

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA EVOLUCIÓN Y ESTABILIDAD DE CAUCES FLUVIALES CON LECHO DE ARENA

María Teresita Pilán, Francisco José Pece Azar, Hector Daniel Farias

Instituto de Recursos Hídricos, FCEyT-UNSE Av. Belgrano (S) 1912, (4200) Santiago del Estero, Argentina.
e-mail: tpilan@unse.edu.ar

RESUMEN

Se realizan una serie de experimentos a fin de observar la evolución de un canal prismático excavado en una mesa de arena con pendiente variable para un caudal constante. Se miden las variables dependientes a fin de analizar y comparar las mismas con resultados experimentales anteriores y cauces aluviales naturales. La pendiente y el transporte de sedimentos están íntimamente relacionados. Para pendientes y transporte bajos, los canales permanecen rectos, pero para un mismo caudal, talweg se vuelve sinuoso para pendiente mayores de 0.002. Las experiencias llevadas a cabo hasta el presente muestran buenas perspectivas en cuanto a la obtención de una importante base de datos para contribuir a la comprensión de algunos fenómenos relativos a la evolución y estabilidad de ríos de llanura. En particular, se han identificado los umbrales a partir de los cuales se desarrollan barras alternadas y tendencias a la formación de talwegs sinuosos. Los valores de razón de aspecto encontrados para los ríos de cauces únicos cuasi-rectilíneos sitúan a los micro-canales de estos experimentos dentro del rango de estabilidad dinámica o régimen.

ABSTRACT

A series of experiments was performed in a tilting flume to observe the evolution of a prismatic sand channel at a constant discharge. The dependent variables are measured in order to analyze and to compare them with previous experimental results and natural alluvial rivers. Sediment loads and slopes are closely related. At a very low slope and sediment load, the channel remained straight, but at a discharge of 0.4 l/s, a meandering talweg channel was formed at slopes greater than 0.002. The experiments carried out until the present show good perspectives in obtaining an important database to contribute to the understanding of some phenomena relative to the evolution and stability of plain rivers. As a particular aspect, the thresholds have been identified at which channel patterns are altered significantly, and alternate bars and meandering talweg channel are developed. The values of aspect ratio found for the rivers of quasi-rectilinear single-channel indicate that the micro-channels of these experiments are located within the range of dynamic stability or regime.

INTRODUCCIÓN

En el caso de ríos de llanura, cuando la pendiente del valle aluvial es muy pronunciada con relación al caudal líquido y sólido que transporta un canal prismático que fluye sobre ella, este cambia su configuración general transformándose en un canal con talweg sinuoso, en un canal trenzado o en un canal con meandros plenamente desarrollados. Estos cambios están directamente relacionados al tipo de transporte de sedimentos que se produce en el canal.

Sobre la base de la recopilación de antecedentes de experiencias realizadas en microcanales y en otras propias, se puede afirmar que al cabo de un tiempo que oscila entre 12 y 24 horas, el perfil de la sección transversal de un microcanal se estabiliza, el ancho B de la superficie libre es constante y el lecho adquiere una configuración de equilibrio en función de las

características de las variables independientes iniciales: diámetro medio, caudal líquido y caudal sólido.

En la naturaleza son comunes los ejemplos de patrones de meandros, pero la reproducción en laboratorio de canales con una sinuosidad alta y bien definida es aún compleja. En aquellas experiencias que el microcanal disponía de una mesa amplia de arena, o dicho de otra forma, de un “valle”, luego que los mismos alcanzaran su configuración de equilibrio, bajo condiciones controladas (aumento de transporte en suspensión, modificación del ángulo de entrada del agua, disminución de la carga de fondo), se formaron meandros en el talweg, barras romboidales, barras alternadas y meandros en su lecho o simplemente el cauce se modificó hasta producir verdaderos meandros. El tiempo de experimentación requirió en algunos casos de varios días. Esta configuración de equilibrio en planta parecería estar en función, además de las variables mencionadas, de la relación de aspecto, y del proceso mediante el cual se alcance la pendiente de equilibrio (Yalin & Silva, 2001).

OBJETIVOS

Una revisión de la literatura muestra que las hipótesis para explicar el origen de las planimetrías de los cauces aluviales es muy diversa. En las experiencias realizadas por Friedkin (1945), solo se producen un talweg sinuoso. La evolución de la sección transversal muestra que en estado de bank-full las barras alternas están sumergidas y, por lo tanto la sinuosidad del canal es muy baja, mas bien se desarrolla la sinuosidad en el talweg mas que en el canal. Un factor ausente en estas experiencias parece ser la consideración de los cambios en la cantidad y tipo de transporte de sedimento que ocurre en los ríos como resultado de los cambios climáticos ocurridos en el último período geológico.

Para probar esta teoría, Schumm y Khan (1972) diseñaron una serie de experiencias en laboratorio, cuyos resultados se analizan en conjunto con los resultados del presente trabajo. Estos investigadores, mediante un manejo apropiado, en sus experiencias pasan de un transporte predominantemente por el fondo a un transporte en suspensión. Este cambio produce en primer lugar la transformación del talweg de recto a sinuoso, luego el patrón en el cauce es de barras alternas y posteriormente al ser el transporte en suspensión predominante, se producen meandros.

En campo la pendiente es una variable que depende del caudal y de las características del sedimento, pero en laboratorio, es la variable independiente apropiada para definir las experiencias. El objetivo del presente estudio es observar la evolución de un canal prismático excavado en una mesa con pendiente variable para un caudal constante. Medir las variables dependientes, analizar y comparar con resultados experimentales anteriores y cauces aluviales naturales.

EXPERIMENTOS

La mesa experimental está conformada por un recipiente de 1.50 m de ancho, 7.30 m de largo y 0.30 m de profundidad. Se encuentra apoyada en una estructura reticular que cuenta con

apoyos que le permiten vascular y variar la pendiente con buena precisión. En el extremo aguas abajo poseen un depósito para el almacenamiento del agua. Aguas arriba cuenta con un sistema de aquietamiento que permite eliminar los vórtices antes del ingreso del agua al canal excavado. El sistema de recirculación cuenta con una bomba centrífuga de ½ HP que toma el agua y los sedimentos en suspensión del depósito de aguas abajo para impulsarlos hasta el aquietador. En un tramo de la cañería de impulsión se dispone un piezómetro diferencial para determinar los caudales instantáneos de recirculación, el que se calibró mediante aforos volumétricos. Como accesorio del canal se construye un carro móvil que se desplaza a lo largo de este y permite montar los elementos requeridos para la compactación, nivelación del sedimento y excavación del canal, así como del instrumental para realizar las mediciones necesarias durante las experiencias (Fig.1).

