

FORMA EN PLANTA DE RÍOS DE LLANURA. CONCILIACIÓN DE CRITERIOS EMPÍRICOS Y ANALÍTICOS PARA LA IDENTIFICACIÓN DE UMBRALES MORFOLÓGICOS

Hector Daniel Farias

Instituto de Recursos Hídricos (IRHi-FCEyT-UNSE)
Av. Belgrano (S) 1912, (G4200ABT) Santiago del Estero, Argentina.
E-mail: hfarias@bigfoot.com - Web: <http://irh-fce.unse.edu.ar/>

RESUMEN

Se presenta una breve revisión de los criterios para la predicción de la forma en planta y la identificación de los umbrales morfológicos que definen un cambio de configuración en el caso de ríos de llanura. Mediante el análisis de criterios energéticos y comparación con datos de ríos reales, se encuentran algunos indicadores de ciertas tendencias de los ríos de llanura que parecerían conciliar algunos enfoques empíricos con aspectos teóricos de reciente desarrollo. Los criterios analizados se aplican a dos tramos diferentes de un río de llanura y se discuten los resultados obtenidos.

ABSTRACT

A brief review of criteria for the prediction of plan form and morphological thresholds for plain alluvial rivers is presented in this study. The analysis of energy-based criteria and the comparison with field river data show the existence of indicators that describe certain trends in alluvial rivers. It appears that these indicators are conciliatory of empirical approaches with theoretical developments of recent publication. The procedures are applied to two different reaches of a plain alluvial river and the results are discussed.

INTRODUCCIÓN

La gran mayoría de los ríos de llanura tienden a adquirir morfologías estables (caracterizadas por un estado de cuasi equilibrio dinámico) cuyos patrones de alineamiento en planta pueden ser a grandes rasgos rectilíneos, meandriiformes o entrelazados. La predicción de la forma óptima resulta de importancia en estudios de ingeniería de ríos y de restauración de corredores fluviales.

En el presente estudio se introduce una revisión de los criterios fundamentales para la predicción de la forma en planta y la identificación de los umbrales morfológicos que definen un cambio de configuración en el caso de ríos de llanura. Se analizan varias situaciones a través de la aplicación de predictores existentes a casos reales.

FORMA EN PLANTA DE RÍOS DE LLANURA

Existen varios criterios de clasificación de la forma en planta de ríos de llanura (Knighton 1984; Rosgen 1996), aunque aún se conserva la clásica discriminación en tres tipos (rectos, meandriiformes y trenzados) introducida por Leopold et al. (1964).

Por su parte, los criterios para el establecimiento de los umbrales que separan un tipo de otro se dividen en los puramente empíricos y los racionales o analíticos (Chang 1988; Gilvear 1999; Bledsoe y Watson 2001).

Para ríos aluviales, el alineamiento meandriforme parecería ser la forma más plausible y eficiente a través de la cual el sistema tiende a minimizar progresivamente su pendiente para aproximarse a la condición de equilibrio dinámico. Aunque algunos ríos exhiben largos tramos cuasi-rectilíneos, la mayor parte de los ríos de llanura desarrollan meandros más o menos regulares.

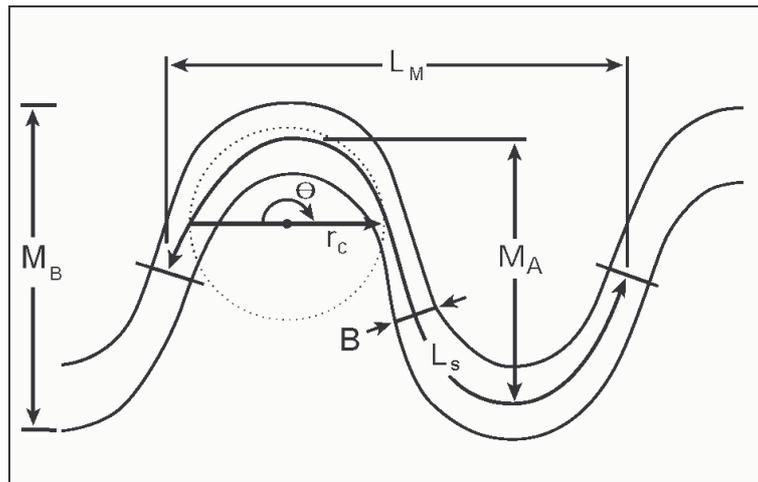


Fig. 1.- Esquema de definición para las características de meandros

La teoría de minimización de la potencia de la corriente (MSP: minimum stream power) establece que para un cauce aluvial, la condición necesaria y suficiente para el equilibrio dinámico ocurre cuando la potencia de la corriente por unidad de longitud del curso ($\gamma \cdot Q \cdot S$) tiende a un mínimo, sujeto a restricciones dadas (Chang, 1988; Deng y Singh, 2002).

Para un caudal dado (e.g., para condiciones de caudal dominante, $Q=Q_D$) la minimización de potencia equivale a minimizar la pendiente ($S = S_{\min}$).

