

MEDICIÓN DEL FENÓMENO DE SUPER-ELEVACIÓN EN COINCIDENCIA CON CORRIENTES SECUNDARIAS INDUCIDAS POR EFECTOS CENTRÍFUGOS

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 (FCEFyN), Universidad Nacional de Córdoba (UNC), Córdoba, y Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

Ciudad Universitaria C.C. 217 Ruta Nacional N° 168 – Km. 472,4 (3000) Santa Fe. Tel: (54) (0342) 4575 233 Int. 199

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

RESUMEN

En este trabajo se analiza la formación de un flujo helicoidal en una bifurcación, en forma de T, de un cauce del sistema aluvial del Río Paraná (Argentina). La elevación del lecho se llevó a cabo con una sonda ecógrafa, mientras que las mediciones de las componentes 3D-tridimensionales- del flujo se obtuvieron con un perfilador acústico Doppler (ADCP). Estas tareas se efectuaron en distintas secciones transversales del sitio bajo estudio. Es así que se detectaron corrientes secundarias generadas por la aceleración centrípeta a la que se ve sometida el flujo, en varias de las secciones transversales relevadas y en distintas ocasiones. Estas corrientes fueron detectadas a partir de un algoritmo de proyección especialmente diseñado para procesar los datos capturados con el ADCP. Adicionalmente, dos sensores de presión fueron instalados en ambos márgenes del cauce, detectando un apreciable gradiente hidráulico lateral, en coincidencia con la descripción teórica del proceso.

ABSTRACT

The behavior of the crosswise flow, measured on an existing T-shaped bifurcation located on a branch of the Paraná River (Argentina), is analyzed. River bottom surveying with an echo sounder and 3D velocity measurements with an Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) were undertaken in several cross sections of the study site at different times. Secondary currents driven by centripetal acceleration effects were consistently detected in several cross sections, following a procedure specially designed for the ADCP data to project the captured velocity field. Additionally, two pressure gauges were deployed on both sides of the channel, capturing a strong lateral gradient of the free surface in coincidence with the theoretical description of the process.

INTRODUCCIÓN

El estudio de la morfología de los ríos, como agentes modeladores del paisaje, es de primordial importancia desde una óptica socio-económica puesto que, entre otros aspectos relevantes, pocas veces dan origen a canales rectos. Por el contrario, los ríos generalmente desarrollan tipologías de cauces entrelazados o meandriiformes en respuesta a la producción de sedimentos a nivel de cuenca, la pendiente del lecho a escala regional, y a los procesos de erosión de las orillas a escala local. Es evidente, por tanto, que la capacidad de simular los cambios naturales o artificiales que tienen lugar a lo largo de los cauces aluviales constituye el primer paso hacia el diseño eficaz de la mayoría de los proyectos de ingeniería que involucren su uso. Sin embargo, un completo entendimiento de todos los aspectos morfodinámicos del río requiere de un conocimiento preciso sobre una gran variedad de escalas espaciales y temporales que caracterizan cada proceso individual (Dietrich y Whiting, 1989). En consecuencia, la separación –o desacople– de escalas constituye un atajo inevitable en la ciencia aplicada y la ingeniería.

Un proceso donde el flujo y la erosión de las márgenes poseen escalas de tiempo disociadas,

aunque en parte responsables de la morfología final, en el largo plazo, del lecho del río en curvas, es definida por el llamado flujo helicoidal (Rozovskii, 1957; Engelund, 1974; Bathurst et al., 1979; Johannesson y Parker, 1989; Richardson y Thorne, De 1998; Blanckaert y de Vriend, 2004). Las corrientes secundarias o flujo helicoidal se vinculan a escalas locales que dependen del ancho de canal, B , y de la profundidad media del cauce, H . Resulta se que estos flujos exhiben comportamientos diferentes en función de la relación de aspecto $B/H, =\beta$, (Rozovskii, 1957; Yalin, 1992).

Estas corrientes secundarias son motorizadas por las fuerzas centrífugas a las que se ve expuesta el flujo en las curvas de un río, y se consideran relevantes en el proceso de formación del cauce, tanto en planta como en profundidad (Engelund, 1974; Leschziner y Rodi, 1979; de Vriend, 1981), a pesar que algunos autores han desdeñado su papel en los procesos morfológicos del lecho en cauces meandriiformes (Hooke, 1980). Leschziner y Rodi (1979) enfatizaron la necesidad de conocer la mecánica del flujo tridimensional (3D) helicoidal, puesto que su entendimiento en flujos curvos facilita la comprensión de los procesos de sedimentación, así como una mejor ubicación de los canales de navegación, la ubicación de tomas de agua, y la estabilización de las márgenes de los ríos.

El flujo secundario produce una redistribución de las velocidades y de las tensiones de corte sobre el lecho, y de la suspensión del material en curvas de meandros (Blanckaert y Graf, 2004; Dinehart y Burau, 2005a) alterando, según mediciones experimentales, las formas de fondo en canales meandriiformes de laboratorio (Wormleaton et al., 2004; Shiono et al., 2009). A pesar de la existencia de una gran cantidad de datos experimentales de laboratorio sobre los flujos curvos, en particular a partir de los trabajos de Rozovskii (1957), Shiono et al. (1999), y más recientemente, Blanckaert y de Vriend (2004), quienes estudiaron curvas con ángulos centrales y relaciones de aspecto de 180° y 13.33, 60° a 180° y 2.83, y 120° y 3.66, respectivamente, al presente se cuenta con pocos estudios de campo que detallan la estructura de los flujos helicoidales motorizados por fuerzas centrífugas (Tabla 1).

Tabla 1.- Algunos datos de campo de ríos alrededor del mundo.

(1): Bathurst et al. (1979), (2): Dietrich and Smith (1984),
(3): Richardson and Thorne (1998), (4): Dinehart and Burau (2005b),
(5): Szupiany et al. (2007), (6): este estudio

Autor	Río	B [m]	H [m]	β
(1)	Severn, UK	12.0	0.9	13.3
(2)	Muddy Creek, USA	5.2	0.4	13.0
(3)	Brahmaputra, Bangl.*	450.0	6.0	75.0
(4)	Sacramento, USA	130.0	12.0	10.8
(5)	Paraná, Argentina*	850.0	15.0	57.0
(6)	Brazo del río Paraná, Arg.	100.0	8.0	12.5

*La dinámica de estudios de confluencias no es necesariamente manejada por las fuerzas centrífugas (ver, por ej., Best and Roy (1991)).

