



Universidad Nacional del Litoral
FACULTAD DE INGENIERÍA
Y CIENCIAS HÍDRICAS

Cátedra de Geología y Geomorfología
Guía Didáctica - Año 1997 (rev. 2000)

GEOMORFOLOGIA DE CAUCES ALUVIALES

* **Carlos G. Ramonell**

I. ALCANCES DE LA GUIA.

La presente guía didáctica suministra un conjunto de conceptos básicos para el análisis geomorfológico de los ríos aluviales. Estos caracteres, justamente, obligan a que el tratamiento del tema sea lo menos extenso posible, y a que se lo focalice en sus aspectos prácticos más sobresalientes.

Igualmente, y como una forma de justipreciar la complejidad y/o diversidad propias de la temática a considerar, al final del texto se ha incluido una breve lista con bibliografía específica, cuya lectura se recomienda a quienes, en el futuro, se desenvuelvan profesionalmente en los campos de la hidrología de superficie, de la hidráulica e ingeniería fluvial, y de otras áreas afines donde los sistemas fluviales sean los escenarios bajo estudio. En coherencia con el carácter universal que debería tener esta guía, en tal listado bibliográfico se incluyeron sólo manuales de texto (y no trabajos en publicaciones periódicas), que se han perfilado -o se perfilan- como obras "clásicas" de la geomorfología fluvial.

II. INTRODUCCION.

En contraposición a los cauces de lecho rocoso, los ríos aluviales poseen márgenes y fondos compuestos por sedimentos que la corriente transporta, o ha transportado, bajo las condiciones de flujo actuales.

Esa vinculación, o interrelación, directa entre la naturaleza del material del lecho y las características hidrológicas e hidráulicas de la corriente, permite que los cauces aluviales ajusten libremente sus dimensiones, forma, patrón y gradiente, en respuesta a cambios que se producen dentro de la cuenca fluvial.

En tal sentido, los ríos que escurren entre afloramientos rocosos tienen una morfología y pendiente fuertemente condicionadas por las características litológicas y estructurales de esas rocas, y, muchas veces, por la dinámica y procesos propios de la evolución de las barrancas o laderas adyacentes. Este último tipo de fenómenos suele afectar también a los cauces aluviales, fundamentalmente a aquellos ubicados en los fondos de quebradas de montaña, o muy próximos a los laterales del valle fluvial.

Finalmente, debe destacarse que el carácter fácilmente erodable de las márgenes y el lecho de los ríos aluviales los sitúa entre las geoformas menos permanentes (o más dinámicas, si se prefiere) de la Tierra, independientemente de la región tectónica o climática en que se encuentren.

III. PRINCIPALES VARIABLES DE LOS CAUCES ALUVIALES. INTERACCION.

En las Figuras 1, 2 y 3 se presentan varios de los parámetros y rasgos morfológicos, hidrológicos, hidráulicos y sedimentológicos, utilizados en la descripción y caracterización de los ríos aluviales desde una perspectiva aplicada. Las propiedades y definiciones allí mostradas forman sólo una parte del análisis geomorfológico, que se completará con los contenidos de los ítems siguientes.

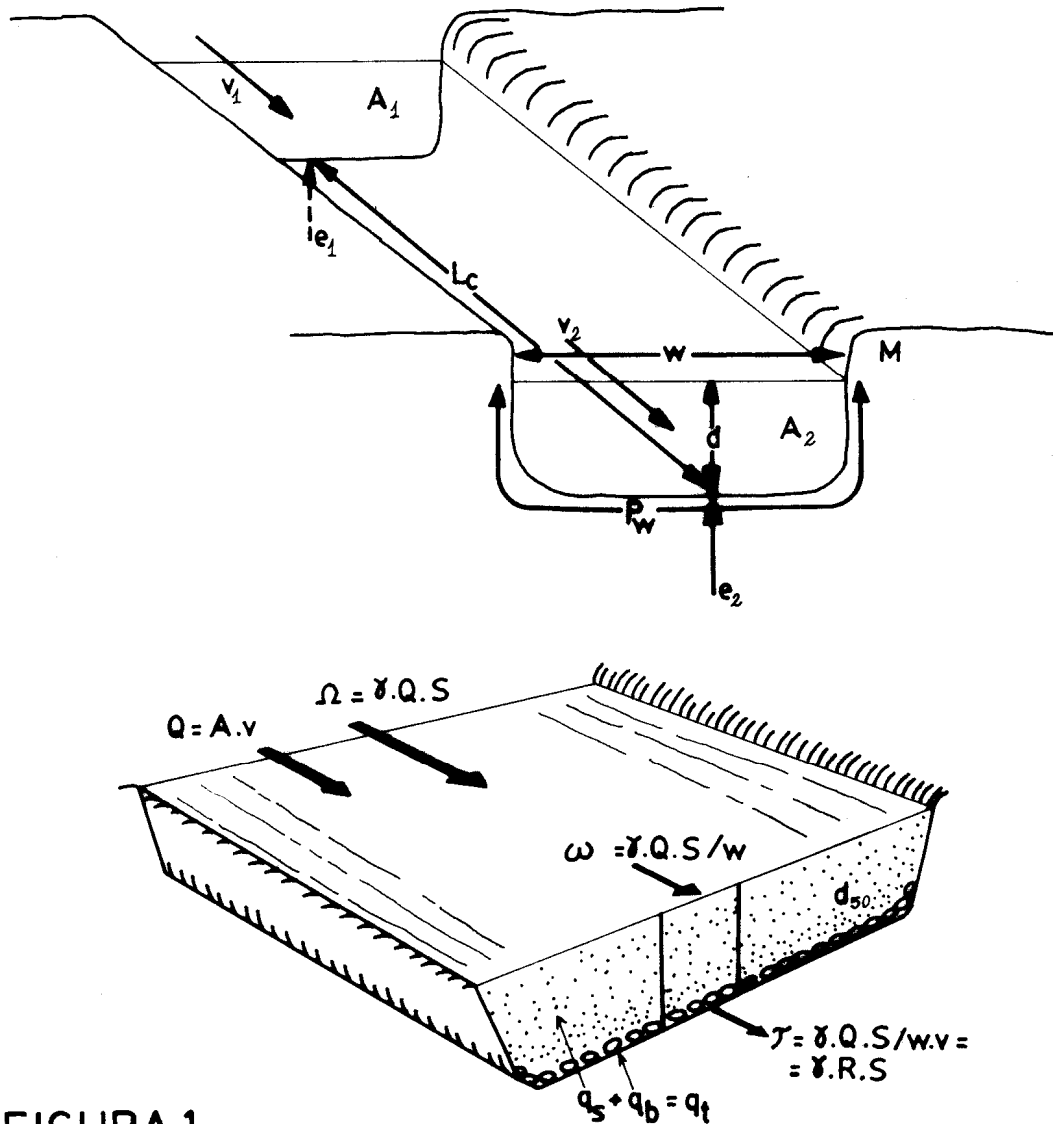


FIGURA 1.

Explicación y definición de símbolos de la FIGURA 1 (y texto en general):

d = profundidad.

w = ancho.

A = área de la sección transversal.

v = velocidad de la corriente.

e = cota altimétrica del lecho.

L_c = longitud del cauce.

P_w = perímetro mojado.

M = % de limo y arcilla en el perímetro del cauce.

D₅₀ = diámetro medio del sedimento del lecho.

Q = caudal líquido = $A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2$

S_c = pendiente del cauce = $(e_1 - e_2) / L_c$

γ = peso específico del agua.

Ω = potencia total de la corriente = $\gamma \cdot Q \cdot S$

ω = potencia por unidad de ancho = $\gamma \cdot Q \cdot S / w$

R = radio hidráulico = A / P_w

τ = esfuerzo tractivo o de corte = $\gamma \cdot R \cdot S$

q_t = caudal sólido total (carga de lavado + c. de fondo).

q_s = caudal sólido en suspensión prolongada.

q_b = caudal sólido del lecho.

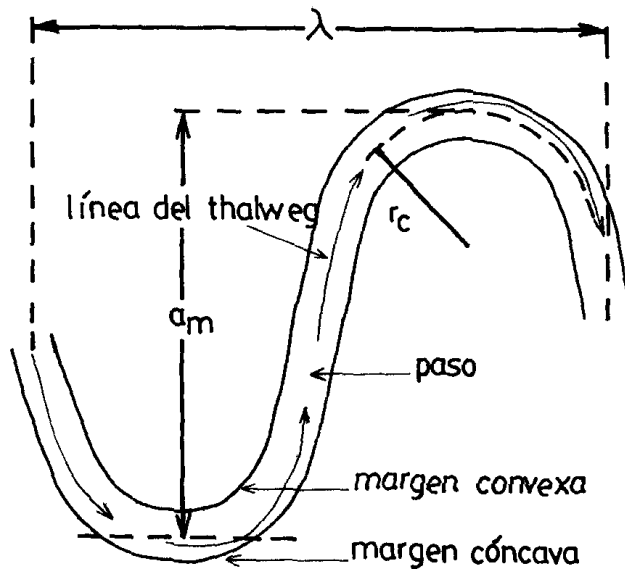


FIGURA 2.

Explicación y definición de símbolos de la FIGURA 2, y de otros utilizados en la guía:

a_m = amplitud de onda.

r_c = radio de curvatura.

λ = longitud de onda.

L_r = longitud del valle (o del cauce rectificad).o

S_v = pendiente regional (o de la llanura aluvial).

P = sinuosidad del cauce = $L_c / L_r = S_v / S_c$

A_d = área de la cuenca de drenaje.

Q_m = caudal medio anual.

Q_{bf} = caudal de cauce lleno.

Q_2 = caudal de inundación para un intervalo de recurrencia de dos años.

Q_f = caudal formativo del cauce: $Q_m, Q_{bf}, Q_2(?)$.

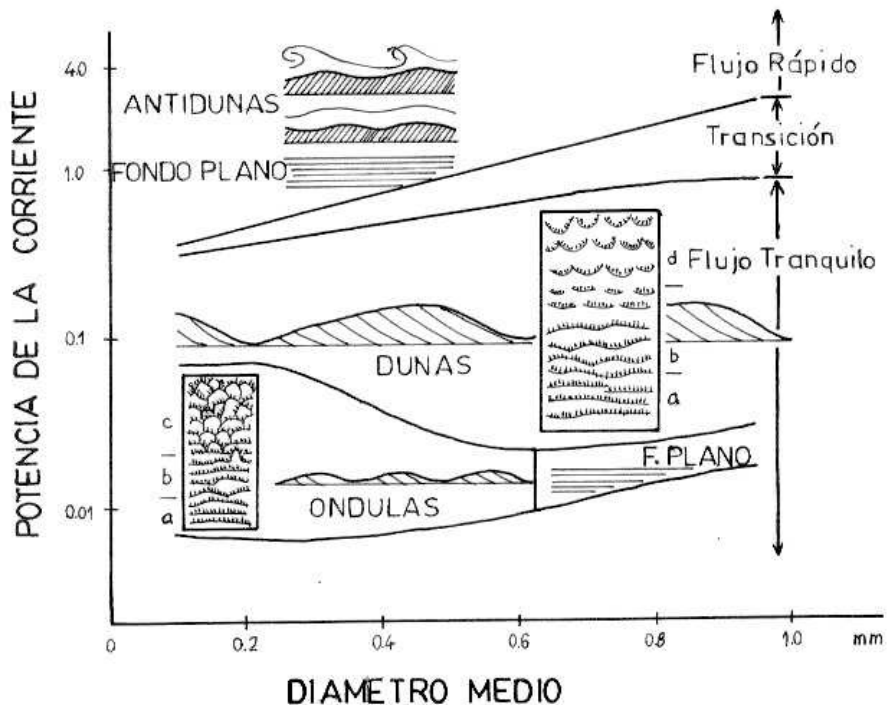


FIGURA 3. Representación esquemática de las formas del lecho menores en cauces aluviales, y relaciones con la potencia de la corriente y el tamaño de grano (D_{50}). a, b, c, d = vista en planta de las crestas de óndulas y dunas: con el incremento de la potencia, las crestas tienden a ser discontinuas. (Tomado de: Reineck, H., & Singh, I.B., 1986. "Depositional sedimentary environments". 552 pp, Springer-Verlag, New York).

No todos los parámetros indicados en las Figuras 1 y 2 tienen la misma importancia en un sistema fluvial: por ejemplo, los ríos tienen poco control sobre el caudal líquido que deben evacuar, o sobre la cantidad y tipo de sedimento que les aportan sus interfluvios por lavaje pluvial y remoción en masa. En efecto, el caudal de una corriente está determinado por la precipitación y evaporación en la cuenca, la permeabilidad de su superficie, la cantidad y tipo de vegetación, y el área de la región que drena. De este modo, el caudal es una variable independiente del sistema fluvial, puesto que la corriente debe ajustarse a él.

