

TRAZADOS DE BAJA Y ALTA SINUOSIDAD EN RÍOS ESPAÑOLES

Carmelo Conesa García

Departamento de Geografía. Universidad de Murcia

RESUMEN

El presente artículo constituye una aproximación al análisis de los trazados de baja y alta sinuosidad originados en ríos españoles. Tras unas consideraciones de carácter tipológico, se dedica un epígrafe a cauces rectilíneos y poco sinuosos, y otro a los cursos meandriformes. En ambos casos, se relaciona el índice de sinuosidad con la pendiente del río y con otros factores directamente implicados en el grado de encajamiento y en las desviaciones del cauce.

El estudio de los trazados de tipo meandriforme incluye asimismo la definición de sus parámetros geométricos, la distribución frecuencial del tamaño de los meandros y, finalmente, la identificación de tramos de especial dinamismo.

Palabras clave: sinuosidad, pendiente, modelos de cauce, meandriforme, nos españoles.

ABSTRACT

This article focuses on the channel patterns of high and low sinuosity in Spanish rivers. Firstly it aims to establish a typology and then considers in detail both straight, less sinuous channels and meandering ones, trying to link the rate of sinuosity to the slope of the riverbed and to the degrees of confinement and deviation of the channel.

The analysis of meandering pattern attempts also to define their geometrical parameters, the frequency distribution of the meanders' size and, finally, to identify the specially dynamic stretches.

Key words: sinuosity, slope, channel patterns, meandering, Spanish rivers.

CRITERIOS TIPOLÓGICOS

Desde la publicación en 1957 del trabajo de LEOPOLD y WOLMAN, *River channel patterns: braided, meandering and straight*, el tema de la clasificación de los cauces fluviales ha sido objeto de una gran atención por parte de numerosos investigadores, que han

contribuido con interesantes aportaciones referentes no sólo a la mera diferenciación de las formas de cauce, sino también a la importancia de sus procesos, sus características sedimentológicas y las condiciones medioambientales que controlan su evolución.

Los trazados de los cauces fluviales se clasifican normalmente en tres tipos: rectos, meandriformes y trenzados, adoptándose así de forma generalizada la clasificación propuesta en 1957 por LEOPOLD y WOLMAN. En la actualidad, se reconoce la existencia de otros transitorios, como es el tipo «sinuoso», cuyo trazado refleja la transición entre el recto y el meandriforme, o el «anastomosado», término utilizado para modelos «braided»

CUADRO 1
Clasificación de los tipos de cauces, basada en MIALL (1977)

Tipo de cauce	Morfología	Sinuosidad	Tipo de carga	Anchura/ profundidad	Tipo de acción erosiva	Tipo de sedimentación
Rectilíneo	Un solo cauce con pozas y rápidos, talweg meandrizante	< 1,05	en suspensión mixta o carga de fondo	< 40	Ensan- chamiento e inci- sión del cauce menor	Barras obli- cuas y longi- tudinales
Ligeramente sinuoso	Un solo cauce, pozas y rápidos, talweg meandrizante	> 1,05 < 1,50	Mixta	< 40	Ensan- chamiento cre- ciente del cauce e inci- sión	Barras obli- cuas
Meandriforme	Un solo cauce (a veces con barra puntual interior)	> 1,50	en suspensión o carga mixta	< 40	Incisión del cauce, ensan- chamiento del meandro	Formación de barra puntual
Trenzado o «braided»	Dos o más cauces con barras y perímetro inestable	> 1,30	Carga de fondo	> 40	Ensan- chamiento del cauce	Acumulación en el cauce y formación de barras centra- les y diagona- les
Anastomosado	Dos o más cauces con grandes islas estables	> 2,0	Carga en sus- pensión	< 10	Lento ensan- chamiento del meandro	Lenta Acre- ción del mar- gen

cuyas islas o brazos emergidos son estables (SCHUMM, 1963; BRICE, 1984; MORISAWA, 1985). Estos diferentes tipos se resumen en el cuadro 1, donde se presenta una clasificación adaptada a la de MIALL (1977).

En realidad los ríos rectos son raros en el medio natural, y *amenudo* aparecen entre dos curvas o a lo largo de secciones «*braided*». El tipo más frecuente es el meandriforme, resultado unas veces de controles litológicos y estructurales, y otras de la propia dinámica divagante en las llanuras de inundación.

El principal criterio de diferenciación de estos tipos es el índice de sinuosidad (IS), definido por expresiones como:

$$IS = \frac{\text{longitud del talweg}}{\text{longitud del valle}} \quad (\text{LEOPOLD y WOLMAN, 1957})$$

$$IS = \frac{\text{longitud del cauce}}{\text{longitud del eje central de meandros}} \quad (\text{BRICE, 1964})$$

Mediante este procedimiento, se considera un *cauce rectilíneo* a aquél que tiene una sinuosidad inferior a 1,05 y *sinuoso* cuando el índice IS queda comprendido entre 1,05 y 1,5. Un *cauce meandriforme* tiene, en cambio, una sinuosidad superior a 1,5, y consta de curvas alternantes que proporcionan un acusado trazado serpenteante. Su similitud geométrica *amenudo* hace difícil distinguir un río meandriforme de otro. Conscientes de esta notable regularidad de los ríos serpenteantes, LANGBEIN y LEOPOLD (1966), sugirieron que los meandros no son meros accidentes y que ellos aparecen en tanto y cuanto un río, al girar, realiza un menor esfuerzo y gasto de energía. Sin embargo también es obvio que un río puede meandrizarse igualmente debido a factores topográficos, sobre todo en los tramos de fuerte control estructural. De acuerdo con esto, MUELLER (1968) propuso dos índices para definir los componentes de sinuosidad en porcentajes, basándose en la sinuosidad total del cauce (ST) y en la sinuosidad del valle (SV):

$$\text{Sinuosidad hidráulica} = \frac{(ST-SV) 100}{ST-1} \quad \text{Sinuosidad topográfica} = \frac{(SV-1) 100}{ST-1}$$

Aunque la sinuosidad varía entre los ríos meandriformes, existe una marcada similitud en la relación del radio de curvatura con la anchura del cauce, Rc/B , común a los tramos de curvas en ríos de diferente tamaño y en diferentes ámbitos físicos. Esta relación también refleja el grado de movilidad de los meandros.

Un río trenzado, en cambio, aparece frecuentemente sobre una pendiente empinada y se caracteriza por un curso ancho y somero, que se subdivide en varios brazos alrededor de islas entrelazadas. El río en su conjunto puede tener un trazado rectilíneo, pero los brazos son normalmente sinuosos. A pesar de sus márgenes inestables y poco definidos, los cauces trenzados pueden presentar un perímetro poco variable y un trazado aparentemente menos fluctuante que la propia morfología de lecho.

