



## **MIGRACIONES DEL CURSO Y FORMA EN PLANTA OBSERVADAS EN RÍOS MEANDRIFORMES DE VARIAS REGIONES ARGENTINAS**

**Hector Daniel Farias<sup>1</sup>, Lucas Gerardo Dominguez Ruben<sup>1</sup>, Alfredo Fabian Reuter<sup>2</sup>**

(1) Instituto de Recursos Hídricos (IRHi, FCEyT) – (2) Instituto de Silvicultura y Manejo de Bosques (INSIMA, FCF)  
Universidad Nacional de Santiago del Estero (UNSE), Argentina.  
E-mail: hdf@unse.edu.ar - ldominguezruben@gmail.com – freuter@unse.edu.ar

### **RESUMEN**

En este trabajo se presenta una base de datos para el estudio de las propiedades geométricas y análisis de las tasas de migración observadas en una serie de ríos ubicados en varias regiones geográficas de la Argentina. Se brindan los aspectos metodológicos aplicados para la cuantificación de la geometría de meandros y se analizan las interrelaciones entre distintos parámetros, tales como la longitud de meandro, el ancho de la faja de divagación y el radio de curvatura de los arcos con respecto al ancho medio del curso fluvial a nivel de desborde. El comportamiento exhibido por ríos estudiados se compara con lo observado a nivel global en cuanto a estos tópicos, con algunas excepciones que muestran casos de apreciable inestabilidad morfológica. También se analizan las tendencias observadas en cuanto a la tasa específica de migración de cada uno de los ríos estudiados.

### **ABSTRACT**

A new data base for the study of geometry and migration rates of meandering rivers is presented in this paper. The rivers are located in several geographic regions of Argentina. Methodological aspects are outlined in relation with the computation of meander features, such as wave length, divagation belt and curvature radius of meander arcs, as related y bankfull channel width. The behavior observed in these rivers is compared with global trends published in the literature. The agreement is good for many of the study reaches, and the observed discrepancies are analyzed. The specific migration rates are also computed.

## **INTRODUCCIÓN**

En la generalidad de los casos, los ríos de llanura tienden a adquirir un patrón de alineamiento en planta de tipo meandriforme (Yalin & Silva, 2001). Esta característica fisiográfica se alcanza a través de procesos de erosión de márgenes en la parte cóncava de las curvas y deposición de material sólido en la zona convexa, procesos que derivan en el desarrollo de migraciones laterales (y longitudinales) del curso fluvial describiendo una suerte de barrido a través de la planicie aluvial (Julien, 2002).

Una importante variedad de problemas de ingeniería hidráulica requieren de una descripción apropiada de estos procesos morfológicos (Rocha, 2009; Chang, 1988). En efecto, el diseño de obras civiles tales como caminos, puentes o cruces de conductos, o bien actividades productivas, tales como agricultura y ganadería, impone la necesidad de conocer el comportamiento de los ríos de llanura meandriformes.

En la actualidad, las técnicas de percepción remota (tales como imágenes satelitales de alta resolución) proveen un medio económico para poder enfocar el problema en un primer nivel de aproximación, y avanzar hacia la cuantificación de las tasas de migración observadas en ciertos intervalos de tiempo. Ello abre la posibilidad de reunir elementos para poder aplicar modelos más o menos sofisticados para predecir el comportamiento morfo-dinámico de tramos de ríos aluviales teniendo en cuenta variables y parámetros hidrológicos, geomorfológicos, hidráulicos, sedimentológicos, geotécnicos, edafológicos y botánicos (Schumm, 1977; Knighton, 1984).

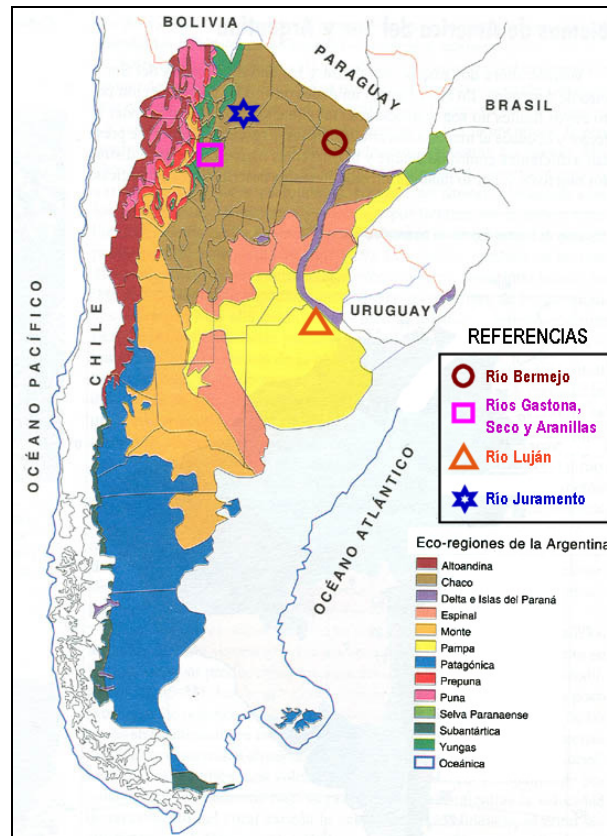
La investigación que se presenta en este trabajo tiene como finalidad analizar cuantitativamente los procesos de migración en ríos de llanura. En particular, en esta fase de desarrollo de los estudios se busca compilar información básica para conformar una base de datos de migración de varios tramos de ríos de llanura en diversos ambientes geográficos de la Argentina. Los ríos seleccionados para los estudios iniciales son: Aranillas, Seco y Gastona, ubicados sobre la llanura tucumana al E del Aconquija; un tramo del Río Juramento, aguas abajo de la Presa El Tunal (provincia de Salta); un tramo del Río Bermejo (límite entre las provincias de Formosa y Chaco), comprendido entre las localidades de El Colorado y Lucio V. Mansilla; y, finalmente, un segmento del Río Luján, aguas arriba de la Ruta Nacional N° 9, en la Provincia de Buenos Aires. En la Figura 1, se indican estas ubicaciones sobre un mapa de regiones geográficas-ecológicas de Argentina. Se estima que estos sistemas fluviales son representativos del comportamiento de muchos ríos de llanura en las regiones involucradas.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

A partir de los criterios de representatividad regional, puede observarse que ríos de llanura estudiados son de diferente envergadura (en cuanto a caudal dominante y, en función de este, el ancho superficial del cauce activo a nivel de desborde).