Bajo el mismo enfoque, el ancho, la profundidad y la velocidad de un río aluvial son variables semi-independientes: aún cuando están determinadas parcialmente por factores como el caudal, también son capaces de influir mutuamente (o de "autorregularse"). Existe una sola variable dependiente, la pendiente de la superficie del agua, que puede transformarse en semi-independiente si se modificara rápidamente.

El diagrama de la Figura 4 contiene varios de los parámetros variables ya presentados, indicando, además, el modo más frecuente en que interactúan. En tal figura, las variables independientes están encerradas en los rectángulos de trazo grueso, y las semi-independientes en los de trazo fino; las flechas indican la dirección de la influencia, y los signos (+) y (-) señalan si la relación es directa o inversa, respectivamente; nótese que algunas ramas tienen influencias reversibles. En el caso del tamaño del material del lecho, aunque está controlado originalmente por la litología y los procesos de meteorización en el área de aporte, puede convertirse en una variable semi-independiente en tanto que es afectado durante el transporte, o sea por selección progresiva o por atrición de los granos entre sí.

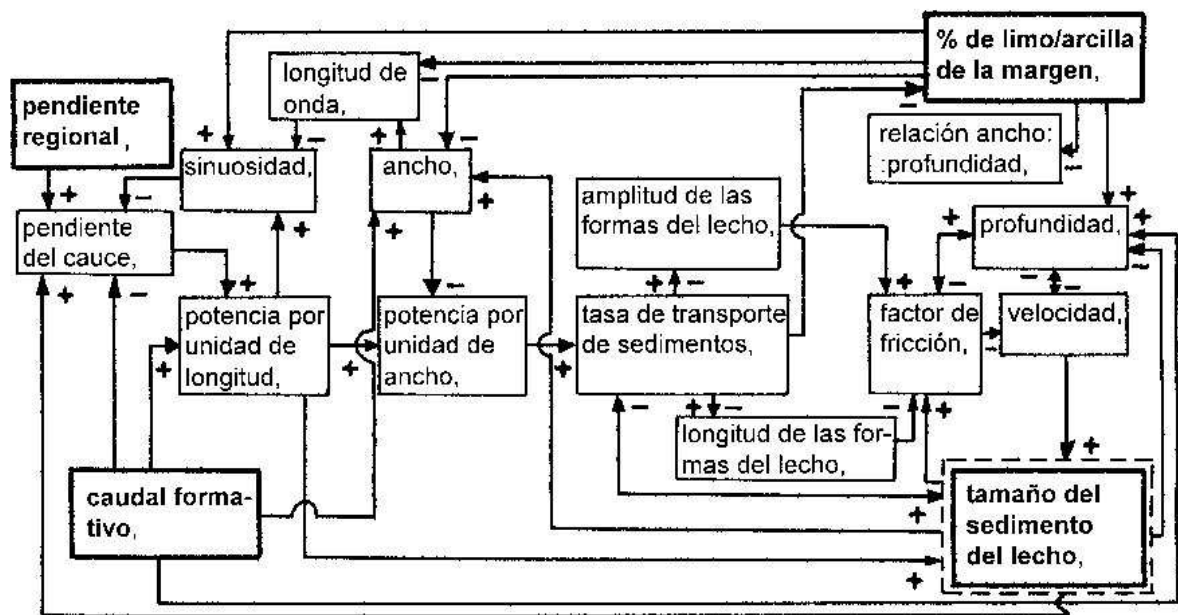


FIGURA 4. Interrelación de variables en un sistema aluvial; explicación en el texto. (Modificado de: Richards, K., 1982. "Rivers. Form and process in alluvial channels". 358 pp., Methuen & Co., New York).

A pesar de la utilidad conceptual de un gráfico como el de la Figura 4, subsisten interrogantes como, por ejemplo, si todas las variables semi-independientes incluidas tienen jerarquías similares. En principio, puede concluirse que sus relaciones son especificables y, en esta vía, que una comprensión más completa del sistema, tanto cualitativa como cuantitativa, es posible.

Otro problema está asociado a la dirección de la causalidad (es decir, qué son causas y qué son efectos). Como se muestra en la Tabla 1, diferentes variables pueden ser dependientes o independientes en función de la escala de tiempo en la cual un río está siendo analizado.

TABLA 1. Jerarquía de las variables que interactúan en un sistema aluvial, para períodos de tiempo de distinta duración. (Modificado de: Schumm, S.A., & Lichty, R.W., 1965. "Time space and causality in geomorphology". Amer. Jour. of Science, Vol. 263: 110-119).

VARIABLES	"Tiempo Geológico" (10 ⁶ años)	"Tiempo Histórico" (10 - 10 ³ años)	"Tiempo Calendario" (1 año o menos)
Estadio en la evolución del sistema	Independiente	No relevante	No relevante
Relieve inicial	Independiente	No relevante	No relevante
Geología (litología, estructura)	Independiente	Independiente	Independiente
Cambios del nivel de base ⁽¹⁾ (tectónica, etc.)	Independiente	Independiente	Independiente
Paleoclima	Independiente	Independiente	Independiente
Paleohidrología	Independiente	Independiente	Independiente
Volúmen del sistema sobre el nivel de base	Dependiente	Independiente	Independiente
Dimensiones del valle (ancho, S _v , etc.)	Dependiente	Independiente	Independiente
Clima (precipitación, temper., estacionalidad)	---	Independiente	Independiente
Vegetación (tipo y densidad)	---	Independiente	Independiente
Hidrología (Q _m , q _t , Q _{bf})	---	Independiente	Independiente
Morfología del cauce (w, d, A, R, P, λ, etc.)	---	Dependiente	Independiente
Caudales Q y q _t instantáneos en una sección	---	---	Dependiente
Hidráulica del flujo	---	---	Dependiente
Influencia antrópica	No relevante	Independiente	Independiente

⁽¹⁾ Nivel de base: punto del perfil longitudinal del lecho de una corriente, cuya ubicación altimétrica permanece invariable durante un tiempo tal, que la forma y el gradiente del perfil se desarrollan según la posición espacial de ese punto.

Mientras que la Figura 4 permite una comprensión de los sistemas aluviales como sistemas puramente físicos (muy adecuada, desde una perspectiva ingenieril), la Tabla 1 nos recuerda que los ríos son sistemas físicos con historia. En otras palabras, un paisaje o escenario fluvial (y sus rasgos asociados) dependerán, en última instancia, de la evolución geológica y climática de la región, y de la acción del hombre en la cuenca.

IV. UN APROVECHAMIENTO PRACTICO DE LA INTERACCION DE VARIABLES: LA GEOMETRIA HIDRAULICA DE LOS CAUCES ALUVIALES.

Gran parte del conocimiento actual acerca de los ríos aluviales es empírico. Los modelos conceptuales del tipo de la Figura 4 tienen una fuerte base en la observación y el experimento, y son un paso necesario para la elaboración de una teoría determinística del comportamiento de los cauces, basada exclusivamente en principios físicos universales.

En este contexto, varias fórmulas empíricas relacionando el flujo en los cauces con otras variables, tales como la pendiente, la forma y la rugosidad del lecho, fueron propuestas desde temprano. La primera ecuación más importante vinculada a los ríos aluviales la formuló el francés Chezy en 1768, cuando proyectó un canal para el abastecimiento de aguas en París. Este autor sostuvo que la velocidad del flujo era proporcional a la raíz cuadrada del producto de la pendiente por el radio hidráulico: $v \approx (R \cdot S)^{1/2}$; la velocidad real dependería de un coeficiente, que incluía un valor para la rugosidad del canal.

Durante el siglo XIX, el estudio de las relaciones de la ecuación de Chezy condujo a la formulación de la ecuación de Manning, ampliamente utilizada en la actualidad:

$$v = R^{2/3} \cdot S^{1/2} / n$$

En esta fórmula, **n** designa a la rugosidad del canal, e incluye factores tales como la granulometría del material del lecho, la sinuosidad del cauce, la presencia de obstáculos como juncos o árboles caídos, etc. El valor de n puede variar desde 0.025 para un cauce recto, limpio y de fondo plano, hasta alrededor de 0.075 para un río tortuoso y con maleza, por lo que la

velocidad del agua en ambos cursos, aún con dimensiones y pendientes análogas, podría diferir en 3 veces o más.

A mediados de este siglo, un geólogo y un ingeniero (L. Leopold y T. Maddock) del Servicio Geológico de los Estados Unidos publicaron un análisis de cientos de mediciones de estaciones de aforo de corrientes de todo aquél país. A su estudio de las relaciones entre el caudal, forma del cauce, carga de sedimento y pendiente, le denominaron “geometría hidráulica de los cauces de corriente”. Sobre una amplia gama de condiciones, estos investigadores encontraron que, al aumentar el caudal en una estación de aforo, el ancho (w), la profundidad (d), la velocidad (v) y la carga de sólidos en suspensión (q_s) también se incrementaban, y como simple funciones de potencia del caudal, de la forma: $w = k \cdot Q^m$, $d = n \cdot Q^n$, $v = o \cdot Q^p$, $q_s = r \cdot Q^t$.

Los valores de las constantes aritméticas “k”, “n”, “o”, y “r” no son muy significativos para la geometría hidráulica de los cauces, pero sí los de los exponentes “m”, “ñ”, “p” y “t”. Para veinte estaciones de aforo de una parte de los EE.UU., los promedios de “m”, “ñ” y “p” fueron de 0.26, 0.40 y 0.34, respectivamente, mientras que el valor de “t” resultó ser más variable, oscilando entre 2 y 3 (lo que significa que, cuando el caudal en una estación de aforo aumenta 10 veces, la carga en suspensión puede aumentar de 100 a 1000 veces!!!).

Cuando aquellos autores compararon los parámetros citados con el caudal anual medio (medido en varias estaciones de aforo sucesivas) de muchos ríos, encontraron que se podían aplicar las mismas ecuaciones que se habían derivado para cambios del caudal en un punto. El promedio de los resultados fue:

$$w \approx Q_m^{0.5}$$

$$d \approx Q_m^{0.4}$$

$$v \approx Q_m^{0.1}$$

$$q_s \approx Q_m^{0.8}$$

indicando que, para un cauce aluvial en el que el caudal va aumentando hacia aguas abajo, el ancho se incrementa como la raíz cuadrada del caudal, su profundidad casi de la misma manera, mientras que la velocidad sólo aumenta ligeramente (antes de que se publicara la relación $v \approx Q_m^{0.1}$, nadie había demostrado que la velocidad de los ríos en regiones húmedas aumentaba aguas abajo). El valor de 0.8 para q_s marca, por su parte, que la concentración de los sedimentos en suspensión se hace más diluida hacia la desembocadura de un río.

Previamente a presentar otras ecuaciones de geometría hidráulica, dos aclaraciones son importantes. En primer lugar, se destaca que este tipo de fórmulas han resultado de tratar estadísticamente una cantidad considerable (aunque limitada, por cierto) de datos. De esta manera, a pesar de que las relaciones entre las variables consideradas sea correcta, y que la regularidad de los cambios se manifieste muy significativa, los valores de las constantes aritméticas y exponenciales no son universales, por lo que no se pueden aplicar a cualquier río en forma indiscriminada.

En segundo lugar, y vinculado a lo anterior, esas constantes numéricas están encerrando, en sí mismas, los resultados cuantitativos de otras variables físicas que no han sido especificadas en las ecuaciones. Precisamente, los estudios en el campo de la morfo-hidráulica fluvial se han encaminado en dos líneas metodológicas diferentes: la de descifrar empíricamente qué parámetros de los cauces aluviales están contenidos en los coeficientes de ajuste, por un lado, y la de identificar estos mismos parámetros a partir del análisis físico teórico convencional, por el otro.

La primer línea de investigación condujo a un notable incremento de fórmulas en el contexto de la geometría hidráulica, algunas de las cuales se muestran a continuación, con el propósito de ejemplificar el modo en que suelen relacionarse cuantitativamente las variables contenidas en la Figura 4.

$$w/d = 255 \cdot M^{-1.08}$$

$$w = 37 \cdot Q_m^{0.38} / M^{0.39}$$

$$d = 0.6 \cdot Q_m^{0.29} \cdot M^{0.34}$$

$$S_c = 18 (D_{50} / A_d)^{0.6}$$

$$S_c = 60 \cdot Q_m^{-0.32} \cdot M^{-0.38}$$

$$S_c = 0.965 \cdot Q_2^{-0.334} \cdot D_{50}^{0.58}$$

$$\lambda = 189 \cdot Q_m^{0.34} / M^{0.74}$$

$$\lambda = 10.95 \cdot w_{bf}^{1.01}$$

$$r_c = 2.59 \cdot w_{bf}^{1.01}$$

$$a_m = 4.48 \cdot w_{bf}^{1.02}$$

$$P = 0.94 \cdot M^{0.25}$$

(Notas: Excepto la primera y la última ecuación, las restantes están expresadas en unidades imperiales. En la cuarta fórmula, el área de la cuenca de drenaje interviene en reemplazo del caudal medio).