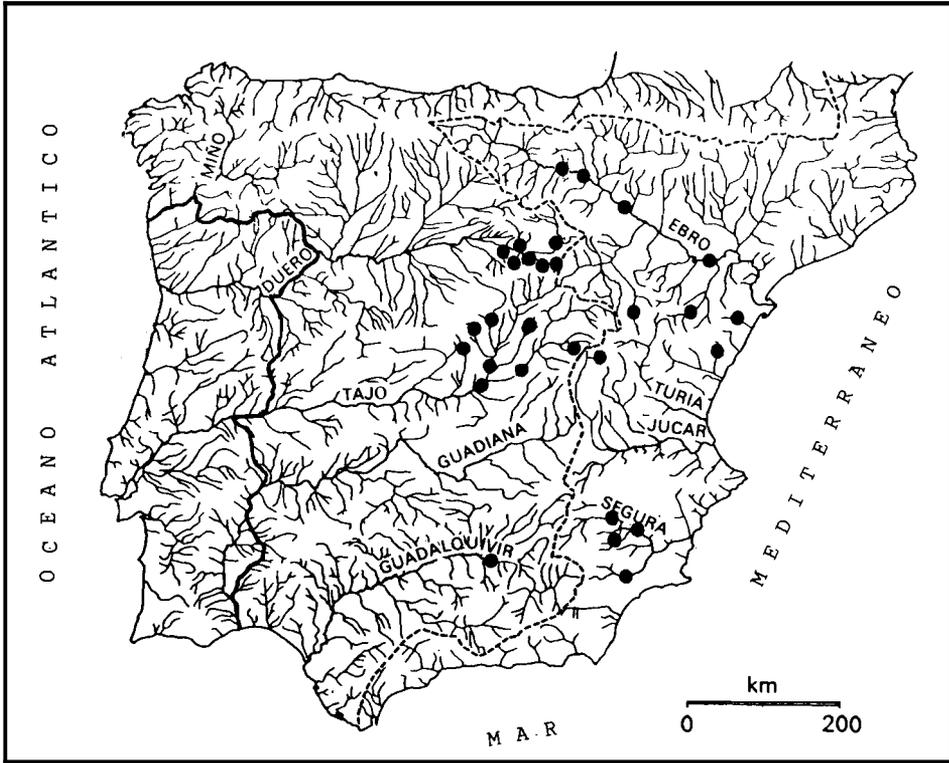


FIGURA 1. Localización de los tramos estudiados.

SINUOSIDAD Y PENDIENTE

En el presente trabajo se ha estimado, para 29 tramos de ríos españoles (fig. 1), el índice de sinuosidad basado en la relación longitud del cauce/longitud del eje central de meandros o sinuosidades (cuadro 2). Entre los criterios empleados en la elección de estos tramos, figuran su régimen hidrológico, pendiente, grado de control estructural y balance entre procesos erosivos y sedimentarios. La medición de las longitudes del cauce y del eje central, así como el cálculo de la pendiente y los parámetros referentes a la geometría de meandros, se han realizado sobre mapas topográficos a escala 1/25000 (1978-82) y ortofotomapas 1:50000 (1979-85).

El valor medio del índice de sinuosidad para el total de tramos estudiados es de 1,38, y la desviación típica de 0,35. El valor máximo corresponde al río Tajo en Trillo (IS = 2,9), y los mínimos al Alto Júcar (IS = 1,06) y al Jiloca (IS = 1,09). El río Júcar, entre los puntos de afluencia de los arroyos de Almagrero y Pedregoso, o el propio Tajo, entre el Estrecho del Hornillo y Las Juntas, son claros ejemplos de los numerosos cursos rectilíneos o de baja sinuosidad que, en el territorio español, se hallan sometidos a un fuerte control por parte de las estructuras y líneas de fracturación.

El término «*meandering*» utilizado por LEOPOLD, WOLMAN y MILLER (1964)

para cauces que presentan curvas de sinuosidad superior a 1,5, puede aplicarse a determinados tramos del Ebro medio (Novillas-Boquiñeni, o los estudiados por OLLERO —1990—: Puente Gallur-Zaragoza y Presa Pina-Puente Gelsa) y a buena parte del Ebro bajo. El resto de las grandes arterias fluviales (Duero, Tajo, Guadiana, Guadalquivir...) incluyen en su trazado gran número de sectores que rebasan este umbral. El Duero medio

CUADRO 2
Pendiente y sinuosidad en diferentes tramos y ríos españoles

Tramo fluvial	Lc	Le	IS	h	P
— Río Ebro (Los Pezales-Alto Mesilla)	25,0	18,6	1,34	28	1,12
— Río Ebro (Logroño-Cruce Cra. de la estación de Mendivia)	29,0	21,2	1,37	34	1,17
— Río Ebro (Novillas-Boquiñeni)	25,1	16,2	1,55	12	0,48
— Río Ebro (Caspe)	24,7	12,1	2,04	10	0,40
— Río Guadalupe (Mas del Obispo-Embalse de Santolea)	20,7	16,0	1,29	200	9,66
— Río Jiloca (Villafranca del Campo-Torrijo del Campo)	16,0	14,7	1,09	40	2,50
— Rambla Cervera ó Río Seco (Chirosa-Benicarló)	27,5	22,0	1,25	300	10,91
— Río Monleón (El Forcal-La Hortisella)	9,7	7,5	1,29	90	9,28
— Río Duero (Almazán-Rebollo de Duero)	25,9	16,2	1,60	15	0,58
— Río Duero (El Rincón-Los Majuelos)	12,0	9,5	1,26	10	0,83
— Río Torete (Jodra de Cardos-Caltojar)	21,2	20,0	1,06	83	3,92
— Río Escalote (Los Aliagares-Caltojar)	12,5	11,2	1,12	62	4,91
— Río Talegones (Lumias-Confl.río Caraceno)	22,4	19,7	1,14	202	9,02
— Río Caraceno (Tarancueña-Vilde)	21,0	18,3	1,15	220	10,47
— Río Tielmes (Carrascosa de Arriba-Confl.río Caraceno)	14,4	13,0	1,11	180	12,50
— Río Tajo (Estrecho del Hornillo-Las Juntas)	18,2	15,8	1,15	150	8,24
— Río Tajo (Trillo)	17,7	6,1	2,90	15	0,84
— Río Tajo (Aranjuez-Añover del Tajo)	17,6	12,5	1,41	17	0,97
— Río Tajuña (Tomellosa-Armuña de Tajuña)	21,3	16,4	1,30	50	2,35
— Río Jararna (Las Cañas-Paracuellos de Jararna)	22,3	16,5	1,35	38	1,70
— Río Jararna (Titulcia-Confl.río Tajo)	19,0	13,3	1,43	20	1,05
— Río Guadarrama (Collado Villalba-Llano de la Monja)	18,5	15,7	1,18	250	13,51
— Río Manzanares (Presa del Grajal-El Pardo)	19,6	15,2	1,29	160	8,16
— Río Júcar (Confl.A.º del Almagrero-Confl.A.ºPedregoso)	11,6	10,9	1,06	65	5,60
— Río Segura (Confl.río Mundo-Confl.río Benarnor)	14,5	10,2	1,42	37	2,55
— Río Segura (Confl.río Benamor-Los Almadenes)	24,7	16,2	1,52	62	2,51
— Río Argos (Valentín-Confl.Segura)	13,5	8,5	1,59	110	8,15
— Río Guadalentín (Lorca-Derivación canal del Reguerón)	19,0	14,5	1,31	80	4,21
— Río Guadalquivir (Fuente del Obispo-Mengíbar)	35,0	24,0	1,46	50	1,43

Lc = Longitud del cauce (Kms)

Le = Longitud del eje central del cinturón de meandros o sinuosidades (Kms)

IS = Índice de sinuosidad; h = desnivel (m); P = pendiente del cauce (m/Km)