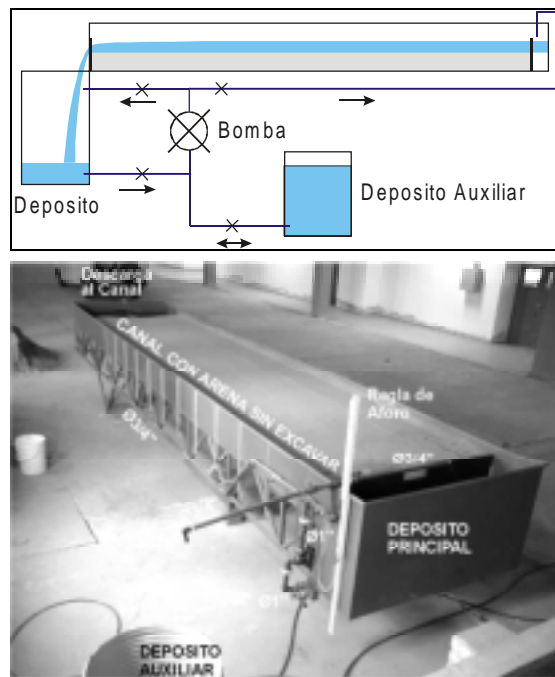


Figura 1. - Instalación Experimental

La sección inicial se excava en la mesa de arena. En las primera experiencia, se trabaja con un caudal de 0.1 l/s. Al ser inestable el sistema, se decide trabajar con 0.4 l/s y una sección inicial de 5 cm de ancho de solera y 4.5 de profundidad. La inclinación del talud es 1.5 y el diámetro medio del material es de 0.015 mm. La configuración inicial del microcanal se observa en la Figura 2.

Se realizaron experiencias para pendientes entre 0.5 y 5 por mil. En todos los casos se permite el ingreso del agua a caudales bajos y progresivamente se alcanza el caudal deseado, 0.4 l/s. Al cabo de pocos minutos se observa en el tramo inicial la formación de formas de fondo, las cuales varían de acuerdo a la pendiente del canal. La sección de control se establece a 4.3 metros de la cabecera del sistema. Para medir la concentración de sedimentos en el equilibrio, una vez alcanzado el mismo, se toma una muestra de 20 litros de la tubería de recirculación del sistema.



Figura 2.-Configuración Inicial

Para una pendiente del 3 y 5 por mil, el lecho se cubre con barras en el centro, ensancha su sección y disminuye considerablemente su tirante. A 4 horas de iniciada la experiencia se observa una disminución del tirante del orden de los 0.5 cm y al final de la experiencia hasta de 1.5 cm. En particular en la experiencia en que la pendiente fue del 5×10^{-3} , en la sección de control la profundidad era aproximada a la inicial. Se observa para dicha sección el inicio y final de las barras. En la Figura 3 se presentan dos fotografías. La primera es al inicio de una corrida para la pendiente de 5 por mil y la segunda es a las 10 horas del inicio de la experiencia para $S = 0.003$. Es importante destacar que en ambos casos, la sección inicial excavada fue insuficiente, acomodándose el caudal en la sección ampliada con la revancha, sobre todo en la cabecera. Aunque en este estadio, se continúan las experiencias para observar su configuración de equilibrio.

Para una pendiente de 2 por mil, el lecho se cubre de barras múltiples siendo su configuración final la de un canal trenzado. Para una pendiente del 1 por mil, y menores, se forman barras alternas y se observa la formación de un talweg sinuoso. Teniendo presente que los valores del Reynold del Grano oscilan entre 1.5 y 4, con lo cual las formas de fondo a esperar son rizos, dunas o rizos superimpuestos en dunas, cualitativamente se asemejan a las barras tal como las presenta esquemáticamente Yalin & Ferreira Da Silva. (2000).



Figura 3: Configuración $S = 0.005$ y $S = 0.003$ respectivamente

En la Figura 4 se observa la configuración final de la sección de control para las pendientes de 0.7, 0.8 y 1 por mil. A medida que disminuye la pendiente, las barras aumentan su tamaño. La sección en el equilibrio es siempre más ancha, tendiente a permitir la emergencia de las barras sobre todo en la experiencia con menor pendiente. Lamentablemente esto no se observa en la sección de control, pero sí a lo largo del microcanal.