Actualmente las mediciones con ADCP han ganado gran popularidad y aceptación por sus eficientes estimaciones de las descargas en ríos, desde embarcaciones en movimiento a lo largo de transectas pre-establecidas. Este instrumento no sufre de la mayoría de las incertidumbres inherentes asociadas al uso de otros aparatos, como ser molinetes, etc. En rigor, debido a la versatilidad de uso y precisión de la información, los datos del ADCP son utilizados cada vez más para estudiar la estructura 3D del flujo. La tendencia es repetir pasadas a lo largo de las transectas para resolver las velocidades de las corrientes del flujo débil o flujo transversal (Dinehart y Burau, 2005a, b; Szupiany et al., 2007).

Sin embargo, aquí se establece que cada vez que los efectos centrífugos estén por encima de una intensidad determinada (cuya intensidad parece depender de β , (Yalin, 1992)), la celda de flujo secundario es siempre capturada sin necesidad de promediar mediciones repetidas a lo ancho de una misma transecta, y sin importar si el plano transversal está correctamente orientado (si es estrictamente perpendicular al plano de flujo primario). Además, aquí se establece la co-existencia de la celda de circulación secundaria con un fuerte gradiente lateral de la superficie libre (fenómeno de super-elevación del pelo de agua), en concordancia con la descripción teórica del proceso.

MODELO CONCEPTUAL

La celda de recirculación del flujo en curvas de río es un proceso bien comprendido (Engelund, 1974; Bathurst et al., 1977, 1979). No obstante, se considera apropiado remarcar los aspectos más salientes de las investigaciones realizadas al presente sobre flujos curvos (Rozovskii, 1957; Engelund, 1974). Aspectos más sutiles se pueden consultar en trabajos más elaborados sobre la temática (Johannesson y Parker, 1989; Blanckaert y de Vriend, 2003).

La aproximación de ondas largas sobre la ecuación del movimiento del fluido en la dirección vertical z , permite postular un balance mecánico entre las fuerzas de gravedad y presión, lo que predice una distribución hidrostática de presión, $g + \rho^{-1}\partial p/\partial z \approx 0$, donde g es la aceleración de la gravedad, ρ la densidad y p la presión del líquido. Luego, la circulación transversal en la celda puede ser explicada en términos de un desequilibrio local entre la fuerza centrífuga y el gradiente de presión en sentido transversal.

Con referencia a la Figura 1, si r , θ , y z son las coordenadas cilíndricas en dirección radial, azimutal, y hacia vertical (positiva hacia arriba), respectivamente, se tiene que la componente de velocidad radial, u_r , se establece en planos perpendiculares a la dirección general del flujo, mientras que la componente de velocidad del flujo primario, u_θ , se origina por la aceleración centrífuga (u_θ^2/r) inducida por la curvatura del canal. Luego, y en base a lo planteado por Engelund (1974), las ecuaciones que gobiernan el flujo en curvas de ríos se reduce a

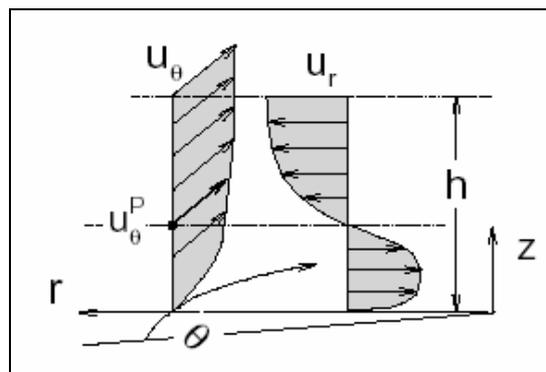


Figura 1.- Esquema de flujo en curva.

$$\frac{\partial(ru_r)}{\partial r} + \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} = 0 \quad (1)$$

$$-g \frac{\partial z_w}{\partial r} + \frac{u_\theta^2}{r} + \varepsilon \frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2} = 0 \quad (2)$$

$$gS + \epsilon \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial z^2} = 0 \quad (3)$$

donde z_w es la elevación de la superficie libre por encima del datum, ϵ es el coeficiente de viscosidad de remolino –la cual se supone constante– y S es la pendiente longitudinal de lecho del cauce que satisface la restricción geométrica $Sr = S_0R$, donde $S = -dz_b/r d\theta$ tal que S_0 representa la pendiente a lo largo del centro del canal en $r = R$. Aquí, z_b es la elevación del lecho por encima del datum de referencia.

La integración directa de la ecuación (3) produce una distribución parabólica para u_θ , la cual fue resuelta por Engelund (1974) después de asumir una velocidad de deslizamiento libre a nivel del lecho. Luego, si analizamos la componente de velocidad u_θ , la misma varía desde cero, o cercana a cero sobre el lecho, hasta un valor máximo en la zona de superficie, siendo los efectos centrífugos mayores sobre la superficie respecto de los del lecho. Esta situación puede observarse en la ecuación (2), dónde la fuerza centrífuga es mayormente contrarrestada por el gradiente de presión radial, el cuál supuestamente está dominado por un equilibrio hidrostático.

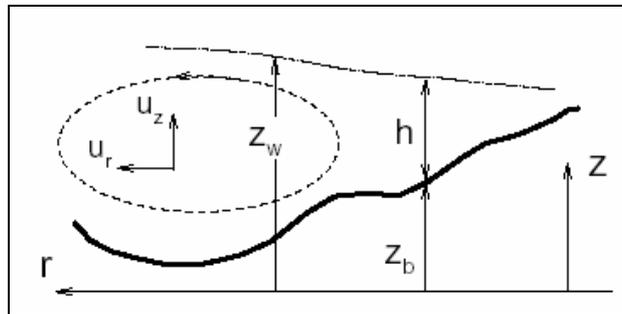


Figura 2.- Fenómeno de super-elevación del pelo de agua.

Por lo tanto, la fuerza de presión radial se manifiesta como un gradiente hidráulico local en dirección radial, $\partial z_w / \partial r$, dando lugar al conocido fenómeno de elevación transversal de la superficie libre (Fig. 2). Está claro que el equilibrio entre ambas fuerzas puede encontrarse solamente en un elemento situado en algún lugar de la parte central de la columna de agua, que se mueve con una velocidad igual a u_θ^P (Rozovskii, , 1957; Falcon, 1984). Para las partículas en movimiento ubicadas en la parte superior de la columna de agua, con velocidad $u_\theta > u_\theta^P$, la fuerza centrífuga será mayor que el gradiente de presión hidrostática por lo que estas partículas se moverán en dirección radial, lejos del centro de curvatura. Por el contrario, las partículas situadas en la parte inferior de la columna de agua, para las cuáles $u_\theta < u_\theta^P$, serán desplazadas hacia el centro de curvatura (Fig. 1). En base a lo explicado hasta aquí, la componente vertical de la velocidad u_z se desarrollará simultáneamente con la componente radial por razones de continuidad de la masa. De esta forma, el campo de velocidades adopta un complejo patrón 3D, helicoidal, a lo largo de las curvas de meandros del río (Engelund, 1974; Bathurst et al., 1979). Esta descripción es debida a Rozovskii (1957), y posteriormente fue revisada por Engelund (1974) y Johannesson y Parker (1989).