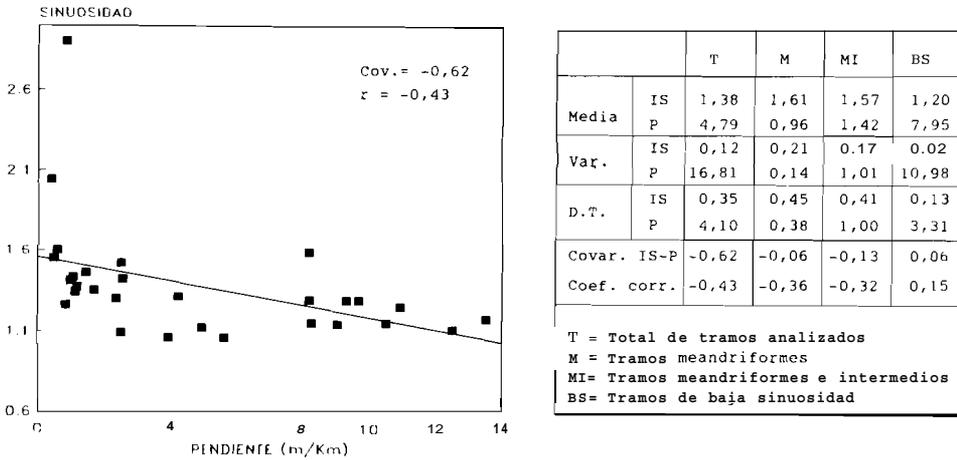


FIGURA 2. Recta de regresión pendiente/sinuosidad para los 29 sectores estudiados. A la derecha, valores de correlación y estadísticos básicos de ambas variables (IS y P) para tramos de diferente sinuosidad.

en algunos segmentos aguas abajo de Almazán inicia un tramo intermedio, algo sinuoso, que termina haciéndose típicamente meandriforme. El Tajo alcanza un umbral máximo de meandrización en las proximidades de Trillo (Guadalajara) (IS = 2,9), para luego disminuir su sinuosidad a la altura de Aranjuez y Añover del Tajo (IS = 1,41), probablemente como consecuencia de reiterados abandonos de antiguos meandros que tenían una mayor amplitud y radio de curvatura que los actuales.

Entre los distintos factores medioambientales que controlan el trazado y modelo de cauce, la pendiente es, junto al caudal y carga transportada, uno de los elementos físicos fundamentales que influyen en la sinuosidad de un curso. OLLERO (1990) obtiene para el Ebro medio una ligera correlación negativa entre pendiente y sinuosidad ($r = -0,18$). Sin embargo, la relativa homogeneidad de las pendientes en dicho tramo y la inclusión de geometrías de meandro dispares dentro de un mismo segmento, entre los 22 analizados, pueden ser algunas de las causas que han determinado este bajo coeficiente de correlación.

Para el conjunto de tramos seleccionados en distintos ríos del territorio peninsular, se ha constatado una mayor relación entre pendiente y sinuosidad, debido quizás a la incorporación de tramos de desigual comportamiento hidromorfológico ($r = -0,43$) (fig. 2). Así, en sectores de fuerte pendiente se observa una tendencia al trazado rectilíneo y poco sinuoso, donde a veces, por sus características sedimentológicas, tiene cabida el modelo «braided» (p.e. en la rambla Cervera o río Seco, provincia de Castellón, IS = 1,25 y P = 10,9 m/Km).

Los valores de sinuosidad baja-moderada (1,30-1,45) suelen coincidir con pendientes superiores al 1 por mil, presentando, en condiciones de escaso encajamiento, importantes riesgos de cortas y desbordamientos. En cambio, en los sectores de pendiente más



FIGURA 3. El Segura entre Cieza y Blanca. El río atraviesa aquí una estrecha llanura aluvial fuertemente constreñida por los relieves circundantes (El Morrón y El Mejú, en las estribaciones orientales de la Sierra del Oro, Loma Jalmero, Sierra del Solán), dibujando un trazado mixto, meandriforme y quebrado.

baja (< 1 por mil) pueden observarse cinturones de meandros regularizados, con mayor radio y amplitud, y una sinuosidad superior a 1,5.

Si sólo se consideran los tramos meandriformes, el *coeficiente de correlación sinuosidad/pendiente* se reduce a $-0,36$ ($-0,32$, si se añaden los cauces de tipo intermedio, constituidos por meandros y segmentos recortados). Para tramos de baja sinuosidad la correlación deja de ser negativa, pero tampoco es del todo satisfactoria ($r = 0,15$). La influencia de la pendiente disminuye en favor de otros factores topográficos y geotectónicos. Queda, no obstante, por confirmar, para este tipo de trazado, la bondad de la tendencia positiva detectada en 15 tramos dentro del presente análisis. Para ello, será preciso abordar en posteriores estudios un número de sectores muy superior a los utilizados aquí.

CAUCES RECTILÍNEOS Y DE BAJA SINUOSIDAD

Los cauces naturales rectos, o sea con una longitud diez veces mayor a su anchura, umbral por debajo del cual LANGBEIN y LEOPOLD (1966) consideran que la meandrización es más probable, reflejan la variabilidad de los materiales del margen, así como la influencia de la vegetación y los desmoronamientos del margen. Como criterio principal se ha utilizado tradicionalmente el grado de sinuosidad del curso o tramo en cuestión. Sin embargo, incluso la sinuosidad puede ser también un criterio ambiguo para definir la rectitud. Así, por ejemplo, varios tramos del río Seco (provincia de Castellón) o del río Guadalimar (provincia de Jaen) aparecen encajados con una longitud de onda de meandro mucho mayor que la anchura del curso (15-20 veces más). Por definición operativa y convencional, la sinuosidad media de estos tramos es $IS_m = 1,25-1,40$, pero también puede considerarse $IS=1$ si se define una línea recta como la suma de todas las distancias entre rápidos y rápidos. Por tanto, una sinuosidad convencional superior a 1,1 puede indicar simplemente que un curso de baja energía está siendo desviado de la dirección de flujo uniforme por controles sedimentológicos y topográficos.

En numerosos sectores de nuestro país, y especialmente en las áreas montañosas, la trama fluvial se acomoda a diversos controles estructurales y tectónicos (ARENILLAS y SÁENZ, 1987). En estos ámbitos, los cauces, permanentes o esporádicos —reflejo en este caso de climas pretéritos más activos— se adaptan sistemáticamente a las bifurcaciones y ángulos de conjunción de las estructuras geológicas, o siguen subsecuentemente la dirección de depresiones longitudinales de tipo estructural, como es la canal de Berdún, drenada por el río Aragón, o la depresión del Jiloca, así como otras muchas por la que discurren el Tietar, el alto Alberche (entre las sierras de la Paramera y de Gredos), tramos altos del Tajuña, del Tormes, el Nalón, Alfambra, Júcar, Guadalaviar, Vistabella... En la mayoría de estos sectores, los trazados fluviales tienen frecuentes tramos rectilíneos, de mayor o menor longitud, que no son sino el reflejo de la compartimentación tectónica del territorio que atraviesan.