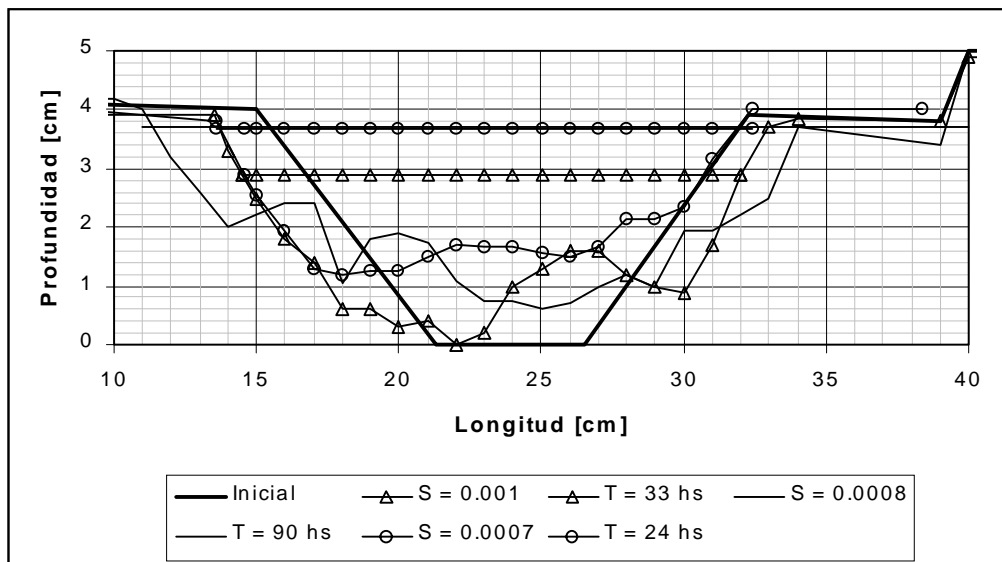


Figura 4: Sección transversal de control

En cuanto a la configuración planimétrica, con el correr de las horas, los bordes del cauce se curvan, alcanzando un estado de equilibrio a un tiempo que depende, entre otros factores, de la cantidad de sedimentos en suspensión. Para una pendiente de 0.8 por mil, se trabaja hasta 90 hs. La concentración de sedimentos en el equilibrio es de 2 ppm. Por el contrario para 0.7 es de 275 ppm. En términos generales se puede decir que al cabo de 48 hs de experimentación, el microcanal alcanza su equilibrio. La configuración final de la sección transversal de control se muestra en la Figura 4 y 5. Como se observa, la sección final es la típica de un canal aluvial en estado de equilibrio.

Sin embargo, la configuración en planta del microcanal presenta variaciones significativas con relación a la configuración original, tal como lo muestra la Figura 6. En la parte superior se observa un talweg sinuoso, mientras que en la parte final está trenzado. Esto estaría indicando un cambio en la pendiente del fondo del canal con relación a algún valor límite. Estudios anteriores (e.g., Schumm y Khan, 1972) presentan situaciones semejantes. Siguiendo sus resultados, se estaría en torno al valor límite superior de la pendiente, por encima del cual la planimetría, cuando el transporte en suspensión disminuye es con talweg sinuoso, y cuando aumenta, tiende a adquirir un patrón trenzado.

Los meandros se presentan en un cauce cuando este fluye sobre un valle cuya pendiente es muy pronunciada para el caudal líquido y transporte en suspensión que dicho cauce conduce. Aún no se ha establecido este patrón en las experiencias realizadas.

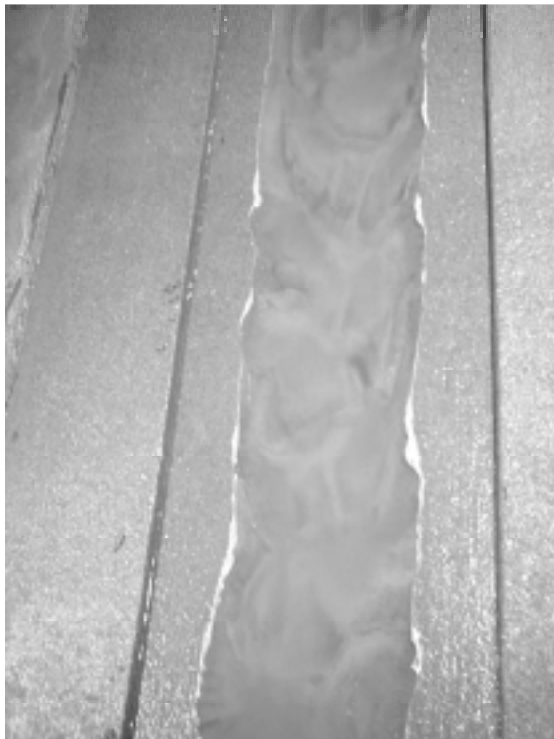


Figura 5.- Sección transversal de control



Figura 6.- Configuración final al cabo de 48 h.

RAZÓN DE ASPECTO

En general, la razón de aspecto de un cauce (Γ) se define como la relación entre su ancho y su profundidad, es decir : $\Gamma=B/H$. Si bien esta definición no presenta inconvenientes interpretativos cuando se refiere a cauces naturales, los cuales son esencialmente canales “anchos”, si puede presentar distintas interpretaciones cuando se aplica a micro-canales más “estrechos”. En efecto, una de las formas de calcular este parámetro es mediante la relación entre el ancho superficial y la profundidad central de cauce ($\Gamma_T=T/H$); otra dividiendo el ancho superficial entre la profundidad media (A/T), es decir resulta $\Gamma_M=T^2/A$ y también puede estimarse como el cociente entre el perímetro mojado y el radio hidráulico ($\Gamma_P=P/R$). En el presente estudio se elige, en la medida que los datos lo permitan esta última relación.

La profundidad relativa H_* es la razón de la profundidad central H al tamaño mediano (d_{50}) del material. Alternativamente, puede usarse el cociente entre el radio hidráulico y el tamaño de la partícula: $R_*=R/d$. Estas magnitudes (H_* y R_*) son muy importantes desde el punto de vista hidráulico-fluvial, ya que las mismas son indicadoras de la recíproca de la rugosidad relativa ($k_s/R \approx k_s/H$, donde k_s es la rugosidad absoluta) y su valor tiene marcada influencia en los procesos de resistencia al flujo.

En los canales arenosos en régimen reales contenidos en la base de datos anteriormente mencionada y, dentro del rango de diámetros del conjunto de experiencias de laboratorio ($d_{50} < 0.9 \text{ mm}$), la razón de aspecto varía de 7 a 35, mientras que la profundidad relativa, desde 1000 hasta 25000. La representación de canales semejantes en laboratorio debe arrojar valores dentro de dichos rangos.

En la Figura 7 se presenta en escala aritmética, la relación entre la razón de aspecto y la profundidad relativa para todos los experimentos en microcanales seleccionados .