Las dificultades que se plantean al momento de la captura de la información durante el relevamiento de campo están asociadas a la existencia de un flujo turbulento, altamente irregular y por tanto muy lejos de la uniformidad, y a una geometría del lecho alejada de lo

que se conoce como secciones prismáticas.

SITIO DE ESTUDIOS

Se llevaron a cabo mediciones sistemáticas de campo en la desembocadura del río Colastiné, en el tramo exterior del Canal de Acceso al Puerto de Santa Fe. En dicho lugar el flujo diverge a 90° aproximadamente, hacia ambos lados de la desembocadura del río Colastiné, dando lugar a una bifurcación en forma de T (Fig. 3). Este canal, excavado artificialmente a principios del siglo XX, vincula el puerto de la Ciudad de Santa Fe con el cauce del río Paraná. Debido a la configuración en planta descrita, el flujo del río Colastiné experimenta un giro agudo en la entrada del canal, lo que lo genera efectos inerciales apreciables debido a las fuerzas centrípetas.

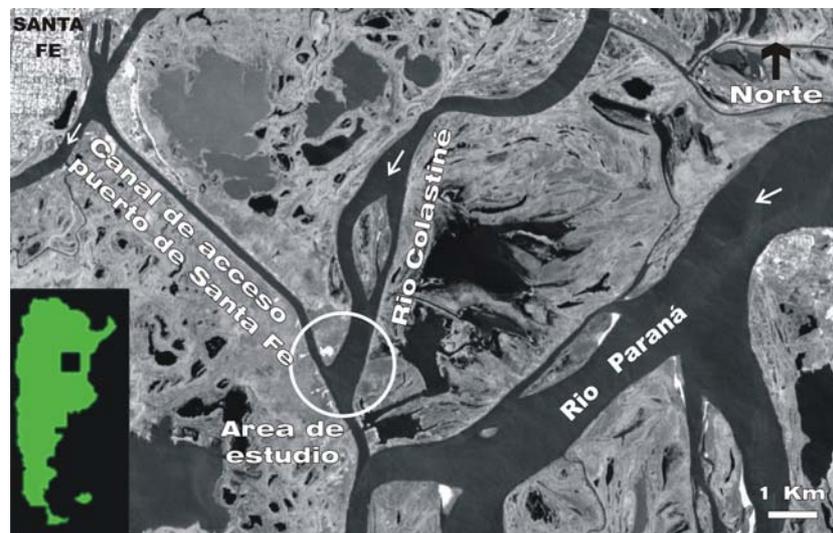


Figura 3.- El área de estudio se ubica a $31^\circ43'$ latitud sur y $60^\circ40'$ longitud oeste.

El sitio de estudio forma parte del sistema aluvial del río Paraná, el cual presenta una pendiente superficial del orden de $[3-5] \times 10^{-5}$. El lecho del canal de acceso está compuesto por arenas finas y medias, y sus márgenes están constituidas por arcillas y limos de unos 4–6 m de espesor, por encima de las arenas gruesas del Paraná.

RECOLECCIÓN DE DATOS

En lo concerniente a la captura de datos de velocidad y al relevamiento batimétrico, se efectuaron mediciones sistemáticas en el sitio de estudio desde el año 2004, mayormente en condiciones de aguas bajas y medias (Tabla 2). El equipamiento utilizado fue un ADCP SonTek River Surveyor de 1000 kHz, montado a un lado de una embarcación de 6,4 m de longitud, y conectado a un sistema diferencial de posicionamiento global (DGPS). Durante las mediciones se emplearon diferentes tamaños de celdas y promedios de intervalos, según se indica en la Tabla 2.

Tabla 2.- Resumen de mediciones a la entrada del canal de acceso al puerto de Santa Fe.

Año	z_w^* [m]	Q [m^3/s]	V [m/s]	Δz [m]	Δt [s]
2004	11.35	856 ± 78	0.75	0.90	10
2006	11.56	904 ± 30	0.81	0.50	5, 10

2007	12.33	614±38	1.54	1.10	10
2008	10.83	659±22	1.18	0.75	10
2009	10.75	-	-	-	-

z_w^* : altura hidrométrica medida en el puerto de Santa Fe, Q : caudal medio, V : velocidad media de la embarcación, Δz : tamaño de celda, y Δt : intervalo de muestreo.

El ADCP posee limitaciones operacionales debidas a su arquitectura, las cuales imposibilitan la captura de información cerca del lecho, en las orillas, y en las proximidades de la superficie libre. Para el presente caso, el ADCP registra profundidades comprendidas entre 1.2 m y 40.0 m, y un rango de altura de celda entre 0.25m y 5.0m, con una región ciega sobre la superficie y el fondo de aproximadamente 0.7m, en la que no se pueden obtener datos. En consecuencia, el equipo fue configurado para relevar la primer medición a una distancia mínima de 1m por debajo del pelo de agua [0.7 m (zona sin mediciones) + 0.2 m (inmersión del dispositivo ADCP) + $\Delta Z/2$]. Con esta configuración, la distancia no medida en la capa superior (cerca de la superficie libre), más la distancia no medida en la capa inferior (en las proximidades del lecho del río) representa un 55% y 15% de la profundidad total del agua en las columnas situadas en zonas poco profundas y profundas, respectivamente. Sin embargo, como se verá más adelante, la región de la sección transversal medida por el ADCP, permitió capturar las celdas de circulación secundaria.

En forma conjunta, las batimetrías y mediciones de velocidades se realizaron aplicando la metodología de la embarcación en movimiento. Para el relevamiento batimétrico se empleó una ecosonda Raytheon de 210 kHz, en combinación con la función Bottom Track del ADCP, para obtener la velocidad de la embarcación y la profundidad con mayor precisión. Además, se usó un segundo puerto serie para coleccionar señales de entrada del DGPS, los cuales fueron almacenados en la computadora de la embarcación durante las mediciones. Los datos geográficos fueron convertidos a coordenadas Posgar – Gauss Krugger, considerando que la brújula interna del ADCP y el sensor de inclinación (roll/pitch) hacen referencia a las componentes de velocidades del agua en términos de coordenadas Este-Norte-Arriba (ENU).

Debido a la existencia de una guías, y recomendaciones referidas a la utilización del ADCP (Muste et al. 2004, Szupiany et al. 2007), se omiten aquí los detalles de los ajustes operacionales del ADCP efectuados durante los trabajos de campo.