Gran parte de las redes de drenaje a las que pertenecen estos cursos puede considerarse subsecuente por ajuste a las estructuras y dislocaciones alpinas. Así lo prueba la alta relación existente entre las orientaciones de numerosos cauces y la dirección dominante de las alineaciones y fracturas. En algunos de estos tramos subsecuentes, por ejemplo el río Jiloca, en su recorrido por la depresión Calatayud-Teruel, la pendiente general del valle es suficientemente suave como para facilitar la meandrización; sin embargo, su trazado es muy poco sinuoso y, en ciertos tramos, prácticamente rectilíneo (p.e. desde Villafranca del Campo a Tomjo del Campo, $IS = 1,09$).

En este caso, al igual que en otros cauces poco sinuosos, de perfil longitudinal suave y cierto grado de encajamiento, se observa por lo general una escasa erosión lateral que resta movilidad al trazado del río. De hecho, apenas existen vestigios de meandros antiguos, ni pruebas de haberse producido una disminución de la sinuosidad por procesos del tipo «*neck cut-off*» o de avulsión en general. Los ríos arenosos de baja sinuosidad constituyen, sin embargo, una excepción en este sentido, ya que, como han señalado DABRIO y FERNÁNDEZ (1980) para la región de Vilches, pueden originar más de una orla de depósitos de desbordamiento, e incluso desplazarse a una nueva posición por avulsión.

La acomodación de los cauces a las líneas de fracturación (desgarres de la cobertera mesozoica en el Sistema Ibérico, fallas transversales a los ejes de pliegues pirenaicos y béticos...), originan trazados **rectilíneos** y quebrados. Cuando se trata de fosas tectónicas que han sufrido un fuerte relleno sedimentario, la pendiente del valle puede disminuir de forma sustancial y la mayor o menor sinuosidad del curso pasa entonces a depender principalmente de la importancia de los caudales, la litología y la distribución de sus tributarios laterales. Así, el río Lozoya, que drena la fosa comprendida entre el macizo de Peñalara, Cuerda Larga y sierra de la **Morcuera** (sierra de Guadarrama), dibuja, desde El Paular hasta el embalse de Pinilla, un trazado ligeramente sinuoso, con curvas de escasa amplitud, al que, sin duda, han contribuido las sucesivas desviaciones provocadas por la trayectoria perpendicular de sus afluentes.

Lo que realmente distingue a este tipo de cauce de los meandriformes es la limitada capacidad de erosión de su perímetro, que sólo ocurre allí donde la desviación de la corriente alrededor de barras-rápido centrales produce el socavamiento del margen, o donde la corriente de fondo provoca el **excavado** del lecho. Existe en ellos, por tanto, una energía excedente que, salvo en el caso de requerirse para transportar la carga suministrada y vencer la fricción, resulta insuficiente para cambiar de forma notoria la dirección del curso. Por lo general, los índices de baja sinuosidad suelen obtenerse en cursos con pendiente apreciable. Por ejemplo, los afluentes de la vertiente izquierda del alto Duero, aquí analizados, tienen una sinuosidad muy reducida (entre 1,06 y 1,15) y pendientes de 4 a 12,5 por mil. Y lo mismo ocurre con el alto Tajo, desde el Estrecho del Hornillo a Las Juntas ($IS = 1,15$; $P = 8,24$ por mil) y con el alto Júcar, entre sus confluencias con el arroyo del Almagrero y el arroyo Pedregoso ($IS = 1,06$; $P = 5,6$ por mil). Sin embargo, al contrario que cabría pensar, la correlación sinuosidad-pendiente de estos cursos resulta positiva, en lugar de negativa como ocurre en los tramos meandriformes. Ello puede deberse a una mayor influencia de determinados factores mediambientales externos, tales como la particular disposición del relieve que atraviesan o la propia configuración de sus tributarios.

CAUCES MEANDRIFORMES

Raras veces un río tiene un curso rectilíneo. Es más frecuente que describa un trazado sinuoso, puesto que también son más frecuentes los controles topográficos y sedimentológicos que alteran la uniformidad direccional de los cursos de baja energía. Estas sinuosidades o meandros aparecen, bien circunscritos a llanuras de inundación (p.e. los meandros de desbordamiento, descritos por **PARDE, 1942**), o bien encajados en rocas compactas y resistentes mecánicamente a la erosión (meandros de encajamiento). En cualquier caso, existe una clara distinción entre cursos rectos y meandriformes, ya que estos últimos son activamente migratorios como resultado de una erosión de margen selectiva y del desarrollo de barras «*point*». Resultan de una relación de **energía/resistencia** muy elevada, y su sinuosidad es el producto de procesos activos, inherentes, más que de una respuesta pasiva a las influencias externas, aunque su grado de regularidad morfológica refleja, de hecho, estos controles medioambientales.

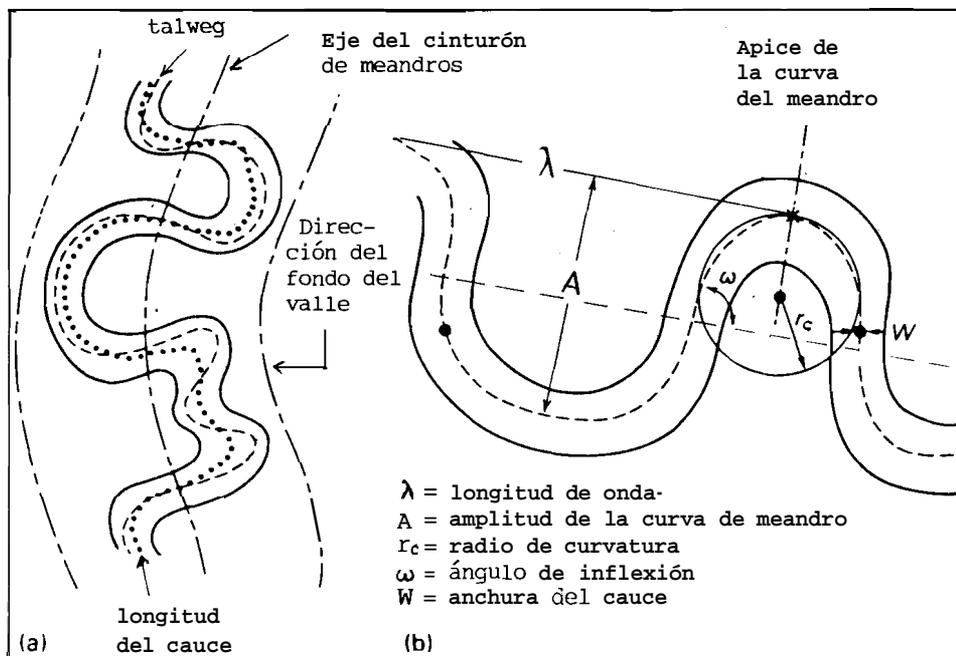


FIGURA 4. Esquema de los parámetros de sinuosidad (a) y de geometría de un meandro (b)

Las pozas, rápidos y secciones transversales asimétricas en las curvas de los cursos son características de los ríos meandriformes. Los indicativos tradicionales de tamaño y forma de un meandro son la *longitud de onda axial* y el *radio de curvatura*. El primero de estos parámetros (h) es difícil de medir en curvas irregulares, y el radio de curvatura (R_c) puede variar si la curva a la que corresponde no es un arco de circunferencia, de modo que antes de proceder a la medición de un radio medio o mínimo debe definirse muy cuidadosamente el tramo a considerar.