El criterio de selección, en esta etapa de la investigación, se basó en la disponibilidad de imágenes satelitales con escenas asociadas a intervalos de tiempo en los que se pudieran apreciar cambios morfológicos inducidos por procesos de migración, de modo de poder

delinear en una planimetría (en escala adecuada) la evolución del curso en ese intervalo de tiempo. Por su parte, se buscaron tramos de ríos en los que se disponga de datos hidrométricos (que permitan estimar los caudales circulantes en los momentos de las escenas que se analizaron) y, eventualmente, datos geotécnicos para poder tipificar tanto el material presente en las márgenes como en el lecho del río. En general, se trata de cauces con lechos arenosos (en los casos de los ríos Bermejo y Luján, el material se sitúa entre el rango de los limos y arenas finas), mientras que las márgenes están conformadas por materiales con ciertos grados de cohesión (en general, suelos estratificados, con presencia de capas clasificadas como CL-ML en el SUCS).



**Figura 1.-** Ubicación de los ríos estudiados.

Luego de seleccionar los tramos y segmentos de ríos a ser analizados, se procedió a la tipificación de cada uno de ellos y al cálculo de los parámetros representativos para describir su forma en planta. En ese sentido, se determinaron: el ancho medio del segmento a nivel del umbral de desborde ( $B$ ), los radios de curvatura medios (tazados por el eje del curso) para cada uno de los arcos de meandros considerados ( $R_c$ ), la longitud de onda de los meandros ( $L_M$ ) y el ancho de la faja de divagación ( $W_M$ ).

En la Figura 2 se presenta en un esquema la manera en la cual se determinaron cada uno de estos elementos. Para ello se procedió a digitalizar cada una de las escenas seleccionadas y se establecieron cuantitativamente los parámetros mencionados sobre la base de entidades gráficas de tipo vectorial.

A posteriori se trabajó en la cuantificación de las tasas de migración, aspecto que se describe a continuación.

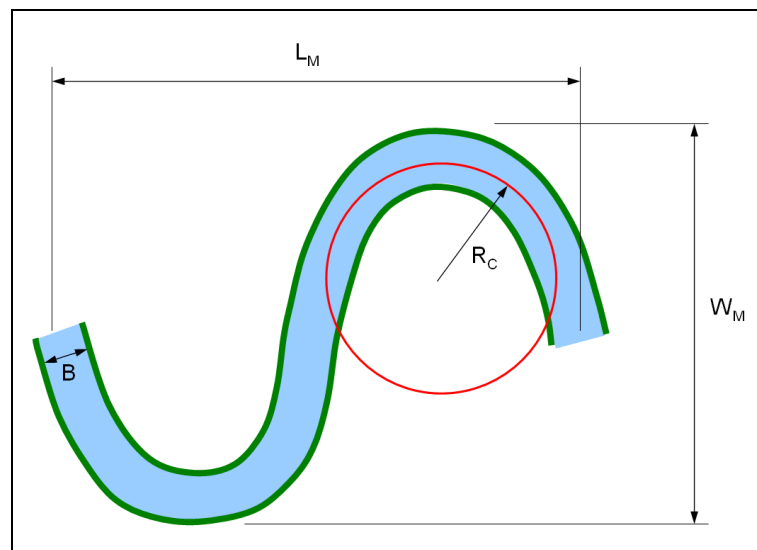


Figura 2.- Esquema de definición para la geometría de meandros

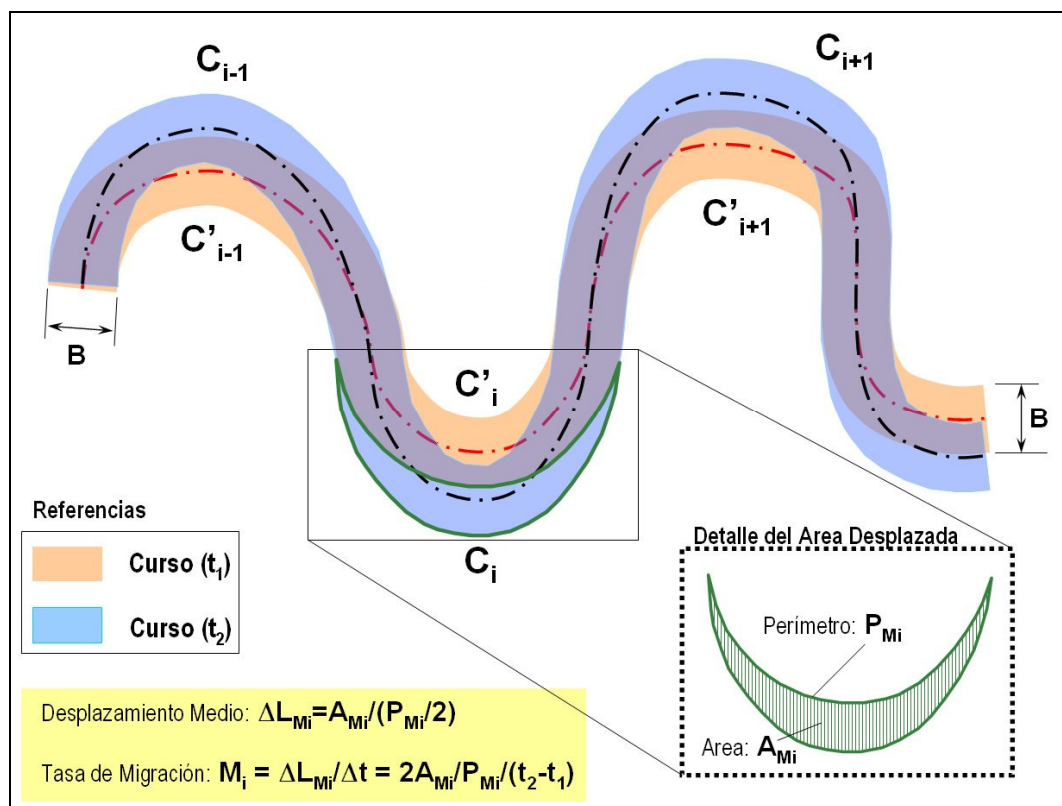
Las secuencias de imágenes satelitales compiladas fueron analizadas y procesadas a los fines de poder estimar cuantitativamente los parámetros morfométricos de interés, tales como anchos de cauces, longitud de onda y amplitud de meandros, radios de curvatura, etc. Las escenas se organizaron por capas y se procedió al trazado (vectorización) de las líneas de márgenes (correspondiente al nivel del umbral de desborde o bankfull), siguiendo los lineamientos fijados para la apreciación de tales características morfológicas. Los tramos de cursos seleccionados se segmentaron para poder identificar sectores con marcado diseño meandriforme. Para cada una de las curvas  $C_i$  identificadas para el análisis, y teniendo en cuenta las dos instancias de tiempo ( $t_1$  y  $t_2$ ) que describen la migración, se determinó la envolvente de la superficie de barrido a través de una entidad gráfica tipo “polilínea”, de la cual se calcularon su área ( $A_{Mi}$ ) y su perímetro ( $P_{Mi}$ ), para así conformar la base de datos usadas en el análisis de migraciones de meandros (Constantine et al., 2009).