El brusco cambio de dirección que experimenta el flujo a la entrada del Canal de Acceso proporciona un excelente escenario para detectar corrientes secundarias. Consecuentemente, mediciones exploratorias fueron llevadas a cabo el 4 de Noviembre del 2004, midiéndose entonces unas pocas transectas orientadas aproximadamente en forma perpendicular a la dirección principal del flujo (Fig. 4).

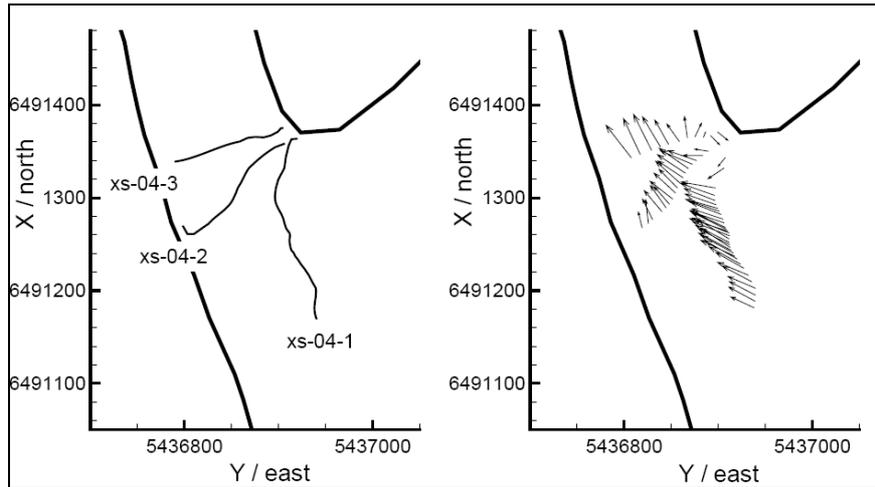


Figura 4.- Izquierda: ubicación de las secciones transversales medidas el 4 de Noviembre de 2004; Derecha: campo de velocidades promediadas en la vertical. Separación de flujo en la margen interna.

El procesamiento de los primeros datos relevados en esa campaña permitió detectar celdas de corrientes secundarias. Con estos resultados en mano, se ejecutó una segunda campaña luego de ubicar con mayor precisión los sectores de interés para la recolección de datos. En la campaña del 27 de Abril de 2006, cada sección transversal medida fue seleccionada de antemano siguiendo radios que partían de un centro virtual de curvatura, definido por un círculo ubicado en la margen interior de la curva. De esta manera, la embarcación siguió el trazado de las secciones transversales radiales prefijadas puesto que su trayectoria fue mapeada a bordo, en tiempo real, con la ayuda del DGPS.

Es sabido que es poco probable que una pequeña embarcación pueda transitar en forma transversal una fuerte corriente siguiendo un recorrido recto. Por tanto, el camino relevado es por lo general irregular, resultado de la acción de varios agentes o factores (Muste et al., 2004). Además del arrastre de la corriente y del viento, otro factor que afecta la calidad de los datos relevados se relaciona con el retraso en la reacción del timonel (hay un desfase entre que el tiempo que se detecta la trayectoria real de la embarcación con el receptor DGPS, y el instante que se percibe la corrección del rumbo). Para ser específicos, las mediciones del 2006 adolecieron de deriva lateral de unos $\pm 45\text{m}$ de la traza predeterminado (Fig. 5), mientras que los datos tomados en el 2007 resultaron inapropiados para capturar celdas de flujo secundario. En este último caso, debido en parte a que otra persona timoneaba la embarcación, a diferencia del experimentado timonel que operó la embarcación durante las campañas de los años 2004 y 2006, y en parte porque el ancho de la celda resultó ser demasiado grande (ver Tabla 2). El resultado inapropiado de los datos puede explicarse en términos simples; durante el período de tiempo comprendido en el intervalo de muestreo, el ADCP perfila la columna de agua cientos de veces, de esta forma, los datos son promediados y asignados al centro en la dirección vertical, y el punto medio de la distancia recorrida Δs , ubicado entre el tiempo t y el tiempo $t + \Delta t$, estimado con la expresión $\Delta s \approx V\Delta t$, donde V es la velocidad de la embarcación (Tabla 2). Así, para un Δt fijo, a mayor V se tiene un ancho de celda mayor, y en consecuencia, un número menor de columnas por sección transversal, en contraposición a una V menor que produce más celdas de menor ancho. Además, el caudal medido durante la campaña de 2007 fue menor a lo esperado dada la hidrología registrada en esos días (Tabla 2). En consecuencia, los datos tomados el 3 de Mayo del 2007 no fueron considerados en este trabajo.

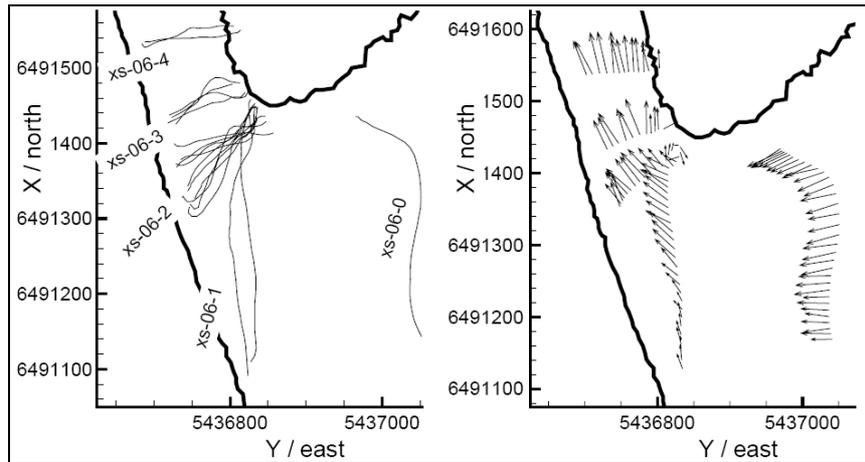


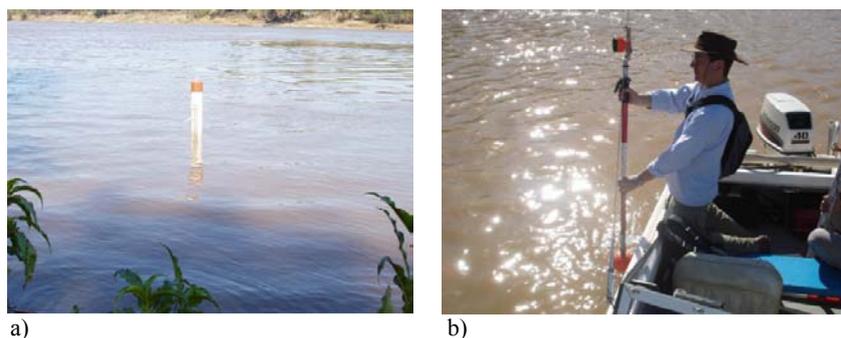
Figura 5.- Izquierda: ubicación de las secciones transversales relevadas el 27 de Abril de 2006; Derecha: campo de velocidades promediadas en la vertical. Separación de flujo en la margen interna.