Teniendo en cuenta la Fig. 2, si se designa con ΔH a la diferencia de cotas entre los puntos nodales (i.e., M_1 y M_2 , o M_2 y M_3 , respectivamente), la diferencia de elevación en un meandro completo será $2\Delta H$. Por su parte, la longitud del meandro (distancia entre los puntos M_1 y M_3 a lo largo del valle) será L_M . Por lo tanto, la pendiente media del flujo en el tramo meandriforme será:

$$\bar{S} = 2\Delta H / L_s \quad (1)$$

donde L_s es la longitud del arco de meandro correspondiente a la longitud de onda L_M . La pendiente local $S(s)$ varía a lo largo del eje de flujo y alcanza su valor máximo en los puntos más alejados del eje del valle y su valor mínimo en los nodos (M_1, M_2, M_3) ubicados sobre el eje del valle. Como el mínimo de $S(s)$ es un valor mayor que cero, la condición de minimización de la potencia de la corriente se escribe ahora:

$$\bar{S} = 2\Delta H / L_s \rightarrow \text{mínimo} \quad (2)$$

sujeto a la restricción:

$$S(s) > 0 \quad (3)$$

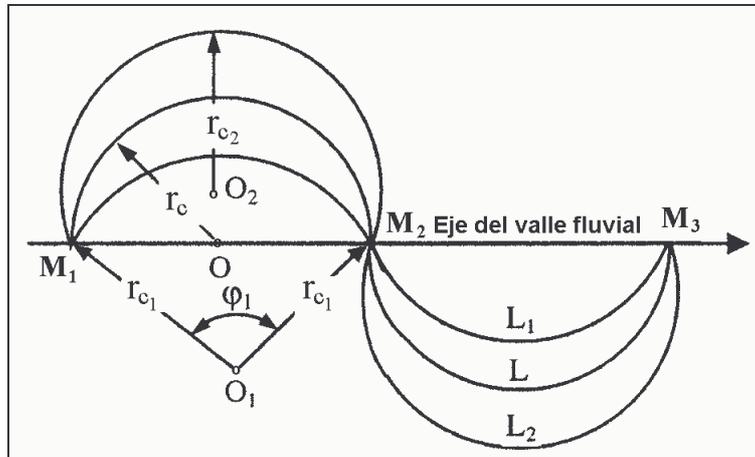


Fig. 2.- Esquema de definición para la sinuosidad óptima

En la Fig.2 los bucles de longitudes L_1 , L_2 y L representan tres etapas típicas en el desarrollo de un meandro. El bucle L_1 está caracterizado por el radio de curvatura del cauce r_{c1} , el centro O_1 y el ángulo central $\phi_1 < \pi$. El bucle L_2 está caracterizado por el radio de curvatura del cauce r_{c2} , el centro O_2 y el ángulo central $\phi_1 > \pi$. Finalmente, El bucle L está caracterizado por el radio de curvatura del cauce r_c , el centro O (ubicado sobre el eje del valle) y el ángulo central $\phi = \pi$.

Para una diferencia de cotas $2\Delta H$ dada la condición de minimización de la potencia corresponde a la condición de que L_s adquiera un valor máximo (máxima trayectoria del flujo). De los bucles (L_1 , L_2 y L), L_1 no puede satisfacer la primera condición, debido a que exhibe una trayectoria más corta del flujo comparada con L_2 y L , mientras que L_2 no puede satisfacer la segunda condición cerca del eje del valle.

Evidentemente, el único bucle que satisface simultáneamente ambos requerimientos es el de longitud L , y que resulta la mitad de una circunferencia. De esta manera, la condición de minimización de la pendiente deriva en:

$$L_M = 4 r_c, L_s = 2 \pi r_c \quad (4)$$

con lo que la sinuosidad óptima será:

$$(L_s/L_M)_{opt} = \pi/2 = 1.57 \quad (5)$$

Investigaciones con datos de campo han demostrado que para el caso de ríos de llanura meandriiformes dinámicamente estables el radio de curvatura del cauce tiende a adquirir valores del orden de tres veces el ancho del cauce a nivel de desborde (bankfull) (e.g., Chang, 1988). Es decir:

$$R \approx 3 \cdot B, \text{ de donde: } L_M = 4 \cdot R \approx 12 \cdot B \quad (6)$$

El desempeño de estas relaciones frente a datos experimentales (canales de laboratorio y ríos naturales) indica una muy buena correlación. Si se realiza un análisis de regresión sobre los datos, se obtiene:

$$L_M = 12.03 B^{0.987} \quad (7)$$

(con un coeficiente de correlación de $r = 0.986$).

La ecuación

$$L_M = 12 B \quad (8)$$

exhibe un comportamiento prácticamente indistinguible de la de mejor ajuste.

Para la función $B = f(r_c)$ se obtuvo el ajuste

$$B = 0.435 r_c^{0.937} \quad (9)$$

mientras que para la función inversa se obtuvo:

$$r_c = 2.68 B^{1.051} \quad (10)$$

(con un coeficiente de correlación $r = 0.9634$).

