

ESTRUCTURA DEL FLUJO Y MORFOLOGÍA EN DOS CONFLUENCIAS AGUAS ABAJO DE ISLAS EN EL RÍO PARANÁ

Ricardo N. Szupiany¹, Mario L. Amsler¹, Daniel R. Parsons², James L. Best³ y Robert Haydel⁴

¹Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, UNL, Santa Fe, 3000, Argentina. E-mail: rszupian@fich1.unl.edu.ar, mamsler@fich1.unl.edu.ar.

²Earth and Biosphere Institute, School of Earth and Environment, University of Leeds, Leeds, LS2 9JT, UK. E-mail: parsons@earth.leeds.ac.uk

³Departments of Geology and Geography and Ven Te Chow Hydrosystems Laboratory, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, 61801, Illinois, USA. E-mail: jimbest@uiuc.edu

⁴Department of Civil and Environmental Engineering and Department of Geology, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Illinois, 61801, USA. E-mail: rahcl@yahoo.com

RESUMEN

Los bancos e islas y su asociada división-confluencia del flujo resultan claves para el comportamiento morfodinámico de ríos entrelazados. Sin embargo, los estudios en estas zonas son escasos o han sido realizados en pequeños cauces naturales o en laboratorio con bajas relaciones ancho/profundidad (W/D). En el presente trabajo se investiga la influencia de la escala en la morfología y estructura del flujo en dos confluencias asimétricas producidas por islas en el Río Paraná, donde la relación W/D es relativamente alta (~100). Los resultados indican que la distribución de caudales en la sección transversal de las corrientes que convergen controla significativamente el flujo y morfología, siendo éste el factor más importante comparado con la relación de caudales (o de momentos) entre los flujos convergentes, habitualmente usada para explicar este comportamiento en pequeñas confluencias. Finalmente, celdas de circulación secundaria de sentido inverso, comúnmente ocupando gran parte del ancho de la sección en confluencias de pequeños cauces, se identificaron en este caso solo en una pequeña porción del ancho.

ABSTRACT

Mid-channel bars and their associated confluences are key nodes in the morphodynamics of braided rivers. Past studies have concentrated on investigating the morphodynamics of small natural systems or laboratory models with low widths/depths (W/D) ratios. This paper investigates the influence of scale through detailing the morphology and flow structure at two large bar-confluences in the Río Paraná (Argentina), where the W/D ratios are relatively high (~100). The results highlight the significant control of the cross-sectional upstream distribution of discharges on confluence flow and morphodynamics, also indicating that this factor becomes increasingly important with channel scale, compared with the simple discharge (or momentum) ratios between the incoming flows, which are commonly used to explain observed flows in smaller confluences. Finally, counter-rotating surface-convergent secondary flow cells, often known to occupy the entire width in small confluences, are only identified in a relatively small portion of the channel width at these larger scales.

INTRODUCCIÓN

En los últimos 20 años, ha crecido notoriamente el interés científico en la dinámica fluvial en zonas de confluencias, estrechamientos y expansiones de corrientes aluviales. Trabajos recientes demostraron que las condiciones hidrodinámicas en estas zonas están caracterizadas por una variedad de estructuras coherentes del escurrimiento que pueden generar distintos patrones en la distribución del sedimento, procesos erosivos y sedimentaciones y, por lo tanto, características morfológicas particulares.

Bristow y Best (1993) presentaron una revisión de los trabajos realizados en estas unidades. Encontraron que el énfasis se centró en la hidrodinámica y morfología en confluencias, mientras que la relación de éstas con las subsiguientes zonas de expansión-bifurcación típicas en ríos entrelazados ha sido menos tratada. Por tal motivo, poco se conoce sobre la dinámica

morfológica en las unidades confluencia-bifurcación y, menos aun, qué rol juegan las estructuras coherentes del flujo en estas zonas.

Estudios de campo en confluencias de pequeños cauces naturales, laboratorio y, en menor medida, simulaciones numéricas, todos con relaciones ancho/profundidad pequeños, han documentado la existencia de las siguientes características del flujo (Komura 1973; Mosley, 1982; Ashmore y Parker 1983; Best 1986, 1987, 1988; Rhoads 2005): a) estancamiento del flujo inmediatamente aguas abajo de la punta de la confluencia, b) una capa de corte y una interfase de mezcla en la combinación de los dos flujos, c) separación del flujo aguas abajo de la punta de la confluencia y en las caras de aguas abajo de los escalones de los tributarios en la boca de la confluencia, d) corrientes secundarias en la zona de convergencia del flujo asociada a su curvatura, e) aceleración del flujo cuando se unen los dos tributarios, y f) recuperación del flujo aguas abajo de la confluencia. También se ha demostrado que esta configuración del escurrimiento está relacionada con la siguiente configuración morfológica del fondo: i) erosión central, ii) escalones en la boca de cada tributario que caen abruptamente en la zona de erosión, iii) depositación de sedimento en la punta de la confluencia, y iv) formación de bancos en la zona de separación del flujo. A su vez la forma, localización y magnitud de las estructuras del flujo y la morfología del cauce están íntimamente relacionados o controlados por el ángulo de confluencia entre ambos tributarios, la asimetría en planta (forma en Y o forma en y) (Ashmore y Parker 1983; Best 1987, 1988), el caudal y sedimento descargado por cada tributario (Best, 1988; Rhoads, 1996) y el grado de concordancia entre los niveles del fondo de las corrientes que convergen (Best and Roy 1991; Biron et al. 1993, 1996, 2002). Cuando los tributarios presentan fondos discordantes, la distorsión de la capa de corte entre los flujos de ambos tributarios aparece como la característica dominante (Biron et al. 1996; De Serres et al. 1999; Biron et al. 2002), mientras que cuando los tributarios presentan concordancia de fondos, las celdas secundarias de circulación opuesta asociadas con la hoya de erosión dominan frente a la distorsión de la capa de corte (McLelland et al. 1996; Rhoads y Kenworthy 1998; Biron et al. 2002).