En lo que respecta a las mediciones de la superficie libre, el 8 de Agosto del 2008 y el 19 de Marzo de 2009 se realizaron dos campañas, con el fin de captar la sobre-elevación transversal de la superficie libre inducida por la curvatura del flujo. Para la detección de este fenómeno se seleccionaron las transectas próximas a las xs-04-02 y xs-06-02 (Figs. 4 y 5, respectivamente), dado que ahí se encontraron previamente fuertes circulaciones secundarias.

Durante el trabajo de campo del año 2008, se midieron alturas de nivel de pelo de agua en dos puntos situados a 1,5 m de la margen exterior e interior de la costa, con un nivel topográfico (TL) Pentax AL-320 y un sistema cinemático diferencial de posicionamiento global en tiempo real Leica (RTK DGPS). En dichos puntos, se instalaron dos sensores de nivel de agua, los cuales se conformaron con un transductor de presión con una precisión de $\pm 1\text{mm}$ con el objetivo de registrar los cambios en la elevación de la superficie de agua durante todo el trabajo de campo. Ambos sensores fueron georreferenciados con el RTK DGPS y ubicados en el interior de tubos de PVC de 10 cm de diámetro perforados para aislar las mediciones de las perturbaciones del viento y del tráfico de embarcaciones (Fig. 6a). El RTK DGPS también fue utilizado para referenciar las mediciones de velocidad, donde se seleccionaron seis secciones transversales a lo largo de la curva. Sin embargo, los datos de velocidad no han sido aún procesados. De los relevamientos de los años 2008 y 2009, sólo se procesaron hasta la actualidad los gradientes laterales de la superficie libre.

Durante el trabajo de campo del año 2009 se hicieron lecturas simultáneas de la elevación de la superficie de agua en varios puntos a lo largo de la transecta. Las mediciones se llevaron a cabo con una estación total (Pentax PCS-515) y un nivel topográfico Pentax AL-320. En el extremo inferior de la mira-prisma, se colocó una boya plástica con el fin de minimizar los errores sistemáticos en el posicionamiento de la superficie libre (Fig. 6b). Con el fin de determinar la mejor orientación de la sección transversal, supuestamente perpendicular a la dirección del flujo principal, se contó con dos flotadores de PVC de 1,8 m de largo y de 5 cm de diámetro, equipados con tecnología Bluetooth GPS (Garmin 10X). Estos dispositivos se utilizaron para identificar la trayectoria y velocidad media en la vertical de las partículas en la curva o zona de giro brusco en la entrada del canal de acceso. Estos flotadores permitieron registrar datos de coordenadas de GPS (2 segundos de intervalo) en una PC portátil (con comunicación Bluetooth de hasta 100 m de alcance) mediante el uso de un software de navegación estándar. Los flotadores se liberaron unos 100 metros aguas arriba de la

bifurcación del río Colastiné y el Canal de Acceso.



a)

b)

Figura 6.- Medición de la superficie libre a lo largo de la transecta.

a) Sensores de presión emplazados en ambas márgenes.

b) Uso del prisma y estación total (Pentax PCS-515)

RESULTADOS

Ocasionalmente, los resultados publicados por algunos investigadores parecen ser vagos y abiertos a diferentes interpretaciones (Rhoads y Kenworthy, 1998, 1999, Lane et al., 1999, 2000). Es así que la gran mayoría de los investigadores recurren al Método de Rozovskii (Bathurst et al., 1977; Rhoads y Kenworthy, 1999; Szupiany et al., 2007). Dinehart y Burau (2005a), basaron su metodología en dos etapas: en primer lugar, proyectaron los datos de velocidad obtenidos del ADCP sobre un plano transversal, en segundo lugar, utilizaron la información de retrodispersión del instrumento –asociado al contenido de sedimentos en suspensión– para alinear los planos de proyección.

Por su parte, el método Rozovskii conlleva una rotación del vector de velocidad planar con respecto a la dirección del vector de velocidad promediado en profundidad (véase, por ej., Bathurst et al. (1977)). Este método depende de que el caudal secundario neto en la vertical sea cero, una condición útil para cerrar el problema matemático planteado por las ecuaciones (1) - (3) (Engelund, 1974; Johannesson y Parker, 1989), aunque poco realista en situaciones prácticas puesto que la conservación de la masa es, en rigor, una restricción 3D. Esa es la razón por la cual la celda de circulación secundaria es mejor conocida como *flujo helicoidal*, ya que ninguna partícula líquida permanece en el plano transversal cuando es transportada aguas abajo por el flujo primario (Dietrich y Smith, 1983).

El resultado del método de Rozovskii, en cualquiera de los perfiles verticales, debe ser visto como el exceso (o déficit) de la componente de velocidad radial en relación con el valor promediado en la vertical analizada (Leschziner y Rodi, 1979; Blanckaert y de Vriend, 2003), contrario al enfoque adoptado aquí, donde se realiza la descomposición planar 2D (promediada en la profundidad) y 3D en las componentes: tangencial (a lo largo del plano transversal), normal (a lo largo del plano de la corriente), y hacia arriba de la velocidad absoluta con respecto al lecho, calculada a partir de los datos capturados del ADCP.

PROYECCIONES DE LOS DATOS EN 2D

El software RiverSurveyor (SonTek/YSI Inc., 2004) maneja datos promediados en profundidad de la transecta medida sin requerir procesamiento adicional. Sin embargo, luego de la conversión de las posiciones geográficas a coordenadas TM (Gaus-Kruger), la información puede ser fácilmente exportada a imágenes satelitales georeferenciadas del sitio de estudio, para mejor interpretación de los resultados. Las Figuras 4 y 5 (derecha) muestran el campo de velocidades promediadas en la profundidad medidos durante las campañas del 2004 y 2006, respectivamente, donde se puede observar la separación del flujo aguas abajo en la punta de la margen interior. Esta separación puede alterar el tamaño y la forma de la celda de circulación secundaria.

PROYECCIONES DE LOS DATOS EN 3D

Los datos relevados a lo largo de las transectas fueron levantados tanto en coordenadas geográficas como en coordenadas ENU. Los datos de velocidad del flujo 3D fueron filtrados y exportados en archivos de hoja de cálculo escrito en formato ASCII, con la ayuda del programa ViewADV (SonTek/YSI Inc., 2004). Estos archivos fueron posteriormente procesados con un código escrito en Fortran 95 para obtener los componentes del campo de velocidades del flujo transversal. La primera versión del código desarrollado incluye: (1) conversión de coordenadas geográficas a TM, (2) identificación de valores extremos en los datos, (3) generación de coordenadas locales a lo largo del plano transversal, incluyendo la reconstrucción de la batimetría del lecho.