Aún con las restricciones señaladas más arriba, la elaboración y uso de fórmulas como las precedentes han mejorado nuestro entendimiento sobre el comportamiento de los cauces aluviales, y la posibilidad de realizar pronósticos más certeros.

Si bien el número de incertidumbres todavía es considerable (¿cuál es el caudal que forma al cauce?, ¿cómo aislar la influencia de la tectónica modificando la pendiente, de la que determina el caudal en un río?, etc.), hay que resaltar que el requisito esencial para el empleo de las ecuaciones de geometría hidráulica es, sin dudas, que la corriente fluya sobre materiales ajustables, es decir, sobre sus propios aluviones.

V. EQUILIBRIO, AGRADACION Y DEGRADACION EN CAUCES ALUVIALES.

Si en un sistema aluvial las variables en juego se vinculan entre sí con dimensiones apropiadas, puede ocurrir que la cantidad de energía y materia que ingresa al cauce por un extremo sea similar a la que sale del mismo aguas abajo. Un balance neutro semejante no implica la inexistencia de fenómenos de erosión y sedimentación en el sistema, sino que estos procesos ocurran en forma simultánea y en magnitudes equivalentes.

Esta particular condición de estabilidad o equilibrio, donde la masa y la energía se desplazan a través del cauce, lo modifican, y no aumentan o disminuyen sensiblemente, fue definida adecuadamente por Mackin en 1948: “un río en equilibrio es un río en el cual, en un período de años, las características de pendiente y cauce están delicadamente ajustadas para proporcionar, con el caudal disponible, exactamente la velocidad requerida para el transporte de la carga sedimentaria aportada desde la cuenca fluvial... su característica diagnóstica es que cualquier cambio en cualquiera de los factores que regulan, originarán un desplazamiento del equilibrio en una dirección que tenderá a absorber el efecto del cambio”.

Debe subrayarse el carácter dinámico del equilibrio considerado. Al término de una gran creciente, por ejemplo, un río puede aparecer a simple vista exactamente igual como era antes, salvo que uno se dé cuenta de que el sedimento del fondo o de las márgenes fue desplazado aguas abajo, y reemplazado por una cantidad de material semejante procedente de aguas arriba. En otra situación, la misma inundación pudo producir un cambio morfológico notable en una parte del cauce, sin que el río pierda su condición de equilibrio en forma permanente: considérese que la curva de la Figura 10(A) fue rectificadas luego de una creciente; el incremento local en la pendiente del cauce, resultante de tal corte, inducirá a que el resto de las variables se modifique (ver Figura 4), hasta que la capacidad de transporte de la corriente en el tramo sirva sólo para evacuar la cantidad de sedimento que le es suministrado desde aguas arriba.

De los ejemplos previos, y de la propia definición de Mackin, se deduce el factor crítico para el logro de la condición de equilibrio: que la corriente fluya sobre materiales ajustables. Precisamente, es un cauce aluvial, emplazado en una llanura compuesta en forma continua por aluviones, el que permite que un río pueda ajustarse hacia el equilibrio.

En otras circunstancias, sin embargo, el balance entre la erosión/sedimentación en un cauce aluvial puede resultar marcadamente negativo o positivo a mediano plazo (≈ 10 o más años, por caso) y, dependiendo de ello, dos procesos reemplazarán a la condición de estabilidad: el de agradación o el de degradación fluvial, respectivamente.

La identificación de esos dos procesos operando en un sistema fluvial es importante, ya que ellos determinarán, en principio, un comportamiento distinto del río en la búsqueda del equilibrio. La Tabla 2 muestra una clasificación de cauces aluviales basada en el modo

dominante en que el sedimento es transportado por la corriente, y en los conceptos de balance (neutro, positivo, negativo) o estabilidad del cauce presentados hasta ahora. Nótese en tal Tabla las diferentes maneras en que probablemente evolucionaría un mismo cauce ante un exceso o deficiencia en el suministro de sedimentos.

TABLA 2. Características de cauces aluviales en equilibrio y desequilibrio, según la forma dominante en que sus sedimentos son transportados. (Tomado de: SCHUMM, S.A., 1977. "The fluvial system". 338 pp, John Wiley & Sons, New York).

MODO DE TRANSPORTE DEL SEDIMENTO	PORCENTAJE DE LIMO Y ARCILLA DEL CAUCE	PORCENTAJE DE CARGA DEL LECHO (respecto de la carga total)	ESTABILIDAD DEL CAUCE		
			ESTABLE (río en equilibrio)	AGRADANTE (exceso de carga)	ERODANTE (deficiencia de carga)
Carga en suspensión	> 20	< 3	Cauce estable con carga en suspensión. Relación w/d < 10; sinuosidad generalmente > 2; pendiente relativamente suave.	Cauce agradante con carga en suspensión. Predominio de sedimentación en las márgenes, que provoca el estrechamiento del cauce; inicialmente, sedimentación menor en el lecho.	Cauce erodante con carga en suspensión. Erosión predominante en el lecho; inicialmente, ensanchamiento menor del cauce.
Carga mixta	5 - 20	3 - 11	Cauce estable con carga mixta. Relación w/d > 10 y < 40; sinuosidad generalmente < 2 y > 1,3; pendiente moderada.	Cauce agradante con carga mixta. Inicialmente, predominio de la sedimentación en las márgenes, seguida por sedimentación en el lecho.	Cauce erodante con carga mixta. Inicialmente, erosión del lecho, seguida por ensanchamiento del cauce.
Carga de lecho (incluye al sedimento transportado en saltación)	< 5	> 11	Cauce estable con carga de lecho. Relación w/d > 40; sinuosidad generalmente < 1,3; pendiente relativamente pronunciada.	Cauce agradante con carga de lecho. Sedimentación en el lecho y formación de islas.	Cauce erodante con carga de lecho. Erosión del lecho escasa; predominio del ensanchamiento del cauce.

La Tabla 2 requiere de pocos comentarios: un río, o parte de él, puede volverse agradante no sólo por un incremento sostenido en el tiempo del aporte sedimentario, sino también por una disminución prolongada de los caudales que modelaron al cauce. Un aumento relativo en el nivel de base de la corriente, inducido por desplazamiento tectónico, ascenso del nivel del mar, etc., obrará en el mismo sentido.

Comúnmente, un sistema aluvial es analizado y medido en un lapso de tiempo muy corto (de días o meses; muy raramente, el período de mediciones supera algunos años). Durante este intervalo, un río puede aparecer en equilibrio con las condiciones hidrológicas del momento, aunque su sección transversal y su pendiente también estén siendo influenciadas por otros cambios menos evidentes, o no considerados, como los citados en el párrafo previo. En este escenario, si una de las variables supera un valor crítico ("umbral"), es posible que la evolución del cauce prosiga en una dirección notablemente diferente que la mostrada por los insuficientes registros investigados. De esta manera, un estudio temporal más amplio de la corriente examinada, basado en la comprensión de que los ríos son sistemas físicos con historia, podría mejorar o alterar sensiblemente la calidad o cantidad de las predicciones.

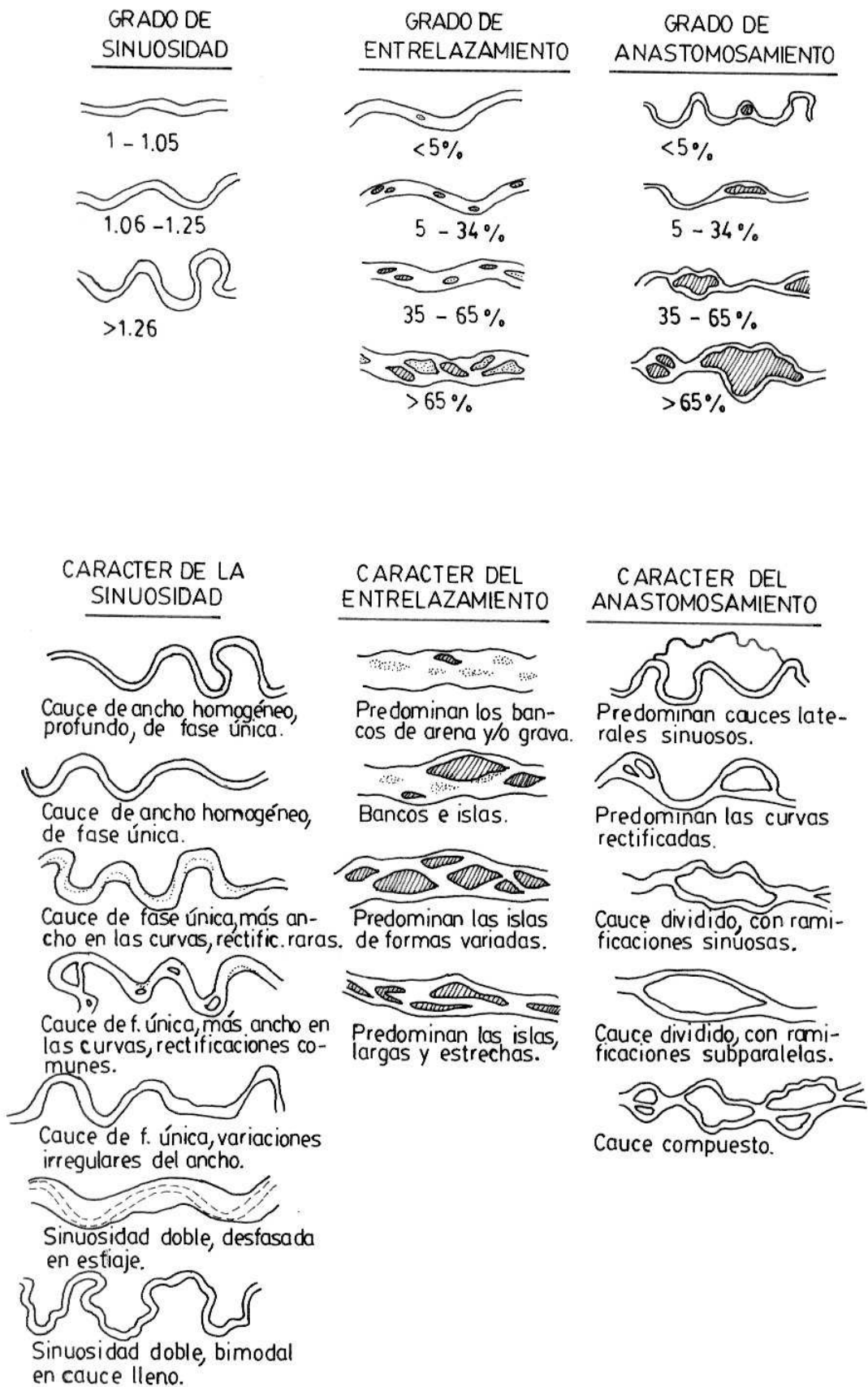


FIGURA 5. Variedades de cauces aluviales. (Tomado de: Brice, J.C., 1984. "Planform properties of meandering rivers". En: 'River Meandering', Proc. Conf. Rivers '83, Am. Soc. Civil Engs.: 1-15. New York).

VI. VARIEDADES MORFO-DINAMICAS DE CAUCES ALUVIALES. GEOFORMAS ASOCIADAS.

VI.a. Formas básicas de los cauces aluviales. Clasificaciones.

La Figuras 5 (pág. 9) y la Figura 6 muestran una gran variedad de formas en planta que pueden exhibir los ríos aluviales, independientemente de sus dimensiones reales.

En la Figura 5, el grado de entrelazamiento expresa el porcentaje de bancos (de arena, arena gravosa o grava arenosa) e islas del cauce, en relación al tamaño del río. Usualmente, esta característica se mide mejor a través del parámetro de entrelazamiento (B_p), definido como el número de “lazos” que rodean a los bancos dividido por la λ del tramo considerado (ver Figura 7). Por su parte, el grado de anastomosamiento vincula, en un sistema de cursos de agua ramificado, la superficie total emergida entre estos cauces, con el área comprendida por el sistema ramificado en su totalidad.

