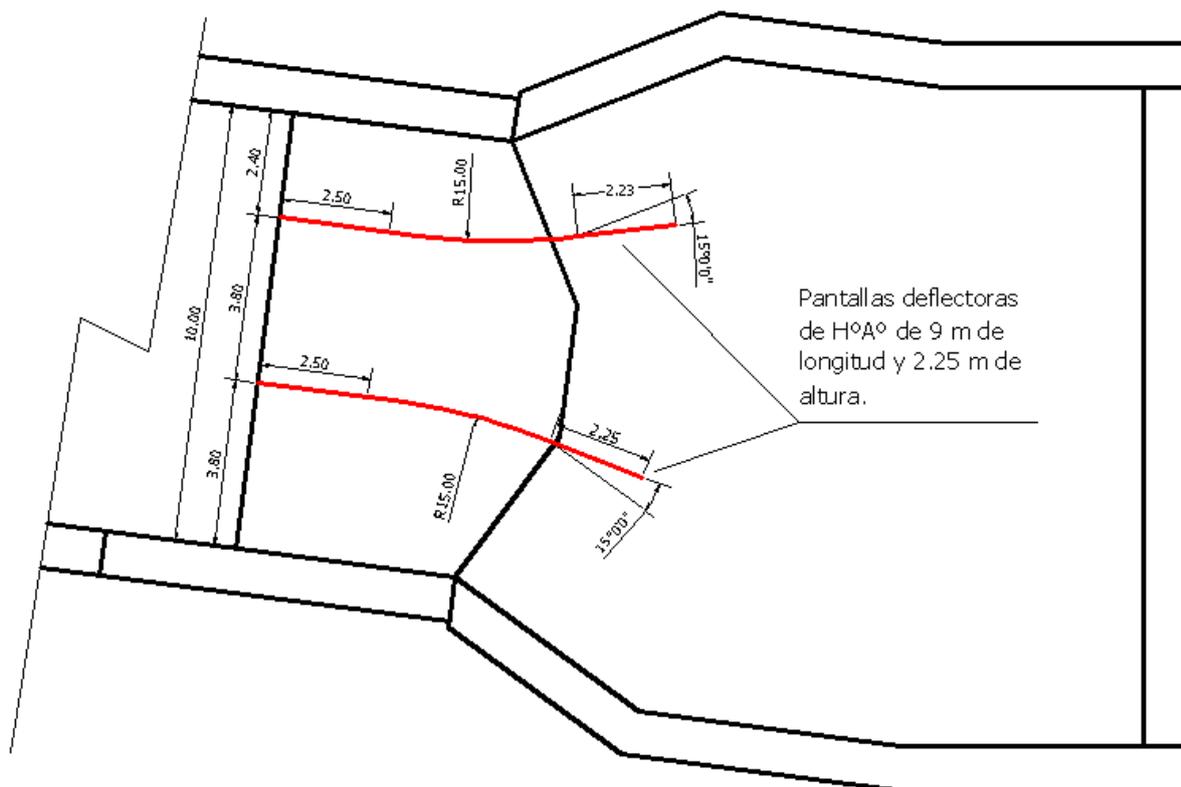


Figura 13: Disposición de los dos deflectores recomendados en el último tramo de la obra (la unidad de longitud representada es metros medidos en el prototipo).

Con la configuración experimental detallada en la Figura 13, se realizarán dos ensayos, uno de ellos en la **Zona C** para la determinación de los patrones de recirculación del flujo en el cuenco disipador, y el otro en la **Zona D** para el análisis de la turbulencia remanente aguas abajo del cuenco disipador. La metodología que se llevó a cabo para la realización de estos dos ensayos fue la misma que para los cuatro ensayos anteriores.

En la Figura 14 se observa para la **Zona C** que en la margen izquierda del cuenco se tienen velocidades menores a las del margen derecho, además se observa que el flujo en esa sección va en sentido del flujo principal (hacia afuera del cuenco). Dicha figura resulta de las mediciones con el MicroADV a una distancia de 5 cm desde el fondo del cuenco.