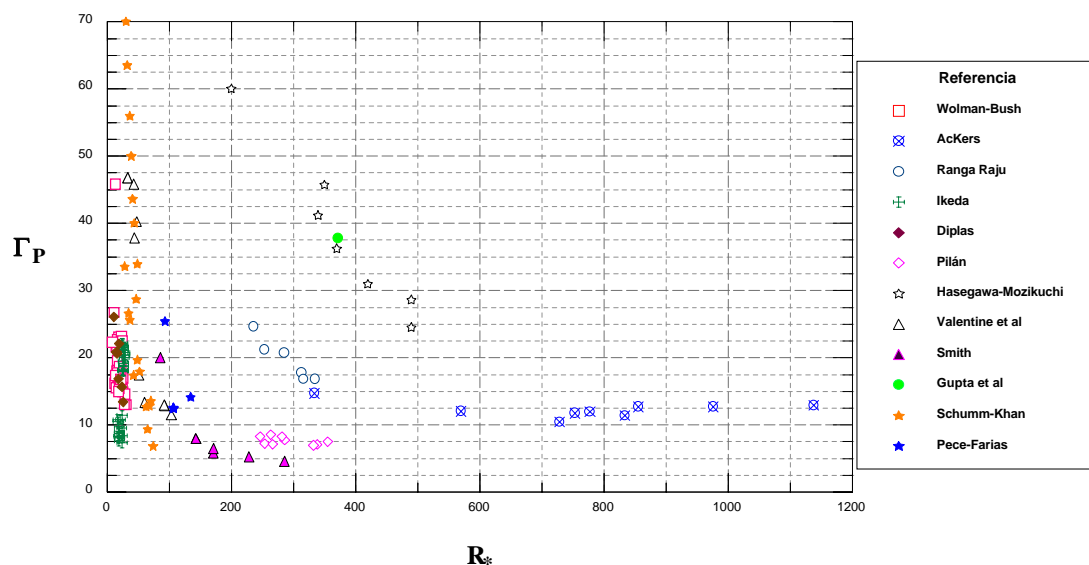


Figura 7.- Relación entre la Razón de Aspecto y la Profundidad Relativa

Los nuevos resultados experimentales presentan una razón de aspecto mayor a 10 y menor a 25. Los valores de profundidad relativa, por debajo de 200. Comparten la franja ascendente junto con los de Smith, material del orden de los micrones (Smith, 1998) y Iso resultados experimentales de Schumm y Khan.

Un aspecto importante en el contexto de la estabilidad de cauces lo constituye la razón de aspecto Γ o relación ancho profundidad. En la Fig. 8 se presenta un gráfico de Γ en función del caudal adimensional $Q_* = Q / (g \Delta d^5)^{0.5}$, en el que se incluyen más de 700 datos de ríos naturales, canales estables y micro-canales de laboratorio.

Para un rango de valores de Q_* que cubre 11 ciclos logarítmicos, se observa que la gran mayoría de los datos se agrupan en el rango de valores de Γ de 8 a 24, ubicándose los experimentos de este estudio en el rango de 10 a 20, lo cual es un indicativo de estabilidad morfológica y representatividad de ríos de llanura.

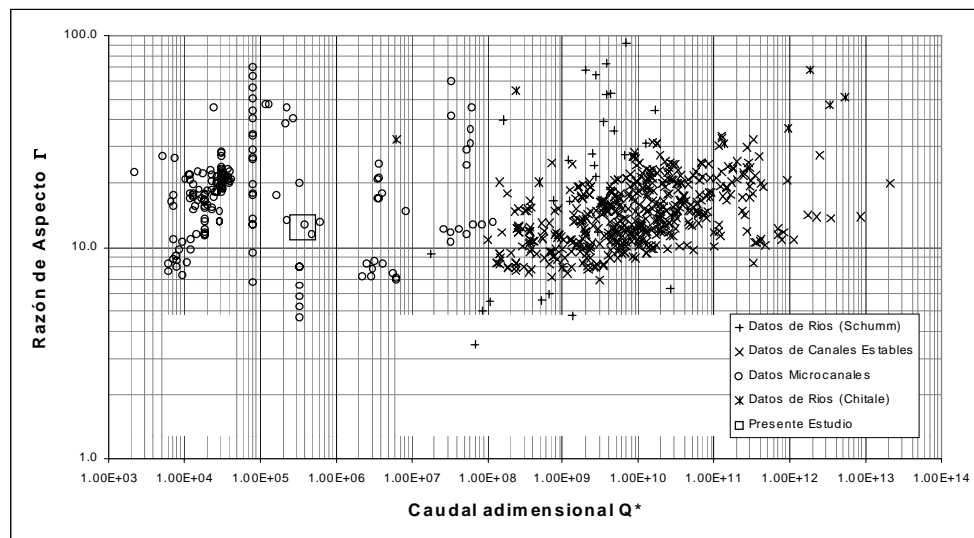


Figura 8.- Relación entre razón de aspecto y caudal adimensional.

CARACTERÍSTICAS FRICCIONALES

En estudios anteriores (Farias y Pilán, 2000), se presentó la siguiente relación de fricción:

$$V = 5.622R^{0.516}S^{0.258}$$

En la Figura 9 se presentan los resultados del comportamiento friccional de los micro-canales, en el plano $[R^2S - V]$ y en escala logarítmica, ya que se ha encontrado que este tipo de representación gráfica constituye un artificio aceptable para visualizar los datos en canales de escala natural (Farias y Pilán, 2000). Como se observa, el comportamiento de tres de los actuales en aceptable. Estos corresponden para pendientes entre 1 y 0.7 por mil. En los tres valores restantes, corresponden a pendientes de 2,3 y 5 por mil. Esto induce a pensar ue le expresión de la velocidad es capaz de predecir valores razonables de la velocidad en los microcanales para pendientes menores o iguales a 0.001. El radio hidráulico varía entre 0.16 y 2.

Analizando los nuevos resultados en relación a los anteriores, se observa que se alinean con los de Akcers (1964), Pilán (1998), Gupta (1996) y Schumm y Khan (1972). Estos experimentos se realizaron para diámetros medios entre 0.15 mm y 0.2 mm. Del conjunto de datos de Schumm–Khan, para $d_{50} = 0.74$ mm la predicción es buena solo para aquellas corridas donde la pendiente fue mayor a 6.5 por mil.