Considérese un tramo “T” de un río de llanura, cuyo patrón de alineamiento en planta es de tipo meandriforme, tal como el que se esquematiza en la Figura 3, en la que se supone que el flujo discurre de izquierda a derecha. Es decir, el alineamiento curvilíneo está constituido por una secuencia de “ $N_c$ ” curvas, que se designarán como  $C_1, C_2, \dots, C_i, \dots, C_{N_c}$ . Esta simbología vale para las regiones externas (cóncavas) de las curvas, en las que se desarrollan los procesos de erosión (E). Se designarán homológamente con  $C'_1, C'_2, \dots, C'_i, \dots, C'_{N_c}$  a los sectores de las curvas ubicados sobre los lados internos (convexos), en donde los procesos dominantes son los de deposición (D) de sedimentos, que se manifiestan como acreción o avance de las márgenes en forma de desarrollo de barras empuntadas (point-bars; Leopold et al., 1964; Rosgen, 1996).

En el esquema de la Figura 3 se designa con “B” al ancho del curso a nivel del umbral de desborde (bankfull; Knighton, 1984) y se supone que el mismo permanece aproximadamente

constante a lo largo del tramo y a lo largo de la evolución del curso en el tiempo. Esta es una restricción inicial importante a los efectos del análisis, pero a la vez es una hipótesis que ha sido usada por diversos investigadores (e.g., Chang 1988; Julien 2002) en la descripción y modelación de los procesos de evolución de meandros (Yalin & Silva, 2001).

Ahora considérese el curso fluvial en el instante “ $t_1$ ” y posteriormente en un instante “ $t_2$ ” ( $t_2 > t_1$ ). En ese lapso de tiempo ( $\Delta t = t_2 - t_1$ ) el sistema habrá experimentado una evolución, tal como se esquematiza en la Figura 3. Observando lo que ocurre en la curva genérica “ $C_i$ ” puede apreciarse que la misma ha experimentado un desplazamiento, y en ese movimiento ha “barrido” un área “ $A_{Mi}$ ” (que se indica en el detalle de la figura) que habitualmente exhibe la forma de una “medialuna” más o menos deformada. Se designará con “ $P_{Mi}$ ” al perímetro de esa superficie desplazada. La migración media se determina a partir del criterio de Constantine *et al.* (2009).



**Figura 3.-** Esquema de definición en planta para calcular la tasa de migración  $M$

La tasa promedio de desplazamiento en correspondencia con la curva  $C_i$  se calcula con la expresión:

$$\Delta L_{Mi} = A_{Mi} / (P_{Mi} / 2)$$

Por su parte, la tasa de migración  $M_i$  (para la curva  $C_i$ ) se estima a partir de la fórmula:

$$M_i = \Delta L_{Mi} / \Delta t = 2A_{Mi} / P_{Mi} / (t_2 - t_1)$$

En esta expresión conviene expresar  $M_i$  en metros/año (m/a), ya que los valores referenciales publicados en la literatura habitualmente se indican en esas unidades.

Los tramos de ríos analizados se describen brevemente a continuación:

Ríos Aranillas, Seco y Gastona (Figuras 5, 4 y 6, respectivamente): estos tres cursos se ubican en la misma región geográfica, es decir, la planicie tucumana correspondiente al sector situado al Este del faldeo oriental del sistema serrano “Nevados del Aconquija”, y forman parte de la cuenca superior del sistema fluvial Salí-Dulce, aguas arriba del Embalse Río Hondo. En este caso se analizaron varios períodos, correspondiendo el intervalo 1990-2000 para el Río Aranillas, 1990-2000 para el Río Seco y 2002-2007 para el Río Gastona. En todos los casos, los tramos estudiados se ubican en la franja de territorio ubicada entre la traza antigua de la Ruta Nacional N°38 y la nueva traza recientemente construida, que se ubica al Este de la anterior.

Río Juramento (Figura 7): en el caso de este río se analiza un tramo ubicado aguas debajo de la presa El Tunal (Provincia de Salta), localizado al sudeste de la Localidad de Ceibalito. Se trata de un tramo que a pesar de estar ubicado en una zona con una intensiva afectación a actividades productivas agropecuarias, aún no ha sido afectada por estas acciones antropogénicas y la planicie de inundación presenta condiciones para el libre desarrollo y evolución de los meandros típicos del río en este sector. Para este caso se han analizado los desplazamientos que han ocurrido en algunas curvas en un período de 1 año hidrológico (2005-2006), tal como se consignan en las imágenes analizadas a partir de la aplicación GoogleEarth™.

Río Luján (Figura 8): El tramo en estudio corresponde a un segmento de este río ubicado inmediatamente aguas arriba del puente sobre la Carretera Panamericana (Ruta Nacional N°9), provincia de Buenos Aires. El período analizado comprende desde 2003 a 2006.

Río Bermejo (Figura 9): En este caso, se analizó un tramo importante de este río (el cual discurre por el límite entre las provincias de Formosa (N) y Chaco (S)), comprendido entre las localidades de El Colorado y Lucio V. Mansilla (Formosa), de unos 100 km de longitud. Este es un tramo de una marcada actividad en cuanto a los procesos de migración, que afectan sectores productivos (cultivos de arroz) en la zona y también han oblicado a la relocalización de varios segmentos de la ruta provincial N° 9 (Formosa). El lapso estudiado corresponde a los años 1990 y 1995.

Una vez compiladas las secuencias de imágenes satelitales e identificadas las fechas de captura e las escenas usadas, se procedió a su análisis primario (rectificación, georeferenciación, etc.) para poder ser procesadas cuantitativamente a los efectos de determinar los parámetros morfométricos de interés.

Las escenas se organizaron por capas y se procedió al trazado (vectorización) de las líneas de márgenes (correspondiente al nivel del umbral de desborde o bankfull), siguiendo los lineamientos esquematizados previamente en la Figura 3.