A pesar de los estudios divulgados, la mayoría de ellos refieren a experimentos en canales de laboratorio (Best y Roy 1991; Biron et al. 1993, 2002), pequeños cauces naturales (entendiéndose por “pequeños” aquellos en que las mediciones son posibles por vadeo o desde pequeños puentes) (Best 1988; McLelland et al. 1996; Rhoads y Sukhodolov 2001; Rhoads 2005) y en simulaciones numéricas con condiciones de borde basados en los canales de laboratorio y pequeños cauces naturales antes mencionados (e.g. Bradbrook et al. 2000; Bradbrook et al. 2001), ya sea concordantes (Best 1988, Best y Roy 1991, McLelland et al. 1996, Rhoads 1996, Rhoads y Sukhodolov 2001) como discordantes (Best y Roy 1991, Biron et al. 1993, 1996, 2002).

De lo anterior se desprende que existe un vacío significativo del conocimiento entre lo sabido a partir de estudios a pequeña escala, con bajas relaciones ancho/profundidad (W/D) y en aquellos sistemas a gran escala con mayores valores de esa relación. De hecho, los estudios de la dinámica del flujo en grandes ríos han sido extremadamente escasos debido a la carencia de una adecuada instrumentación y de metodologías adaptadas a investigaciones a grandes escalas. Recientemente, desarrollos en tecnologías de medición, en particular avances en los sistemas de posicionamiento global y de velocímetros con tecnología acústica Doppler, han empezado a facilitar los estudios de detalle del flujo en grandes sistemas fluviales. En particular, entre otros pueden citarse los trabajos de Richardson y Thorne 1998, 2001; Parsons et al. 2004; Szupiany et al. 2005, 2006 y Parsons et al. 2005.

El presente trabajo ofrece resultados de la estructura del flujo (corrientes primarias y secundarias) y características morfológicas en dos confluencias asimétricas formadas por islas del río Paraná, Argentina. La configuración 3D de la corriente se registró con un perfilador acústico Doppler (ADP) Sontek de 1000 kHz en 5 secciones transversales dispuestas a lo largo de las confluencias. Para ello se utilizó una metodología específica de medición (Szupiany et al. 2007) que posibilita lograr valores precisos de la componente 3D de la velocidad del flujo con embarcación en movimiento.

SITIOS DE ESTUDIO Y MEDICIONES EN CAMPO

El área de estudio sobre el Río Paraná se encuentra ubicada en su tramo inferior en cercanías de las localidades de San Martín (A) y Rosario (B), Argentina (Figura 1). En las zonas investigadas se encuentran presentes dos grandes confluencias asimétricas producidas por la presencia de islas centrales (ver Figura 1). En confluencia A, San Martín, las mediciones fueron realizadas el 13 de junio, mientras que en B, Rosario, el 7 de junio de 2006.

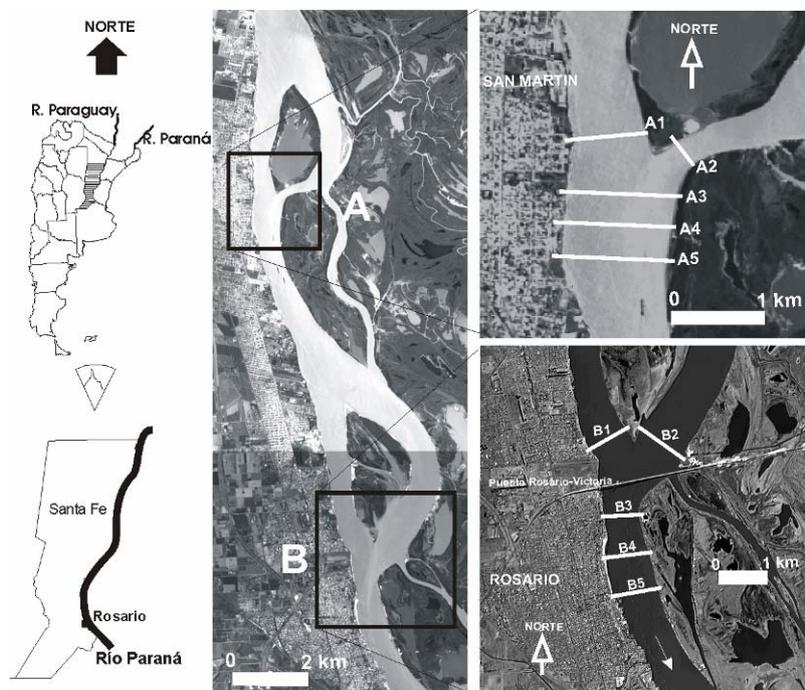


Figura 1. Zonas de estudio y ubicación de secciones relevadas.

En ambas confluencias la morfología del fondo fue relevada con una sonda ecógrafa Raytheon acoplada con un sistema de posicionamiento global (GPS), instalados sobre una embarcación adaptada para tales fines. El GPS provee la posición horizontal con una precisión de ± 1 m programado con una salida de 1 pulso por segundo. Los relevamientos batimétricos fueron realizados sobre secciones transversales seleccionadas a lo largo de las confluencias y separadas cada una 100 m. A fin de obtener los planos batimétricos los puntos x, y, z fueron interpolados sobre una grilla regular.

La velocidad del flujo en sus tres dimensiones fue medida en 5 secciones transversales dispuestas a lo largo de las confluencias (A1, A2, A3, A4 y A5 en A y B1, B2, B3, B4 y B5 en B, Figura 1) con un velocímetro acústico Doppler (ADP) Sontek de 1000 kHz. La ubicación de estas secciones se seleccionó con el fin de cubrir con el mayor detalle posible las variaciones del flujo a lo largo de la confluencia. Dado que el ADP fue utilizado con

embarcación en movimiento, el GPS fue acoplado al mismo a fin de proveer la posición y velocidad de la embarcación. Las mismas fueron monitoreadas online tan constante como fuera posible, con una velocidad media de la embarcación de 1.5 m s^{-1} (ver detalles en Szupiany y Amsler 2005; Szupiany et al. 2007).

SELECCIÓN DEL PLANO SECUNDARIO. MÉTODO DE ROZOVSKII APLICADO A DATOS MEDIDOS CON ADP.

Las corrientes secundarias han sido definidas como aquellas que ocurren sobre un plano perpendicular al plano del flujo principal (Prandtl 1952). Chang (1988), a su vez define a la velocidad secundaria como aquella que produce un caudal lateral nulo en relación con la dirección del flujo principal. Se han desarrollado varios criterios a fin de definir el plano secundario en corrientes naturales. Discutiendo este tópico, Lane et al. (2000) adoptaron la siguiente clasificación para las diferentes definiciones existentes: 1) De la línea central; 2) De Rozovskii; 3) De cero caudal transversal y 4) De continuidad de caudales.