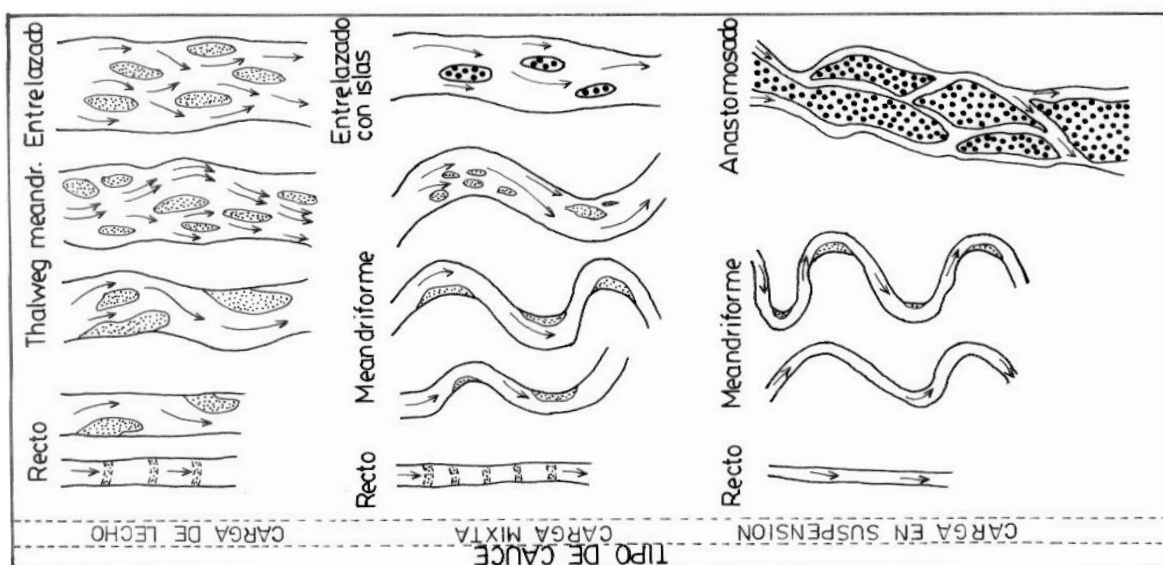


FIGURA 6. Variedad de patrones de cauces aluviales, y relación con el modo en que el sedimento es transportado. (Tomado de: Schumm, S.A., 1981. "Evolution and response of the fluvial system, sedimentologic implications". Soc. of Econom. Paleontol. and Mineralogists Spec. Publ. N° 31: 19-29).

Aquí suele haber confusión con el significado de los términos “entrelazado” y “anastomosado” (de hecho, hasta la década del ‘80, aproximadamente, ambos vocablos eran empleados como sinónimos; el lector debe tener precaución al encontrar estos términos en trabajos de principios de los ‘80 o anteriores). En un cauce entrelazado, la separación del flujo en un punto provoca la sedimentación de parte de la carga que está siendo transportada por el fondo, dando origen a un banco embrionario compuesto por ese material; en etapas sucesivas, el banco podrá crecer en volúmen, hasta que alcance una altura tal, que hará que quede emergido durante la mayor parte del tiempo; el desarrollo de vegetación permanente en su superficie, la sedimentación de detritos suspendidos, etc., podrán o no transformar al banco en una isla fluvial.

Por su lado, un río anastomosado consiste en un sistema múltiple de cauces, separados entre sí por islas que fueron excindidas de una llanura aluvial originalmente continua; normalmente, estas geoformas son mucho más grandes que los cauces que las limitan. De esta manera, las zonas emergidas de los ríos anastomosados se forman principalmente por la erosión de la corriente, mientras que en los cauces entrelazados las islas, si existen, son rasgos originalmente deposicionales (Add.: la definición previa de río anastomosado es genética, y sigue la propuesta por Knighton & Nanson -1993-. El autor de esta guía ha reconocido sistemas anastomosados formados en ambientes netamente deposicionales, en partes de la planicie aluvial del Río Paraná. Así, convendría prescindir de una connotación genética al usar el término anastomosado, y emplearlo para aquellos sistemas de cauces múltiples en los que se

cumple que, en cada sección transversal de la planicie aluvial, la suma de los anchos de los canales es mucho menor a la suma de anchos de las islas que estos delimitan).

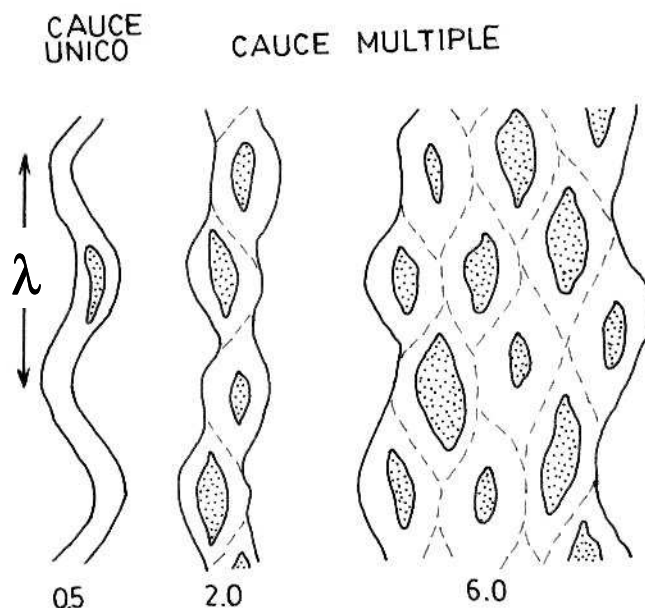


FIGURA 7. Ejemplos de valores del parámetro de entrelazamiento. (Tomado de: Rust, B.R., 1978. "A classification of alluvial channel systems". En: 'Fluvial Sedimentology', Canad. Soc. of Petroleum Geologists Memoir 5: 187-198).

De una inspección visual ordenada de las Figuras 5 y 6, y tal como ha sido observado por los geomorfólogos fluviales en la naturaleza, se concluye que existen, al menos, cuatro tipos básicos (o patrones) de cauces aluviales: rectos, meandriformes, entrelazados y anastomosados. Las Tablas 3 y 4 contienen dos propuestas, conceptualmente muy diferentes entre sí, para diferenciar uno de otro tipo de cauce (en la Figura 8 se ha materializado gráficamente la clasificación de la Tabla 3).

TABLA 3. Clasificación de cauces aluviales basada en sus propiedades geométricas (ver también la Figura 8). (Tomado de: Rust, B.R., 1978. "A classification of alluvial channel systems". En: 'Fluvial Sedimentology', Canad. Soc. of Petroleum Geologists Memoir 5: 187-198).

	Cauce Unico (Parámetro de Entrelazamiento < 1)	Cauce Múltiple (Parámetro de Entrelazamiento > 1)
Sinuosidad Baja (< 1,5)	RECTO	ENTRELAZADO
Sinuosidad Alta (> 1,5)	MEANDRIFORME	ANASTOMOSADO

TABLA 4. Clasificación de formas básicas de cauces aluviales basada en propiedades de la corriente, las márgenes y el aporte de sedimentos. (Tomada de: Knighton, A.D., & Nanson, G.C., 1993. "Anastomosis and the continuum of channel pattern". Earth Surf. Process. and Landforms, Vol. 18: 613-625).

	FUERZA DEL FLUJO (1)	ERODABILIDAD DE LAS MARGENES (2)	SUMINISTRO RELATIVO DE SEDIMENTO (3)
RIO RECTO	baja	baja	bajo
RIO MEANDRIFORME	moderada, baja	moderada, baja	moderado
RIO ENTRELAZADO	alta	alta	moderado, alto
RIO ANASTOMOSADO	baja	baja	moderado, alto

(1) Los índices hidráulicos que pueden utilizarse para expresar la fuerza del flujo son: Potencia Específica ($= \gamma.Q.s/w$), Potencia Total ($= \gamma.Q.s$) o Esfuerzo Cortante ($= \gamma.Q.s/w.v$).

(2) Aunque difícil de cuantificar, la erodabilidad de las márgenes puede relacionarse con el contenido de limos y arcillas, de lo que resulta una relación inversa.

(3) Se refiere a la cantidad de sedimentos aportados desde las márgenes o desde aguas arriba, en relación a la cantidad de sedimentos que son transportados aguas abajo.

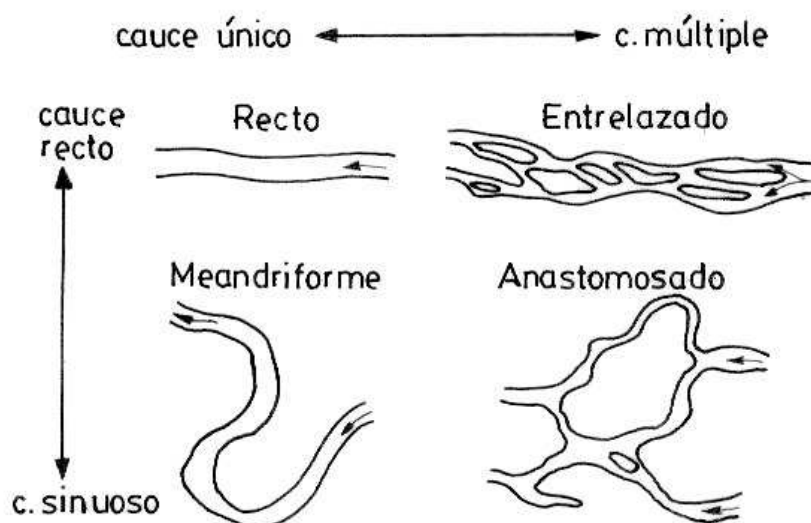


FIGURA 8. Esquema gráfico de la clasificación de Rust, 1978 (ver Tabla 3).

Varios ríos aluviales suelen presentar combinaciones de dos o más patrones a lo largo de su recorrido, lo que ha sido interpretado como que las cuatro formas básicas son las configuraciones más apropiadas para la búsqueda o el logro de la condición de equilibrio de la corriente. Con esta consideración, una clasificación como la de la Tabla 3 (Figura 8), que no contempla las diferencias genéticas entre los cauces entrelazados y anastomosados, ni ciertas variables de estado (como la relación de dependencia entre P y M -ver Figura 4-, y entre este parámetro y el ancho y la profundidad del cauce -ver relaciones al final de la pág. 6-), reduce a la sistemática fluvial a una suerte de inventario o "filatelia" geomorfológica.

En tal sentido, la propuesta de la Tabla 4, a pesar de su ambigüedad cualitativa, refleja mejor el conocimiento actual sobre la temática.

Nótese que ninguna de las clasificaciones mostradas han considerado en forma explícita al caudal, aunque esta variable está incluida dentro de la potencia de la corriente (Ω o ω). Debido al muy amplio rango de caudales que poseen los cauces aluviales, se presentan varios problemas cuando se pretende incorporar tal parámetro en una taxonomía universal, a menos que su objetivo sea el de diferenciar el tamaño de los ríos. Además, no sólo importarían aquí los valores máximos o mínimos de la escorrentía, sino también sus duraciones y frecuencias. De todos modos, las formas básicas de cauce aparecen tanto en una gran grama de escalas, como de valores absolutos y de distribución anual de los caudales.

La Figura 9 presenta una clasificación basada en una gran cantidad de atributos de los ríos aluviales. Debido a que varias de esas propiedades son las variables independientes y semi-independientes que operan a corto plazo en el sistema fluvial (Figura 4), tal clasificación debería tener un importante potencial predictivo. Precisamente por esta cualidad, la propuesta de la Figura 9 parece ser una de las más completas entre las elaboradas hasta el momento.

Los patrones identificados con los números 1 y 2 de la Fig. 9, junto con las propiedades derivadas de su ubicación en el diagrama, corresponden a las dos variedades de **cauces rectos** más frecuentes en los sistemas aluviales. Lo mismo vale para los **cauces meandriformes**, que han sido identificados con los índices 3a y 3b. En los dos patrones restantes (4 y 5), y a diferencia de los anteriores, la corriente fluye a través de más de un canal a la vez; en estas circunstancias, todos los canales pueden estar evacuando fracciones similares del caudal total, como ocurre en los **cauces entrelazados** típicos (tipo 5) o, de manera diferente, puede identificarse claramente una línea de máximo caudal específico (o thalweg) dentro del río, como sucede en los **cauces entrelazados de thalweg meandriforme** (tipo 4).

Los **cauces anastomosados** no están incluidos en la clasificación de la Figura 9, ya que estos sistemas ramificados pueden considerarse como una forma compuesta por dos de los otros tipos de ríos: de acuerdo a sus características más frecuentes, y tal como lo sugiere el propio autor de la propuesta, correspondería situarlos en el área ocupada por los patrones 1 y 3a.