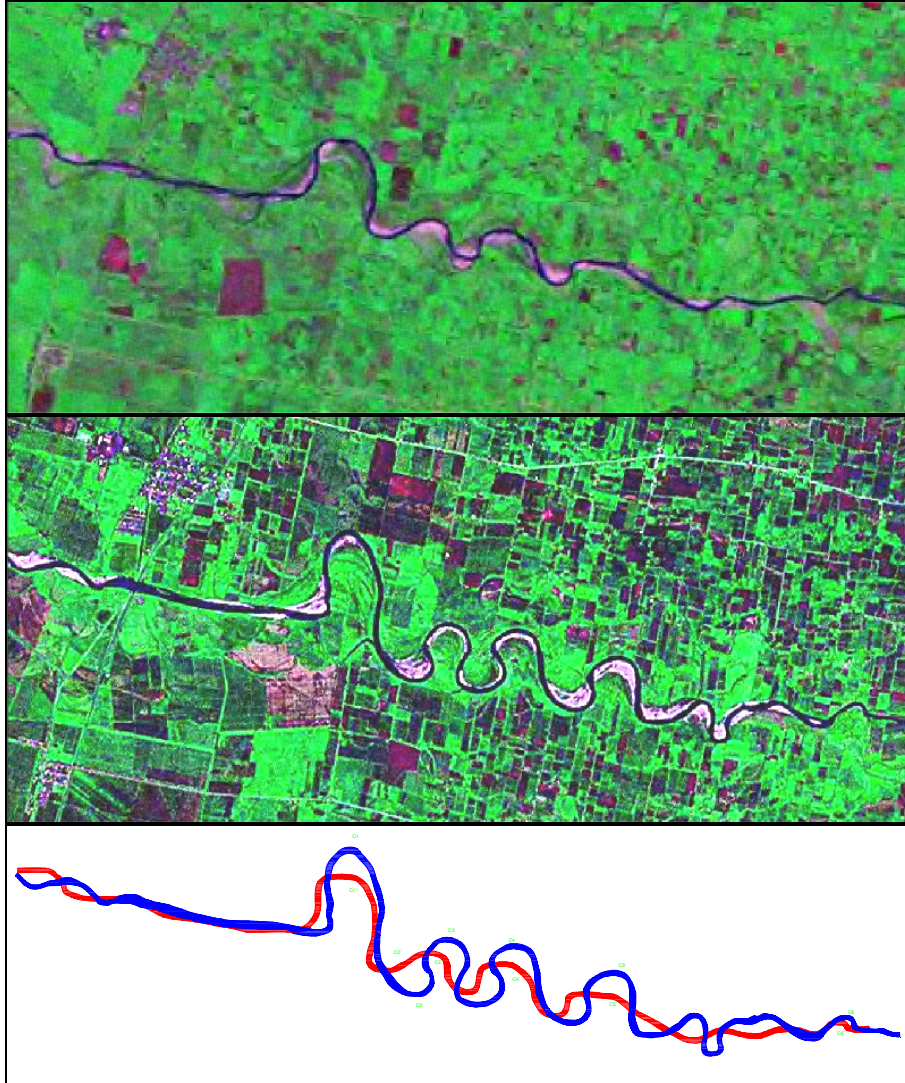
Para cada una de las curvas  $C_i$  identificadas para el análisis, y teniendo en cuenta las dos instancias de tiempo ( $t_1$  y  $t_2$ ) que describen la migración, se determinó la envolvente de la

superficie de barrido (ver esquema en el detalle de la Figura 3) a través de una polilínea, de la cual se calcularon su área ( $A_{Mi}$ ) y su perímetro ( $P_{Mi}$ ).

En las Figuras 4 a 9 se presentan las escenas correspondientes a los instantes  $t_1$  y  $t_2$  para los seis tramos analizados, conjuntamente con la superposición de los cursos vectorizados en cada uno de los tramos en cuestión. En el caso del Río Bermejo (Figura 9) se presenta sólo un segmento ilustrativo, ya que el tramo analizado es muy largo y en la escala de representación no se podrían advertir con un nivel razonable de detalle los desplazamientos observados en el curso.

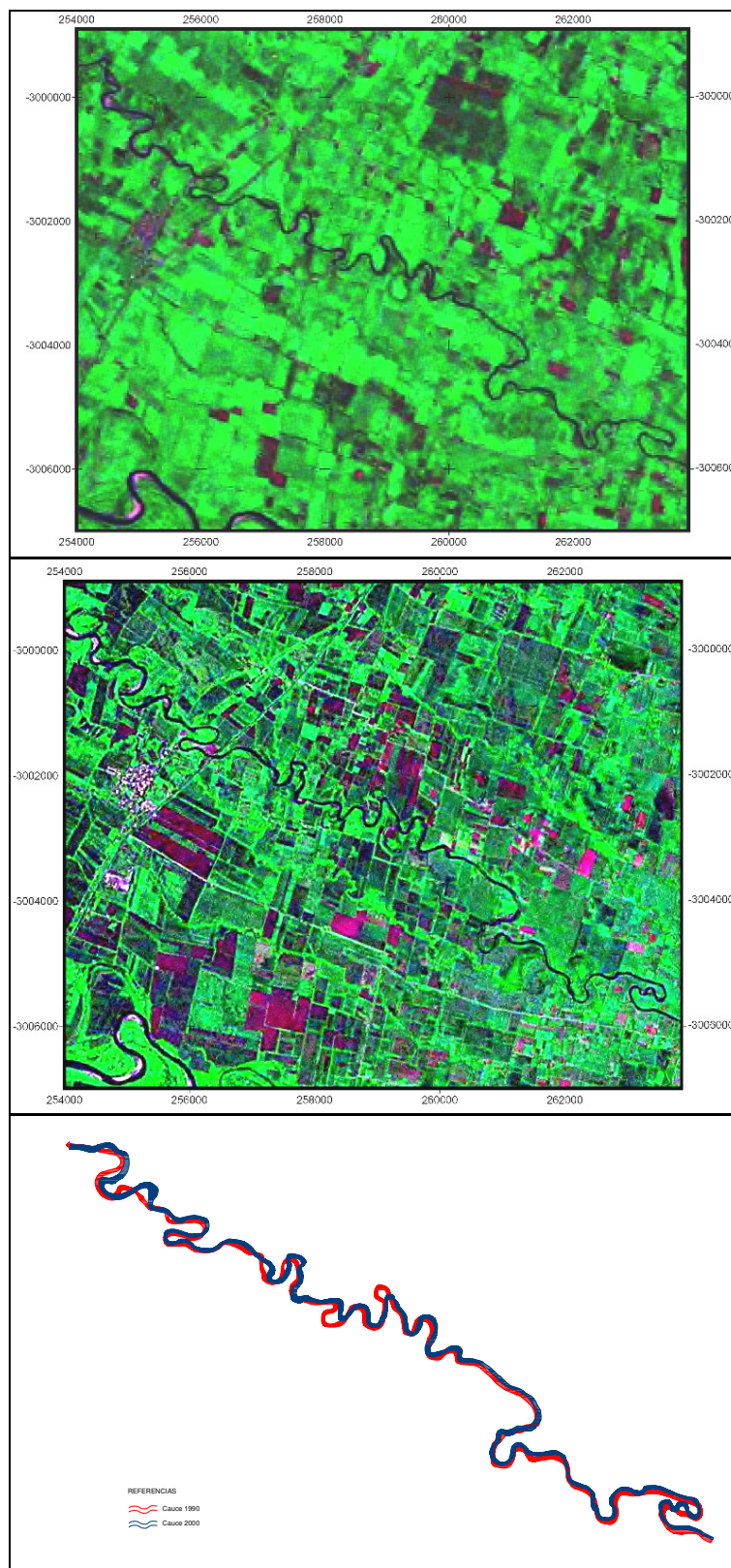
Con la finalidad de preservar la homogeneidad en cuanto a la visualización de las figuras se ha representado, para todos los casos, con color rojo el curso en el instante  $t_1$  mientras que la posición en el instante  $t_2$  se representa en azul.