Todavía existen discusiones acerca de cuáles de las definiciones mencionadas son las más adecuadas a fin de lograr resultados realistas del campo de corrientes secundarias (Rhoads y Kenworthy 1998, Lane et al. 1999, Rhoads y Kenworthy 1999, Lane et al. 2000). En el río Paraná, un gran río aluvial con sus restricciones operativas para la toma de datos en número apropiado y calidad acorde (anchos entre 600 m y 2500 m), la definición de continuidad de caudales fue descartada ya que requiere registros en secciones transversales que presenten escasa separación, incrementando considerablemente el tiempo y costos en el trabajo de campo. Del mismo modo, la dificultad en definir la línea central del cauce, ya que el río presenta continuos cambios y divisiones del flujo en dos o más direcciones dominantes, hace que la aplicación de dicha definición sea dificultosa para este gran río. La definición de cero caudal transversal no fue testeada aún en esta etapa de la investigación.

Por lo tanto, en el presente trabajo, solo serán presentados los resultados de la aplicación del procedimiento de Rozovskii, con el cual las componentes principal (v_p) y secundaria (v_s) en cada punto de una dada vertical se obtienen calculando la componente paralela y perpendicular al vector promedio en la vertical (V) a través de las siguientes expresiones:

$$V = \sqrt{V_N^2 + V_E^2} \quad (1)$$

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{V_N}{V_E}\right) \quad (2)$$

donde V_N, V_E son las velocidades medias en la vertical de la componente Norte y Este respectivamente obtenidas con el ADP. Las mismas se obtienen:

$$V_N = \frac{1}{H} \int_0^D v_N dz \quad (3)$$

$$V_E = \frac{1}{H} \int_0^D v_E dz \quad (4)$$

Luego, los valores de v_p y v_s se calculan como:

$$v_p = v \cos(\theta - \alpha) \quad (5)$$

$$v_s = v \sin(\theta - \alpha) \quad (6)$$

$$v = \sqrt{v_N^2 + v_E^2} \quad (7)$$

donde v , vector de velocidad puntual; θ , orientación de v respecto al norte; v_N, v_E componente Norte y Este del vector de velocidad puntual (obtenidas con el ADP); α , orientación respecto del Norte del vector velocidad promedio en la vertical. α fue determinado de la dirección del vector de velocidad promedio en la vertical promediando v_N y v_E separadamente sobre la profundidad para cada vertical.

Cuando se presenta una celda de circulación secundaria o movimientos helicoidales del flujo, los valores de v_s se incrementarán y decrecerán sistemáticamente en la vertical y este patrón ocurrirá en verticales adyacentes. Este patrón bidimensional ha sido utilizado por diferentes autores para inferir el comportamiento tridimensional en distintos sistemas aluviales (Bathurst et al. 1979), incluyendo confluencias de flujos (Rhoads y Kenworthy 1998, Rhoads 1996). Cabe destacar que se requieren mediciones 3D del flujo para establecer en forma adecuada cualquier tipo de estructuras helicoidales del flujo razón por la cual, ante la ausencia del instrumental o su complejidad y de metodologías de medición adecuadas, es que los trabajos sobre la estructura del flujo en grandes corrientes han sido escasos como se comentó con anterioridad.

CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS Y GEOMETRICAS GENERALES EN LAS AREAS DE MEDICIO

En Tabla 1 se resumen las condiciones geométricas e hidráulicas generales en las zonas seleccionadas [confluencia San Martín (A) y Rosario (B)] durante los trabajos de campo. La misma muestra las características en tres secciones, dos correspondiente a los tributarios inmediatamente aguas arriba de las confluencias y la restante aguas abajo de la misma coincidente con las zona de máxima profundidad correspondiente a la hoyo de socavación típica en estas zonas.

Tal como indican los valores de α_L y α_R , ambas confluencias presentan una configuración asimétrica, donde el brazo predominante (mayor caudal) no presenta una curvatura a lo largo del nodo, es decir que la dirección del cauce permanece constante y no varía aguas arriba y abajo de la confluencia (brazos derechos en ambos casos).

El ángulo de confluencia fue medido en base al plano batimétrico (ver Figura 2) tomando la dirección del thalweg en ambos tributarios y del cauce aguas abajo de la confluencia. Debido a los cambios que sufre el thalweg (Ramonell et al. (2000) definieron al Río Paraná como entrelazado con thalweg meandriforme) especial atención requiere la medición de esta variable, ya que el resultado puede variar significativamente si se considera el recorrido del flujo obtenido, por ejemplo, de imágenes satelitales o aérea del río o siguiendo la ubicación de las márgenes.

Tabla 1.-Principales características hidráulicas y geométricas en confluencias A y B.

Parámetros característicos	A			B		
	A1	A2	A3	B1	B2	B3
Velocidad media (m s ⁻¹)	1.08	0.81	1.03	0.94	0.81	1.0
Velocidad máxima (m s ⁻¹)	1.63	1.25	1.73	1.14	1.09	1.26
Ancho (m)	700	310	1000	935	565	900
Caudal (m ³ s ⁻¹)	12250	2420	14670	9538	4800	14338
Profundidad media (m)	16.2	7.95	14.3	10.6	10.4	10.6
Profundidad máxima (m)	25.6	12.4	18	18	13.9	23.4
Angulo de confluencia (grados)		77			70	
α_I (*)		77			70	
α_D (*)		0			0	
Relación de momentos, $M^{(**)}$		0.15			0.43	
Relación de caudales		0.2			0.5	

(*) α es el ángulo formado por la dirección del cauce aguas abajo de la confluencia y los tributarios.

(**) $M = (\rho Q_I \bar{U}_I) / (\rho Q_D \bar{U}_D)$, donde ρ , densidad del agua (kg m⁻³), Q , caudal (m³ s⁻¹), \bar{U} , velocidad media en la sección (m s⁻¹). I y D denota el brazo izquierdo y derecho.