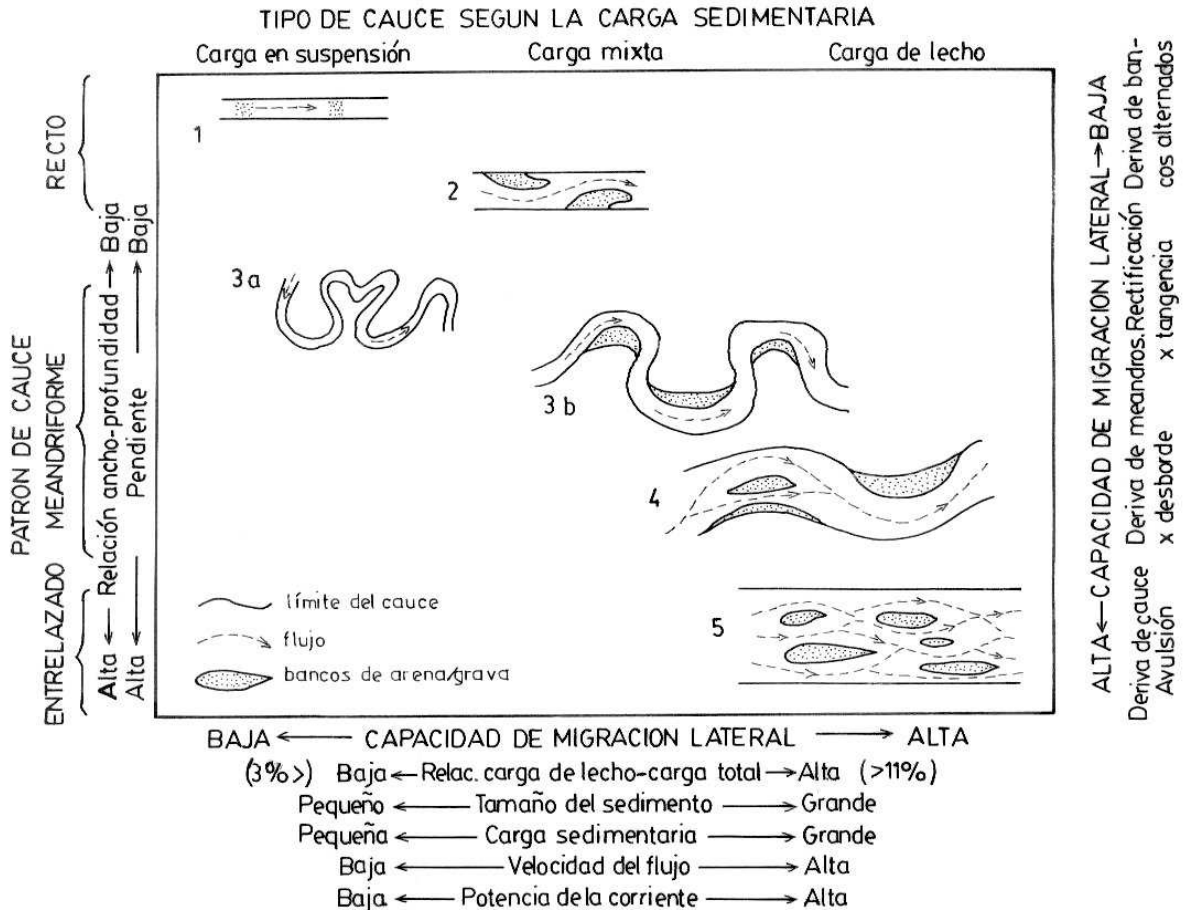


FIGURA 9. Clasificación de cauces aluviales de Schumm. (Adaptada de: Schumm, S.A., 1981. "Evolution and response of the fluvial system, sedimentologic implications". Soc. of Econom. Paleontol. and Mineralogists Spec. Publ. N° 31: 19-29; y de Schumm, S.A., 1985. "Patterns of alluvial rivers". Ann. Rev. Earth Planet. Sci., Vol. 13: 5-27).

Como se desprende de las clasificaciones presentadas en la Tabla 4 y la Figura 9, cada uno de los patrones reconocidos posee un "comportamiento geomorfológico" particular, que se visualiza tanto en la manera en que el sedimento es transportado por la corriente, como en la construcción de geofomas distintivas. Este aspecto morfo-dinámico de los ríos aluviales, junto con comentarios adicionales sobre los tipos básicos, se trata a continuación.

VI.b. Precisiones acerca de las formas básicas. Elementos geomorfológicos asociados.

Entre sus varias cualidades, uno de los atributos que considera la clasificación de la Figura 9 es la capacidad de migración lateral (relativa) de los cauces aluviales. En efecto, y tal como se observa a la derecha del diagrama, no sólo la tasa de desplazamiento horizontal suele diferir para los distintos tipos de ríos, sino también los mecanismos mediante los cuales se producen estas derivas (es decir, rectificaciones de meandros por desborde y tangencia, y avulsión).

Los tres mecanismos señalados se han representado en la Figura 10. Antes de tratarlos con más detalle, hay que recordar que, debido a que la línea del thalweg en los meandros

aluviales se “recuesta” sobre las orillas cóncavas de las curvas (con su mayor aproximación a la margen algo desplazada aguas abajo de sus ápices; ver Figura 2), estas tienden a exagerarse lateralmente por erosión, lo que resulta en la migración de los meandros individuales hacia aguas abajo (translación) y hacia afuera (extensión) del eje de las ondas.

Esa exageración progresiva de un meandro particular involucra, simultáneamente, una pérdida continua de la capacidad de transporte de la corriente en el tramo, asociada a la disminución de la pendiente del cauce por el incremento de la longitud de la onda. De todas maneras, el corte de un meandro (Figura 10 A y B) es un suceso ordinario o predecible de la evolución de un tramo de la corriente.

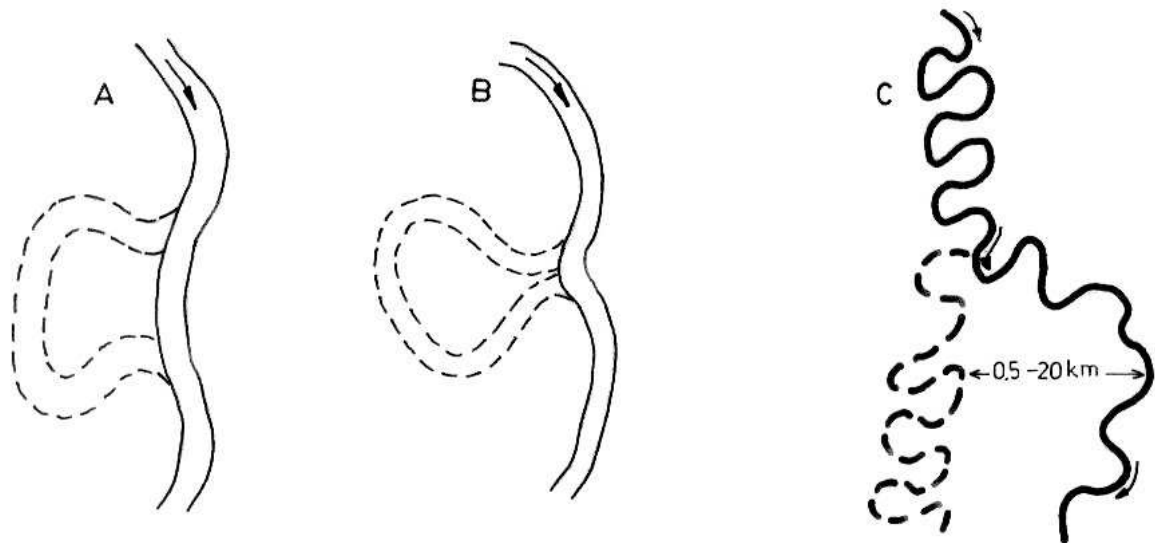


FIGURA 10. A) Rectificación o corte de meandro por desborde. B) Rectificación o corte de meandro por tangencia. C) Avulsión (el rango de distancias ilustrado es de carácter orientativo).

La rectificación de un meandro por desborde (Figura 10 A; en inglés: chute cutoff) es un fenómeno que está vinculado al paso de una o varias crecientes importantes, en las que el flujo de inundación modela el nuevo cauce, ya sea por erosión uniforme sobre una traza más rectilínea, o por erosión retrocedente desde el extremo de aguas abajo de la curva, o por ambos procesos a la vez. Entre los factores que promueven este tipo de corte se encuentran: a) la magnitud de los desbordes y la aptitud de la escorrentía de inundación de concentrarse linealmente; b) la ineficacia de la vieja traza para evacuar la carga que está siendo transportada por el fondo (como se comentó en el párrafo anterior); y c) una cierta susceptibilidad a la erosión de los sedimentos donde se instalará el canal más recto. Los chute cutoff son mecanismos frecuentes de abandono de cauces en los ríos meandriformes de carga mixta y en los entrelazados de thalweg meandriforme (tipos “3a” y “4” de la Figura 9).

La rectificación de un meandro por tangencia (Figura 10 B; en inglés: neck cutoff) es el estrangulamiento que resulta de la translación y extensión normales de un meandro. Este mecanismo está más generalizado en los cauces meandriformes de carga en suspensión (tipo “3a” de la Figura 9) y en los canales sinuosos de los ríos anastomosados, por dos razones: a) debido a que la mayor parte de la carga que transportan estos sistemas es de lavado, la onda puede exagerarse libremente, sin que la disminución de la S_c local (y la ω) impliquen una sedimentación notable en el lecho de la corriente; además b) en el perímetro de esos cauces predominan los sedimentos limo-arcillosos, que incrementan notablemente la resistencia a la erosión de la margen (ver Tabla 4).

La avulsión (Figura 10 C), por su parte, hace referencia al abandono más o menos súbito de un tramo relativamente largo del cauce, con la adopción de una nueva traza alejada

de la anterior. Las magnitudes dibujadas en la Figura 10(C) se incluyeron como ejemplos de las distancias que suelen mediar entre las ubicaciones nueva y vieja del río.

Entre los factores condicionantes de avulsión se encuentran: a) una gran tasa de sedimentación en un sitio puntual o trecho del cauce, con la consecuente sobre elevación exagerada de su fondo; y b) que la llanura adyacente en ese punto o tramo se ubique a una cota altimétrica más baja que el lecho de la corriente. Si bien el fenómeno puede ocurrir al término de una sola creciente extraordinaria, también puede ser el producto final de un proceso de mediano o largo plazo en la historia del sistema fluvial.

Aunque la avulsión se ha señalado en la Figura 9 como uno de los modos de deriva típicos de los ríos entrelazados, el mecanismo ha sido registrado en otras formas básicas de cauces aluviales.

Los tres gráficos de la Figura 10 tienen un aspecto en común: el de ser las tres maneras habituales en que se originan **cauces abandonados** en los ambientes aluviales. Las depresiones así formadas pueden ser ocupadas por lagunas, y experimentar las siguientes transformaciones: lagunas \Rightarrow pantanos (áreas permanentemente anegadas con desarrollo de vegetación hidrófita) \Rightarrow bañados (áreas periódicamente anegadas) \Rightarrow "tierra firme" (áreas casi permanentemente emergidas). Esta evolución está determinada por la colmatación progresiva de los cursos abandonados, con detritos suministrados por las aguas de inundación, y por lavaje pluvial y remoción en masa de las superficies y barrancas adyacentes.

Mientras que el corte de un meandro por tangencia resulta de un proceso de deriva continua de la onda, la rectificación por desborde y la avulsión son modos de desplazamiento discontinuo de los ríos aluviales. Igualmente, cualquiera de los cinco patrones de la Figura 9 puede migrar lateralmente hacia uno u otro lado del eje del cauce en forma continua, condicionado por alguno/s de los siguientes factores: a) tectónica activa (un ligero basculamiento en dirección perpendicular a la dirección regional del curso de agua); b) pendiente secundaria (un suave abovedamiento de la superficie, transversal a la pendiente regional); c) susceptibilidad a la erosión de las márgenes (una orilla con formaciones geológicas menos resistentes que la otra); d) influencia de tributarios (cuyas contribuciones de q_b obligan a que el thalweg de la corriente troncal se recueste sobre una margen); e) fuerza de Coriolis (y otros fenómenos asociados a la ubicación particular del sistema).

La tasa de migración lateral continua de un cauce aluvial es altamente variable, dependiendo del caudal y la potencia de la corriente, la erodabilidad de las márgenes asociada a los distintos patrones (ver Tabla 4), y el grado de la influencia de los factores indicados en el párrafo precedente. Los valores registrados en la literatura específica oscilan ampliamente, entre cm/año para cursos pequeños, y Dm/año para los grandes ríos del mundo. Con estas magnitudes, al cabo de unos miles (o decenas de miles) de años, un río de llanura derivando en una dirección preferencial (u oscilando hacia uno u otro lado) dejará "tras" de sí una faja de terreno compuesta por sedimentos depositados por la corriente: habrá edificado entonces una **llanura o planicie aluvial**.

Las llanuras aluviales (flood plains o planicies de inundación, literalmente; los ingenieros se refieren a ellas como "valles aluviales" o "valles de inundación" comúnmente) son unidades geomorfológicas mayores que construyen los ríos aluviales, aún en altiplanicies o entre cadenas montañosas. Sus superficies son casi horizontales en la dirección transversal al eje regional de los sistemas fluviales, aunque a veces suelen ser ligeramente convexas hacia arriba, con las cotas más altas próximas a donde está ubicado el cauce. En tal paisaje se reconocen varios elementos geomorfológicos originados por la dinámica morfo-sedimentaria del cauce y la de la escorrentía de inundación, en distintos grados de preservación. En la Tabla 5 (última página de esta guía, sin numerar) se han listado los nombres de esos elementos, junto con sus características más sobresalientes.