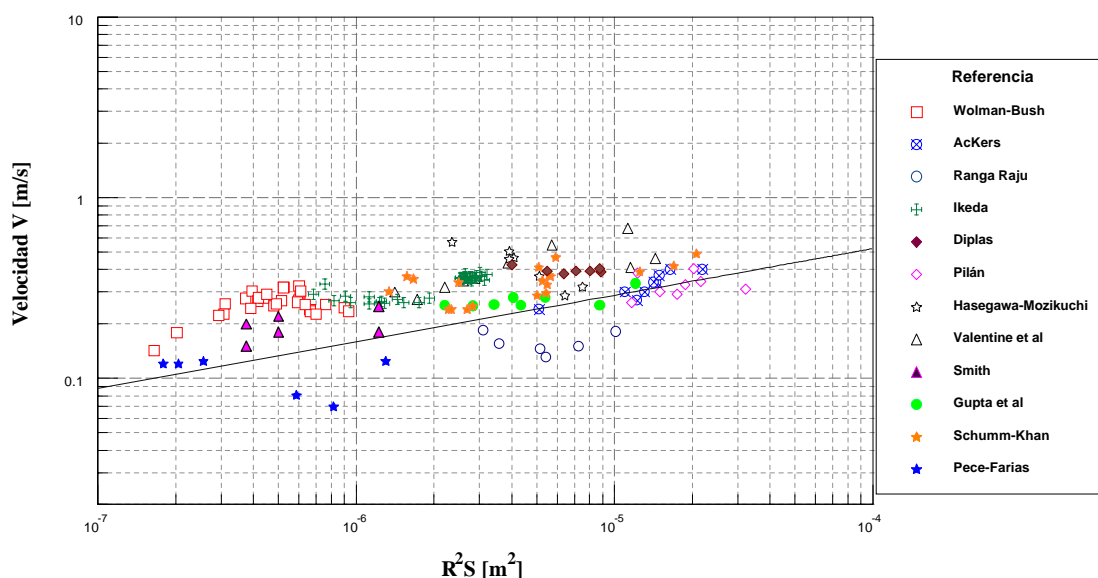


Figura 9: Características friccionales de los micro-canales aluviales

Formas de Fondo

Un aspecto muy importante en el estudio de canales aluviales naturales, lo constituye el hecho de que la configuración del fondo del cauce habitualmente no es plana, sino que se modifica con las condiciones del flujo y las características del material que forma el lecho. Trabajando en régimen fluvial inferior, las formas de fondo a esperar que se presenten en los cauces naturales con lechos arenosos son rizos, dunas y dunas con rizos superpuestos. En virtud de su marcada incidencia sobre la resistencia al escurrimiento y por lo tanto sobre la geometría final de régimen, es que se analizan los tipos de formas de fondo que se desarrollan en los micro-canales de laboratorio para evaluar su semejanza con los eventuales los prototipos a quienes representan.

Existen diversas metodologías de clasificación de las formas de fondo en función de algunas variables hidráulicas, sedimentológicas o geométricas fácilmente mensurables. En ese sentido, los avances experimentados en la hidráulica fluvial durante la última década (Yalin y Ferreira, 2001) han ido progresivamente confirmando la importancia de las características energéticas del flujo en la formación y mantenimiento de un cauce aluvial estable. Una de las cantidades más importantes, y que ha servido como instrumento para explicar diversos aspectos morfológicos de cauces aluviales, como su geometría hidráulica, alineamiento planimétrico, formas de fondo, etc. es la potencia hidráulica de la corriente. Para un segmento de curso fluvial, que es justamente lo que se estaría representando en el laboratorio a través de un

micro-canal, la potencia total de la corriente (Farias, 1990) vale $\gamma.Q.S.L$, donde γ es el peso específico del líquido, Q es el caudal, S la pendiente y L la longitud del segmento. Otra cantidad usada (fundamentalmente por H. Chang en sus diversas investigaciones; Farias, 1990) es la potencia de la corriente por unidad de longitud del cauce, es decir, $\gamma.Q.S$. Asimismo, también se ha empleado en numerosos estudios (especialmente C. T. Yang; Farias, 1990) la que se denomina potencia unitaria del flujo, es decir, la potencia total por unidad de peso del líquido: $(\gamma.Q.S.L)/(\gamma.A.L)=V.S$, donde V es la velocidad media. Finalmente, también se emplea la potencia por unidad de área del lecho, o sea: $(\gamma.Q.S.L)/(P.L)= (\gamma.A.V.S)/P=\gamma.R.S.V=\tau.V$, donde τ es la tensión media de cizallamiento sobre el lecho fluvial.

En base a lo expresado, es que se analizan las formas de fondo de los microcanales mediante el empleo del diagrama presentado por Simons y Richardson en 1961 (Valentine *et al.*, 2001). En ese diagrama, la predicción de las formas de lecho para cada experimento se identifica de acuerdo a su posición de ploteo en el plano $[d - \tau.V]$, es decir, en función de la potencia de la corriente por unidad de área del lecho (expresada en watts/m^2) y del tamaño mediano de la partícula (en mm). Como se observa en la Figura 10, para lechos con tamaño mediano de partícula inferior a 0.5 mm la mayoría corresponden a rizos. Sólo un pequeño grupo de experiencias presentan dunas. Esto se debe a que el sedimento empleado posee una curva granulométrica extendida en contraposición con la uniformidad de las experiencias cercanas en el gráfico. Esta afirmación se ve reforzada por el hecho que los resultados de los microcanales de Smith, con diámetros medios del orden de la decena de micrones, pero con gradación uniforme, se encuentran todos en la zona de los rizos.

A partir de $d_{50}= 0.7$ mm y para una potencia superior a 0.2 [Wm^{-2}], la dispersión de los datos estaría indicando que las formas del lecho son dunas. Sin embargo la morfología final reportada por Schumm-Khan (1972) indica la presencia de canales prismáticos con talweg sinuosos y de canales sinuosos para las mayores potencias (entre 1 y 2 [Wm^{-2}]). Valentine *et al.* (2001) indica la presencia de meandros, barras alternadas y combinaciones de barras alternadas y dunas, y barras alternadas dunas y meandros, alcanzando valores máximos de potencia de 1 [Wm^{-2}].

A medida que aumenta el caudal, disminuye la razón de aspecto, aumentando la complejidad en la configuración del lecho. En el caso de los microcanales de material fino, su configuración en el equilibrio es de rizos, pero al producir la inestabilidad por el agregado de sedimento, se desarrollan meandros bien definidos y de alta sinuosidad y barras alternadas para caudales en entre 25 y 50 l/s y razones de aspecto entre 8 y 21 (Valentine *et al.*, 2001). Para caudales menores a 5 l/s (Schumm-Khan, 1972), aumentando el transporte en suspensión una vez alcanzado el equilibrio, el cauce forma meandros, aunque de una sinuosidad muy baja.

Las experiencias actuales se ubican en forma semejante a las de Smith, pero con valores de potencias inferiores. A diferencia de dicho autor, en las mismas no se presentan cauces sinuosos.

