

MEDICIÓN DEL FENÓMENO DE SUPER-ELEVACIÓN EN COINCIDENCIA CON CORRIENTES SECUNDARIAS INDUCIDAS POR ACELERACIÓN CENTRÍPETA

M. G. Gallego¹, M. I. Morell¹, C. J. Ocampo¹, L. Tarrab² y C. A. Vionnet¹

¹ Centro de Estudios Hidroambientales (CENEHA), Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH), Universidad Nacional del Litoral (UNL), Santa Fe, y Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

² Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (FCEFN), Universidad Nacional de Córdoba (UNC), Córdoba, y Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

E-mail: gallegomanu@yahoo.com.ar - Web: <http://www.unl.edu.ar/ceneha/>

Introducción

En el presente trabajo se analiza el comportamiento de corrientes transversales medidos sobre el sistema aluvial del Río Paraná, a la salida de una bifurcación en forma de T. Más precisamente, el sector de interés se ubica en la desembocadura del Río Colastiné, donde parte de su flujo se bifurca hacia el puerto de la ciudad de Santa Fe a través de un canal artificial, y hacia el cauce principal del Río Paraná por el otro. En el primero de los casos, el flujo proveniente del Río Colastiné experimenta un importante cambio de dirección a la entrada del canal, produciéndose un efecto inercial motorizado por fuerzas centrífugas (Figura 1).

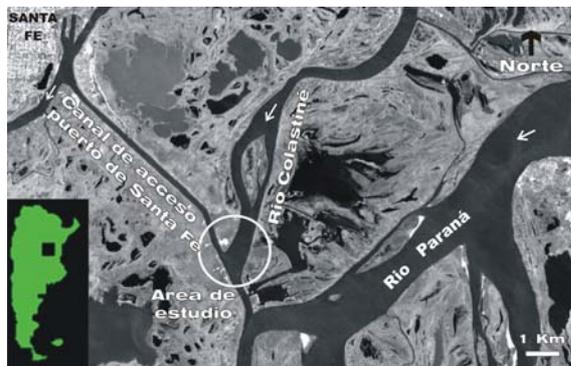


Figura 1.- Área de estudio (31°43' lat. sur y 60°40' long. oeste)

Se realizaron mediciones de profundidades con una sonda ecógrafa y del campo de velocidades 3D con un perfilador de corriente acústico Doppler (ADCP), en secciones transversales a la dirección general del escurrimiento en el sitio de interés. Las corrientes secundarias inducidas por el efecto de la aceleración centrífuga fueron detectadas en algunas de las secciones medidas. Además, se instalaron sensores de presión emplazados en ambas márgenes del canal, con los cuales se pudo capturar un fuerte gradiente lateral de la superficie libre en coincidencia con la descripción teórica del proceso.

Mediciones

Se llevaron a cabo relevamientos de campo en los años 2004, 2008 y 2009. En los dos primeros (años 2004 y 2008), se obtuvieron datos de caudales y campo de velocidades, los cuales fueron complementados con mediciones batimétricas, mientras que en los dos últimos (años 2008 y 2009), se obtuvieron variaciones del pelo de agua sobre ambas líneas de márgenes.

Las mediciones de velocidades y caudales se realizaron con un ADCP SonTek RiverSurveyor de 1000 kHz, montado sobre una embarcación de 6,4 m de eslora, y conectado a un sistema de posicionamiento global con corrección diferencial cinemática a tiempo real (RTK DGPS) marca Leica.

Para estas mediciones, se configuró el ADCP con una altura de celda de 0,9 y 0,75 m (años 2004 y 2008, respectivamente), y un ancho de celda variable, el cuál es función de la velocidad de la embarcación y el intervalo de tiempo de muestreo, fijado en 5 y 10 s.

Con el objeto de obtener valores de profundidad con mayor exactitud a los registrados por el ADCP, se utilizó una sonda ecógrafa Raytheon de 210 kHz. Esto último se logró activando la función bottom-track del ADCP y, por tanto, adoptando el valor de profundidad local registrado por la sonda ecógrafa.

A fin de capturar la sobre-elevación transversal de la superficie del pelo de agua a lo largo de la curva, se identificaron secciones transversales afectadas por una fuerte presencia de corrientes secundarias a partir de los relevamientos efectuados en los años 2004 y 2006. Un ejemplo lo constituye la sección xs-04-2 (Figura 2).