Los resultados se compilan en la Tabla 1, en la que se indican todos los parámetros calculados. En las tres últimas columnas se presenta el ancho medio ( $B$ ) del curso y los valores de migración específica ( $M/B$ ), relativa al ancho, además de la relación ( $E/D$ ) calculada, en forma genérica para la curva  $C_i$ , como el cociente  $[M(C_i)/M(C'_i)]$ .



**Figura 4.-** Evolución del Río Seco (Tucumán, Argentina) entre 1990 y 2000

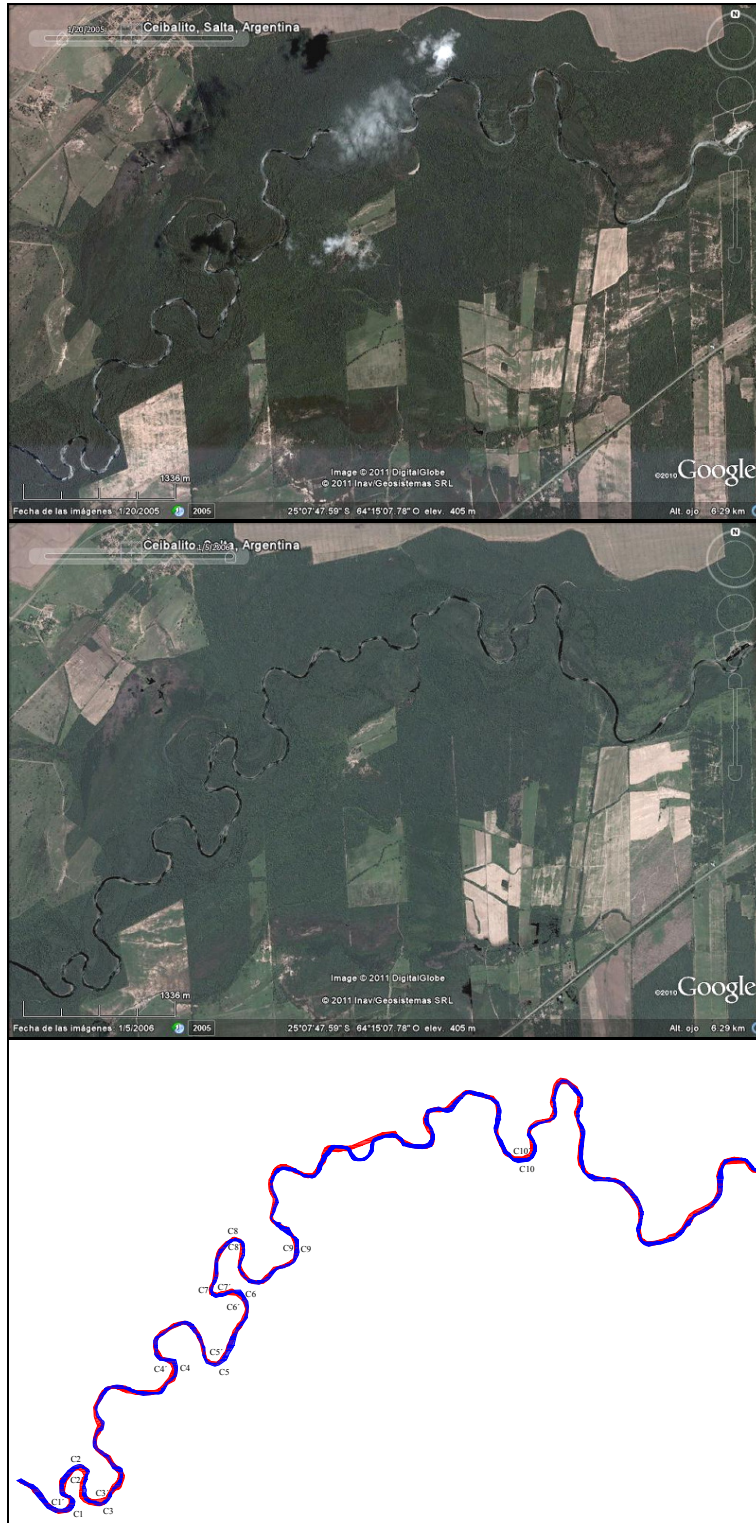




**Figura 5.-** Evolución del Río Aranillas (Tucumán, Argentina) entre 1990 y 2000



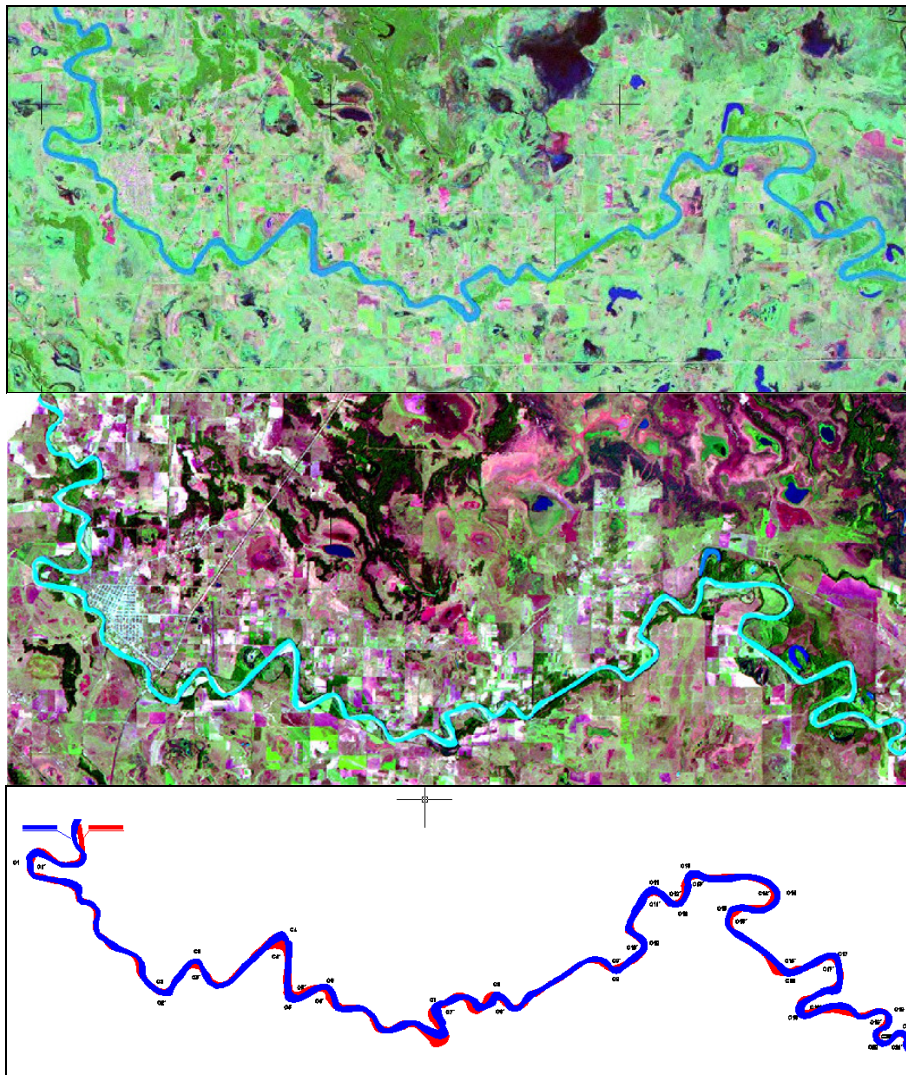
**Figura 6.-** Evolución del Río Gastona (Tucumán, Argentina) entre 2002 y 2007



**Figura 7.-** Evolución del Río Juramento (Salta, Argentina) entre 2005 y 2006



**Figura 8.-** Evolución del Río Luján (Bs.As., Argentina) entre 2003 y 2006



**Figura 9.-** Evolución del Río Bermejo (Formosa-Chaco, Argentina) entre 1990 y 1995

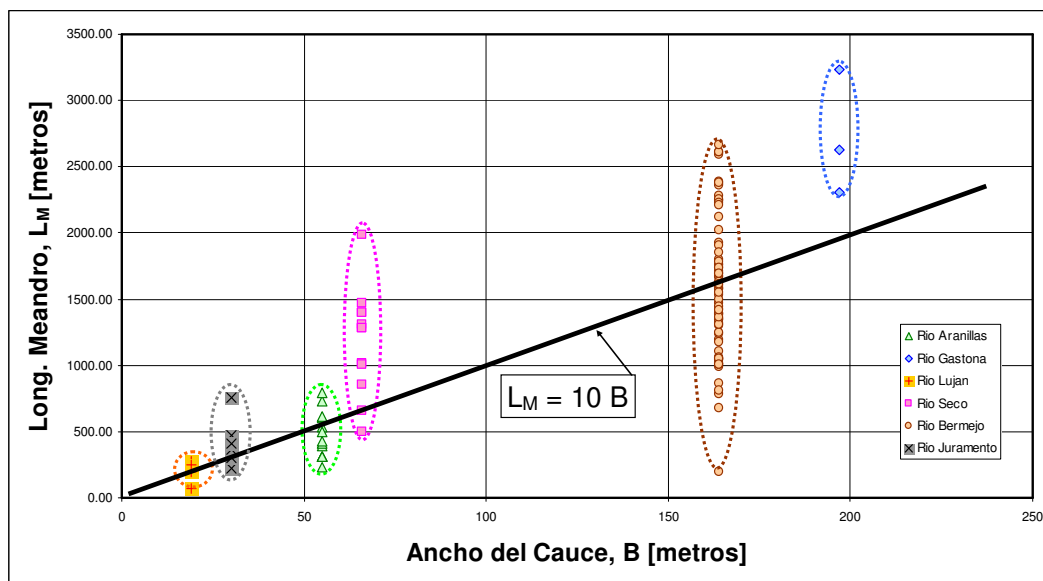
## EVALUACIÓN DE RESULTADOS

En una primera instancia se procedió al análisis de la geometría de meandros observadas en cada río, para poder tipificar el comportamiento de los cursos en relación a estos aspectos y a la vez poder comparar el mismo con patrones observados en otras regiones del mundo y disponibles en la literatura (e.g., Rosgen, 1996).