Las coordenadas locales ENU se obtienen a partir de un plano tangente a la superficie de la Tierra en el sitio de estudio. Contrariamente a la convención habitual que designa al este con x , y al norte con y , el programa RiverSurveyor mide el movimiento del agua en tres dimensiones con x (norte), y (este), y z (arriba). Luego, siempre y cuando los datos recogidos sean corregidos por el sesgo de la declinación magnética, las coordenadas TM (Gauss-Kruger) y ENU son totalmente compatibles, con la componente vertical apuntando hacia arriba, en la dirección opuesta a la aceleración de la gravedad. Para las coordenadas Gauss-Kruger de la RA, el origen de la proyección es el Polo Sur con un norte cero. Estrictas aplicaciones de las fórmulas de TM, con latitudes sur negativas, resultan en la derivación de un este y norte correcto. Por lo tanto, se puso en práctica un módulo con el nuevo Sistema Geodésico Mundial (WGS 84) como sistema de referencia, adoptando las fórmulas TM dadas por Snyder (1926). Luego, un enfoque similar al propuesto por Dinehart y Burau (2005a) fue adoptado para la proyección de los datos 3D. La ubicación del plano de proyección fue determinada por la trayectoria media seguida por la embarcación durante las mediciones. Las componentes tangenciales y normales se calcularon para cada perfil sobre el plano medio. Por último, ambas componentes, tanto tangencial como normal, definen el movimiento del flujo transversal proyectado a lo largo de un plano medio. Las Figuras 7 y 8 muestran la celda de movimiento secundario capturada durante las campañas de los años 2004 y 2006.

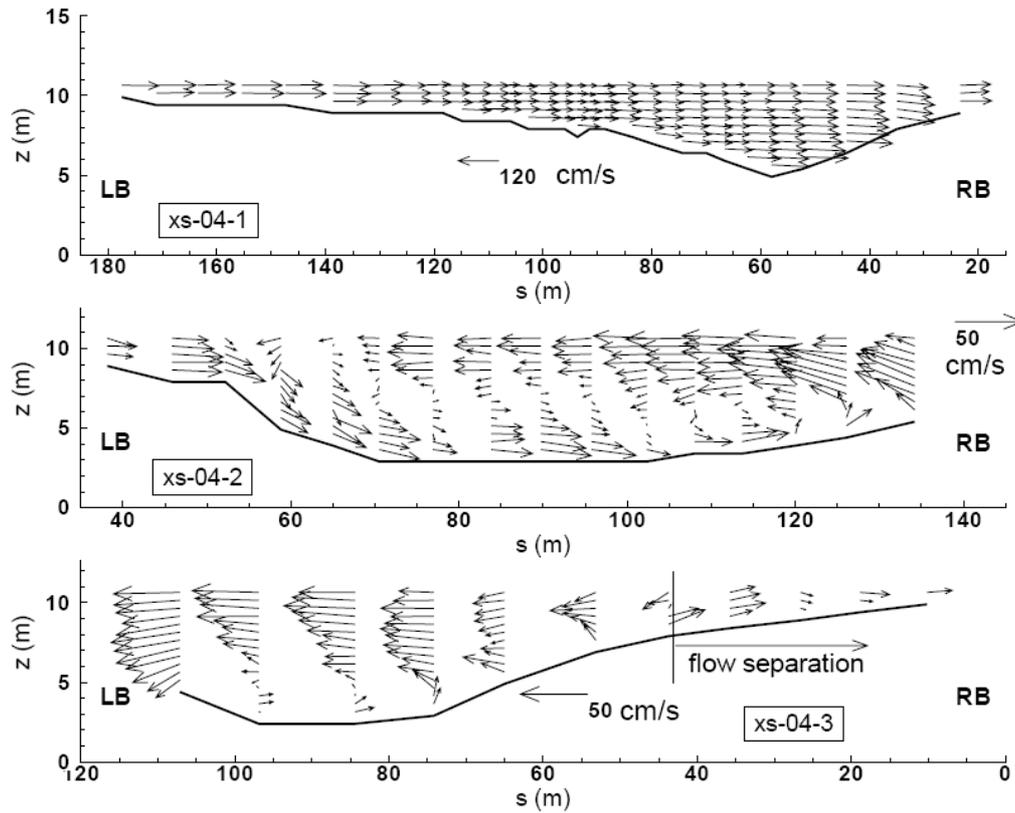


Figura 7.- Velocidades transversales en la sección transversal medidas en Noviembre de 2004.

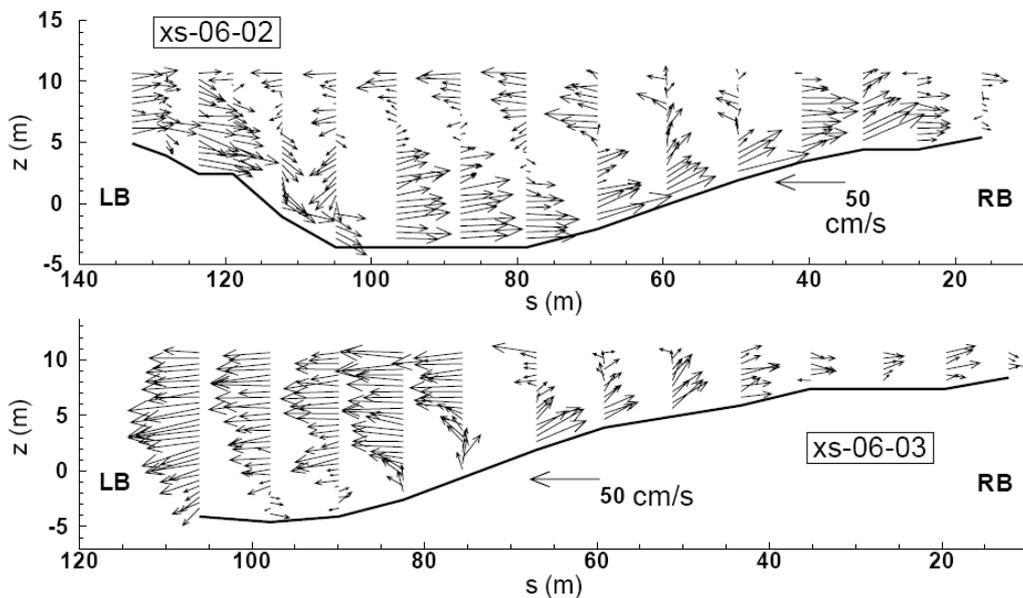


Figura 8.- Velocidades transversales en la sección transversal medidas en Abril de 2006.