Finalmente, debe mencionarse que las llanuras aluviales experimentan acreción vertical en sus superficies, con sedimentos detríticos finos aportados por las aguas de desborde. Este proceso, a muy largo plazo (las tasas normales de sedimentación asociadas a las inundaciones se miden en unidades de mm/año), contribuye a obliterar o disipar a los elementos geomorfológicos originales, ubicuos en tales planicies.

VI.c. Epílogo de las formas básicas de cauces aluviales. Ejemplos.

Para concluir el ítem VI, se ha considerado conveniente incluir una discusión final acerca de los tipos básicos de cauces aluviales, con el auxilio de bloques diagramas y de ejemplos de ríos locales, y cercanos a la ciudad de Santa Fe. Otro de los objetivos perseguidos es que el lector termine de familiarizarse con los patrones más frecuentes, y que pueda mejorar la calidad de su análisis, a partir de la observación de fotografías aéreas, por caso.

Cauces rectos: Son poco frecuentes en la naturaleza. A pesar de su nombre, no debe imaginárselos como una traza rectilínea: por lo común, los tramos verdaderamente rectos se suceden por distancias que no superan 10 veces el ancho del cauce. Otras propiedades relevantes de estos ríos fueron presentadas en la Tabla 4 y la Figura 9. De esta última, la variedad "2" se ha tomado como referencia para construir la Figura 11.

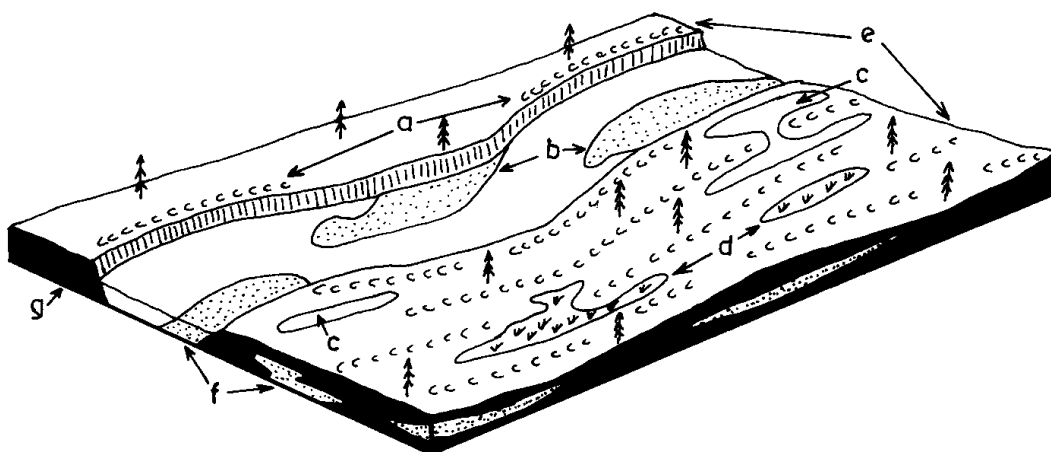


FIGURA 11. Referencias: a) albardones; b) bancos de cauce; c) lagunas; d) pantanos (c y d ocupan bajíos entre los albardones); e) llanura aluvial; f) depósitos de fondo de cauce; g) depósitos de inundación (limos y arcillas, principalmente).

El cauce recto de la Figura 11 (representado en estiaje) es uno de carga mixta, en el que el thalweg serpentea entre ambas márgenes. Tal característica, sin embargo, no determina una sección transversal marcadamente asimétrica, como la que poseen los ríos meandriiformes. El sedimento del fondo migra hacia aguas abajo formando bancos alternados, principalmente.

En la figura, se ha idealizado que el río deriva más sostenidamente hacia la derecha, como lo denuncian los sucesivos albardones sobre la margen izquierda. Simultáneamente, los dos albardones de la derecha podrían estar indicando que la deriva se ha detenido, al menos transitoriamente (un par de dataciones absolutas en el núcleo y la cresta del albardón indicarían el lapso de estabilidad).

Los perfiles del bloque diagrama muestran la composición geológica de la llanura aluvial, en la que predominan los depósitos limo-arcillosos. Tanto la abundancia relativa de estos sedimentos, como el predominio de albardones en la llanura, sugieren que la inundación es el proceso morfogenético más eficaz en el área. Respecto de los recursos hídricos subterráneos, los depósitos de fondo de cauce constituyen los mejores acuíferos de la zona.

El Arroyo Leyes, que forma un delta digitado al desembocar en la Laguna Setúbal, es un ejemplo de cauce recto (el Aº Aguiar, al oeste y muy cercano a la desembocadura del Leyes, es un río recto no aluvial, con su traza controlada estructuralmente).

El Río Uruguay en las adyacencias del Puente Internacional Artigas (32° 15' S), es una variedad recta de cauce anastomosado, con albardones como elementos geomorfológicos característicos.

Uno de los mejores ejemplos de cauces rectos de carga mixta del país es el del Río Desaguadero-Salado, entre los 34° y 36° S, donde forma el límite político entre San Luis y Mendoza. Este río tiene allí una llanura aluvial de 25 km de ancho, similar a la del Paraná a la latitud de la ciudad de Santa Fe; esto, aún cuando ambas cuencas hidrográficas difieren en ≈ 10 veces el área total, y que el Q_m (actual) del Desaguadero-Salado sería 65 a 75 veces menor que el del Paraná.

Cauces meandriformes: Junto con los entrelazados típicos, son las formas de cauce más abundantes en la naturaleza. Aunque las variedades "3a" y "3b" (Figura 9) se denominan de la misma manera (si no se hace la aclaración del tipo de carga sedimentaria), lo mencionado en las páginas precedentes sirve para concluir que se trata de dos tipos de ríos morfogenéticamente muy diferentes.

Tradicionalmente, estos cursos de agua se han definido como de cauce único y $P > 1,5$ (como repite Rust en la clasificación de la Tabla 3). Sin embargo, Schumm ha demostrado que las corrientes meandriformes pueden tener sinuosidades tan bajas como 1,2. De hecho, y debido al corte de la onda ideal graficada en la Figura 10(A), por ejemplo, el valor de P se modificó de 1,7 a 1,1: el corolario es que hay que tener cuidado si el cauce se analiza en una carta topográfica y no en una fotografía aérea -donde ciertos rasgos, como las espiras o los meandros abandonados son evidentes-, ya que una medición de la sinuosidad podría conducir a clasificar como recto a un tramo de río meandriforme.

En la Figura 12 se ha esquematizado en tres direcciones un cauce meandriforme de carga mixta, de gran capacidad de migración lateral (por caso, mensurable en unidades de m/año), como lo indica la ubicuidad de los conjuntos de espiras en la llanura aluvial. Los depósitos de tales geoformas se visualizan en los perfiles del diagrama, como así también las lentes formadas por depósitos de inundación (correspondientes a albardones, rellenos de cauces abandonados, etc.). Debido a su permeabilidad, los primeros representan una fuente de explotación muy conveniente del agua subterránea.

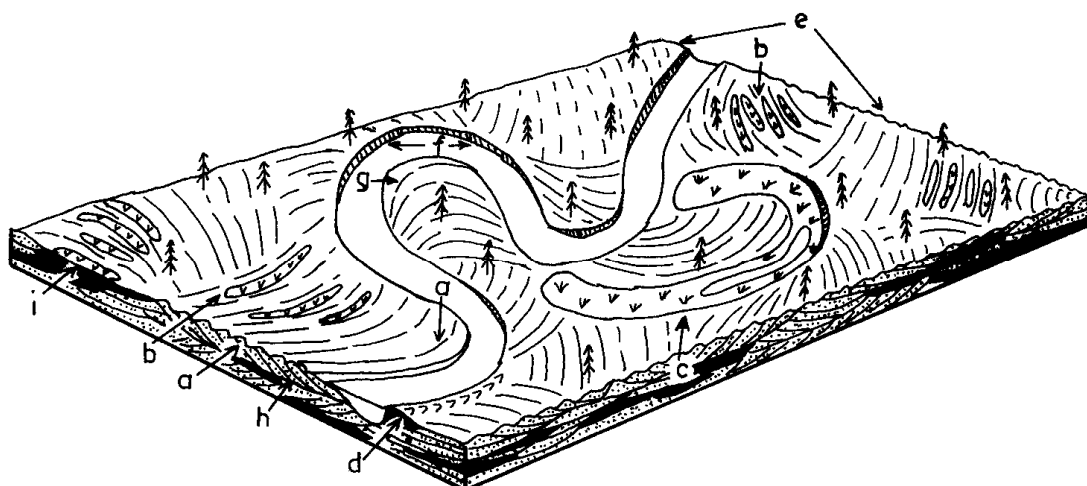


FIGURA 12. Referencias: a) espiras de meandro; b) lagunas y pantanos entre espiras; c) meandro abandonado (transformado en ambiente lacustre/palustre); d) albardón; e) llanura aluvial; f) margen erosiva; g) margen deposicional; h) depósitos de cauce (de espiras y de fondo de canal); i) depósitos de inundación.

El modelo de la Figura 12 está inspirado en el Río Colastiné, brazo secundario del Río Paraná en cercanías de la localidad homónima. Otros ejemplos típicos de cursos del tipo “3b” son el Río Paraguay y el Río Coronda (al sur de Santa Fe - Santo Tomé).

Respecto de la variedad meandriforme de carga en suspensión (“3a”) puede citarse el Río Salado, desde los bañados de Añatuya (Santiago del Estero) hacia aguas abajo (aunque en partes de su recorrido a través de la Provincia de Santa Fe, el perímetro del cauce está en contacto con afloramientos de rocas sedimentarias resistentes a la erosión). Cuando atraviesa los “Bajos Submeridionales”, el diseño en planta del Salado suele ser exactamente igual al de la Figura 9 (es decir, con ondas en doble fase).

Cauces entrelazados: son los más abundantes en la Argentina, encontrándose en zonas montañosas (por ejemplo, el Río Grande en la Quebrada de Humahuaca, Jujuy), en llanuras pedemontanas (Río Juramento en Salta - Santiago del Estero, Río Cuarto en Córdoba, Río Quinto en San Luis, ríos San Juan y Mendoza en tales provincias), y en planicies bastante alejadas de sistemas orográficos (los ríos Negro, Chubut y Santa Cruz son entrelazados aún en el extremo este de los territorios homónimos).

En cualquiera de los ríos citados podrían reconocerse los rasgos esquematizados en la Figura 13, tanto los geomorfológicos en superficie, como los geológicos en el subsuelo.

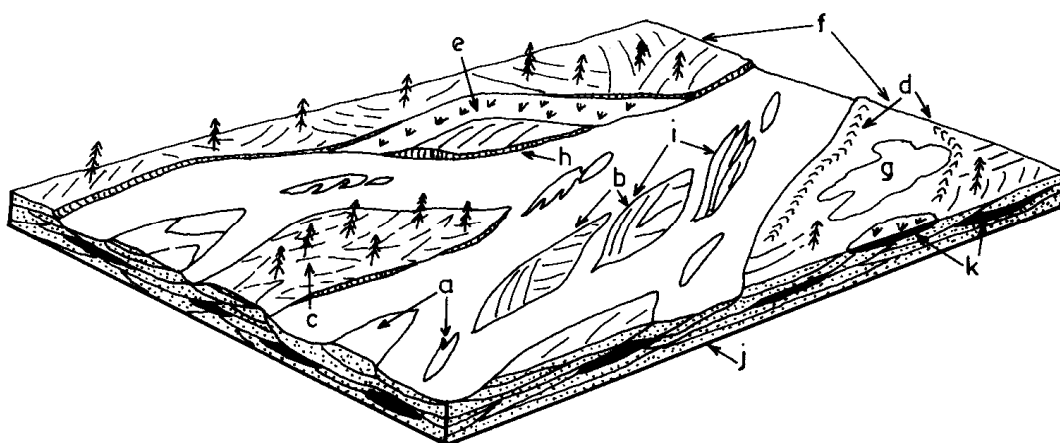


FIGURA 13. Referencias: a) bancos de cauce; b) bancos adosados lateralmente; c) isla; d) albardones; e) cauce abandonado (laguna o pantano); f) llanura aluvial; g) laguna; h) margen erosiva; i) margen deposicional; j) depósitos de cauce (bancos y fondo de canal); k) depósitos de inundación, rellenos sedimentarios de lagunas y pantanos.

La carga de fondo en los ríos entrelazados forma más del 11 % de la carga total de sedimentos. En casos extraordinarios, el q_b puede ser próximo al 50 % del q_t .