En las Figuras 10 a 14 se presentan algunos de los resultados obtenidos, tales como el comportamiento de la longitud de meandros ( $L_M$ ), ancho de faja de divagación ( $W_M$ ) y el radio de curvatura ( $R_c$ ) en función del ancho medio del cauce a nivel de desborde ( $B$ ). En la Figura 10 se indican los valores individuales de la relación “ $L_M$ - $B$ ”, en la cual no obstante la dispersión observada (que ha sido indicada con envolventes elípticas para mostrar los clusters

o agrupamientos de puntos experimentales para cada río), puede discernirse una tendencia general que está más o menos de acuerdo con las funciones estándar que habitualmente se disponen en la literatura.

A fin de clarificar el gráfico los puntos representados para cada río indican los valores promedio de todos los segmentos analizados (Figuras 11, 12 y 13). En el gráfico  $L_M$ - $B$  se han trazado también las relaciones observadas en la literatura (del tipo  $L_M=K_L B$ , donde  $K_L$  es una constante, que varía entre 10 y 12 según la fuente) (Farias, 2005). Se observa que los ríos analizados, el Aranillas, el Luján, el Juramento y el Bermejo muestran comportamientos que tienden a colapsar sobre la recta  $K_L=10$ , mientras que el Seco y Gastona (ríos muy sinuosos y dinámicos en términos de migraciones) se ubican incluso por encima de la recta  $K_L=12$ , lo cual indica longitudes de meandros por encima de la tendencia media a nivel global.