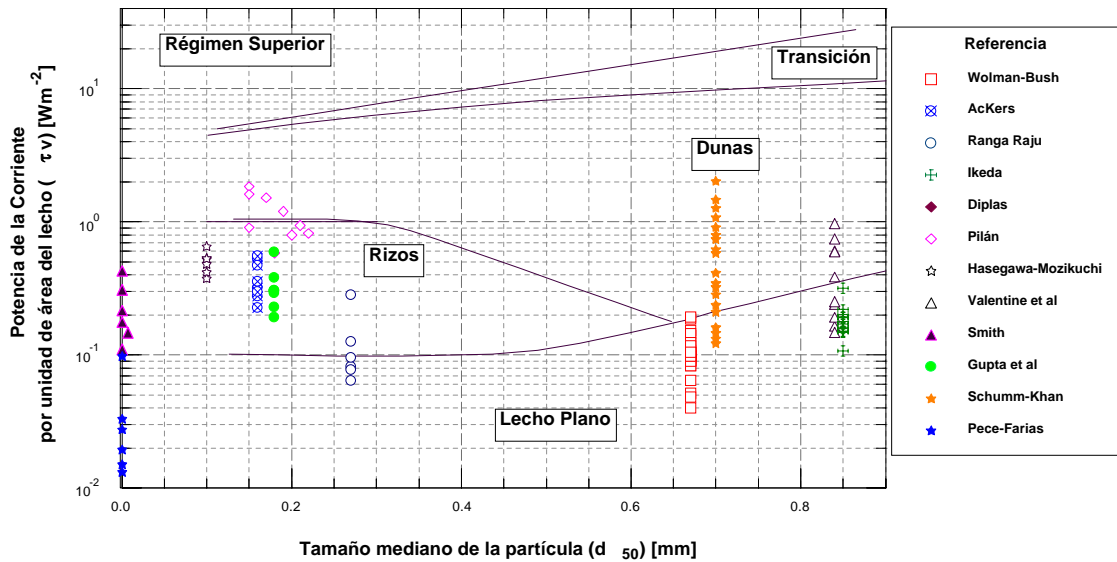


Figura 10.- Formas de fondo de los micro-canales según el diagrama de Simons-Richardson .

Otro aspecto que se consideró oportuno analizar es el referido a la formación de barras de sedimentos en los micro-canales. En efecto, unos de los elementos más difíciles de controlar en la realización de los experimentos es el referido a la formación de estructuras sedimentarias laterales, tales como barras alternadas o barras múltiples que dan lugar a la evolución de procesos morfológicos tales como el desarrollo de talwegs curvilíneos y meandros. Para ello, se recurrió a la aplicación del diagrama presentado por Yalin y Ferreira da Silva (2001) que precisamente se basa en el plano definido por la profundidad relativa en abscisas y la razón de aspecto en ordenadas, en escala log-log.

Según el criterio de Yalin-Ferreira (Figura 11), en la zona comprendida entre L_M y L se encuentran los canales que alcanzan su condición de régimen mediante procesos de erosión y deposición. En la zona superior, es decir entre L y L_A , y para profundidades relativas mayores que 60, en los cauces se producen barras alternas y meandros. Esto se explica a partir de la presencia de los remolinos horizontales que “barren” el fondo dando origen a las barras, y al alcanzar su máxima amplitud, impactan con los taludes, modificando la planimetría del cauce. Las barras actúan como “guías” que aceleran la formación de los posteriores meandros (Yalin-Ferreira, 2001) En la zona inferior, entre L_A y L_M , los remolinos ocurren a una distancia z del fondo, por lo tanto solo modifican la planimetría del cauce al impactar en las márgenes. Esto ocurre para relaciones de aspecto inferiores a 15. Para valores de profundidad relativa inferiores a 60 y a la izquierda de la línea punteada, se presentan barras alternadas. En base a este criterio se analizan los datos de los microcanales recopilados en el marco del presente estudio.

En la Figura 11 se observa que los datos de Smith se encuentran dentro de los canales en régimen y con formación de meandros, situación reportada por dicho investigador (Smith, 1998). El material empleado es fino, con $d_{50} = 35 \mu$ para H^* entre 100 y 300. Casi en el límite

de la zona de meandros se encuentran tres de las experiencias de Schumm y Khan que reportan la formación de meandros para H^* menores a 100. Este último investigador logra el patrón sinuoso al aumentar el transporte en suspensión del canal en régimen mediante una concentración de caolinita. De la inspección de la Figura 11 inferior, se observa que estos microcanales deberían aumentar su profundidad relativa para poder representar, al menos bajo este criterio ríos en condición de régimen con cauces sinuosos.

Entre el segundo y tercer ciclo para la profundidad relativa y teniendo como límite superior a L_A , se observan barras alternadas con dunas (Valentine), rizos (Ackers, Pilán) y lecho plano (Ranga Raju). Entre L_A y L , por encima de la línea punteada, para $\Gamma_T > 40$, meandros (Valentine), cauces rectos con talweg sinuosos (Schumm-Khan) y $\Gamma_T < 40$, barras alternadas con dunas y dunas (Valentine) y cauces rectos (Schumm-Khan). Estas experiencias se corresponden con la dispersión presentada en esta zona para cauces naturales.

Los resultados experimentales actuales se sitúan en la zona de canales sinuosos, tanto en laboratorio como en cauces naturales. Sin embargo están muy próximos a las nubes de corridas que presentaron barras alternas, lo cual permite sostener que al menos cualitativamente las formas observadas son barras.

La ubicación del conjunto de los datos en la zona comprendida entre las líneas L_M y L_A evidencia que un parámetro director en la formación de las formas de fondo en un microcanal es la rugosidad relativa. Entre el tercer y cuarto ciclo se encuentran concentrados los cauces naturales con meandros. Aún en microcanales no se ha podido alcanzar dichos valores.

RELACIÓN LA CONCENTRACIÓN Y LA PENDIENTE

Es una práctica común introducir arena a la entrada del canal para compensar los sedimentos que quedan retenidos en el depósito. Cuando se introduce una cantidad menor de sedimentos que la necesaria, el canal se profundiza y la pendiente disminuye. Cuando se introduce una tasa superior a la necesaria, el lecho se agrada aumentando la pendiente. En las experiencias realizadas en el marco del presente trabajo, no se introdujo material adicional. La concentración de sedimentos medida corresponde al transporte total.