Cauces entrelazados de thalweg meandriforme: Son un tipo de transición entre los meandriformes de carga mixta y los entrelazados, como se ilustra en el bloque diagrama de la Figura 14. Por tal razón, se reconocen en estos cursos geoformas típicas de las variedades “3b” y “5” (bancos de cauce y espiras de meandro, por ejemplo), y mecanismos de cambio de cauce como cortes por desborde y avulsión.

El mejor ejemplo lo constituye el Río Paraná ($q_b \approx 15\%$ de q_t ; $S_c \approx 1-6 \cdot 10^{-5}$; $Q_m \approx 18.000 \text{ m}^3/\text{s}$), entre las localidades de Curtiembre y Paraná, por citar un tramo muy ilustrativo.

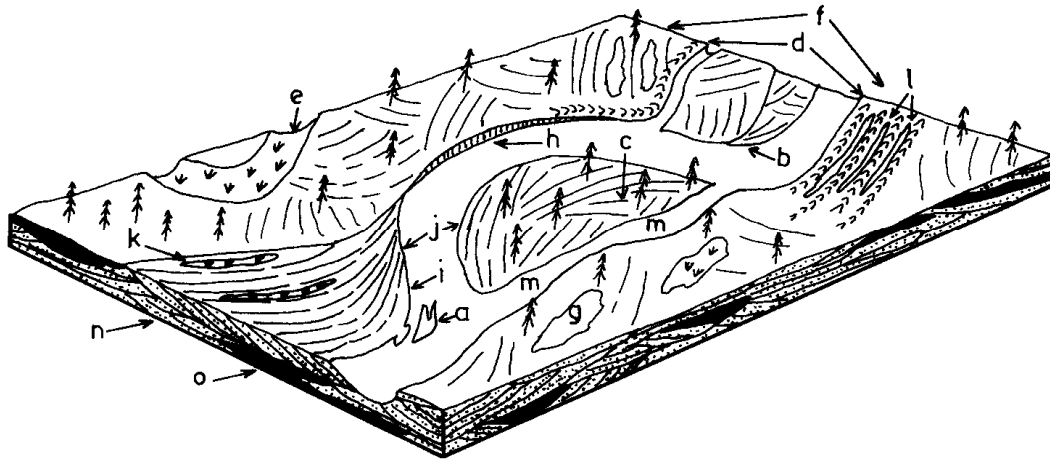


FIGURA 14. Referencias: a, b, ..., h, i) Idem Figura 13; j) espiras de meandro; k) lagunas y pantanos entre espiras; l) lagunas y pantanos entre albardones; m) brazo generado por corte de la curva; n) depósitos de cauce (de bancos, espiras y de fondo de canal); o) depósitos de inundación, lagunas y pantanos (principalmente pelíticos).

A principios de este siglo, la sinuosidad del thalweg frente a la capital entrerriana varió de 1,47 a 1,15, por un proceso de chute cutoff que demandó casi una decena de años en completarse.

Respecto de las avulsiones, la existencia de este mecanismo en el Paraná fue sugerida ya a mediados de siglo por Joaquín Frenguelli (un naturalista italiano, autor de muchos trabajos sobre la geología de Santa Fe y la Argentina, en general), quien postuló que este cauce había ocupado la depresión de los Saladillos en tiempos geológicos pasados, antes de construir la llanura aluvial en la posición actual.

Cauces anastomosados: De acuerdo a la bibliografía temática, este tipo de sistemas no es muy frecuente en los ambientes aluviales netamente continentales, y aparecen más en los de transición, como en determinadas variedades de deltas.

Las menciones hechas sobre estas corrientes múltiples desde la pág. 10 de la guía, se han sintetizado en la Figura 15. Debe recordarse, igualmente, que los cauces individuales pueden ser menos sinuosos, con $P < 1,5$.

Un intrincado sistema de canales anastomosados similar al de la Figura 15 puede observarse en la Isla Clucellas, al sur del canal de acceso al Puerto de Santa Fe, como así también en otros sectores de la llanura aluvial del Río Paraná alejados de la influencia directa del cauce principal y brazos más importantes.

El complejo de riachos asociado al Río Paraná Guazú, en el delta del Paraná, parece constituir otro ejemplo de estos sistemas.

Además de las llanuras aluviales, y dependiendo del contexto geológico y fisiográfico regional, los ríos edifican otros elementos y unidades geomorfológicas de importancia, tales como **abanicos aluviales** y **deltas**. El análisis de estas geoformas queda fuera de los objetivos de la guía, aunque los principios expuestos pueden aplicarse a los cursos de agua que las construyen (con las adaptaciones de ocasión para los ambientes deltaicos, principalmente en los deltas dominados por el oleaje o las mareas).

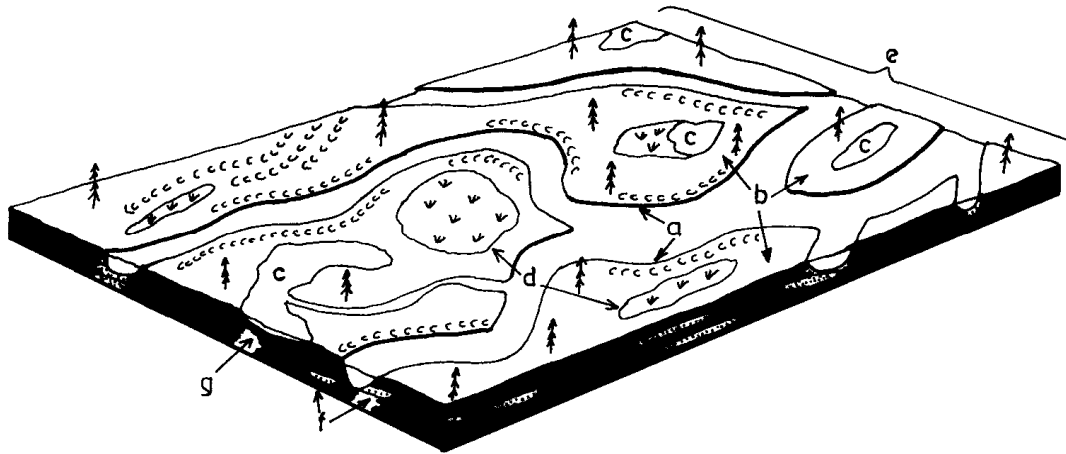


FIGURA 15. Referencias: a) albardones; b) islas; c) lagunas; d) pantanos; e) llanura aluvial; f) depósitos de cauce; g) depósitos pelíticos, principalmente.

Como consecuencia de un descenso significativo en el nivel de base de una corriente (inducido por tectónica o cambio climático), o por un aumento notable y permanente de los caudales circulando por el sistema (también provocado por un cambio climático), un cauce aluvial puede inaugurar una etapa de incisión vertical, al cabo (o durante) la cual su llanura aluvial queda altimétricamente muy por encima del nivel del agua, aún en los períodos de creciente. La unidad geomorfológica “abandonada” por el encajamiento del río se denomina **terrazza fluvial**.

Las terrazas fluviales poseen características morfométricas muy parecidas a las llanuras aluviales: si existen, se disponen como fajas subhorizontales sobreelevadas a uno o ambos lados de la corriente, de ancho variable, con pendientes longitudinales de bajo gradiente en la dirección de la escorrentía, y compuestas por sedimentos similares (en mineralogía, no necesariamente en tamaño) a los que el cauce transporta en la actualidad. Dependiendo de la antigüedad de la incisión, en sus superficies podrán o no identificarse los elementos geomorfológicos fluviales de la Tabla 5.

Las terrazas son unidades geomorfológicas sujetas a la erosión lateral de los ríos, y a la evolución normal de las vertientes (acaravamiento, procesos de remoción en masa, etc.). Un excelente ejemplo de terraza fluvial es la superficie del Parque San Carlos, en Concordia (Entre Ríos), dispuesta a más de 20 metros sobre el nivel actual del Río Uruguay.

VII. METAMORFOSIS DE CAUCES ALUVIALES.

Para un ingeniero dedicado al estudio de los sistemas fluviales, la correcta identificación de una u otra variedad de cauce podría mejorar la calidad de sus investigaciones, tanto básicas como aplicadas. Si el Río Paraná fuera considerado como un curso entrelazado típico, por ejemplo, uno no debería porqué tener en cuenta cambios significativos de la sinuosidad a corto o mediano plazo, que afectarían el diseño de obras en las adyacencias del cauce, o el trazado y mantenimiento de una ruta de navegación.

De la misma manera, un puente que atravesase un meandro podría proyectarse de modo diferente en función de la máxima amplitud (a_m) y longitud de onda esperables, condicionadas en parte por el tipo y cantidad de carga sedimentaria que la corriente transporta por el lecho.

Los dos ejemplos brindados cumplen el propósito de ilustrar sobre el beneficio de clasificar adecuadamente a los cauces aluviales. Así, conociendo que el Río Paraná es uno entrelazado de thalweg sinuoso en parte importante de su recorrido como río aluvial, el ingeniero tendrá la posibilidad de elegir los sitios en que el dragado de un canal de navegación

artificial no se contraponga con la tendencia natural del río, o de emplazar una obra en sus adyacencias, que quede fuera del alcance de la a_m máxima de una onda que en la actualidad se ha insinuado sólo levemente.

Obviamente, con una correcta clasificación no se definirá ninguna obra de ingeniería ni mucho menos. Sin embargo, y a partir de los nuevos conocimientos adquiridos al estudiar el ítem VI, sería conveniente que el lector repasara la discusión hecha en torno a la Tabla 2 (último párrafo de la pág. 7 hasta el último de la pág. 8), que bien refleja la importancia de conocer un sistema fluvial desde una perspectiva geomorfológica, mucho más allá de los límites del perímetro mojado y la longitud de la corriente.

Al final de la pág. 8 se mencionan los términos “valor crítico” y “umbral”. En relación a esto, la forma en que Schumm construyó su diagrama de la Figura 9 sugiere que los diferentes patrones de cauce forman un continuo, y que el cambio de la variedad “1” a la “5” es transicional. Sin embargo, el mismo autor advierte que, tanto los trabajos experimentales de laboratorio, como los estudios en el terreno, indican que las mutaciones (o “metamorfosis”) de un tipo establecido de río a otro, ocurren más bien al traspasarse valores críticos de la pendiente (S_c o S_v), potencia de la corriente (Ω o ω), o carga sedimentaria (q_b). Las Figuras 16, 17 y 18 muestran este aspecto.

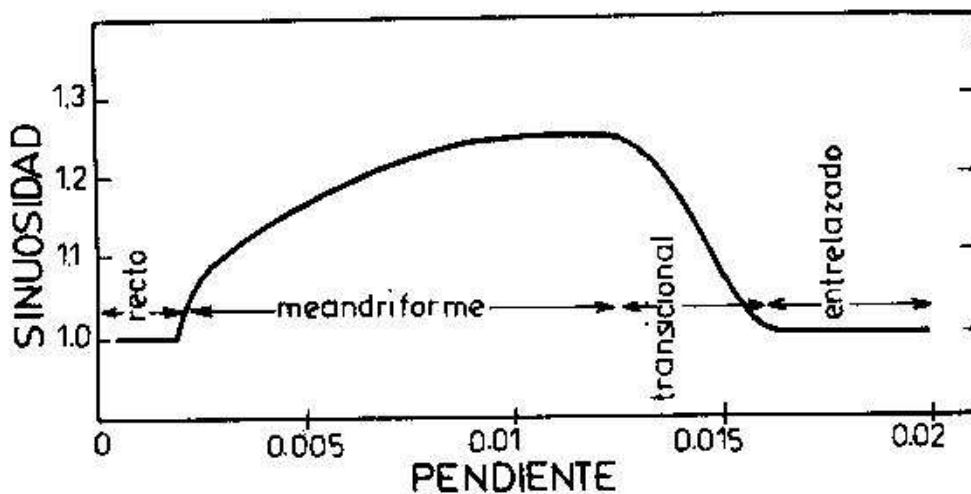


FIGURA 16. Efecto de la S_c (pendiente de un canal de laboratorio) sobre P , manteniendo constante Q . Los patrones indicados en la curva son los nº “2”, “3b”, “4” y “5” en la Figura 9. (Tomado de: Schumm, S.A., & Winkley, B.R. (eds.), 1994. “The variability of large alluvial rivers”. 467 pp., American Society of Civil Engineers).