**Figura 10.-** Comportamiento de la relación entre longitud de meandro y ancho del curso

En la relación para el ancho de la faja de meandros, también se ha indicado la función que responde a la media general que se presenta en la literatura, es decir:  $W_M = 4.5 B$ . En este caso, los puntos correspondientes a los ríos Luján y Bermejo se ubican prácticamente sobre esa curva, mientras que los otros cuatro se apartan de ella (por exceso) en mayor o menor grado. Nuevamente, el Seco y el Gastona son los que más se apartan, con discrepancias del orden del 100% para ambos.

Por su parte, en la relación  $R_c$ - $B$  nuevamente los ríos que se apartan de la tendencia general (en torno a la recta  $R_c=3B$ ) son el Seco y el Gastona, el primero marcadamente por encima de la función media y el segundo levemente por debajo. La interpretación inmediata indicaría que estos cauces muestran un grado de inestabilidad morfológica en cuanto a la geometría de sus meandros.

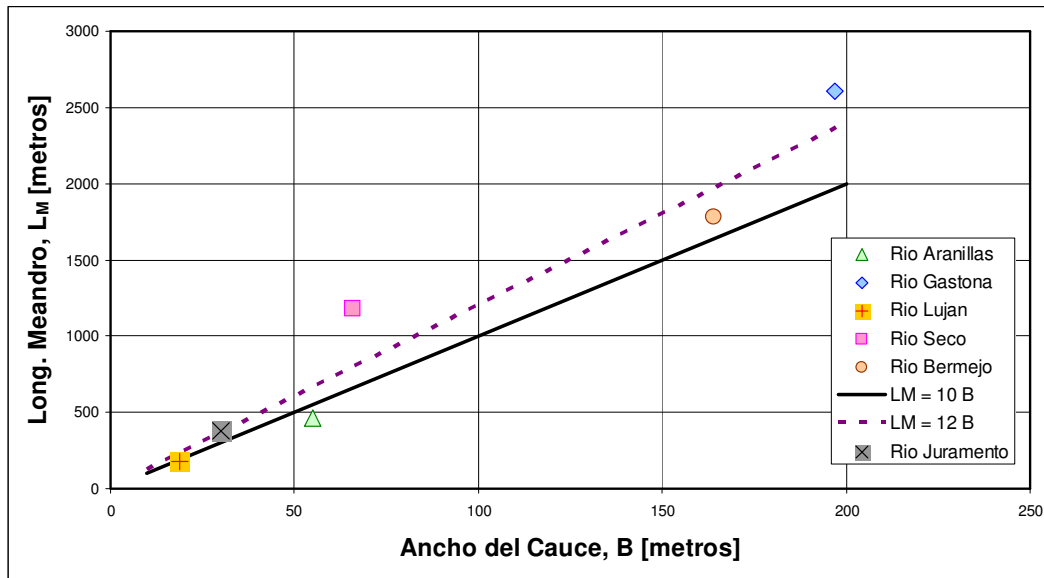


Figura 11.- Relación entre longitud de meandro y ancho del curso (valores promediados)

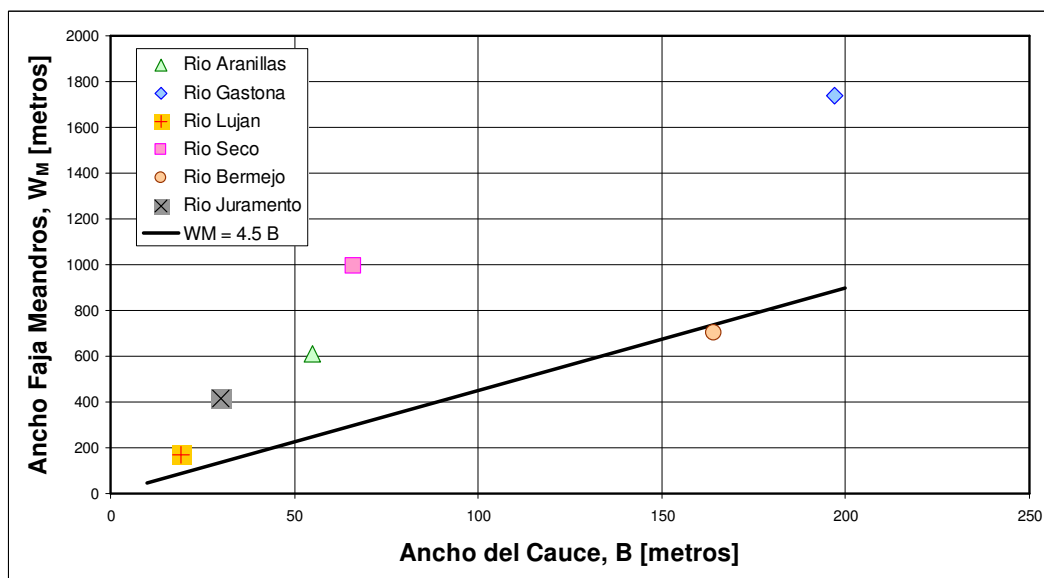


Figura 12.- Relación entre ancho de faja de meandros y ancho del curso (valores promediados)