En cualquier caso, la principal característica morfológica de este tipo de cauce es el aspecto circular que presenta la mayoría de los meandros. En tal sentido, LANGBEIN y LEOPOLD (1966) señalan que el radio de curvatura es casi constante, pero la longitud de la cuerda de uno de ellos es menor que su radio. Los lóbulos compuestos incluyen dos o más lóbulos simples, simétricos o no, cuya curvatura está comunmente (pero no necesariamente) orientada en el mismo sentido de la corriente. En definitiva, los lóbulos pueden agruparse en una amplia gama de formas dentro de cada categoría.

La mayoría de los afluentes de las grandes arterias fluviales del territorio peninsular (Esla, Adaja, Trabancos, Cega, Guadarrama, Jarama, Leza, Cidacos...) presentan, en su recorrido por terrenos llanos aluviales, meandros simples claramente orientados en la dirección de su flujo. En cambio, el Ebro, el Duero o el Tajo tienen trazados muy sinuosos cuando circulan por el fondo de las depresiones terciarias, adoptando formas de meandro más netas y en ocasiones complejas. Los frecuentes desbordamientos en los sectores de



FIGURA 5. El Tajo en Trillo (prov. de Guadalajara). Uno de los tramos de mayor sinuosidad del río en tierras parameras.

vega, incluso en situación de aguas medias, acarrearán continuos cambios de las trazas fluviales: meandros abandonados, zonas temporalmente encharcadas y malecones invadidos por lóbulos de derrame. Aparecen *meandros disimétricos*, con longitudes de onda y radios de curvatura muy diferentes (río Ebro, tramo Lodosa-Sartaguda-San Adrián; río Duero, tramo Gormaz-confluencia con el río Talegones) y *bucles de tipo compuesto*, formados por dos o más lóbulos que presentan una ratio A/Rc elevada (río Tajo en Trillo, $A/Rc = 3,1$) o baja (río Ebro, tramo San Adrián-Azagra).

Distribución frecuencial del tamaño de los meandros

En la fig. 6 se muestra la distribución de frecuencias acumulativas de las longitudes de onda (λ) y radios de curvatura (Rc) de tres tramos de alta sinuosidad, correspondientes a

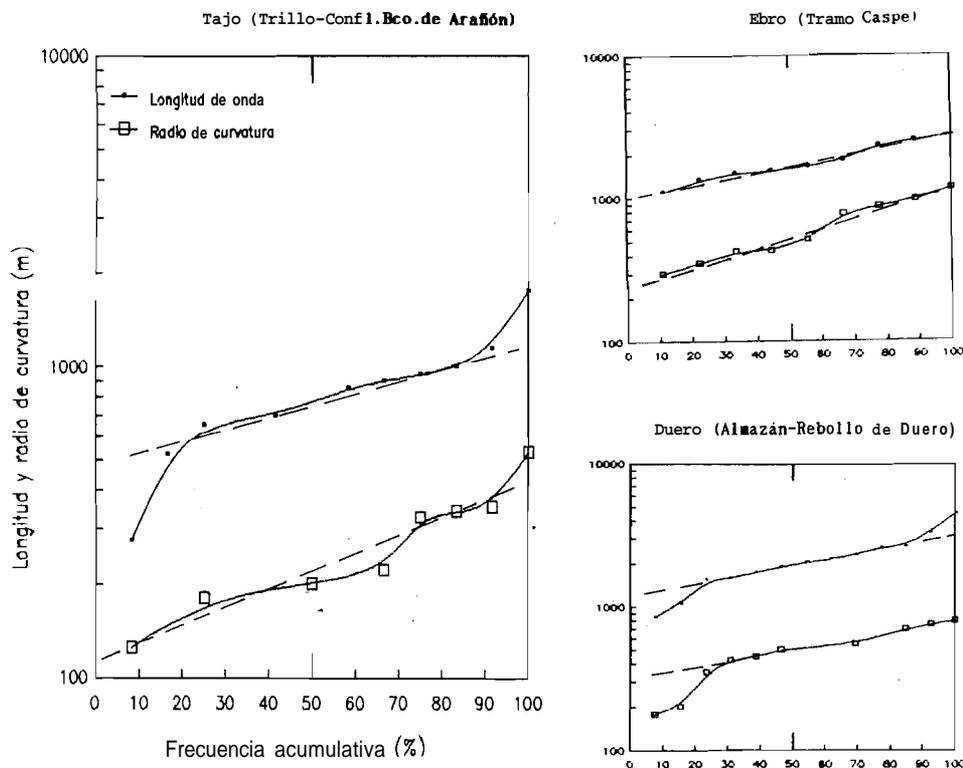


FIGURA 6. Distribución de frecuencias acumulativas de las longitudes de onda y radios de curvatura de tres tramos típicamente meandriiformes.

los ríos Ebro, Duero y Tajo. En todos los casos, se observa una *distribución lognormal*, si bien existe cierta dispersión en los extremos de la curva de frecuencias, motivada por la presencia de tamaños excepcionales. Debido a la simetría de las distribuciones, la mediana ($Rc_{med} = 100-440$ m) puede tomarse como una aproximación a la moda y a la media. Este tipo de *distribución lognormal* es probablemente característica de la mayoría de los cursos meandriiformes (BRICE, 1981), aunque también existen tramos de meandros de dimensiones irregulares que presentan distribuciones de longitudes de onda *bi-modales* o *multi-modales*, comparables, por ejemplo, a los estudiados por SPEIGHT (1965) en Nueva Guinea y Australia.

La lognormalidad de las distribuciones de los casos analizados, especialmente las obtenidas para Caspe (río Ebro) y para el tramo Almazán-Rebollo de Duero (río Duero), puede atribuirse a la presencia de lóbulos de meandro simples, caracterizados por una geometría regular y que funcionan como unidades correlativas en la migración lateral del río.

Muchos de los parámetros estadísticos y de clasificación utilizados en sedimentología son aplicables a las curvas de distribución de tamaños de los meandros: índices granulométricos de FRIEDMAN (1962), de TRICART (1969), índices de energía y clasi-

ficación dinámica de los sedimentos (RIVIERE, 1977), o la propia adaptación logarítmica de los índices clásicos realizada por GALLART (1981). Entre los estadísticos más empleados, por su significado genético para rocas sedimentanas, figuran la *desviación standard* y los *coeficientes de disimetría de Skewness* y de *acuidad de Kurtosis*. Su aplicación a la distribución del tamaño de los meandros aquí considerados, arroja como resultado un coeficiente de Skewness próximo a 0, y valores de Kurtosis comprendidos entre 0,5 y 1.