MORFOLOGÍA DE LOS NODOS EN ESTUDIO

La Figura 2 muestra la topografía del fondo del cauce para las zonas en estudio. La confluencias B, de acuerdo a las profundidades en ambos tributarios (Tabla 1), no presenta una marcada discordancias de fondo entre los canales que convergen, con diferencias no mayor a ~ 2 m. No ocurre lo mismo en confluencia A donde la diferencia en la profundidad media de los tributarios es de ~ 8 m. Biron et al. 1996; De Serres et al. 1999 y Biron et al. 2002 establecen que la discordancia de fondo es un factor dominante en la estructura del flujo la cual, a través de la distorsión de la capa de corte producto de la separación del flujo sobre estas zonas, genera estructuras coherentes particulares del escurrimiento. Sin embarco, cabe destacar, en este caso, que a pesar de la diferencia en las profundidades en A entre los brazos convergentes, la pendiente de transición resulta suave con valores menores a 5 grados, mucho más a los que los autores mencionados encontraron en confluencias de pequeños cauces, con bruscos cambios en su topografía. Para estas condiciones la separación del flujo y la consecuente generación de estructuras coherentes del escurrimiento encontradas en pequeñas confluencias no pueden ser directamente extrapoladas para confluencias de grandes ríos. La ausencia de pendientes pronunciadas en la topografía del fondo en corrientes aluviales como el Río Paraná aparece como una de las principales diferencias cuando se comparan fenómenos morfológicos e hidráulicos con cauces de pequeña escala.

La presencia de la hoya de erosión, característica morfológica típica en pequeñas confluencias (e.g. Mosley, 1976; Ashmore y Parker, 1983; Best, 1988; Rhoads, 1996; Bradbrook et al., 2000; Rhoads y Sukhodolov, 2001), es claramente visible en A y B inmediatamente luego de que los flujos comienzan a mezclarse. Esta socavación se encuentra en la cercanía de la margen izquierda, dependiendo fundamentalmente de la relación de caudales y ángulos de confluencias. Así pues, tanto en A como en B, donde el brazo derecho presenta una mayor jerarquía (relación de momentos M de 0.15 y 0.43 en A y B, respectivamente) el flujo proveniente del brazo izquierdo no posee la suficiente energía como para penetrar en el anterior, por lo que la combinación de ambos, con la consecuente formación de la hoya de erosión, se produce hacia margen izquierda. En confluencia A, sin embargo aún con un menor valor en la relación de momentos, se produce una zona de bajas velocidades y depositación de sedimento sobre la margen izquierda inmediatamente aguas abajo de la confluencia.

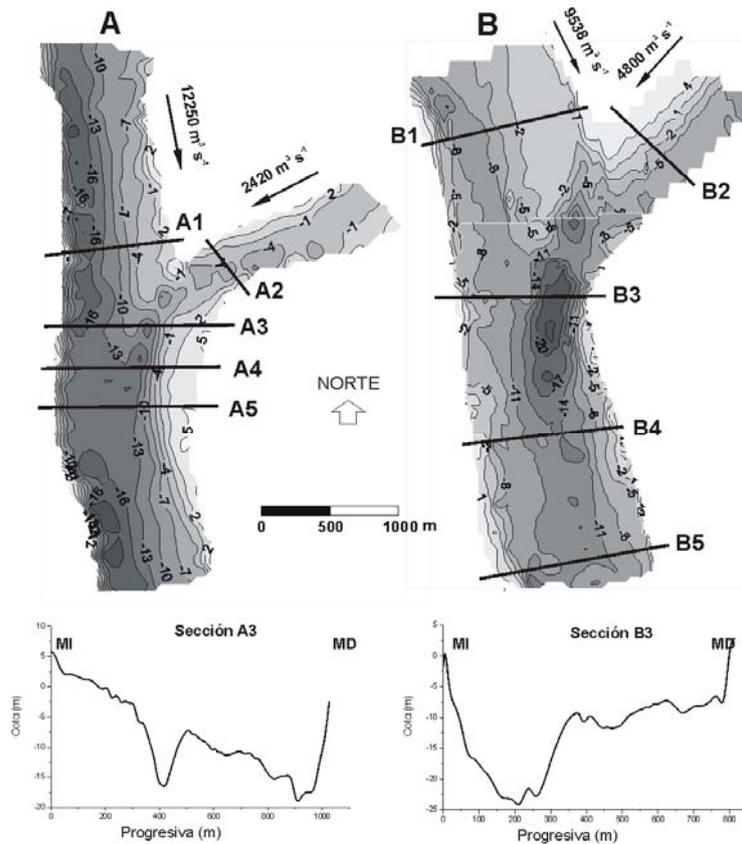


Figura 2. Mapa batimétrico de confluencias A y B (profundidades referidas al nivel 0 m de escala de Puerto Rosario). Fecha de relevamiento: 13/06/06 (A) y 07/06/06 (B). Nivel hidrométrico: 2.74 m y 2.25 m respectivamente.

Si bien el tamaño de la hoya abarca una extensión longitudinal considerable en B (~ 1000 m), en A no es posible su determinación ya que esta se une aguas abajo con las zonas de máximas profundidades correspondiente al thalweg del brazo de mayor jerarquía (derecho). La profundidad de la hoya está vinculada con M , el ángulo de confluencia y, en B, a otro mecanismo relacionado a la aceleración del flujo del brazo izquierdo, cuestiones que se discuten más adelante.

La formación de bancos sobre las márgenes aguas abajo de la confluencia donde se produce una zona de separación del flujo, son una de las principales características morfológicas en estudios de pequeñas confluencias (Best, 1988; Rhoads y Kenworthy, 1995; Rhoads, 2005). En relación a este aspecto, en las zonas de estudio presentan también diferencias. Tal como muestra la Figura 2, pueden observarse diferentes configuraciones morfológicas sobre estas zonas. En confluencia A se aprecia claramente la zona de depositación sobre la margen izquierda coincidente con un área de bajas velocidades producto de la curvatura que realiza el flujo del brazo izquierdo cuando confluye con el derecho. En confluencia B, por el contrario, no se produce ninguna depositación sobre esta zona, a pesar que presenta un ángulo de confluencia similar y una relación de momentos mayor que A. Actualmente se presentan graves problemas erosivos sobre esta margen. Las razones de estas diferencias se explican analizando la ubicación de la hoya de erosión y la capacidad que tiene el flujo convergente izquierdo en separarse de su margen respectiva cuando ingresa a la confluencia. Es así que, en A, el flujo del brazo izquierdo puede apartarse aguas debajo de su margen homónima al entrar a la confluencia dado que el centro de máximas velocidades (y thalweg) del brazo derecho se encuentra recostado sobre margen derecha, en B ocurre lo inverso, es decir, el apartamiento aguas abajo del flujo proveniente del brazo izquierdo es impedido por el flujo principal

proveniente del brazo derecho, dado que su thalweg y zonas de máximas velocidades se ubican uniformemente distribuidos hacia el centro del canal. Esto provoca una rápida curvatura del flujo proveniente del brazo izquierdo y aceleración del mismo en las cercanías de la margen izquierda. En lo que sigue se examina con más detalle estos aspectos.