La función

$$r_c = 3 B \quad (11)$$

también resulta casi indistinguible respecto a la función de mejor ajuste.

PREDICTORES DE LA FORMA EN PLANTA

Existen varios predictores para discriminar la forma en planta de ríos de llanura. En la Fig. 3 se presenta el clásico criterio de Leopold y Wolman (Leopold et al., 1964). En el estudio se realizó un análisis comparativo preliminar de los criterios puramente empíricos y también de aquellos basados en razonamientos que incluyen la consideración de los procesos físicos (involucrando criterios energéticos basados en la hidrodinámica y el transporte de sedimentos) que afectan la estabilidad del cauce, el desarrollo de un patrón curvilíneo y la ocurrencia de ríos con múltiples ramas interconectadas entre sí. Las metodologías analizadas incluyen los criterios de Parker (Dade 2000), van den Berg (1995) y de Yalin & Da Silva (2001), entre otros.

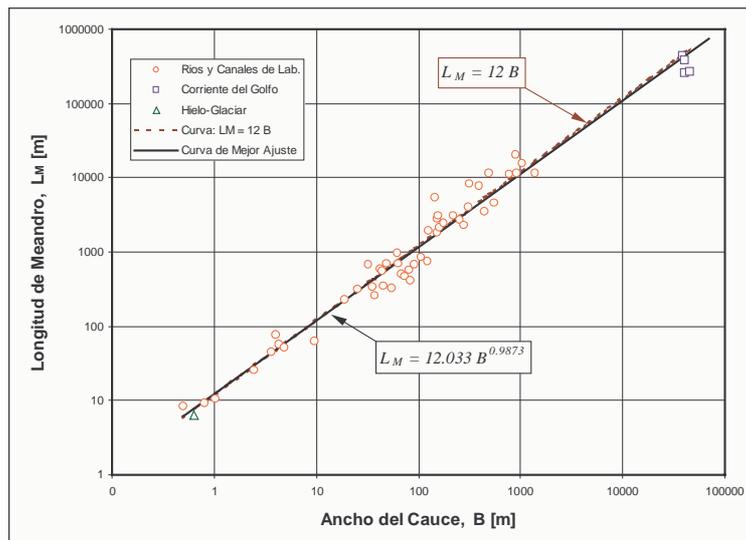


Fig. 3.- Relación entre la longitud de onda de meandros y el ancho del cauce

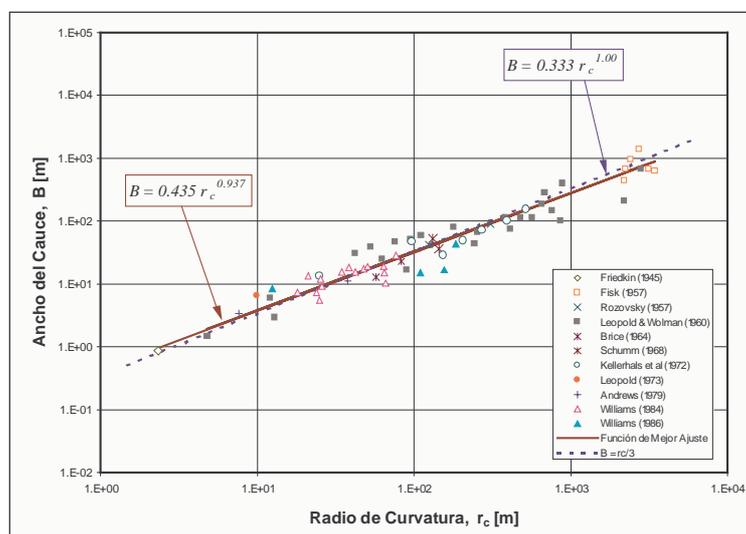


Fig. 4.- Relación entre el radio de curvatura y el ancho del cauce.

Parker introdujo un parámetro adimensional (Π_P), que se puede definir como el cociente entre el trabajo mecánico (por unidad de longitud del curso) requerido para mantener el cauce estable (γAS) y la energía disponible por parte del flujo, contabilizando la contribución de la energía potencial y la cinética $[(\rho V^2 H)^{1/2} (\rho g H^2)^{1/2}]$.

Con ello resulta:

$$\Pi_P = g^{1/2} H^{1/2} B^2 S Q^{-1} \quad (12)$$

Se puede demostrar que:

$$\Pi_P = \Gamma S / Fr \quad (13)$$

donde $\Gamma = B/H$ es la razón de aspecto de la sección transversal del cauce y $Fr = V / (g \cdot H)^{0.5}$ es el número de Froude correspondiente al flujo asociado al caudal dominante. De este modo, si el

valor de Π_P es pequeño, puede interpretarse que hay un exceso de energía disponible para que la corriente pueda emplearla en los procesos de erosión de márgenes y ensanchamiento del cauce. Así, las oscilaciones periódicas del poder erosivo del flujo determinan la aparición de meandros. Por su parte, para valores altos del parámetro Π_P hay insuficiente energía para mantener el ancho existente y de esta manera para lograr anchos menores el flujo modela depósitos en la región central del cauce y se desarrolla un patrón trenzado.