Como parámetro de dispersión se ha adoptado una expresión logarítmica de la *desviación gráfica* propuesta por INMAN (1952) (Log Dg), manteniendo así, para distribuciones de baja dispersión, una excelente correlación con el logaritmo de la desviación standard.

$$\text{Log Dg} = (\text{Log } q_{84} - \text{Log } q_{16}) / 2$$

Donde Dg es la desviación gráfica, y q_{84} y q_{16} , son percentiles de una distribución normal. Otra medida sencilla de dispersión es la ratio q_{84}/q_{16} . En el cuadro 3 se muestran los resultados de estos estadísticos básicos aplicados al radio de curvatura, así como los valores medios del radio, longitud de onda y amplitud de meandro, y las razones $\lambda m/Rm$ y Am/Rm , correspondientes a seis tramos sinuosos elegidos por su movilidad, grado de encajamiento y presencia o no de control estructural. Los tramos del río Ebro analizados y el tramo del río Duero Almazán-Rebollo de Duero, no presentan encajamiento. El sector de Caspe ha experimentado un extraordinario dinamismo, comparable al de otros tramos medios y bajos del río Ebro (Alfaro, Castejón, Pastriz-El Burgo de Ebro, Villafranca de

CUADRO 3

Estadísticos sobre dimensiones de los meandros en seis tramos de diferente sinuosidad

	Ebro ⁽¹⁾	Ebro ⁽²⁾	Duero ⁽³⁾	Tajo ⁽⁴⁾	Monleón ⁽⁵⁾	Segura ⁽⁶⁾
Radio q_{84} , m	1670	980	731	370	281	448
Radio q_{16} , m	163	338	266	164	94	120
Log Dg	0,51	0,23	0,22	0,18	0,24	0,29
q_{84}/q_{16}	10,25	2,90	2,75	2,26	2,99	3,73
Radio medio (Rm), m	991	637	515	255	116	250
Long. media (km), m	2296	1819	2174	833	418	713
$\lambda m/Rm$	2,3	2,9	4,2	3,3	3,6	2,9
Ampl. media (Am), m	937	1742	1162	792	320	425
Am/Rm	0,9	2,7	2,3	3,1	2,8	1,7

(1) Tramo Los Pezales-Alto Mesilla (provs. Logroño-Navarra)

(2) Tramo de Caspe (prov. Zaragoza)

(3) Tramo Almazán-Rebollo de Duero (prov. Soria)

(4) Tramo Trillo-bco. de Arañón (prov. Guadalajara)

(5) Tramo El Forcal-La Hortisella (prov. Castellón)

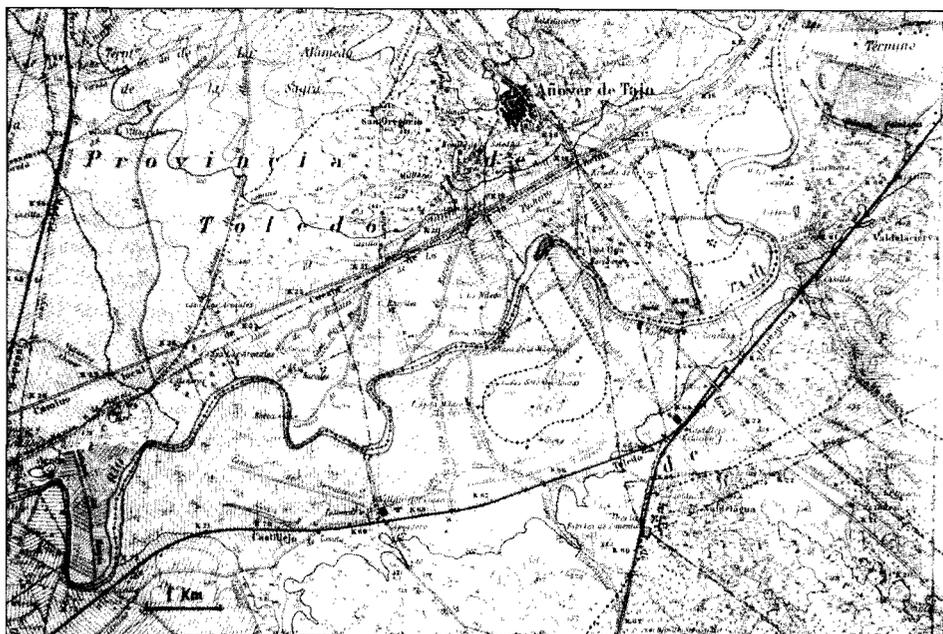
(6) Tramo confl. río Benamor-Los Almadenes (prov. Murcia)

Ebro...). El río Tajo, en Trillo, aparece algo encajado en los páramos castellanos, conservando la sinuosidad de su trazado primitivo. El control estructural se hace determinante en el trazado sinuoso del río Monleón, al flanquear El Forcal y el Morral Blanch, en el término de Culla (provincia de Castellón). Finalmente en el tramo del río Segura, desde su confluencia con el río Benamor hasta el estrecho de Los Almadenes (próximo a Cieza), alternan meandros labrados en amplias llanuras aluviales con bucles y codos de origen epigenético.

Los valores de $\text{Log } Dg$ indican que la diferencia o dispersión entre q_{84} y q_{16} para el radio de curvatura oscila aproximadamente entre 0,2 y 0,3, salvo el caso del Ebro en su tramo Los Pezales-Alto Mesilla (provincias de Logroño y Navarra), que es de 0,51. La ratio q_{84}/q_{16} varía entre 2,26 y 10,25, si bien los valores más frecuentes se sitúan entre 2,7 y 3,7. La enorme desviación observada en el tramo Los Pezales-Alto Mesilla puede deberse a que se trata de un cauce de transición entre poco sinuoso y meandriforme, donde se suceden meandros muy dilatados y pequeños segmentos acodados, de radio muy corto. La influencia



(a)



(b)

FIGURA 7. El río Tajo. Proximidades de Añover del Tajo. La comparación de la fotografía aérea (1956) (fig. 7.a) y el mapa topográfico (1959) (fig. 7.b) deja bien patente la desconexión parcial del curso respecto a la antigua traza fluvial, adoptada desde el primer tercio del siglo XIX como límite administrativo entre las provincias de Madrid y Toledo.

las estructuras y la tectónica se aprecia ligeramente en el río Monleón ($q_{84}/q_{16} = 2,99$) y el tramo Benamor-Almadenes del río Segura ($q_{84}/q_{16} = 3,73$).

Del cuadro 3 se desprende también que los valores medios más elevados de longitud de onda (λ) y amplitud de meandro (A) se registran en terrenos llanos, siendo el sector de Almazán-Rebollo de Duero el de mayor *ratio* $\lambda m/Rm$ (4,2) y el sector Trillo-Bco. de Arañón (Tajo) el que anota la *ratio* Am/Rm más alta (3,1). Morfológicamente, ello se traduce en meandros más abiertos y laxos, en el primer caso, y en lóbulos, a veces compuestos, más alargados y estrechos en su base, en el segundo.

Dinámica del trazado meandriforme

En los tramos medios y bajos, los ríos tienden a ser meandriformes. El Ebro, el Duero o el Tajo, por citar algunos de los principales, tienen trazados muy sinuosos cuando circulan por el fondo de sus depresiones. Con frecuencia, la existencia de uno o más cinturones de meandros abandonados y su distancia, a veces considerable, respecto al

cauce actual (p.e. El Ebro en Castejón, límite de La Rioja con Navarra) son un claro testimonio de la extraordinaria movilidad de estos cursos.

También son numerosos los límites municipales que en su origen (división de Javier de Burgos, 1833) seguían el trazado del río, y que hoy están cortados por él (fig. 7). De acuerdo con esta referencia de cambio, puede afirmarse que en menos de 150 años el Tajo, en las proximidades de Añover del Tajo, ha experimentado una migración que varía de 1,3 a 2,5 Kms según los puntos.