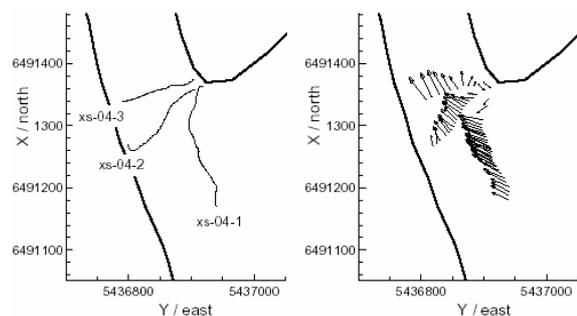


Figura 2.- Izquierda: secciones transversales relevadas el 4 de Noviembre de 2004; Derecha: velocidades medias en la vertical.

En el relevamiento correspondiente al año 2008, se midieron por primera vez niveles de pelo de agua en puntos ubicados a 1,5 m de la margen, usando para esto un nivel topográfico Pentax AL-320 en conjunción con el RTK DGPS. Sumado a esto, en cada punto se instaló un sensor de nivel de agua con el objeto de registrar cambios en la elevación de la superficie libre. Ambos sensores fueron geo-referenciados con el RTK DGPS y colocados dentro de tubos de PVC de 10 cm de diámetro perforados con el fin de evitar perturbaciones atribuibles al viento o al paso de embarcaciones (Banerjee 2000).

Durante la campaña del corriente año, se realizaron lecturas de la elevación de la superficie del pelo de agua en varios puntos a lo largo de la transecta. Estas mediciones se efectuaron con una estación total Pentax PCS-515 y el nivel topográfico Pentax AL-320.

Resultados

El software RiverSurveyor (SonTek/YSI Inc., 2004) permite obtener valores de velocidades promediados en la vertical a lo largo de cada transecta. En la Figura 2 (derecha) se muestra el campo de velocidades promediado en la vertical, medido en el relevamiento del año 2004,

dónde puede observarse una separación del flujo en el sector aguas abajo de la curva sobre la margen interna de la misma.

Los datos de velocidades, en sus tres direcciones, fueron filtrados y convertidos en archivos de formato ASCII por medio del software ViewADV (SonTek/YSI Inc., 2004). Estos archivos fueron procesados a través de un código computacional escrito en Fortran 95 con el objeto de obtener las componentes del campo de velocidad de las secciones transversales.

Acorde a lo propuesto por Dinehart y Burau (2005), se adoptó una proyección de datos 3D. La localización del plano de proyección fue fijada siguiendo la trayectoria media de la embarcación durante el relevamiento. Las componentes tangenciales y verticales fueron computadas para cada perfil sobre el plano de proyección medio. Finalmente, ambas componentes, definen el movimiento del flujo transversal proyectado en un plano medio. En la Figura 3 se muestran las celdas de movimiento secundario capturadas durante el relevamiento del año 2004.

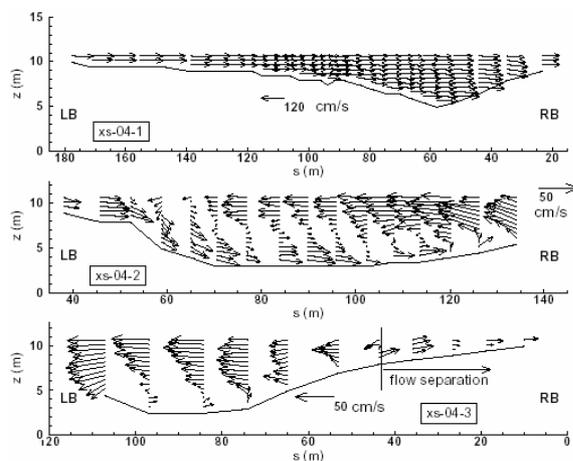


Figura 3.- Velocidades transversales en las secciones relevadas el 4 de Noviembre de 2004

En base a lo analizado, se detectaron intensidades de circulación secundaria con velocidades del orden de los $0,5 \text{ ms}^{-1}$, representando aproximadamente un 50 % de la velocidad en la dirección general del escurrimiento (componente primaria del flujo).