Un río para el cual $\Pi_P > 1$ tiende a desarrollar un patrón entrelazado en el que el número de ramas es proporcional a Π_P , mientras que en el caso en que $\Pi_P \ll 1$ se desarrollará un cauce meandriforme. Luego de analizar una importante cantidad de datos de ríos en todo el mundo (incluyendo grandes ríos de llanura, como el Brahmaputra y el Mississippi), Dade (2000) observó que los mayores valores de sinuosidad se presentan en ríos con $10^{-2} < \Pi_P < 10^{-1}$. Asimismo, los ríos donde $\Pi_P > 1$ son no-sinuosos y trenzados. Esto incluye ríos con predominancia de transporte de fondo y en algunos casos carga mixta, mientras que los ríos meandriformes se caracterizan por una preponderancia de transporte en suspensión.

La longitud de onda de los meandros puede predecirse con la expresión:

$$L_M/B = k_M (C_* Fr / \Gamma)^{1/2} \quad (14)$$

donde k_M es un coeficiente adimensional que agrupa varias constantes y vale alrededor de 10 (Dade, 2000) y C_* ($=V/U_*$) es el coeficiente adimensional de resistencia de Chezy para el flujo asociado al caudal dominante.

Considerando las expresiones anteriores, pueden definirse dos escalas de longitud características. Por un lado, se introduce la denominada "longitud de remanso" $L_H = H/S$, que corresponde a la extensión hacia aguas arriba sobre la cual los cambios morfológicos son comunicados casi instantáneamente bajo condiciones de bajos números de Froude (Dade, 2000). Por otra parte, se considera la escala característica de Parker, $L_P = (C_* \cdot B \cdot H \cdot Fr)^{1/2}$ deducida a partir de la expresión anterior, y que se torna relevante para valores bajos del parámetro Π_P .

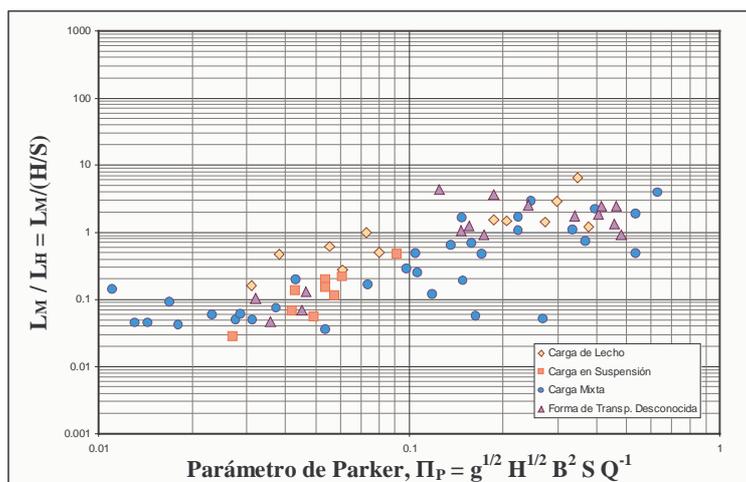


Fig. 5.- Relación entre el parámetro de estabilidad y la longitud de onda de meandro normalizada con L_H .

Un análisis de la Fig.5 indica que para valores transicionales de Π_P levemente menores a la unidad, la longitud de onda de los meandros corresponde aproximadamente a la longitud de remanso ($L_M/L_H \approx 1$). Sin embargo, en la Fig. 6 puede observarse que para $\Pi_P \ll 1$ los valores de L_M/L_P se aproximan a 10 y por lo tanto predomina la escala característica de Parker. Es decir, se cumple que $k_M \approx 10$ en la ecuación de predicción de Parker.

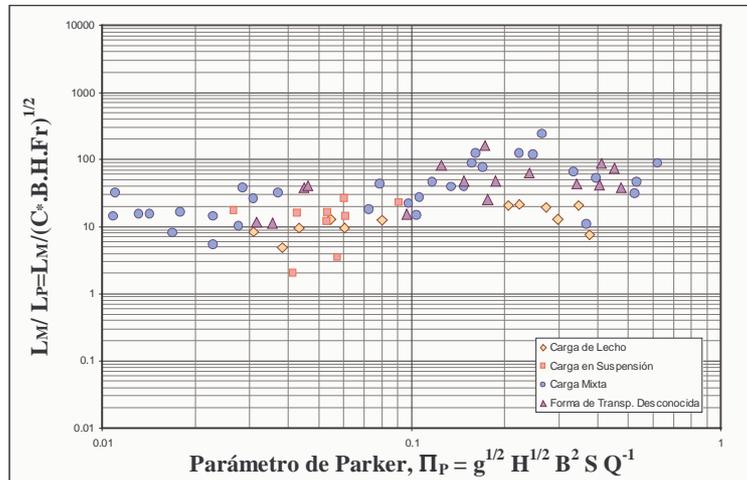


Fig. 6.- Relación entre el parámetro de estabilidad y la longitud de onda de meandro normalizada con L_P .