En base a lo observado en las figuras anteriores, es notable destacar la intensidad de la circulación secundaria detectada, con velocidades transversales del orden de 0.50 ms^{-1} , aproximadamente el 50% de la componente primaria del flujo. Por otra parte, aguas arriba de las secciones xs-04-02 y xs-06-02, respectivamente (Figs. 4 y 5), la aceleración y desaceleración longitudinal del flujo tienen lugar en las márgenes interior y exterior,

respectivamente, estableciéndose un flujo unidireccional en la dirección transversal desde la región exterior hacia de interior por razones de continuidad, o de conservación de la masa. Este fenómeno es bien capturado por la proyección del flujo transversal en la sección xs-04-01 (parte superior de la Fig. 7).

Por último, las diferentes configuraciones del ADCP, en lo referido a los parámetros y valores (como la velocidad de la embarcación), ya sean establecidos y/u obtenidos durante los trabajos de campo, intervienen en la captura de los campos de velocidad en 3D. Haciendo caso omiso a las variaciones en la hidrología de los ríos, la celda de circulación secundaria medida en el trabajo de campo durante el año 2006 (Fig. 8), muestra las fluctuaciones más bien ausentes de su homólogo capturado en 2004. La gran diferencia entre los dos relevamientos reside en el tamaño de las celdas empleadas (Tabla 2). Además, los datos capturados con un $\Delta t=5s$, durante la campaña del 2006 (que aquí no se muestran), se consideraron muy ruidosos para su procesamiento. Es evidente entonces la influencia del tamaño de celda y el intervalo promedio, y en menor medida, la velocidad de la embarcación. Estos parámetros resultan críticos a la hora de intentar capturar datos de velocidades en cauces pequeños.

DATOS DE SUPERFICIE LIBRE

Durante los trabajos de campo del 2008 se registraron diferencias de elevación de la superficie libre, del orden de 2.3cm a 7 cm entre las márgenes externa e interna, las cuales fueron observadas mediante la utilización de DGPS RTK y TL, respectivamente. Como era de esperar, la elevación más alta correspondió a la margen externa, tal como lo predice la teoría (Fig. 2). Las diferencias observadas, de aproximadamente 4.15 cm en promedio entre ambas metodologías, fueron mayores que las variaciones de nivel de agua registradas en cada lugar (de un rango de 1.2 cm), y no pueden ser explicada por efecto del viento u oleaje debido al tráfico de embarcaciones, al menos en el período de tiempo de las mediciones de campo (Fig. 9). Si bien el DGPS RTK presentó un importante error en los valores de elevación, con una incertidumbre estimada en $\pm 2,5$ cm, las mediciones de TL (± 1 cm) sugieren que el fenómeno de super-elevación se estableció, efectivamente, a lo largo de la sección transversal xs-06-2, donde anteriormente fue detectada una celda de circulación secundaria (Figs.7 y 8).

Datos de campo relevados en el año 2009, obtenidos en una condición hidrodinámica similar (ver los valores de z_w en la Tabla 2), revelaron una diferencia de 4.2 cm en la elevación de la superficie del agua entre las dos márgenes, las cuales están separadas por una distancia de 163 m. Esta diferencia crece hasta los 6,4 cm entre la margen exterior y el centro del canal de navegación, obteniéndose de esta manera una pendiente transversal de $2,6 \times 10^{-4}$ (de un orden de magnitud superior a la pendiente longitudinal). Este resultado no sólo confirma la existencia del fenómeno de sobre-elevación del pelo de agua en coincidencia con una celda de circulación secundaria, sino también la formación de un particular perfil con forma de *S* de la superficie del agua en la dirección transversal. Esto es, altos niveles de agua en la margen externa, seguida por la profundización de los niveles hacia el centro del canal, para finalmente ganar algo de altura en la margen interna (datos no publicados). La separación del flujo, observada en las proximidades de la margen interna, no sólo altera la forma y tamaño de la celda de circulación secundaria, sino también la distribución lateral del perfil en forma de *S* de la superficie del agua.

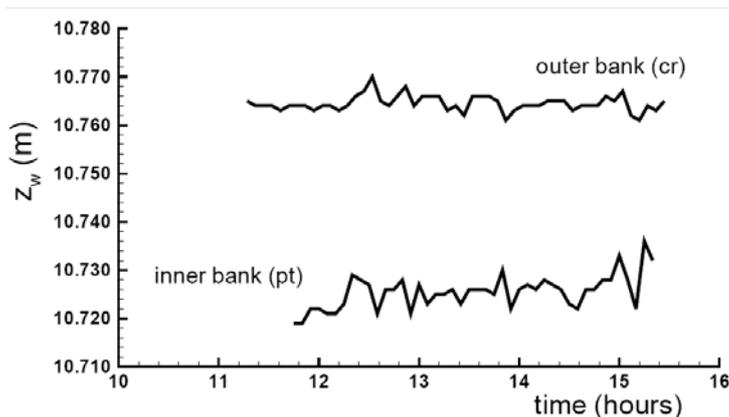


Figura 9.- Variaciones de la superficie libre (intervalo de 5 min.) en ambas márgenes registradas el 8 de Agosto de 2008; *cr* se refiere a varilla capacitadora, *pt* a sensor de presión, y Z_w a la cota de nivel del sistema de referencia de la Argentina, mantenida por el Instituto Geográfico Militar (IGM).

CONCLUSIONES

Trabajos previos enfatizaron el papel esencial que juega el parámetro β en la explicación de la circulación secundaria en las curvas de los ríos (otro parámetro crítico no mencionado aquí es la relación entre el radio y el ancho). El valor de β que caracteriza al presente estudio no sólo está en sintonía con otros valores publicados correspondientes a otros ríos del mundo, donde la circulación secundaria fue particularmente establecida y observada (Tabla 1), sino que también se encuentra en correspondencia con el trabajo experimental de Rozovskii (1957), quién utilizó $\beta = 13.3$.

Los datos de velocidades presentados, recogidos durante los trabajos de campo de los años 2004 y 2006, muestran un gran desarrollo primero y un paulatino decaimiento del movimiento helicoidal del flujo aguas abajo. En la entrada del canal, un movimiento radial unidireccional hacia el interior de la curva prevalece por razones explicadas en términos de inercia y continuidad.