Del trabajo publicado en 1972 por Schumm y Khan se tomaron los resultados correspondientes a las experiencias con entrada recta (1), con entrada desviada 40° en relación al eje longitudinal del microcanal (2 y 3). Posteriormente mediante condiciones apropiadas, disminuyeron el transporte por el fondo y aumentaron la concentración en suspensión hasta 30000 ppm (4). En el primer conjunto de datos la planimetría es recta, en el segundo y tercero, talweg sinuoso y solo en el cuarto caso produce meandros. Se integran con los obtenidos por Pilán en 1998 y los actuales. Cabe mencionar que si bien se van realizando

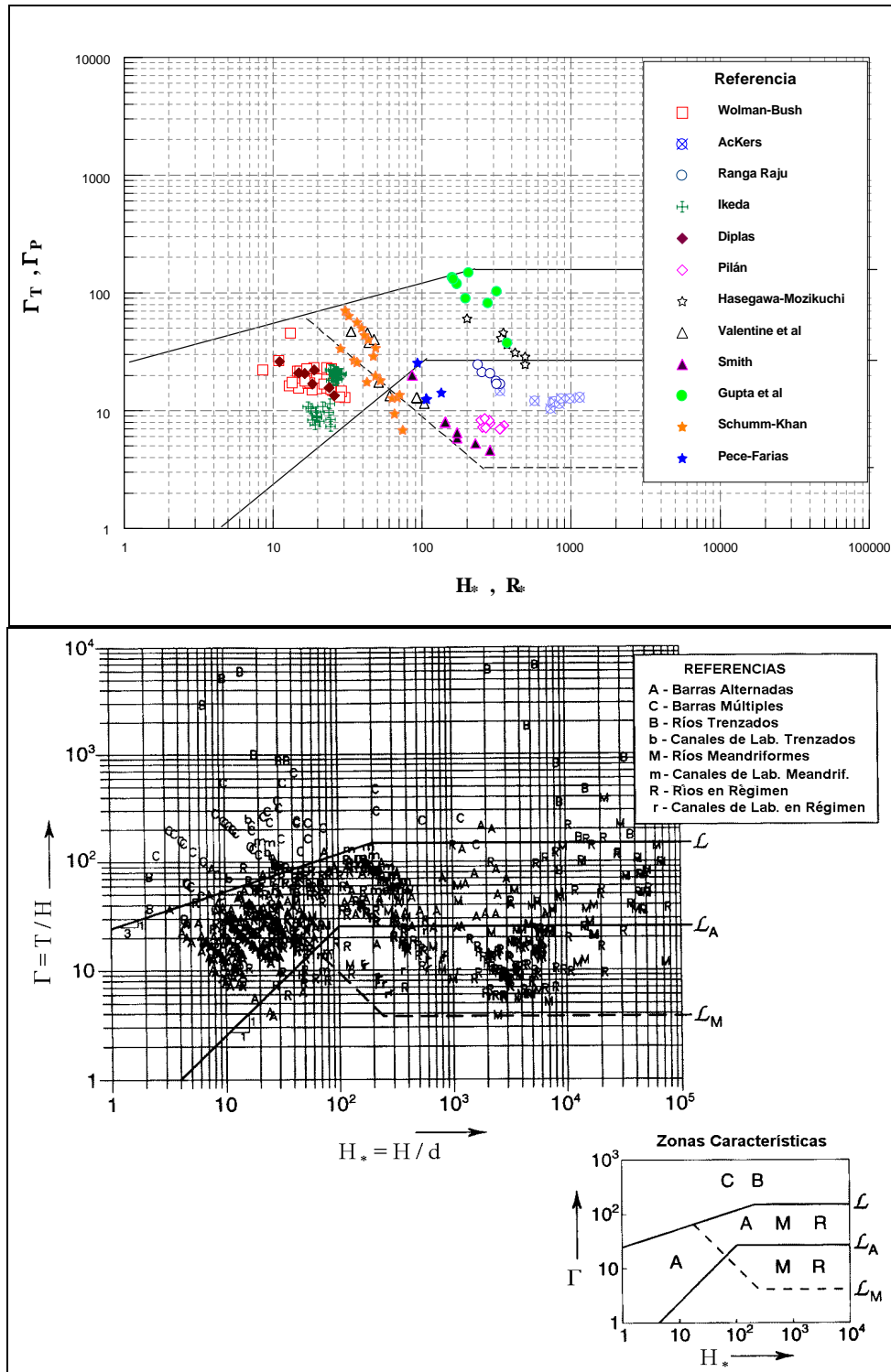


Figura 11.- Diagrama de Yalin-Ferreira (2001) para la clasificación de barras sedimentarias

nueve experiencias, solo en tres se determina la concentración, desescartandose una de las mismas por no ser confiable. En la Figura 12 se presenta la relación entre las variables en escala doble logarítmica.

Se observa que la mayoría de las experiencias presentan concentraciones entre 100 y 900 ppm. Mientras que los resultados de Pilán alcanzan su equilibrio sin incorporación de arena y las formas de fondo son rizos, los mismos son coincidentes con el tercer grupo de Schumm y Khan. Recordemos que estos investigadores incorporaron arena al sistema y en particular en este set de corridas, la entrada formaba un ángulo de 40° .

Para pendientes menores a 0.001, sus canales son rectos, mientras que en las experiencias actuales se observa que el talweg es sinuoso. Para una pendiente de 0.5 por mil el microcanal permanece recto. Más aún, la tendencia observada indica que en algún valor de pendiente dentro del rango actual de experimentación, el tirante disminuirá lo necesario para permitir las barras en puntas y que las curvas que se observan se desarrollen verdaderos meandros.