CORRIENTES PRIMARIAS

La Figura 3 muestra el comportamiento de las corrientes primarias (v_p) y secundarias (v_s) en las distintas secciones medidas en cada confluencia. La componente v_s fue obtenida siguiendo la metodología de Rozovskii ya explicada. Las ubicaciones de las secciones se fijaron con el objetivo de poder interpretar el comportamiento del flujo a lo largo de los nodos, es decir, se seleccionaron secciones aguas arriba de cada confluencia (A1, A2, B1 y B2), inmediatamente aguas abajo donde se producen las máximas profundidades (A3 y B3) y aguas abajo de éstas donde comienza la recuperación del flujo (A4, A5, B4 y B5).

En las secciones A3 y B3 se presentan dos centros de máximas velocidades correspondientes a ambos tributarios separados por una zona de bajas velocidades (capa de corte). En confluencia B, entre las progresivas 400-450 m (Figura 3), se advierte una zona de bajas velocidades que se origina por el efecto de la gran pila del Puente Rosario Victoria ubicado aguas arriba de esta sección. La localización del centro de máximas velocidades primarias, en especial aquellos correspondientes a los brazos principales, parecen tener un importante control sobre el flujo del brazo de menor jerarquía cuando éstos comienzan a mezclarse. En confluencia A, brazo derecho, la zona de mayor caudal específico se ubica entre la margen derecha y el centro del canal (sección A1), coincidente con la línea de máximas profundidades (el thalweg se recuesta sobre margen derecha) permaneciendo en esta posición aguas abajo sobre las secciones A3 y A4. En confluencia B, el flujo sobre el brazo dominante está más uniformemente distribuido (sección B1) extendiéndose y con una tendencia de los mayores caudales a ubicarse entre el centro y margen izquierda, hacia aguas abajo.

Existen diferencias importantes en la distribución del flujo cuando se comparan las secciones A3 y B3. En A, el brazo izquierdo (en A2) tiene un ancho medio de ~ 310 m con un área de escurrimiento de 2761 m^2 al momento de las mediciones. En la sección A3, el caudal proveniente de este brazo fluye en un ancho de ~ 400 m y un área de 3245 m^2 , extendiéndose entre la margen izquierda y capa de corte donde ambos flujos se juntan. Sin embargo, en confluencia B, el brazo izquierdo (fluyendo en un área de 6170 m^2 con un ancho medio de ~ 560 m en sección B2) es distribuido a través de un ancho y área menor de ~ 260 m y 5350 m^2 respectivamente en B3, limitado entre margen izquierda y la capa de corte. Este comportamiento sugiere que en confluencia B el flujo del brazo izquierdo que pasa por la sección B2 está limitado por la acción del flujo convergente principal (derecho) aguas abajo cuando ambos comienzan a combinarse, resultando en una aceleración y aumento de su curvatura entre la zona de interfase y la margen izquierda en la sección B3. Esto impide la existencia de zonas de separación del flujo o bajas velocidades y formación eventual de bancos laterales como los relevados en A y en confluencias de pequeños cauces bajo similares condiciones de relación de caudales y ángulos, ocasionando los procesos erosivos intensos que se producen actualmente sobre esta margen. Por el contrario, a pesar de una menor relación de momentos, en la confluencia A el flujo izquierdo, lo cual permite la formación de una región de bajas velocidades, posibilitando eventuales procesos de sedimentación. Esta disímil interacción entre los flujos convergentes, junto con la relación de caudales y/o momentos, explicarían la existencia de una hoya de erosión de menores dimensiones en A con

respecto a la de B.