Se estableció entonces que, cada vez que los efectos centrífugos predominen sobre otros procesos actuantes sobre el flujo, es posible capturar la celda de corriente secundaria con la metodología actual, sin necesidad de promediar los datos obtenidos con el ADCP en repetidas pasadas, y sin importar si el plano transversal no se encuentra correctamente orientado. El fenómeno de super-elevación del pelo de agua fue asimismo capturado en la misma sección transversal donde una celda de circulación secundaria fue detectada previamente, en correspondencia con la descripción teórica del problema. Por último, los parámetros críticos que deben tenerse en cuenta en la promediación de datos, bajo la metodología de embarcación en movimiento, son el tamaño de celda, el intervalo de muestreo y la velocidad de la embarcación.

Agradecimientos. Se agradece a José Huespe, Guillermo Contini y Mario Gardiol, expertos en el uso del equipamiento de campo. Esta investigación ha sido posible, en parte, gracias a la asistencia financiera del CONICET y al contrato de investigación UNL-CORIPA SA .505.310.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bathurst, J. C., C. R. Thorne, and R. D. Hey** (1977). "Direct measurements of secondary currents in river bends", *Nature* 269(5628), 504.506.
- Bathurst, J. C., C. R. Thorne, and R. D. Hey** (1979). "Secondary flow and shear stress at river bends". *J. Hydraul. Div.* 105(10), 1277.1295.
- Best, J. L. and A. G. Roy** (1991). "Mixing-layer distortion at the confluence of channels of different depth". *Nature* 350(6317), 411.413.
- Blanckaert, K. and H. J. de Vriend** (2003). "Nonlinear modelling of mean flow redistribution in curved open channels". *Water Resources Res.* 39(12), 1375.1388.
- Blanckaert, K. and H. J. de Vriend** (2004). "Secondary flow in sharp open-channel bends". *J. Fluid Mech.* 498, 353.380.
- Blanckaert, K. and W. H. Graf** (2004). "Momentum transport in sharp open-channel bends". *J. Hydr. Engrg.* 130(3), 186.198.
- De Vriend, H. J.** (1981). "Velocity distribution in curved rectangular channels". *J. Fluid Mech.* 107, 423.439.
- Dietrich, W. E. and J. D. Smith** (1983). "Influence of the point bar on flow through curved channels". *Water Resources Res.* 19, 1173.1192.
- Dietrich, W. E. and J. D. Smith** (1984). "Bed load transport in a river meander". *Water Resources Res.* 20(10), 1335. 1380.
- Dietrich, W. E. and P. J. Whiting** (1989). "Boundary shear stress and sediment transport in river meanders of sand and gravel". In S. Ikeda and G. Parker (Eds.), *River Meandering*, pp. 1.50. *Water Resources Monograph*, 12:AGU.
- Dinehart, R. L. and J. R. Burau** (2005a). "Averaged indicators of secondary flow in repeated acoustic Doppler current profiler crossings of bends". *Water Resources Res.* 41. (W09405, doi:10.1029/2005WR004050).
- Dinehart, R. L. and J. R. Burau** (2005b). "Repeated surveys by acoustic doppler current profiler for flow and sediment dynamics in a tidal river". *J. Hydrol.* 314, 1.21.
- Engelund, F.** (1974). "Flow and bed topography in channel bends". *J. Hydraul. Engrg.* 100(11), 1631.1648.
- Falcon, M.** (1984). Secondary flow in curved open channels. *Ann. Rev. Fluid Mech.* 16, 179.193.
- Hooke, R. L.** (1980). "Shear-stress distribution in stable channel bends". *J. Hydraul. Eng* 106(7), 1271.1272. (Discussion).

Johannesson, H. and G. Parker (1989). “Linear theory of river meanders”. In S. Ikeda and G. Parker (Eds.), *River Meandering*, pp. 181.214. *Water Resources Monograph*, 12: AGU.

Lane, S. N., K. F. Bradbrook, K. S. Richards, P. M. Biron, and A. G. Roy (1999). “Time-averaged flow structure in the central region of a stream confluence: a discussion”. *Earth Surf. Process. Landforms* 24, 361.367. (Short communication).

Lane, S. N., K. F. Bradbrook, K. S. Richards, P. M. Biron, and A. G. Roy (2000). “Secondary circulation cells in river channel confluence: measurement artefacts or coherent flow structures”. *Hydrolog. Process.* 14, 2047.2071.

Leschziner, M. A. and W. Rodi (1979). “Calculations of strongly curved open channel flow”. *J. Hydraul. Engrg.* 105(10), 1297.1314.

Muste, M., K. Yu, and M. Spasojevic (2004). “Practical aspects of adcp data use for quantification of mean flow characteristics; part i: moving-vessel measurements”. *Flow Meas. Instrum.* 15, 1.16.

Rhoads, B. L. and S. T. Kenworthy (1998). “Time-averaged flow structure in the central region of a stream confluence”. *Earth Surf. Process. Landforms* 23, 171.191.

Rhoads, B. L. and S. T. Kenworthy (1999). “On secondary circulation, helical motion and rozovskii-based analysis of time-averaged two-dimensional velocity fields at confluences”. *Earth Surf. Process. Landforms* 24, 369.375. (Short communication).

Richardson, W. R. and C. R. Thorne (1998). “Secondary currents around braid bar in brahmaputra river: Bangladesh”. *J. Hydraul. Eng* 124(3), 325.328.

Rozovskii, I. L. (1957). “Flow of water in bends of open channels (in Russian)”. *Israel Program for Sci. Transl.*, Jerusalem, 1961: Izd. Akad. Ukr. SSR, Kiev, 1957.

Shiono, K., T. L. Chan, J. Spooner, P. Rameshwaran, and J. H. Chandler (2009). “The effect of floodplain roughness on flow structures, bedforms and sediment transport in meandering channels with overbank flows: Part I”. *J. Hydraul. Res.* 47(1), 5.19.

Shiono, K., Y. Muto, D. W. Knight, and A. F. L. Hyde (1999). “Energy losses due to secondary flow and turbulence in meandering channels with overbank flows”. *J. Hydraul. Res.* 37(5), 641.663.

Snyder, J. P. (1926). *Map projections - a working manual*. Professional paper 1395, U.S.G.S., Washington DC 20402.

SonTek/YSI Inc. (2004). “RiverSurveyor System Manual, Software version 4.10”. Sand Diego, CA, USA: Son-Tek/YSI Inc.

Szupiany, R. N., M. L. Amsler, J. L. Best, and D. R. Parsons (2007). “Comparison of fixed- and moving-bessel flow measurements with an adp in a large river”. *J. Hydraul. Engrg.*

133(12), 1299.1309.

Wormleaton, P. R., R. H. J. Sellin, T. Bryant, J. H. Loveless, R. D. Hey, and S. E. Catnur (2004). "Flow structures in a two stage channel with a mobile bed". *J. Hydraul. Res.* 42(2), 145.162.

Yalin, M. S. (1992). "River mechanics". *Oxford, UK: Pergamon Press Ltd.* (in French).