Puede verse en la Figura 2 que la apreciable aceleración del flujo principal en la vecindad de la margen interior de la curva induce, por continuidad, un flujo transversal considerable en dirección transversal (Figura 3, arriba).

Durante la campaña del año 2008, se observaron diferencias en la elevación de la superficie libre entre la margen interna y externa de la curva, de 2,3 y 7 cm, según se reverencien las mediciones acorde al RTK DGPS y al nivel topográfico, respectivamente. Cabe aclarar que la sobre-elevación del pelo de agua se produjo sobre la margen externa, y que, el valor promedio entre las mediciones realizadas con las dos metodologías mencionadas asume un valor de aproximadamente 4,15 cm.

En base a los registros de altura de pelo de agua de los sensores emplazados en cada una de las márgenes, se detectaron fluctuaciones de 1,2 cm durante el desarrollo de las tareas de campo (Figura 4). Por lo tanto, el desnivel medido entre ambas márgenes no estaría asociado a efectos de viento o de tráfico de embarcaciones.

Aun considerando los errores de medición atribuibles a cada uno de los instrumentos utilizados, RTK DGPS y

nivel Pentax AL-320, del orden de los $\pm 2,5$ y ± 1 cm, respectivamente, se detectó en una sección con presencia de corrientes secundarias (Figuras 2 y 3) una apreciable sobre-elevación del pelo de agua que supera dicha incertidumbre.

Los datos recolectados en el año 2009, obtenidos bajo condiciones hidrodinámicas similares, revelan una diferencia de 4,2 cm en la elevación de la superficie del agua entre ambas márgenes. Si se considera que entre ambos puntos de medición existe una distancia de aproximadamente 163 m, el gradiente transversal de la superficie libre es de $2,6 \times 10^{-4}$, un orden de magnitud mayor que el gradiente hidráulico medio en dirección longitudinal. Mas aún, en la zona comprendida entre el centro del canal de navegación y la margen interna, se detectó un desnivel de 6,4 cm respecto a la margen externa. Por consiguiente, la superficie libre del pelo de agua se asimila a una forma de S, en coincidencia con reportes previos de varios autores (Banerjee 2000).

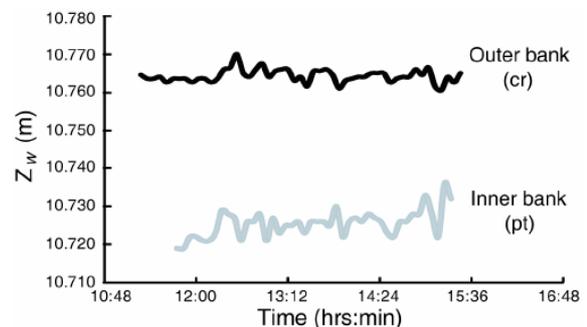


Figura 4.- Área de estudio ($31^{\circ}43'$ lat. sur y $60^{\circ}40'$ long. oeste)

Conclusiones

Los datos de velocidades obtenidos en los distintos relevamientos realizados en la zona de estudio muestran que los flujos helicoidales se desarrollan, crecen, y eventualmente se atenúan a medida que el flujo progresa hacia aguas abajo. Prevalece, a la entrada del canal, un flujo unidireccional gobernado por un movimiento radial hacia el interior de la curva, explicado en términos de inercia y continuidad de masa.

Si bien forma parte de un tratamiento más extenso, es posible mencionar que la presente metodología captura los efectos centrífugos predominantes en un plano transversal a la dirección general del escurrimiento, sin necesidad de promediar los datos obtenidos con el ADCP en sucesivos cruces de la sección transversal.

Finalmente, el fenómeno de sobre-elevación de la superficie libre fue registrado en las mismas secciones transversales donde la celda de flujo secundario fue previamente detectada, en concordancia con la descripción teórica del problema.

Referencias Bibliográficas

Dinehart, R. L. and J. R. Burau (2005). "Averaged indicators of secondary flow in repeated acoustic doppler current profiler crossings of bends", *Water Resources Res.* 41. (W09405, doi:10.1029/2005WR004050).

Banerjee, D. (2000), "Initiation of bed deformation in meandering channels: a theoretical and numerical study". MSc Thesis, University of Windsor, Canada.