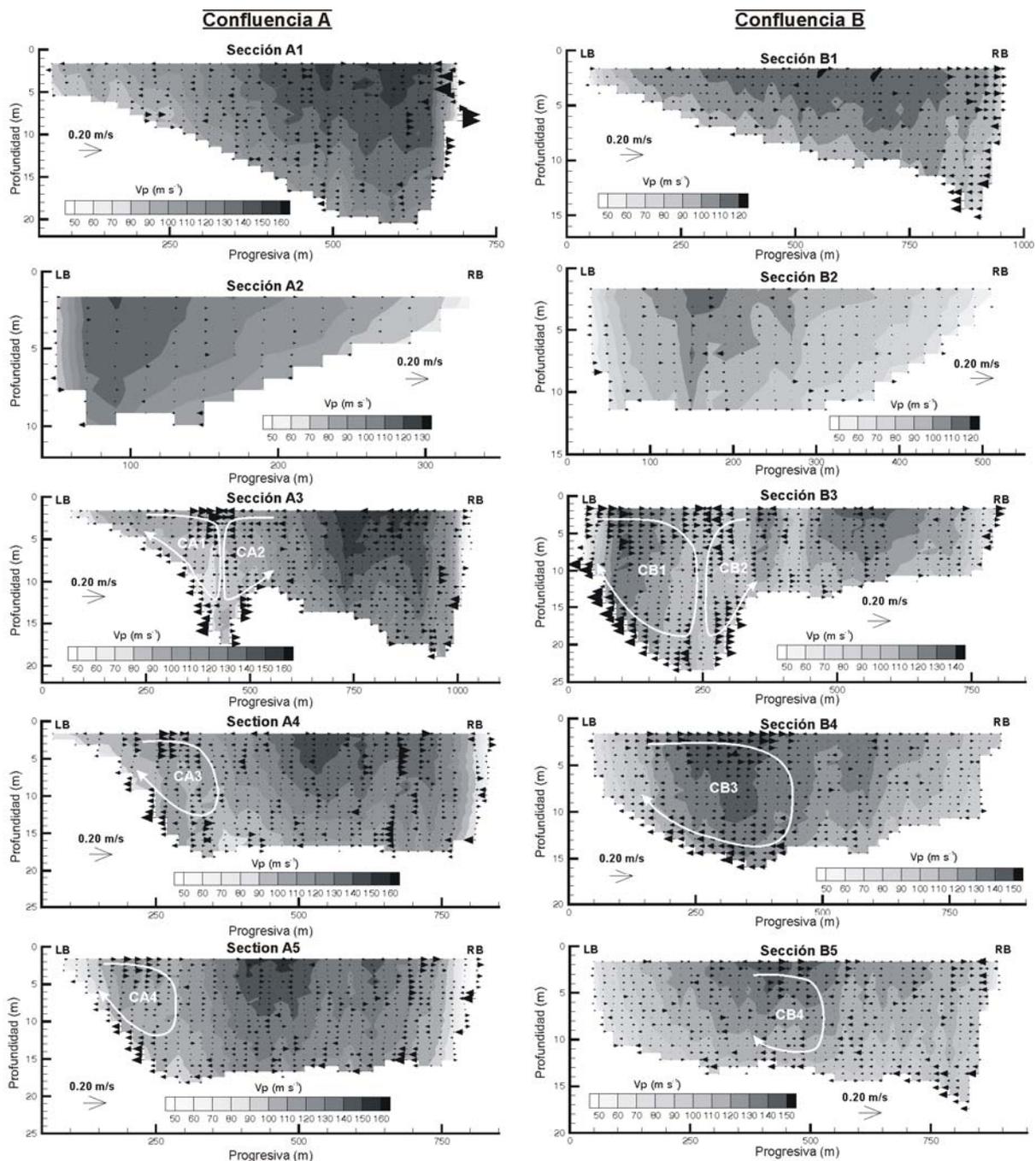


Figura 3. Corrientes primarias y secundarias en confluencias A y B.

La recuperación del flujo aguas abajo se produce relativamente rápido. De acuerdo a las secciones relevadas, la distancia en la cual ambos centros de máximas velocidades se juntan y solo se observa una zona de máximas velocidades es de aproximadamente $\sim 1 \times W_A$ y $\sim 1.8 \times W_B$ donde W_A y W_B son los anchos medios del cauce aguas abajo de la confluencia.

Cabe analizar, asimismo, la magnitud de las velocidades máximas a lo largo de los nodos. En confluencia A las velocidades máximas ($\sim 1.5 \text{ m s}^{-1}$) permanecen entre las secciones A3 y A5 al igual que los valores de las áreas transversales al escurrimiento. En B se observa un aumento en las velocidades máximas en la sección B4 con valores de $\sim 1.7 \text{ m s}^{-1}$, mientras que en las secciones ubicadas aguas arriba (B3) y aguas abajo (B5) se presentan valores menores

(ver Figura 3). En B3 sin embargo el centro de velocidades máximas correspondiente al flujo convergente izquierdo es de $\sim 1.25 \text{ m s}^{-1}$ contra $\sim 1 \text{ m s}^{-1}$ en B2 lo que da cuenta de la aceleración del flujo comentada mas arriba. Si bien el ancho de la sección permanece aproximadamente constante sin variaciones importante, el área de escurrimiento decrece en un $\sim 10 \%$ entre las secciones B3 y B4 y se incrementa en un $\sim 11 \%$ ($\sim 1500 \text{ m}^2$) entre las secciones B4 y B5. Estas diferencias en el área de escurrimiento puede explicarse a que en sección B4 el flujo (zona de máximas velocidades y caudal relativo) se concentra sobre un ancho menor con un aumento local de las profundidades, mientras que en sección B5 la distribución de caudales es más homogénea sobre la transversal producto de la tendencia de la corriente a concentrarse entre el centro del cauce y margen izquierda abandonando el antiguo thalweg sobre margen derecha.

Otra característica observada en estas grandes confluencias, cuando se las compara con aquellas de pequeños cauces naturales o de laboratorio, es la ausencia de zonas de recirculación del flujo en la punta de la confluencia y sobre una o ambas márgenes aguas abajo de la misma. La ausencia de estas zonas se debería los cambios muy graduales en la morfología y topografía del fondo, los cuales direccionan adecuadamente al flujo impidiendo la separación del mismo. Los cambios bruscos en la morfología en planta en el Río Paraná están asociados generalmente con formaciones sedimentológicas generalmente puntuales más rígidas y resistentes a la erosión que sobresalen a lo largo de sus márgenes. Sin embargo, se requieren mayores comprobaciones de campo para evaluar este comportamiento bajo condiciones hidrológicas extremas que podrían llegar a generar zonas de separación del flujo en zonas específicas de confluencias.

CORRIENTES SECUNDARIAS

Tal como indica la Figura 3, en la zona central inmediatamente aguas abajo de las confluencias donde ambos flujos comienzan a mezclarse (secciones A3 y B3) se producen celdas de circulación secundarias con sentido de rotación opuestas (celdas CA1 y CA2 en A y CB1 y CB2 en B), ambas separadas por una zona de bajas velocidades coincidente con las máximas profundidades.

Estas velocidades secundarias son coherentes y consistentemente de magnitud significativa con respecto a los errores de medición producidos por el ADP cuando éste se utiliza con la embarcación en movimiento (Szupiany et al. 2007). La Tabla 2 muestra los anchos y máximas velocidades secundarias de las celdas antes mencionadas ubicadas sobre las hoyas de erosión en la que se registraron los mayores valores de intensidad. En todos los casos, las alturas de las celdas están limitadas por la profundidad del flujo. La posición de éstas y centros de máximas velocidades primarias están en correspondencia/divididas por la capa de corte o zona de mezcla y donde se presentan las máximas profundidades, ubicadas en progresiva $\sim 400 \text{ m}$ en A y $\sim 250 \text{ m}$ en B. Como se muestra en Tabla 2 las celdas correspondiente al tributario que sufre una mayor curvatura en su recorrido a través de la confluencia (izquierdo) presenta valores en la velocidad secundaria mayores (celda izquierda en A y B).

Sin embargo, dado el ancho del canal, la extensión espacial que cubren las celdas de circulación secundaria es limitada a un área pequeña del cauce ($\sim 30\%$ y $\sim 35\%$ en A y B respectivamente). Este comportamiento es muy diferente al encontrado en confluencias de pequeños cauces, donde las celdas secundarias cubren aproximadamente todo el ancho del canal con valores entre el 80-90 % (Rhoads y Kenworthy 1995; Rhoads 2005). Las

velocidades verticales resultaron para todas las secciones estadísticamente no significativas (por debajo del ruido Doppler) con valores menores a 0.05 m s^{-1} .

Tabla 2: Intensidad máxima de las velocidades secundarias y anchos de celdas.