Amenudo, el abandono del antiguo cauce se produce de forma brusca, mediante el rápido cierre de sus extremos —por la carga tractiva depositada en las confluencias con el nuevo curso— creándose un brazo marginal o «*lago* de meandro», que solamente recibe sedimentos finos, transportados en suspensión durante las crecidas. Son las ((madres *viejas*» o *galachos* (el diccionario de la Real Academia define la voz galacho como «barranquera que *excavan* las aguas al correr por las pendientes del terreno», mientras que COROMINAS —Diccionario crítico-etimológico de la lengua castellana— (1974) anota que su origen es el mismo que el del Alto aragonés, galocho, «barranco sin agua», el catalán galatxo, «brazo de un río» y el siciliano galecci, «riachuelo que queda sin agua»), como el citado caso del Tajo en Añover o la Estanca del Ebro cerca de Zaragoza.

En el bajo Guadalquivir la pendiente longitudinal del río es muy exigua (entre 0,25 y 0,5 por mil), lo que es, en gran parte, responsable de la generación de brazos de gran sinuosidad («*vuletas*» o «tornos»). Estos meandros, de gran curvatura y amplitud variable (1-6 Kms), tienen un dinamismo distinto de norte a sur. Al norte de las marismas adoptan un régimen fluvio-deltaico, mientras que más al sur, su trazado es consecuencia de un régimen de estuario más pronunciado, siendo su longitud de onda inferior a la de la marea.

El examen comparativo de mapas antiguos (siglos XVIII y XIX), consultados en la Cartoteca Histórica del Ejército (Madrid), Museo Naval (Madrid), Junta de Obras del Puerto (Sevilla), Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo (Madrid), de fotogramas aéreos (junio, octubre 1956; junio 1977), y de imágenes de satélite (Landsat-2, noviembre 1981; Landsat-4, febrero 1984) ha permitido detectar con precisión las distintas fases de evolución histórica del trazado fluvial y estuaril. El detallado estudio de MENANTEAU y VANNEY (1985) es asimismo bastante ilustrativo al respecto.

Desde La Algaba, aguas arriba de Sevilla, hasta la Isla Mayor, el cauce principal está bordeado a ambos lados por depresiones curvas que son huellas de meandros y brazos hoy abandonados, como es el caso del Río Viejo, al este de Coria del Río, o del brazo del Este en el norte de las marismas. No obstante, al sur de Sevilla, es posible observar la presencia de paleocauces menos sinuosos y más anchos, dotados de gran amplitud, lo que hace pensar que la antigua marisma tenía una clara influencia mareal que afectaba al drenaje del bajo Guadalquivir. Hoy día, la existencia de un único brazo navegable y las numerosas cortas realizadas en él impiden que los caños y ciertos brazos del río, entonces canales principales, puedan ser remontados por la marea.

La cartografía anterior a las dos últimas décadas, etapa en que empieza a producirse la modificación antrópica del trazado de los brazos y del cauce principal, pone de manifiesto la importancia que en esta época tenían los meandros de estuario, caracterizados por una exageración constante de su radio de curvatura y una escasa migración aguas abajo.

A partir de la segunda mitad del siglo XVIII se ha desarrollado una intensa actuación

humana, que se ha visto principalmente materializada por la reducción de unos 50 Kms de la distancia entre Sevilla y el mar. Las cortas realizadas hasta la fecha actual (Merlina, San Fernando, Los Jerónimos, **Tablada**, Nuevo Cauce, **Punta del Verde** y Olivillos) han concentrado el flujo de las crecidas en un brazo central bordeado de diques, excepto en su paso por la Isla Menor, lo que impide al río prácticamente su desbordamiento. El bajo Guadalquivir es ahora un estuario artificial casi rectilíneo, que participa más directamente del régimen **mareal** e inhabilita definitivamente antiguos meandros que funcionaban como brazos subsidiarios durante las inundaciones.

Salvo el bajo Guadalquivir, no hay río en España de cauce tan dinámico y cambiante como el Ebro. Las fluctuaciones de su trazado no sólo se hacen patentes en los tramos finales, sino también en determinados sectores de su amplio tramo medio. En la misma Rioja, al terminar el **primer** tercio de su trayecto, se observa una gran inestabilidad en los márgenes. Lo más frecuente, en los grandes cambios, es que la acción erosiva en las partes cóncavas de los meandros vaya aumentando su curvatura hasta que se cierre el cuello del meandro («*neck cut-off*»); la corriente corre más rápidamente por este nuevo desnivel y va abandonando el cauce primitivo que rodea una momentánea isla; más tarde, sólo un lago en forma de media luna o «*croissant*» queda como rastro del cauce circular; por último aparece un brazo pantanoso, que después termina por desecarse (p.e. el Ebro, en **Alfaro**, Boquiñeni...). En otros tramos, el río acorta su trayectoria habilitando antiguos cauces subsidiarios o profundizando las depresiones existentes entre los cordones de meandro («*chute cut-off*») (p.e. el Ebro entre Pastriz y El Burgo, provincia de Zaragoza).

En los fotogramas aéreos que se acompañan pueden apreciarse algunas de estas fases de la evolución de meandros. El fenómeno ocurre especialmente en la Rioja Baja, Ribera de Navarra y Ribera de Aragón, hasta la Zaida; de aquí en adelante, los meandros suelen ser más fijos (**VÁZQUEZ MAURE**, 1963). La evolución del cauce en el delta presenta fenómenos de otro tipo: cambio de cauce, relleno de lagunas y depósitos litorales.

La huella de estos meandros abandonados en el paisaje actual, y particularmente en la morfología rural, es muy clara, y así, marcadas por antiguos meandros definitivamente abandonados se encuentran: Villafranca de Ebro, Fuentes de Ebro, etc. La disposición curvilínea de determinadas parcelas de cultivo representa la traza de antiguos meandros (figs. 8 y 9); a veces incluso los caminos siguen la misma curva que seguía antes el río.

También los topónimos reflejan el mismo fenómeno: en Caspe una antigua laguna de meandro es ahora un huerto llamada «**La Herradura**»; el nombre de «**Río Viejo**» aparece en lugares ahora totalmente secos, como en Fuentes; otras veces es el de «**Río Mayor**», como en Arguedas; es curioso el nombre de la «**Deja**», que aparece en varios lugares, como en Castejón, donde también merece citarse el de «**Sequeros**» o el «**Secaral**», en Rincón de Soto, referidos a antiguas islas, que ahora no lo son. Con el mismo significado aparece el topónimo «**Mejana**», aplicado en toda la ribera del Ebro a las islas y que, en numerosos lugares, lo llevan terrenos que no son islas y se hallan alejados del río (en Cadreita, p.e.). Y lo mismo puede decirse de los sotos que, a pesar de aparecer a veces rodeados por dos brazos de cauce todavía hoy funcionales, como ocurre aguas abajo de Logroño (Soto La Sabuquera y Soto Los Americanos), por lo general son sectores que han perdido el carácter de isla (Soto Nuevo, Soto de la Marina, Soto Serrano), y que frecuentemente están muy alejados del cauce actual del río, como en **Alfaro**, en Alfajarín.



FIGURA 8. El Ebro en Castejón (límite de La Rioja con la provincia de Navarra) muestra un trazado meandriforme muy evolucionado. (S.G.E., 1956).