A partir de lo observado en las Figs. 5 y 6 parecería inferirse que las relaciones entre estabilidad del cauce, sinusidad y longitud de onda de meandros no exhiben una relación sistemática con la modalidad de transporte de sedimentos, más allá de la correlación entre sinusidades bajas y cauces con transporte predominante de fondo o mixto.

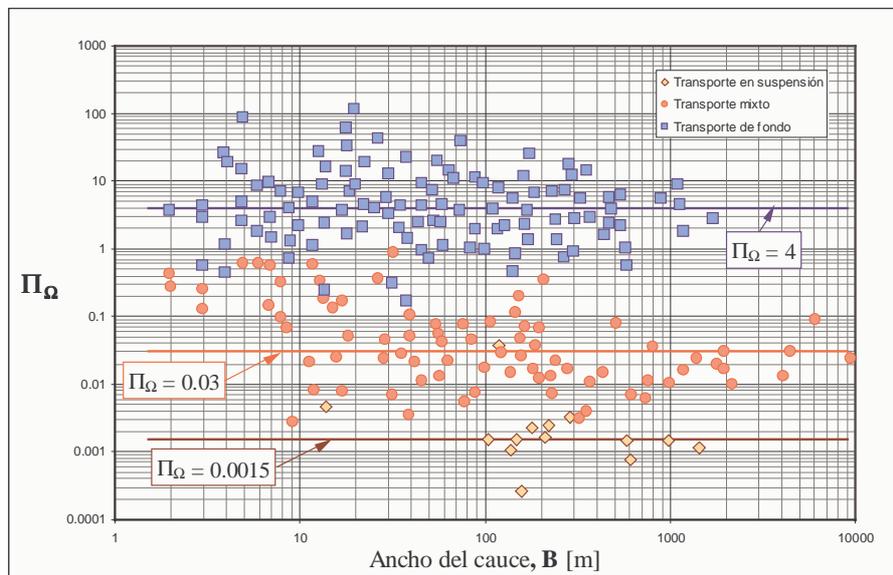


Fig. 7.- Relación entre el ancho del cauce y el parámetro de potencia Π_Ω .

En cuanto a las relaciones entre formas en planta, tamaño del sedimento, modalidad de transporte y aspectos energéticos del flujo, Dade (2000) observó el comportamiento de datos de ríos naturales que cubren un amplio rango de características morfológicas, para los cuales se calculó el valor del parámetro de Shields (τ_{*i}) correspondiente al flujo asociado al caudal

dominante. Mediante ese criterio, encontró valores estimativos característicos para ríos con preponderancia de transporte en suspensión, mixto y de fondo, respectivamente. Esos valores son: $\tau_{*s} \approx 10$, $\tau_{*m} \approx 1$, $\tau_{*b} \approx \tau_{*c}$, donde τ_{*c} es el valor crítico para inicio de arrastre ($\tau_{*c} \approx 0.04$ en el caso de ríos con lecho de grava). Los valores anteriores tienen el carácter de indicadores orientativos.

Un parámetro adimensional importante, que aglutina el ancho del cauce, el tamaño del sedimento y la potencia de la corriente, es el que en el contexto de este trabajo se denomina “parámetro de potencia”, que se define como:

$$\Pi_{\Omega} = [(g \cdot d^3 \cdot B^2) / (Q^2 \cdot S^2)]^{1/2} \quad (15)$$

Teniendo en cuenta las características friccionales del cauce y el parámetro de Shields, el valor del mismo también se expresa como sigue:

$$\Pi_{\Omega} = [C_*^2 \cdot \Delta^3 \cdot \tau_{*i}^3]^{-1/2} \quad (16)$$

donde $\Delta = (\rho_s - \rho) / \rho$ es la densidad relativa del sedimento sumergido.

En la Fig. 7 se presenta la relación entre el ancho del cauce y el parámetro de potencia para el conjunto de datos de ríos compilados por Dade (2000). No obstante la dispersión observada (típica de situaciones con datos de campo en ríos aluviales) puede inferirse que