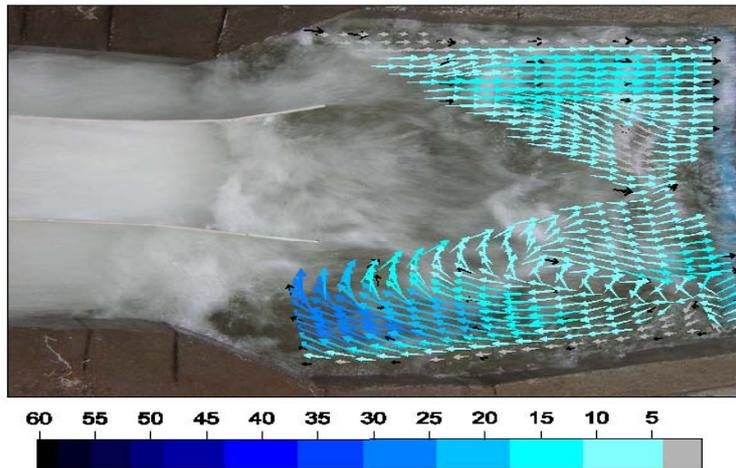


Figura 14: Patrones medios de recirculación a 5 cm del fondo del cuenco disipador con deflectores. Los valores se miden en cm/s y corresponden al modelo.

Podemos notar que las velocidades de la recirculación en la margen derecha han disminuido notablemente (se redujo a la mitad comparado para el mismo lugar sin deflectores) como así también su dimensión. El cambio más notable se puede ver en la margen izquierda donde la dirección del flujo ha cambiado 180° y ahora tiene la dirección del flujo principal.

Las Figuras 15, 16, 17 y 18 muestran para la zona D, la caracterización del flujo y la erosión observadas con la nueva configuración,. Un contraste entre esta Figuras y las Figuras 9, 10, 11 y 12 permite cuantificar como han cambiado los mismos parámetros en relación a los calculados para la configuración sin deflectores.

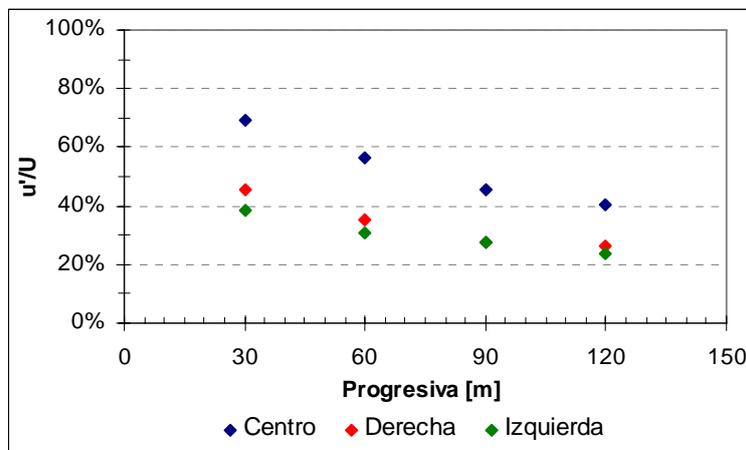


Figura 15: Variación de u'/U al centro, margen derecha y margen izquierda, con deflectores.

La Figura 15 muestra que la relación u'/U disminuyó con el uso de los deflectores debido a que el ancho útil del cuenco aumentó. Al no existir más la zona muerta de recirculación sobre la margen izquierda, el flujo se reparte en una mayor superficie y por ende la velocidad disminuye. Sin embargo, esta relación sigue siendo mayor que la obtenida para la **Zona A** aguas arriba de la obra, por lo tanto la alternativa con deflectores disipa gran cantidad de energía pero no alcanza a devolver al cauce las condiciones naturales.