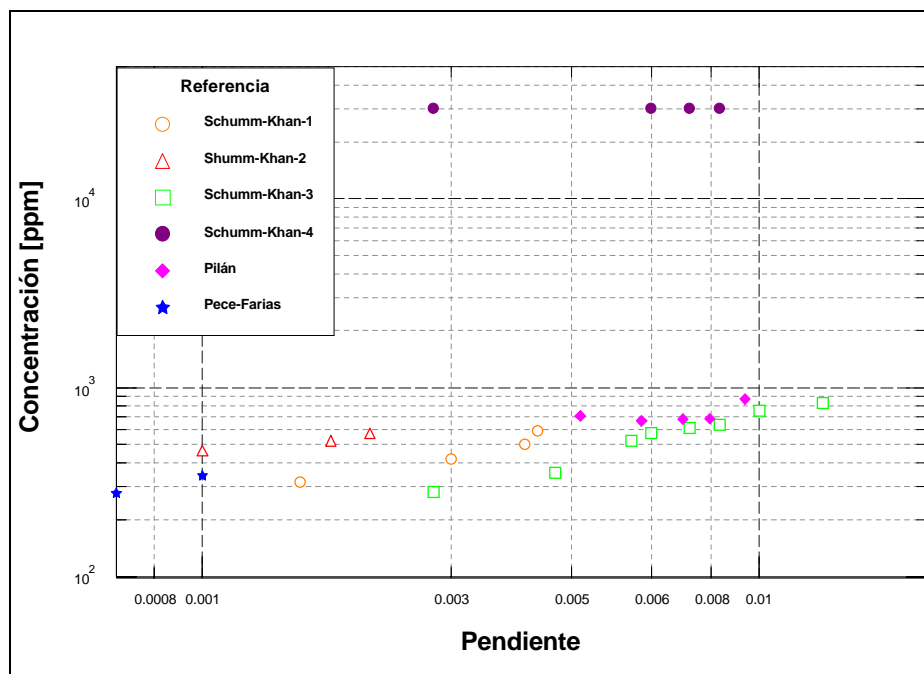


Figura 12.- Relación entre la concentración y la pendiente

CONCLUSIONES

Las experiencias llevadas a cabo hasta el presente en un cuenco de arena muestran buenas perspectivas en cuanto a la obtención de una importante base de datos para contribuir a la comprensión de algunos fenómenos relativos a la evolución y estabilidad de ríos de llanura.

En particular, se han identificado los umbrales a partir de los cuales se desarrollan barras alternadas y tendencias a la formación de talwegs sinuosos trabajando con sistemas autosuficientes. El comportamiento del mismo indica que en sucesivas experiencias se podrá cuantificar los valores límites para los rangos de pendientes en estudio.

Los valores de razón de aspecto encontrados para los ríos de cauces únicos cuasi-rectilíneos sitúan a los micro-canales de estos experimentos dentro del rango de estabilidad dinámica o régimen.

Agradecimiento. Los autores quieren expresar su agradecimiento a los alumnos Mariano Guzmán y Jesús Ibañez quienes con entusiasmo colaboran en las mediciones. De igual manera al Ingeniero Abdala y Tco. Miguel A. Cárdenas del Laboratorio de Obras Viales y a la Dra. Silvia Rodríguez.

LISTA DE SÍMBOLOS

A:	área de la sección transversal
B:	ancho del cauce
P:	perímetro mojado
b:	diámetro
Δ :	peso específico relativo
R:	radio hidráulico
g:	gravedad
Q:	caudal
Q*:	caudal adimensional
Γ :	relación de aspecto
S:	pendiente
L:	longitud
γ :	peso específico
τ	tensión media de cizallamiento

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ackers, P. (1964). "Experiments on Small Streams in Alluvium", *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 90, No. HY4, July, pp. 1-37.

Diplas, P. (1990). "Characteristics of Self-Formed Straight Channels", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 116, No. 5, May, pp. 707-728

Farias, H. D. (1990). *Modelos Matemáticos Variacionales para la Determinación de la Forma y Dimensiones de Canales Aluviales Estables*. Tesis M.Sc., CIDIAT-ULA, Mérida, Venezuela.

Farias, H. D. (1994). "Empleo de Micro-Canales de Laboratorio para Estimar la Geometría Hidráulica de Canales Aluviales en Régimen", *Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, IARH, Vol. 2, pp. 133-144.

Farias, H. D. y Pilán, M. T. (2000). "Análisis de Fórmulas de Fricción Aplicables a Canales Arenosos en Régimen". *XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Córdoba, Argentina. Tomo I, pp. 511-520.

Garde, R.J. y Ranga Raju, K.G. (1985). *Mechanics of Sediment Transportation and Alluvial Stream Problems*. 2nd Ed. Halsted Press, New Delhi, India.

Gupta, S.N., Bhattacharya, A.P., Saxena, P.N., Jindal, S.R. & Chandra, S. (1996). "Applications of Dimensional Analysis and Similitude Principles". *Modern Trends in Hydraulic*

Engineering Research. Goden Jubilee Symposia. Pune, India, pp. 77-82

Ikeda, S. (1981). "Self-formed Straight Channels in Sandy Beds", *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 107, No. HY4, pp. 389-406.

Ikeda, S. y Izumi, N. (1996). "Stable Channel Cross Sections of Straight Sand Rivers", *Water Resources Research*, Vol. 27, No. 9, pp. 2429-2438.

Pilan, M. T. (1998). *Geometría Hidráulica de Canales Aluviales en Régimen. Investigación Experimental mediante el uso de Microcanales de laboratorio*. Tesis M.Sc., CIDIAT-ULA, Mérida, Venezuela.

Ranga Raju, K.G., Dhandapani, K. y Kondap, D.M. (1977). "Effect of Sediment Load on Stable Sand Canal Dimensions", *J. Waterways Division*, ASCE, Vol. 103, No. WW2, pp. 241-249.

Smith, C. E. (1998). "Modeling high sinuosity meanders in a small flume". *Geomorphology*, Vol. 25, pp. 19-30.

Schumm, S.A. & Khan, H.R. (1972). "Experimental Study of Channel Patterns". *Geological Society of America Bulletin*, v.83, p. 1755-1770, 22 figs.

Valentine, E.M.; Benson, I.A.; Nalluri, C. y Bathurst, J.C. (2001). "Regime Theory and Stability of Straight Channels with Bankfull and Overbank Flow". *Journal of Hydr. Research*, Vol. 39, No. 3, pp. 259-282.

Wolman, M.G. y Brush, L.M. (1961). "Factors Controlling the Size and Shape of Stream Channels in Coarse Non-Cohesive Sands", *U.S. Geological Survey Prof. Paper No. 282-G*.

Yalin, M. S. & Ferreira da Silva, A. M. (2001). *Fluvial Processes*. IAHR Monograph. Delft, The Netherlands.