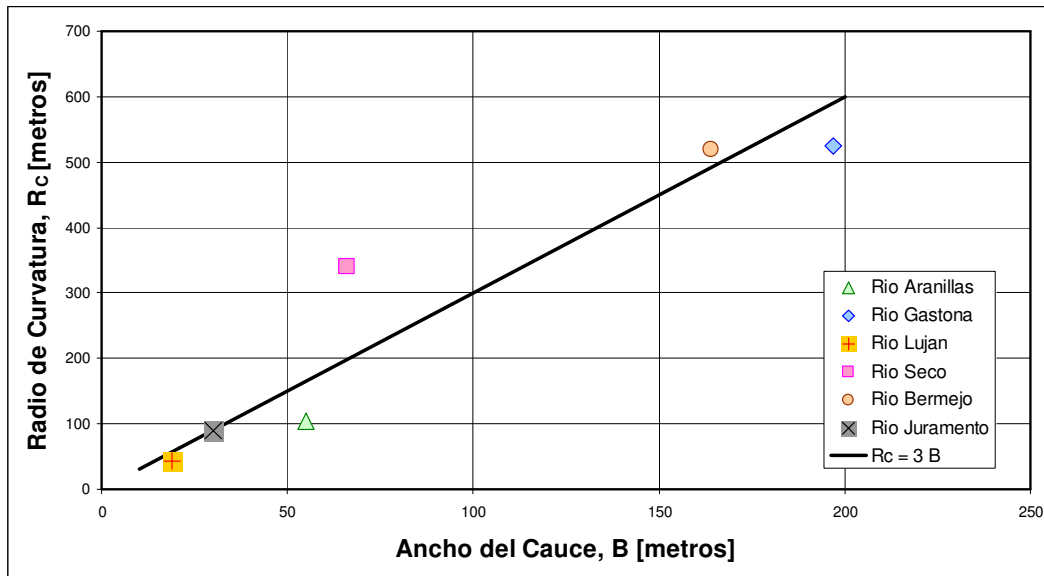


Figura 13.- Relación entre radio de curvatura de meandro y ancho del curso (valores promediados)

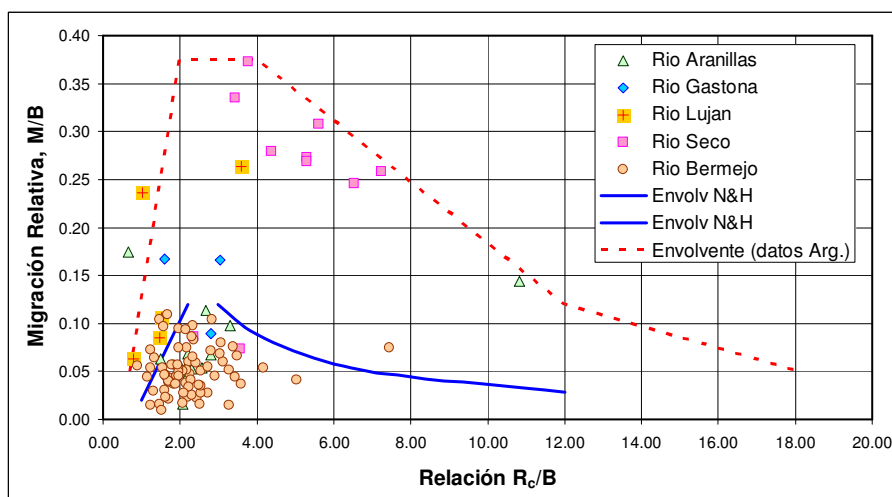


Figura 14.- Migración observada en los ríos estudiados

En la Figura 14 se presenta el comportamiento de la migración específica ( $M/B$ , donde  $M$  es la tasa media de migración anual) en función de la razón  $R_c/B$  en un gráfico del tipo Nanson & Hickin (Julien, 2002). En este caso se han ploteado todos los puntos analizados. En el marco de la apreciable dispersión que se observa se indican las envolventes sugeridas por N&H. Puede advertirse que una gran fracción de los puntos se ubica dentro de esas envolventes. Nuevamente, muchos de los puntos del Río Seco se apartan de ese comportamiento general, con tasas de migración específica mucho mayores a las reportadas en la literatura, y también se observan (con valores más moderados de  $M/B$ ) datos de los ríos Luján, Gastona y Aranillas por encima de la envolvente.



Un aspecto a destacar es que, al margen de las discrepancias, los valores de migración máxima se ubican en el rango de  $R_c/B$  de 2 a 4, lo cual coincide con los valores reportados en la literatura (Julien, 2002).

## CONCLUSIONES

Las conclusiones presentadas tienen el carácter de preliminares, ya que aún el estudio se encuentra en la etapa de compilación de datos de otros ríos de estas y otras regiones, para los que se realizarán análisis morfológicos similares a los aquí presentados.

Teniendo en cuenta ese aspecto, en este trabajo se han presentado aspectos de geometría de meandros y migraciones de ríos de llanura pertenecientes a varias regiones argentinas. El comportamiento de estos ríos se compara con lo observado a nivel global en cuanto a estos tópicos, con algunas excepciones que muestran casos de apreciable inestabilidad morfológica.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Chang, H. H.** (1988). *Fluvial Processes in River Engineering*. J. Wiley and Sons, New York, USA.
- Constantine, C.R., Dunne, T. & Hanson, G.J.** (2009). "Examining the physical meaning of the bank erosion coefficient used in meander migration modeling". *Geomorphology*, Vol. 106, pp. 242–252. doi:10.1016/j.geomorph.2008.11.002
- Farias, H.D.** (2005). "Forma en Planta de Ríos de Llanura. Conciliación de Criterios Empíricos y Analíticos para la Identificación de Umbrales Morfológicos". *2º Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos*, Neuquén, Argentina. [[http://irh-fce.unse.edu.ar/TC/TC\\_Farias\\_Forma\\_en\\_Planta.pdf](http://irh-fce.unse.edu.ar/TC/TC_Farias_Forma_en_Planta.pdf)]
- Julien, P. Y.** (2002). *River Mechanics*. Cambridge University Press, United Kingdom.
- Rocha Felices, A.** (2009). "La Morfología Fluvial y su Incidencia en la Estabilidad de las Obras Viales". *VII Congreso Internacional de Obras de Infraestructura Vial*. Academia Peruana de Ingeniería, Lima, Perú.
- Rosgen, D.** (1996). *Applied River Morphology*. Wildland Hydrology, Pagosa Springs, Colorado, USA.
- Schumm, S. A.** (1977). *The Fluvial System*. Blackburn Press, UK & USA.
- Yalin, M.S. & Ferreira da Silva, A.M.** (2001). *Fluvial Processes*. IAHR Monograph, A. A. Balkema Publishers, Rotterdam, The Netherlands.



Instituto de Recursos Hídricos



Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías



Universidad Nacional de Santiago del Estero



Instituto Nacional del Agua



Subsecretaría de Recursos Hídricos



Agencia Nacional de Promoción Cient. y Tec.



Gobierno Prov. de Santiago del Estero



Ministerio de la Producción



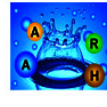
Secretaría del Agua



Secretaría de Desarrollo, Ciencia y Tecnología



Consejo Prof. de la Ingeniería y Arq.



Asociación Argentina de Recursos Hídricos



Asoc. Internacional de Investig. Hidroamb.



Comisión Regional del Río Bermejo



CORPORACION ARGENTINA TECNOLÓGICA S.A. INGENIERIA CIVIL E HIDRAULICA