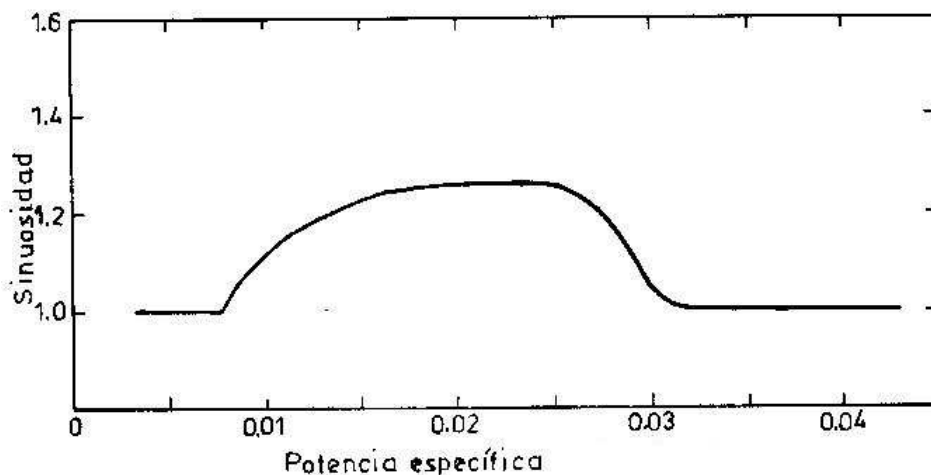


FIGURA 17. Relación entre P y ω . Los patrones de cauce asociados a la curva son los mismos (y ocupan idéntica posición) que los de la Figura 16. (Tomado de: Schumm, S.A., 1977. “The fluvial system”. 338 pp., John Wiley & Sons, New York).

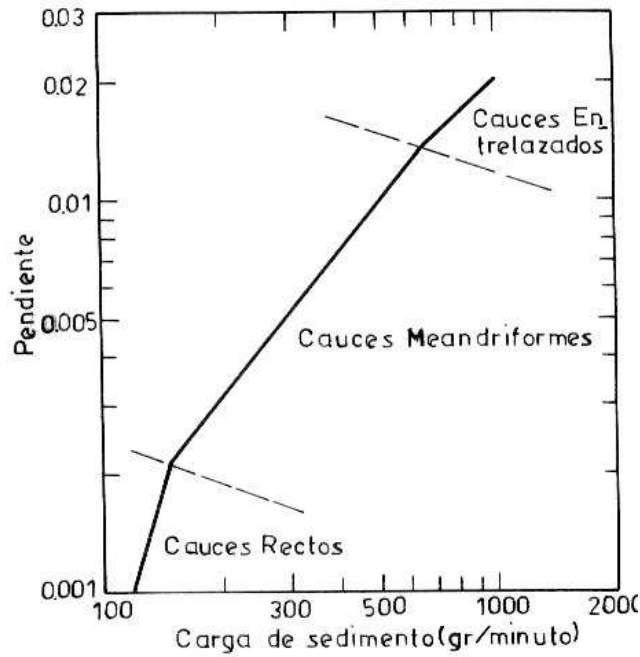


FIGURA 18. Relación entre q_b y S_c (pendiente de un canal de laboratorio), mostrando los incrementos en el transporte de sedimentos en los umbrales de cambio del patrón de cauce (Tomado de: Schumm, S.A., & Khan, H.R., 1973. "Experimental study of channel patterns". Geol. Soc. of Am. Bull., Vol. 83: 1755-1770).

Los tres gráficos presentados son claras demostraciones de que un cauce aluvial puede mutar "drásticamente" de patrón y, por lo tanto, de dinámica morfogenética, si algunas variables importantes del sistema fluvial (tales como S_v , Q_f , q_b , D_{50}) se modifican sobrepasando algún valor crítico. La influencia del caudal de un río sobre su forma en planta se muestra en las Figuras 19 y 20.

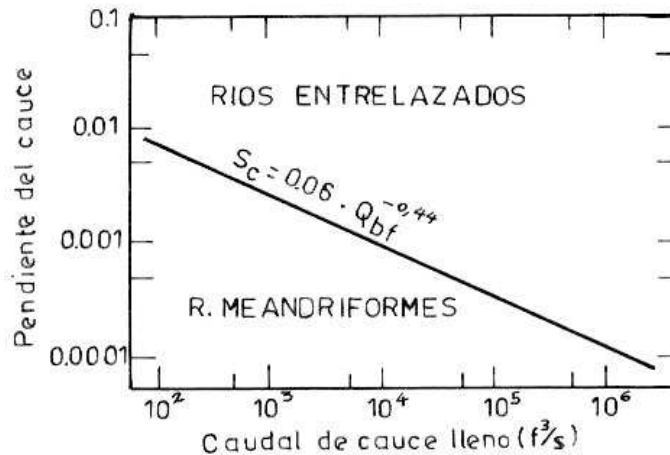


FIGURA 19. Relaciones entre patrones de cauce, Q_{bf} y S_c , observada en ríos naturales. La función discriminante $S_c = 0.006 \cdot Q_{bf}^{-0.44}$ resultó de plotear ≈ 30 datos. (Tomado de: Leopold, L.B., & Wolman, M.G., 1957. "River channel patterns: braided, meandering and straight". U.S. Geol. Surv. Prof. Paper 282-B).

Las Figuras 16 a 20, como la Figura 9, tienen la cualidad de brindar un abanico de explicaciones a los cambios de patrón que suele presentar un río en tramos sucesivos, o durante su historia. Así, por ejemplo, la transformación del Río Juramento (entrelazado) en el meandriforme Río Salado, podría vincularse a la disminución de la pendiente regional al cruzar los bañados de Añatuya, o a la pérdida de parte de la carga de fondo, que queda atrapada en esa gran zona pantanosa.

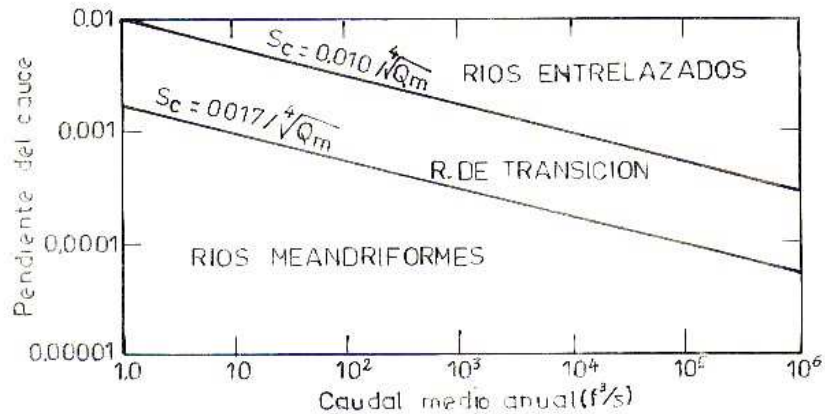


FIGURA 20. Relaciones entre patrones de cauce, Q_m y S_c , observada en ríos naturales. Como en el caso de la Figura 19 y otras ecuaciones de geometría hidráulica, debe observarse precaución si se emplea la ecuación $S_c = 0.01 / Q_m^{1/4}$. (Tomada de: Lane, E.W., 1957. "A study of the shape of channels formed by natural streams flowing in erodible material". M.R.D. Sediment Series N° 9, U.S. Army Eng. Division).

Por otro lado, en varios ríos de la región pampeana se reconocen trazas meandriiformes antiguas, vinculadas genéticamente a cauces que en la actualidad son entrelazados. Los ríos Chorrillo y Quinto en San Luis, y el Río Cuarto, en Córdoba, son buenas muestras de ello. En el primer caso, la metamorfosis parece haber ocurrido cuando, al encajarse el cauce en un paquete de sedimentos principalmente limosos, su fondo alcanzó un depósito de gravas y arenas gruesas, infrayacente a los limos.

En el Río Paraná, la sinuosidad del thalweg entre Curtiembre y Paraná varió de 1,20 a 1,13 en la primera mitad de este siglo, asociada a una merma del 7 % en el caudal formativo del cauce. Paralelamente, algunos tramos del sector adquirieron la apariencia de entrelazados típicos.

Los tres ejemplos previos son explicaciones más o menos debatibles para fenómenos que se observan hoy en día, o que ocurrieron tiempo atrás. Razonamientos similares podrían utilizarse en la dirección opuesta, para realizar predicciones de posibles metamorfosis futuras.

Con el auxilio de gráficos como los de las Figuras 16 a 20, el ingeniero fluvial podría definir mejor el tipo de control artificial sobre un río, sin alterar radicalmente su dinámica, o desafiarla permanentemente.

VIII. TEXTOS DE CONSULTA RECOMENDADOS.

COOKE, R.U., & WARREN, A., 1973. 'Part 3: The fluvial landscape in deserts'; in: "Geomorphology in deserts", 394 pp. University of California Press, California.

COOKE, R.U., & DOORNKAMP, J.C., 1974. "Geomorphology in environmental management. An introduction", 385 pp. Clarendon Press, Oxford.

LEOPOLD, L.B., WOLMAN, M.G., & MILLER, J.P., 1964. "Fluvial processes in geomorphology", 522 pp. W. H. Freeman & Company.

RICHARDS, K., 1982. "Rivers. Form and process in alluvial channels", 358 pp. Methuen & Co., New York.

SCHUMM, S.A., 1977. "The fluvial system", 338 pp. John Wiley & Sons, New York.

SCHUMM, S.A., MOSLEY, M.P., & WEAVER, W.E., 1987. "Experimental fluvial geomorphology", 413 pp. John Wiley & Sons, New York.

SCHUMM, S.A., & WINKLEY, B.R. (eds.), 1994. "The variability of large alluvial rivers", 467 pp. American Society of Civil Engineers.

Elemento Generador	Elementos Geomorfológicos	Tipo de río (Figura 9)	Ubicación	Forma en planta	Origen	Composición sedimentaria	Tamaño (altura) / Forma L. transver.	Características dinámicas sobresalientes
cauce	Bancos de cauce (channel bars)	2 4 5	Central o lateral al cauce.	Elipsoidal, romboidal, elongados en la dirección de la corriente.	Sedimentación de q_b a partir de bifurcación del flujo.	Arenas, arenas gravosas, etc. (depende de la granulometría de q_b), con estratificación cruzada en diferentes escalas.	decímetros a metros (dependiendo de la $d_{máx}$ del río) / Aproximadamente trapezoidal.	Geoformas móviles que migran por erosión en sus extremos de aguas arriba, y sedimentación en sus extremos inferiores. Por diferentes velocidades de avance, suelen adosarse lateralmente. Pueden desaparecer por erosión al paso de una creciente.
	Espiras de meandro (scroll bars, point bars)	3a (poco frecuentes) 3b (por excelencia) 4	Margenes convexas.	De media luna.	Sedimentación de q_b . Al término de una creciente, sedimentación de fracción más gruesa de q_s .	Idem arriba. Suelen formar unidades granodrecientes por la sedimentación de parte de q_s . Estratificación cruzada sigmoidal grande.	Se elevan algunos dm sobre el nivel de la llanura / Sigmoidal, con pendiente hacia el cauce. Cresta convexa	La mayor parte del sedimento que los forma procede de la margen cóncava de aguas arriba. Cada ciclo hidrológico puede formar una espira.
	Cauces abandonados	1 a 5	Llanura aluvial Islas.	Variable (Figura 10).	Figura 10.	Variable, de acuerdo a la procedencia del sedimento y a la evolución del elemento (laguna, etc.). Generalmente, sedimentos detríticos finos (fracción fina de q_s), y a veces orgánogenos.	Variable / Variable (asimétrica en cauces 3a, 3b y 4)	-----
cauce + inundación	Islas	4 5	Interior del cauce.	Elipsoidal, romboidal, elongadas en la dirección de la corriente. Muy variable en cauces anastomosados.	Erosivo en cauces anastomosados. En cauces entrelazados, bancos colonizados por vegetación.	Variable de acuerdo al origen. En cauces entrelazados, base formada por q_b y techo por q_s .	decímetros a metros (dependiendo de la $d_{máx}$ del río y del nivel del agua de inundación) / Aproximadamente trapezoidal.	Geoformas fijas. Evolucionan por erosión principalmente, aunque pueden crecer por el adosamiento de bancos en sus laterales y extremos. Suelen adosarse a la llanura aluvial.
	Albardones (natural levees)	1 a 5 (más comunes en 1, 2 y 3a)	Sobre la llanura aluvial, adyacentes al cauce.	Lineal (rectos o suavemente arqueados).	Sedimentación de la fracción + gruesa de la carga transportada en suspensión.	Principalmente, limos gruesos a arenas muy finas.	Algunos dm sobre la llanura (a veces, algunos m) / Convexa asimétrica, con pendiente más pronunciada hacia el cauce.	La pendiente más pronunciada hacia el cauce del perfil transversal es de origen erosivo. Normalmente, un albardón aumenta su altura y ancho durante varias crecientes.
inundación	Derrames (crevasse splays)	1 a 5	Idem.	En abanico, lobulada.	Idem.	Principalmente arenas.	Decímetros a metros sobre la llanura / Convexa	Generados a partir de la rotura de albardones por surcos de desborde, pueden originar cambios de la posición del cauce si el flujo se concentra en los pantanos o baldíos tras-aldardón (backswamps) .