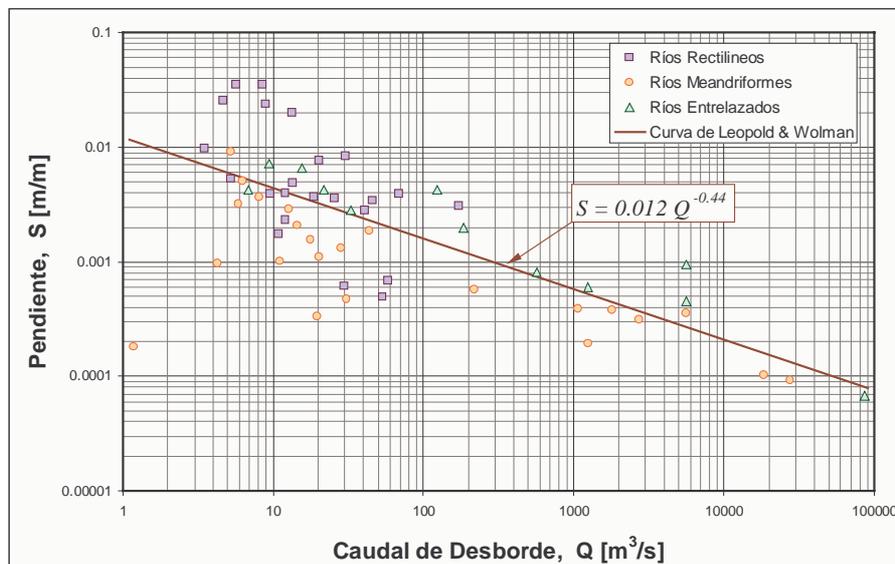


Figura 8.- Criterio de Leopold & Wolman para clasificar formas en planta de ríos aluviales

El uso de criterios energéticos no es nuevo, ya que algunos métodos empíricos empleados por geomorfólogos tiempo atrás llevaban implícitos aspectos basados en la potencia de la corriente. Por ejemplo, el clásico clasificador de Leopold y Wolman (Leopold et al., 1964) (Figura 8), comparable en alguna medida al de Lane, presenta una separación cauces meandriiformes y trenzados a partir de una partición de regiones en el plano 'Caudal-Pendiente'.

Si se recuerda que la potencia de la corriente por unidad de longitud del cauce se expresa como $\gamma.Q.S$ (donde γ es el peso específico del fluido, que se puede considerar constante, S es la pendiente y Q el caudal), es factible asumir que el producto $Q.S$ es un indicador de la potencia de la corriente. Entonces, el discriminador basado en $S = f(Q)$ lleva implícito una consideración energética.

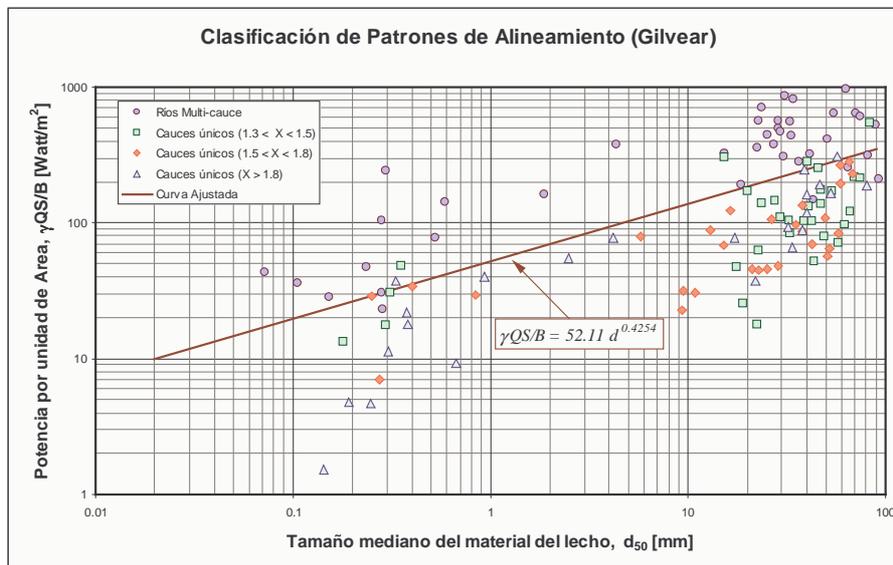


Figura 9.- Criterio de van den Berg

El clasificador de van den Berg (1995) (Fig. 9) se basa en la relación entre la potencia de la corriente por unidad de ancho del lecho ($\gamma.Q.S/B$) y el tamaño característico del sedimento (d), para discriminar entre cauces únicos (con sinuosidad X variable) y cauces de brazos múltiples.

APLICACIONES PRÁCTICAS

La aplicación de los diferentes criterios analizados se efectuó sobre dos tramos del Río Dulce, en la provincia de Santiago del Estero, Argentina.

El primer tramo es el comprendido entre el Dique Los Quiroga y las ciudades de Santiago del Estero y La Banda (Figura 10), en el que se está llevando a cabo un estudio del cauce y su planicie de inundación a fin de evaluar el comportamiento fluvio-morfológico ante la presión impuesta por el crecimiento urbano y las obras de protección y control de inundaciones. En este segmento el río presenta una sinuosidad de 1.08 y un trazado de curvas alternadas suaves, ya que no alcanza a desarrollar un patrón meandriforme completamente definido en virtud de las restricciones al desarrollo de procesos de erosión de márgenes y migración lateral impuesto por las obras ejecutadas en la planicie de inundación, sumado a una disminución del caudal dominante por efecto de la regulación de caudales.