Celda	A (sección A3)		B (sección B3)	
	izquierda	derecha	izquierda	derecha
Ancho	190	100	220	80
Velocidad máxima (m s^{-1})	0.16	0.10	0.15	0.10

En confluencias A y B la celda secundaria izquierda, la de mayor intensidad, generadas aguas arriba de las secciones A3 y B3, mantiene su estructura coherente aguas abajo aumentando su tamaño, disminuyendo progresivamente su intensidad, hasta desaparecer a una distancia de $\sim 1-2 \times \hat{W}$ donde \hat{W} es el ancho medio del cauce aguas abajo de la confluencia. La celda derecha pierde su intensidad más rápidamente no pudiendo identificarse en la sección aguas abajo de A3 y B3, es decir a una distancia menor que $\sim 1 \times \hat{W}$.

CONCLUSIONES

El presente trabajo brinda una descripción y comparación de las principales características de la morfología y estructura del flujo en dos grandes confluencias asimétricas originadas por islas centrales en el cauce principal del río Paraná.

Se encontraron algunas características similares a aquellas divulgadas en trabajos anteriores para confluencias de pequeños cauces con bajos valores de W/D : una capa de corte cuando los flujos de los tributarios comienzan a mezclarse, dos celdas de circulación secundarias con sentido de rotación inversa inmediatamente aguas abajo de la confluencias, y una región de recuperación del flujo aguas abajo.

En confluencia A se presenta una zona de bajas velocidades y sedimentación aguas abajo sobre la margen izquierda del brazo izquierdo. Por el contrario, en B con relaciones $Q_I/Q_D \ll 1$ como en A y similar ángulo de confluencia que ésta última, y dadas la posición de la hoya de erosión y las aceleraciones del flujo producida en las cercanías de la margen izquierda, se identificaron erosiones sobre esa margen. Este comportamiento dispar sugiere que la relación Q_I/Q_D como así también el ángulo de confluencia no son las variables más importantes que controlan las características morfológicas (posición de la hoya de erosión y generación de zonas de sedimentación) en grandes confluencias. La posición y distribución de los centros de máximas velocidades en la transversal en el brazo izquierdo de aguas arriba, sería un factor de control de las condiciones aguas debajo de gran importancia a grandes escalas. En confluencia B, la posición de las máximas velocidades del brazo derecho se ubica sobre el centro del cauce cuando ambos flujos se mezclan, desplazando y acelerando el flujo proveniente del brazo izquierdo sobre esta margen. Es decir la posibilidad de la divagación del thalweg y distribución transversal de velocidades en grandes ríos con elevada relación W/D puede ejercer una influencia sobre la dinámica del flujo en la confluencia. Estudiar las particularidades locales de la relación de caudales, posición y ángulos de confluencia entre las zonas de máximas velocidades, pueden generar mejores predicciones en grandes corrientes entrelazadas que si se consideran solo dichas variables en forma general.

En ambas confluencias fueron identificadas dos celdas de velocidades secundarias con sentido de rotación opuestas, con un tamaño relativamente pequeño con respecto al ancho total del cauce de $\sim 250 \text{ m}$ (celda izquierda) y $\sim 100 \text{ m}$ (celda derecha) en B3 y $\sim 200 \text{ m}$ (celda izquierda) y $\sim 100 \text{ m}$ (celda derecha) en A3. Esta limitada extensión espacial plantea la interrogante sobre la real importancia de estas estructuras coherentes en la dinámica y mezcla

del flujo en grandes ríos, y en cierto modo refuerza la hipótesis propuesta por Parsons et al. 2007 en cuanto que en grandes ríos con elevadas relaciones ancho/profundidad, la influencia de la rugosidad domina los procesos de mezcla.

Los autores agradecen al Ing. José Huespe responsable de la puesta a punto de parte de instrumental y de la embarcación hidrográfica. Los trabajos forman parte del proyecto “Morfología y cambios hidráulicos en puntos nodales del cauce principal del río Paraná” subsidiado por la Universidad Nacional del Litoral de Santa Fe. El primer autor agradece al Earth and Biosphere Institute por el otorgamiento de una beca de estudio en la Universidad de Leeds, Reino Unido que permitió completar este trabajo. A su vez RH expresa su reconocimiento por la beca de intercambio que recibió del STC International Research Experience Program de la NSF a través del Nanobiotechnology Center bajo Agreement No. ECS-9876771. DP agradece por su parte a UK Natural Environment Research Council por su beca (NE/C002636/1).

LISTA DE SÍMBOLOS

D :	profundidad
Q :	caudal
\bar{U} :	velocidad media en la sección
v :	vector de velocidad puntual
v_p :	velocidad primaria
v_s :	velocidad secundaria
v_N :	componente Norte del vector de velocidad puntual (obtenidas con el ADP)
v_E :	componente Este del vector de velocidad puntual (obtenidas con el ADP)
V :	velocidad media en la vertical
V_N :	velocidad media en la vertical de la componente Norte
V_E :	velocidad media en la vertical de la componente Este
W :	ancho del cauce
θ :	orientación de v respecto al norte
α :	orientación respecto del Norte del vector velocidad promedio en la vertical
ρ :	densidad del agua

REFERENCIAS

- Ashmore, P.E. y Parker, G.** (1983). “Confluence scour in coarse braided streams”. *Water Resources Research*, 19, 392-402.
- Bathurst, J.C., Thorne C.R., y Hey, R.D.** (1979). “Secondary flow and shear stress at river bends”. *Journal of the Hydraulics Division*. American Society of Civil Engineers, 105: 1277-1295.
- Best, J.L.** (1986). “The morphology of river channel confluences”. *Progress in Physical Geography*, 10, 157-174.
- Best, J.L.** (1987). “Flow dynamics at river channel confluences: implications for sediment transport and bed morphology”. *The Society of Economic Paleontologists and Mineralogists*.
- Best, J.L.** (1988). “Sediment transport and bed morphology at river channel confluences”. *Sedimentology*, 35, 481-498.
- Best, J.L. y Roy, A.G.** (1991). “Mixing-layer distortion at the confluence of channels of different depth”. *Nature*, 350, 6317, 411-413.

