

# 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: H.D.Farias@members.asce.org

## 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, meandriformes o entrelazados. La predicción de la forma óptima resulta de importancia en estudios de ingeniería de ríos y de restauración de corredores fluviales.

## Objetivos

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, meandriformes 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.

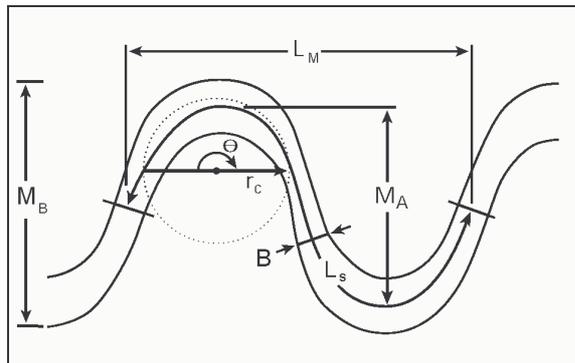


Fig. 1.- Esquema de las características de meandros

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 ( $\gamma Q S$ ) 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  $\Delta H$  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:  $\bar{S} = 2\Delta H / L_s$ , 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:  $\bar{S} = 2\Delta H / L_s \rightarrow$  mínimo, sujeto a la restricción:  $S(s) > 0$

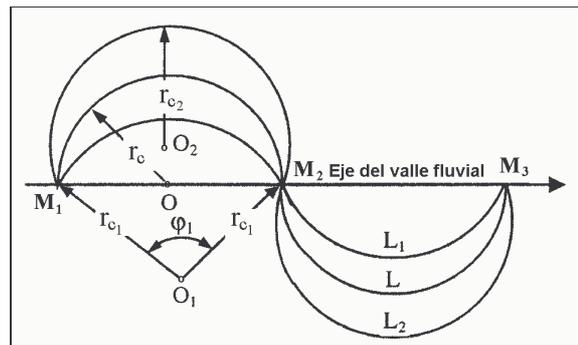


Fig. 2.- Esquema de definición para la sinusoidal óptima

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  $\phi_2 > \pi$ . 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:  $L_M = 4r_c, L_s = 2\pi r_c$ , con lo que la sinusoidal óptima será:  $(L_s/L_M)_{opt} = \pi/2 = 1.57$ .

Investigaciones con datos de campo han demostrado que para el caso de ríos de llanura meandriformes 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:  $R \approx 3 \cdot B$ , de donde:  $L_M = 4 \cdot R \approx 12 \cdot B$

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:  $L_M = 12.03 B^{0.987}$  (con un coeficiente de correlación de  $r = 0.986$ ). La ecuación  $L_M = 12B$  exhibe un comportamiento prácticamente indistinguible de la de mejor ajuste. Para la función  $B = f(r_c)$  se obtuvo el ajuste  $B = 0.435 r_c^{0.937}$ , mientras que para la función inversa se obtuvo:  $r_c = 2.68 B^{1.051}$  (con un coeficiente de correlación  $r = 0.9634$ ). La función  $r_c = 3B$  también resulta casi indistinguible respecto a la función de mejor ajuste.

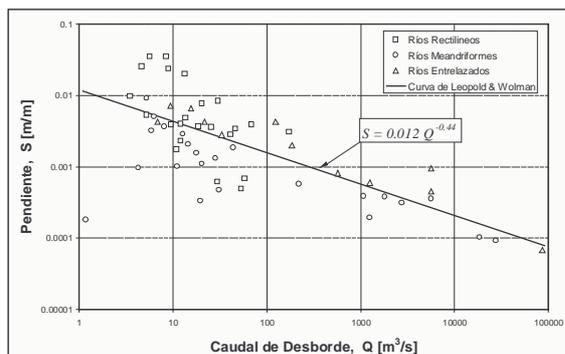


Fig. 3.- Clasificador de forma en planta L&W y datos de campo

### 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 realiza un análisis comparativo de los criterios puramente empíricos y 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.

### 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, 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 meandriiforme 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.

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. En este sector el río posee una sinuosidad del

orden de 1.93 y el patrón de alineamiento es altamente meandriiforme, con el desarrollo de meandros de gran amplitud, y con cortas naturales periódicas. 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. 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.

### 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.

### 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.
- 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.
- Gilvear, D. J. (1999). "Fluvial geomorphology and river engineering: future roles utilizing a fluvial hydrosystems framework". *Geomorphology*, Vol. 31, pp.229–245.
- Chang, H. H. (1988). *Fluvial Processes in River Engineering*. J. Wiley and Sons, New York, 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.