Figura 10.- Tramo urbano del Río Dulce entre las ciudades de La Banda y Santiago del Estero (Argentina)

El segundo tramo analizado corresponde a un segmento del Río Dulce, ubicado entre las localidades de Loreto y Brea Pozo, aproximadamente unos 70 km al sur del tramo anterior (Figura 11). En este sector el río posee una sinuosidad del orden de 1.93 y el patrón de alineamiento es altamente meandriforme, con el desarrollo de meandros de gran amplitud, y con cortas naturales periódicas.

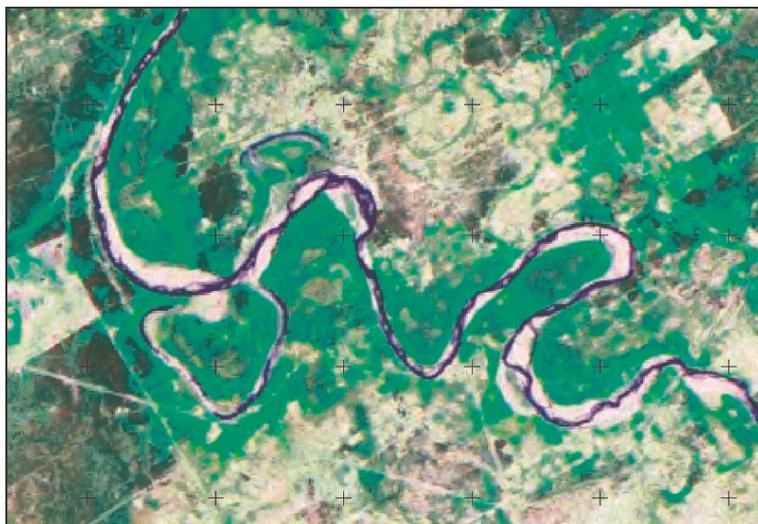


Fig. 11.- Tramo del Río Dulce entre las localidades de Brea Pozo y Loreto (Santiago del Estero, Argentina)

Justamente como consecuencia de la importante actividad morfológica del río, y el incremento de asentamientos poblacionales y actividades productivas (agricultura y ganadería) en la planicie de inundación, se han efectuado intervenciones antrópicas severas sobre el cauce, y en el contexto de este estudio se estiman las tendencias evolutivas futuras en función de la aplicación de los criterios antes descriptos.

Se discuten las distintas posibilidades de adquisición de un patrón de alineamiento en planta en condición de cuasi-equilibrio dinámico, de modo de poder planificar las obras de control (en esencia, terraplenes y canales piloto) y las obras de explotación (tomas libres para canales de riego) en las ubicaciones correctas y con la tipología y dimensiones adecuadas, en un contexto de armonía con el corredor fluvial, de modo de minimizar los impactos tendientes a alterar la condición de régimen hacia la cual evoluciona el río.

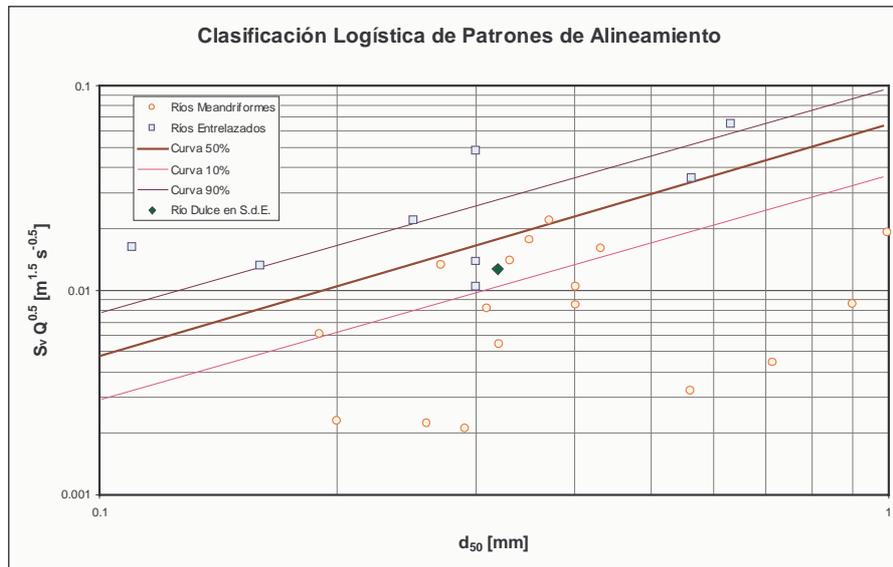


Figura 12.- Análisis de regresión logística de los datos originales de van den Berg. Ríos con lechos arenosos (Bledsoe & Watson, 2001). Se indica la posición correspondiente al tramo urbano del Río Dulce.

Como la aplicación de los distintos criterios produce resultados en algunos casos contrapuestos, se ha desarrollado un análisis que para el caso termina conciliando los enfoques empíricos con algunas teorías de funcionamiento que parecerían cumplirse en esta situación. Como ejemplo se indican las ecuaciones tipo régimen de Parker (ecs. 12 a 15, basadas en un análisis de estabilidad), mientras que en la Fig. 12 se indica el diagrama basado en una regresión logística de Bledsoe y Watson (2001).