También en su vega baja el río Segura adquiere un carácter especialmente meandriforme, sobre todo entre el Llano de Brujas y Beniel, donde se aprecian huellas de antiguos lóbulos separados 1,5-3 Kms del lecho actual. Desde su confluencia con el río Mundo hasta Cieza, tiene tramos de trazado sinuoso ($IS = 1,5-1,6$) en llanuras de inundación de 0,6-1,3 Kms de anchura, y tramos encajados en las estructuras prebéticas, que a lo sumo dibujan codos y curvas de corto radio. Se trata de un trazado de tipo intermedio, formado por meandros de desbordamiento y tramos encajados de baja sinuosidad, muy propio de los ríos que atraviesan los sistemas béticos.



FIGURA 9. El Ebro a la altura de Villafranca de Ebro (prov. de Zaragoza) (S.G.E., 1981). Tramo de morfología muy dinámica que presenta varios cinturones de meandros abandonados y numerosas islas o «mejanas».

CONCLUSIONES

La utilización del índice de sinuosidad como parámetro diferenciador del trazado de los ríos españoles es insuficiente, habida cuenta de la enorme variedad de factores medioambientales que condicionan su morfología y dinámica. No obstante, el análisis de la sinuosidad, relacionada con la pendiente longitudinal de los cursos, la geometría de los lóbulos de meandro (en el caso de tramos meandriformes), el contorno de los relieves montañosos y el grado de encajamiento, en los 29 sectores estudiados, arrojan, a modo de aproximación, interesantes resultados:

— La inclusión de tramos de desigual comportamiento hidromorfológico en el análisis de correlación sinuosidad/pendiente del cauce hace que el valor de dicha correlación, para el conjunto muestreado, sea superior ($r = -0,43$) al obtenido en tramos de homogeneidad topográfica (p.e. el Ebro medio, con una pendiente entre 0,35 y 1,30 por mil presenta un coeficiente $r = -0,18$).

— Para cursos poco sinuosos esta correlación deja de ser negativa, pero tampoco es suficientemente significativa como para confirmar, con el número de casos estudiados, una tendencia en tal sentido.

— Los ríos de baja sinuosidad se agrupan en dos tipos de acuerdo con la evolución de su trazado. Los hay relativamente encajados, sobre litologías dispares pero sometidos a un fuerte control tectónico y estructural (p.e. el Alto Tajo, desde el Estrecho del Hornillo a Las Juntas), y, por el contrario, cuando el lecho de inundación se ensancha y entre el material sedimentario abundan los limos y arenas, el trazado poco sinuoso puede presentar cierta movilidad, incluso ser el resultado de sucesivas cortas o fenómenos de avulsión.

— En la mayoría de los cursos meandriformes se observa una distribución lognormal en la frecuencia acumulativa del tamaño de los meandros (longitud de onda y radio de curvatura).

— Los topónimos, las trazas curvilíneas de determinadas parcelas agrícolas y las facies sedimentarias de antiguos bordes de meandro localizadas en la franja distal de la actual llanura de inundación, o fuera de ésta, son claras pruebas de la extraordinaria movilidad que han sufrido algunos tramos meandriformes (el Ebro medio y bajo, el Guadalquivir, aguas abajo de Sevilla...). En todos ellos, la sinuosidad parece haber disminuido respecto a etapas pretéritas, unas veces por causa de incrementos de energía del flujo y otras por las cortas atribuidas a la acción del hombre.

BIBLIOGRAFÍA

- ARENILLAS PARRA, M. y SÁENZ RIDRUEJO, C. (1987): *Los Ríos. Guía Física de España*, Alianza Editorial, Madrid, pp. 29-40.
- BRICE, J. C. (1964): «Channel patterns and tenaces of the Loup River in Nebraska», *US Geo. Survey Prof. Paper*, 422-D.
- (1981): «Meandering pattern of the White River in Indiana. An analysis», en Morisawa, M. (ed.), *Fluvial Geomorphology*, George Allen & Unwin, London, pp. 178-200.
- (1984): «Planform properties of meandering rivers», en Elliot, C. M. (ed.), *River- Meandering*, American Society of Civil Engineers, New York, 1-15.
- DABRIO, C. J. y FERNÁNDEZ, J. (1980): «Secuencias originadas por migración de ríos arenosos de baja sinuosidad», *Estudios Geológicos*, 36, pp. 371-381.
- FRIEDMAN, G. M. (1962): «On sorting, sorting coefficients, and the lognormality of the grain-size distribution of sandstones», *Journ. Geology*, V. 70, pp. 737-753.
- GALLART, F. (1981): «Morfometría de elementos detnitos: interés y utilización de una modificación logantmica de los índices clásicos», *Revue de Géomorphologie Dynamique*, 30, pp. 95-111.
- INMAN, D. L. (1952): «Measures for describing the size distribution of sediments», *Journ. Sed. Petrology*, V. 22, pp. 125-145.

- KRUMBEIN, W. C. y PETTIJOHN, F. J. (1938): *Manual of sedimentary petrography*, D. Appleton-Century, New York, 549 pp.
- LANGBEIN, W. B. y LEOPOLD, L. B. (1966): «River meanders — theory of minimum variance», *US Geol. Survey Prof. Paper*, 422-H, pp. 1-15.
- LEOPOLD, L. B. y WOLMAN, M. G. (1957): «River channel patterns: braided, meandering and straight», *US Geol. Survey Prof. Paper*, 282-B, 85 pp.
- LEOPOLD, L. B. ; WOLMAN, M. G. y MILLER, J. P. (1964): *Fluvial Processes in Geomorphology*, Freeman and Co., San Francisco, 522 pp.
- MENANTEAU, L. y VANNEY, J. R. (1985): «El cauce del Bajo Guadalquivir, morfología, morfología, hidrología y evolución histórica», en Carrasco, D. (coord.), *El Río. El Bajo Guadalquivir*. Ayuntamiento de Sevilla y Junta de Andalucía. pp. 116-127.
- MIALL, A. D. (1977): *Fluvial Sedimentology*, Canadian Soc. of Petro. Geologists, Calgar, 859 pp.
- MORISAWA, M. E. (1985): *Rivers, Form and Process*, Geomorphology Texts, Longman, London, 222 pp.
- OLLERO OJEDA, A. (1990): ((Pendiente, sinuosidad y tipo de canal en el Ebro medio», *Cuadernos de Investigación Geográfica*, T. XVI, fasc. 1-2, pp. 73-84.
- PARDE, M. (1942): *Quelques nouveautés sur le régime du Rhône*, Mmoires et Documents de l'Institut des Etudes Rhodaniennes de l'Université de Lyon, 172 pp.
- SPEIGHT, J. G. (1965): «Meander spectra of the Angabunga River», *Journ. Hydrology*, V. 3, pp. 1-15.
- RIVIERE, A. (1977): *Méthodes granulométriques, techniques et interprétations*, Ed. Masson, Paris, pp. 88-103.
- SCHUMM, S. A. (1963): «A tentative classification of alluvial river channels», *US Geol. Survey Circutar*. 477.
- TRICART, J. (1969): «Étude granulométrique de la fraction sableuse des aluvions de la crue de juin 1957 sur le Guil (Hautes-Alpes)», *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 7 (1), p. 614.
- VÁZQUEZ MAURE, F. (1963): «El curso del Ebro y su cartografía», *Boletín de la Real Sociedad Geográfica*, T. XCIX, pp. 7-29.