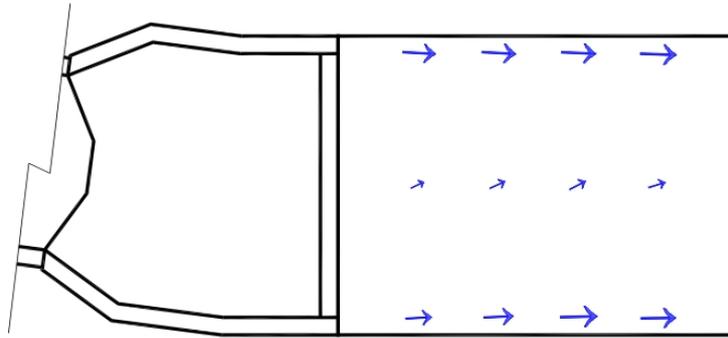


Figura 16: Vectores de velocidades medias, con deflectores

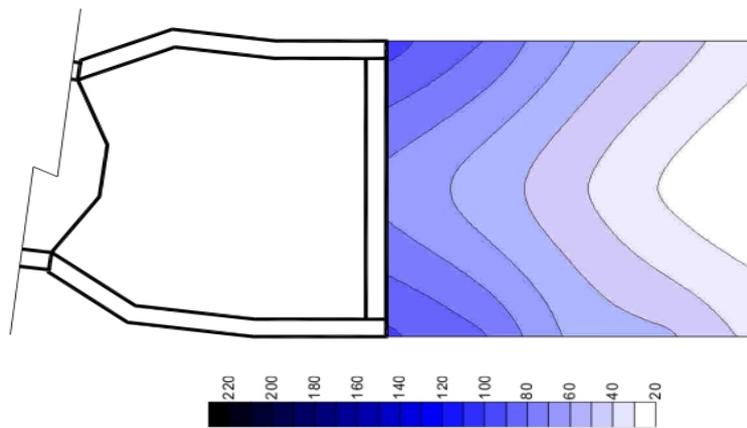


Figura 17: Isótopos de TKE a la salida del cuenco disipador., con deflectores. TKE [cm^2/seg^2].

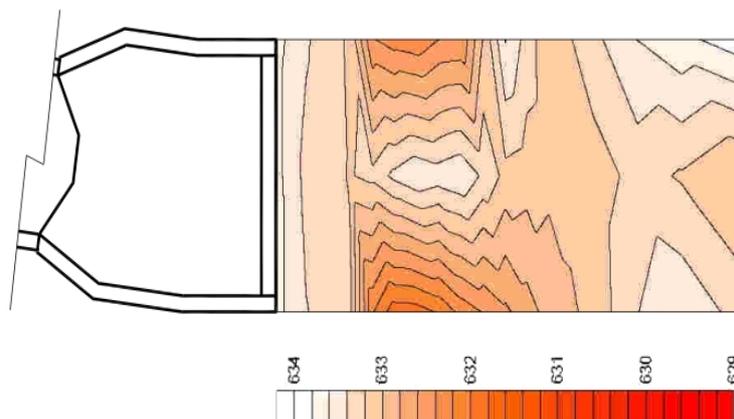


Figura 18: Curvas de nivel de la erosión medida en la Zona D, con deflectores. Las cotas son [msnm]

Se puede apreciar la simetría de las figuras 17 y 18, donde los menores valores de la TKE al centro del canal están en correspondencia con las menores erosiones en esa zona. Por ello podemos afirmar que es considerable la mejora que brinda esta alternativa con respecto a la configuración original.

CONCLUSIONES

En la zona de transición se tiene velocidades muy altas para el material del cauce, y también se alcanzan altas velocidades en el primer tramo de la serie de saltos. Por esta razón se debería rediseñar la transición para mejorar las condiciones de entrada del flujo a la obra.

Las mayores presiones sobre la serie de saltos se alcanzan en los lugares de impacto del flujo. Por ello se deberán reforzar esas zonas para evitar futuros daños.

Con la alternativa de las pantallas deflectoras se logró distribuir el flujo en todo el ancho del cuenco disipador, aumentando el ancho útil y de esta forma alcanzar una mayor eficiencia del mismo, disminuyendo las velocidades.

Esta disminución de velocidades en el cuenco disipador nos da como consecuencia menores niveles de turbulencia aguas debajo de la obra, y por ende menores erosiones en esa zona.

Aunque los niveles de turbulencia disminuyeron con la alternativa de los deflectores, siguen siendo mayores que los correspondientes al flujo natural del arroyo. Esto también queda demostrado por las erosiones aguas abajo.

REFERENCIAS

Castelló, E., Vanoli, G., Rodríguez, A. y Farias H.D. (2003). “Estudios, proyecto, ejecución y seguimiento de estabilización de cárcavas en cauces sobre suelos loésicos”. *Primer Simposio Regional sobre Hidráulica de ríos, Bs.As., Argentina.*

Farias, H. D. (1998). “Algunos Aspectos Hidráulicos y Morfológicos del Proceso de Erosión en Cárcava en Cauces y Planicies”. *XVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Oaxaca, México.*

Farias H.D., Rodríguez A., Castelló E. y Vanoli G. (2002). “Estabilización de Cárcavas en Cauces sobre Suelos Loésicos. Estudios Morfológicos, Hidráulicos y Solución Ingenieril”. *XIX Congreso Nacional del Agua, Villa Carlos Paz, Argentina.*

Herrero H., Castro P, García C., Rodríguez A. (2007). “Guía Práctica Para Realizar Mediciones de Velocidad en Flujos Turbulentos con ADV”. *XX Congreso Nacional del Agua, Tucumán, Argentina.*

Stein, O. R., Julien, P. and Alonso, C. V. (1997). “Headward Advancement of Incised Channels”. *Management of Landscapes Disturbed by Channel Incision, Ed. by S. Wang, E. Langendoen & F. Shields, Oxford, MS, USA, pp. 497-502.*