CONCLUSIONES

Se ha presentado una revisión de los criterios para la predicción de la forma en planta y la identificación de los umbrales morfológicos que definen un cambio de configuración en el caso de ríos de llanura. Mediante el análisis de criterios energéticos y comparación con datos de ríos reales, se han encontrado algunos indicadores de ciertas tendencias de los ríos de llanura que parecerían conciliar algunos enfoques empíricos con aspectos teóricos de reciente desarrollo. Los criterios analizados se han aplicado a dos tramos diferentes de un río de llanura y se discuten los resultados obtenidos.

Agradecimiento. Las investigaciones presentadas en el presente trabajo fueron financiadas por el Consejo de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Universidad nacional de Santiago del Estero (CICYT-UNSE) [Proyecto 23-C042], la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT) [Proyecto FONCYT PICTR2002-00175] y el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

LISTA DE SÍMBOLOS

A :	Área de la sección transversal del flujo
a_i :	Constantes (i = 1, 2, 3, ...)
B :	Ancho del cauce (a nivel del lecho) (= T en ríos “anchos”)
b_i :	Constantes (i = 1, 2, 3, ...)
c_j :	Constantes (j = 1, 2, 3, ...)
C_* :	Coefficiente adimensional de Chézy
d :	Tamaño mediano de las partículas de sedimento (d = d_{50})
d_* :	Parámetro adimensional de partícula (= $[(g \cdot \Delta / v^2)^{1/3} \cdot d]$)
g :	Aceleración de la gravedad
H :	Profundidad media del flujo en una sección estable
h :	Profundidad local del flujo
k_i :	Constantes (i = 1, 2, 3, ...)
L_H :	Longitud de remanso ($L_H = H/S$)
L_M :	Longitud de onda de meandros
m :	Inclinación de los taludes en un cauce de sección trapecial
M_B :	Ancho de la faja de meandros
P :	Perímetro mojado
Q :	Caudal líquido
r_c :	Radio de curvatura
R :	Radio genérico
s :	Coordenada curvilínea a lo largo del thalweg
S :	Pendiente del lecho
T :	Ancho del cauce a nivel de la superficie libre del flujo
U_* :	Velocidad de cizallamiento
V :	Velocidad media del flujo
X :	Sinuosidad (= pendiente del valle / pendiente del cauce)
Δ :	Densidad relativa del sedimento sumergido [= $(\rho_s - \rho) / \rho$]
Γ :	Razón de aspecto del cauce (= B/H)
ν :	Viscosidad cinemática
μ :	Viscosidad dinámica
ρ :	Densidad del fluido
ρ_s :	Densidad del sedimento
Π_P :	Parámetro de estabilidad de Parker ($\Pi_P = g^{1/2} H^{1/2} B^2 S Q^{-1}$)
Π_Ω :	Parámetro de Potencia: $\Pi_\Omega = [(g \cdot d^3 \cdot B^2) / (Q^2 \cdot S^2)]^{1/2}$

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bledsoe, B.P & Watson, C.C.** (2001). "Logistic analysis of channel pattern thresholds: meandering, braiding, and incising". *Geomorphology*, Vol. 38, pp. 281–300.
- Chang, H. H.** (1988). *Fluvial Processes in River Engineering*. J. Wiley and Sons, New York, USA.
- Dade, W.B.** (2000). "Grain size, sediment transport and alluvial channel pattern". *Geomorphology*, Vol. 35, pp.119–126.
- Deng, Z.Q. & Singh, V.P.** (2002). "Optimum channel pattern for environmentally sound training and management of alluvial rivers". *Ecological Modelling*, Vol. 154, pp. 61–74.
- Garde, R. J. & Ranga-Raju, K.** (1985). *Mechanics of Sediment Transportation and Alluvial Stream Problems*. Halsted Press, J. Wiley & Sons, NY, USA.
- Gilvear, D. J.** (1999). "Fluvial geomorphology and river engineering: future roles utilizing a fluvial hydrosystems framework". *Geomorphology*, Vol. 31, pp.229–245.
- Julien, P.Y.** (1995). *Erosion and Sedimentation*. Cambridge University Press, NY, USA.
- Knighton, D.** (1984). *Fluvial Forms and Processes*. Arnold Publ. & J. Wiley and Sons, London, UK.
- Leopold, L. B. , Wolman, M. G. & Miller, J. P.** (1964). *Fluvial Processes in Geomorphology*. Dover Publications, Inc. New York, USA.
- Rosgen, D.** (1996). *Applied River Morphology*. Wildland Hydrology, Pagosa Springs, Colorado, USA.
- Van den Berg, J.H.** (1995). "Prediction of alluvial channel pattern of perennial rivers". *Geomorphology*, Vol. 12, No. 259-279.
- Yalin, M.S. & Ferreira Da Silva, A.M.** (2001). *Fluvial Processes*. IAHR Monograph, A. A. Balkema Publishers, Rotterdam, The Netherlands.