- Biron P., Roy A. G., Best J. L., y Boyer C.J.** (1993). "Bed morphology and sedimentology at the confluence of unequal depth channels". *Geomorphology*, 8, 115–129.
- Biron P., Best J. L., y Roy A.G.** (1996). "Effects of bed discordance on flow dynamics at river channel confluences". *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE 122(12), 676–682.
- Biron P. M., Richer A., Kirkbride A. D., Roy A. G., y Han S.** (2002). "Spatial patterns of water surface topography at a river confluence". *Earth Surface Processes and Landforms*, 27, 913-928.
- Bradbrook, K. F, Lane, S. N. y Richards K. S.** (2000). "Numerical simulation of three-dimensional, time-averaged flow structure at river channel confluences". *Water Resources Research*, 36, 9, 2731-2746.
- Bradbrook, K. F, Lane S. N., Richards K. S., Biron P. M., y Roy A.G.** (2001). "Role of bed discordance at asymmetrical river confluences". *Journal of Hydraulic Engineering*, may, 351-368.
- Bristow, C.S. y Best, J.L.** (1993). *Braided rivers: perspectives and problems*. In: *Braided Rivers*. Edited by J.L. Best y C. S. Bristow. Geological Society Special Publication No. 75, 1-11.
- Chang, H. H.** (1988). *Fluvial Processes in river Engineering*, Wiley, New York, 432 pp.
- De Serres B., Roy A. G., Biron P. M., y Best J. L.** (1999). "Three-dimensional structure of flow at a confluence of river channel with discordant beds". *Geomorphology* 26, 313-335.
- Komura, S.** (1973). "River-bed variations at confluences". Proceeding of the Symposium on River Mechanics, Bangkok, 9-12 January, Paper A66, 773-784.
- McLelland, S.J., Ashworth P.J. y Best J.L.** (1996). "The Origin and Downstream Development of Coherent Flow Structures at Channel Junction". In *Coherent flow structures in open channels*, Ashworth, Bennett, Best and McLelland (eds), Wiley and Sons, 491-519.
- Mosley, M. P.** (1982). "Scour depths in branch channel confluences: Ohau River, Otago, New Zealand". Proceedings of New Zealand Institute of Professional Engineers, 9, 17-24.
- Lane, S. N, Bradbrook, K. F., Richards, K. F., Biron, P. M. y Roy A. G.** (1999). "Time-Average flow structure in the central region of a stream confluence: a discussion". *Earth Surface Processes and Landforms*, 24: 361-367.
- Lane, S. N, Bradbrook, K. F., Richards, K. F., Biron, P. M., y Roy A. G.** (2000). "Secondary circulation cells in river channel confluence: measurement artifacts or coherent flow structures?". *Hydrological Processes*, 14, 2047-2071.
- Parsons D. R., Lane S. N., Hardy R. J., Orfeo O. y Kostaschuk R.** (2004). "The Morphology, 3D flow structure and sediment dynamics of a large river confluence: the Río Parana and Río Paraguay, NE Argentina". Proc. Of the Sec. Int. Conference on Fluvial Hydr. Eds. M. Greco, A. Canaveta & R. Della Morte. Vol. 1. River Flow 2004. Napoly, Italy.
- Parsons D. R., Best J., Lane S., Kostaschuk R., Orfeo, O. y Hardy R.** (2005). "Flow structure and morphology of a confluence-diffuence: Río Parana, Argentina". 4th IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, Urbana, Illinois, USA, October, 2005.
- Parsons D.R, Best J.L., Lane S.N., Orfeo O., Hardy R.J y Kostaschuk R.** (2007). "Form roughness and the absence of secondary flow in a large confluence-diffuence, Río Paraná, Argentina". *Earth Surface Processes and Landforms*. Esex Commentary. DOI: 10.1002/esp. 1457.
- Prandtl, L.** (1952). *Essentials of fluid dynamics*, Blackie, London, 452 pp.
- Ramonell, C.G., Amsler M.L. y Toniolo H.** (2002). "Shifting modes of the Paraná River thalweg in its middle/lower reach". *Zeitschrift fur Geomorphologie*. Suppl.-Bd. 129, 129-142.
- Rhoads, B.L.** (1996). "Mean structure of transport-effective flows at an asymmetrical confluence when the main stream is dominant". In *Coherent flows structure in Open Channel*, Ashworth P.J., Bennett S.J., Best J.L., McLelland S.J. (eds). Wiley and Sons; 491-517.

- Rhoads, B.L.** (2005). "Scaling of confluence dynamics in river systems: some general considerations". 4TH IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, Urbana, Illinois, USA, October, 2005.
- Rhoads, B.L. y Kenworthy S.T.** (1995). "Flow structure in asymmetrical stream confluence". *Geomorphology*, 11: 273-293.
- Rhoads, B.L., y Kenworthy S.T.** (1998). "Time-average flow structure in the central region of a stream confluence". *Earth Surface Processes and Landforms*, 23: 171-191.
- Rhoads, B.L. y Kenworthy S.T.** (1999). "On secondary circulation, helical motion and Rozovskii-based analysis of time-averaged two-dimensional velocity fields at confluence". *Earth Surface Processes and Landforms*, 24: 369-375.
- Rhoads, B. L. y Sukhodolov A. N.** (2001). "Field investigation of three-dimensional flow structure at stream confluences: 1. Thermal mixing and time-averaged velocities". *Water Resouces Research*, 37, 9, 2393-2410.
- Richardson, W. R. y Thorne C. R.** (1998). "Secondary Currents around a Braid Bar in the Brahmaputra River, Bangladesh". *Journal of Hydraulic Engineering*, 124: 3, 325-328.
- Richardson, W. R. y Thorne C. R.** (2001). "Multiple thread flow and channel bifurcation in a braided river: Brahmaputra-Jamuna River, Bangladesh". *Geomorphology*, 38, 185-196.
- Szupiany, R. N., y Amsler M. L.** (2005). "Estrategia de medición del campo de velocidades en un gran río con la tecnología acústica Doppler". XX° Congreso Nacional del Agua, Mendoza, Argentina.
- Szupiany R. N., Amsler M. L. y Fedele J. J.** (2005). "Secondary flow at a scour hole downstream a bar-confluence (Paraná River, Argentina)". 4TH IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, Urbana, Illinois, USA.
- Szupiany, R. N., Parsons D.R.; Best J.L.; Amsler M. L. y Orfeo O.** (2006). "Morfología y corrientes secundarias en una confluencia con cauces discordantes, Río Paraná, Argentina". XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Ciudad Guayana, Venezuela.
- Szupiany, R. N., Amsler M. L., Best J.L. y Parsons D.R.** (2007). "Comparison of Fixed- and Moving Vessel Measurements with an ADP in a Large River". *Journal of Hydraulic Engineering*, in press.