

# ANÁLISIS MORFOMÉTRICO DE LA CUENCA Y DE LA RED DE DRENAJE DEL RÍO ZADORRA Y SUS AFLUENTES APLICADO A LA PELIGROSIDAD DE CRECIDAS

**Askoa Ibisate González de Matauco**

Dpto. Geografía, Prehistoria y Arqueología  
Universidad del País Vasco

## RESUMEN

Se analizan las características morfométricas de la cuenca y la red de drenaje del río Zadorra y sus principales afluentes, señalando la influencia que estos factores tienen en la intensificación o posible atenuación de los procesos y la peligrosidad de las crecidas del río.

**Palabras clave:** peligro de crecidas, morfometría, cuenca hidrográfica, red de drenaje, río Zadorra.

## ABSTRACT

This paper analyzes the morphometric characteristics of Zadorra basin and stream network, as those of his tributaries in relation to the effects on floods processes and hazard.

**Key words:** Flood hazard, Morphometry, Hydrographic basin, Drainage network, Zadorra river.

---

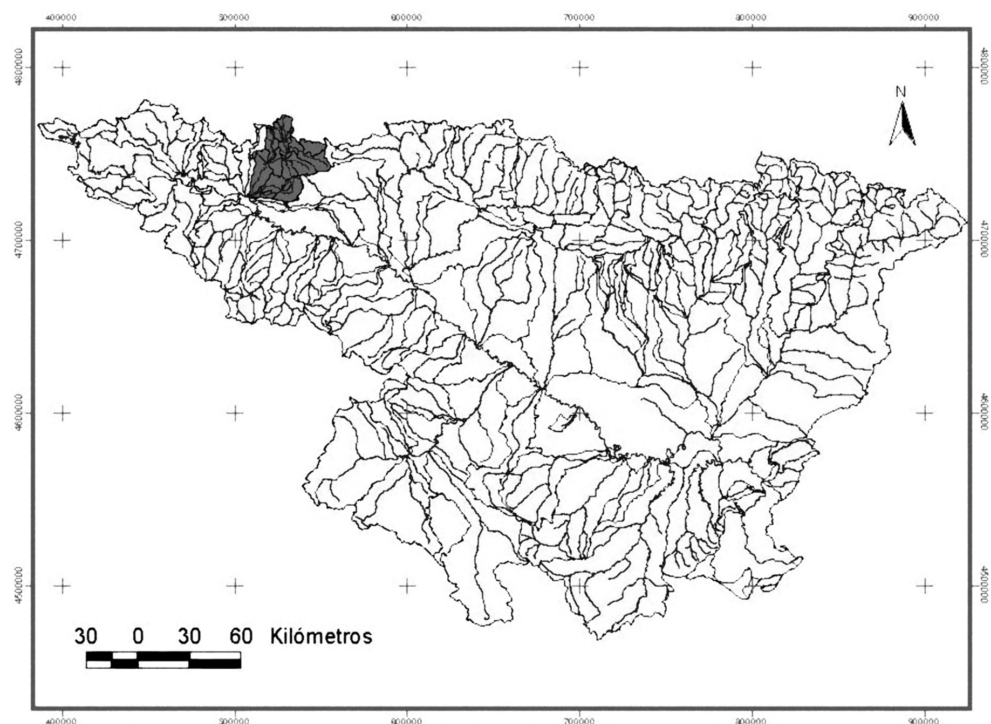
Fecha de recepción: mayo 2004

Fecha de admisión: julio 2004

## I. INTRODUCCIÓN

El comportamiento del caudal y el de las crecidas, puede verse modificado por una serie de propiedades morfométricas de las cuencas, como son el tamaño, la forma y la pendiente, que resultan muy importantes en la respuesta del caudal recibido y que pueden operar tanto para atenuar como para intensificar las crecidas. La mayor parte de estas propiedades actúan incrementando el volumen del flujo y la velocidad de su movimiento. (JONES, 1997; WARD y ROBINSON, 2000)

Sobre la base de las características morfométricas de las cuencas, se han obtenido fórmulas para obtener caudales máximos atendiendo a que esas propiedades afectan a la respuesta de caudal según la superficie de la cuenca (JONES, 1997). Existe una gran variedad de estudios e índices morfométricos, fruto del interés que se mostró por los mismos a mediados de siglo XX en Estados Unidos (HORTON, 1945; MILLER, 1957) y en los años 80 e incluso más recientemente en nuestro entorno (SALA y GAY, 1981; ANTIGÜEDAD, 1982; CRUZ-SAN JULIÁN y TAMÉS, 1983; ERASO, 1983; JARDÍ, 1985; VIDAL-ABARCA *et al*, 1987; SÁNCHEZ, 1990; SENCIALES, 1999). En este trabajo se analizan las características



(Fuente: Confederación Hidrográfica del Ebro y elaboración propia).

**Figura 1.** Mapa de localización de la cuenca del río Zadorra en la del Ebro.

morfométricas del río Zadorra y sus principales afluentes de cara al comportamiento hidrológico de las crecidas del río principal y sus tributarios.

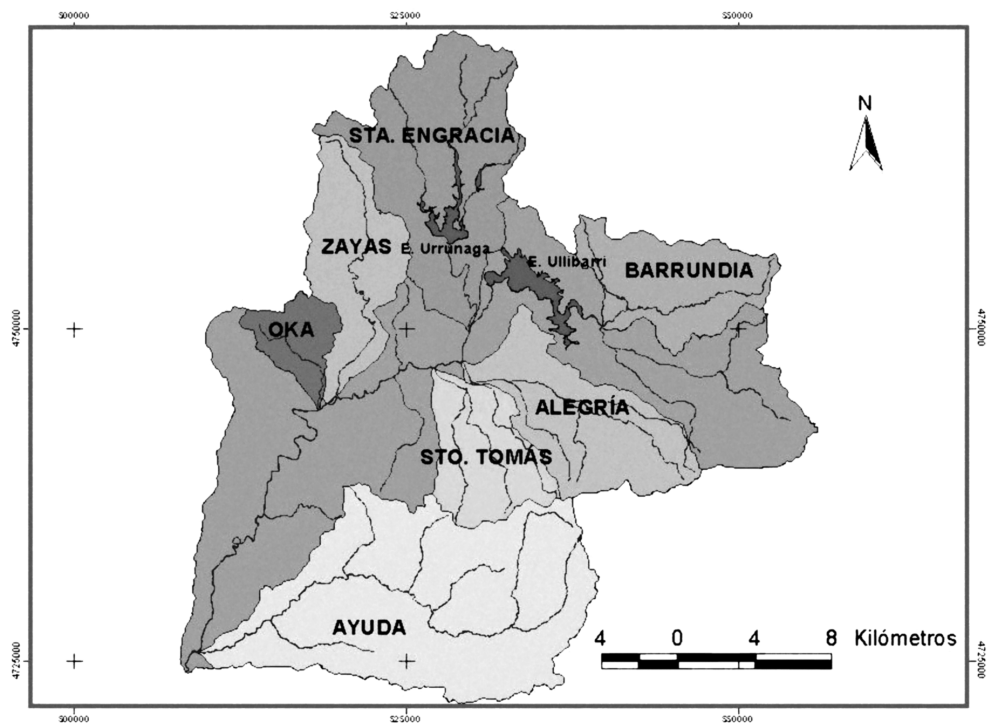
La cuenca del río Zadorra se sitúa en la zona de cabecera de la cuenca del Ebro, en el cual desemboca por su margen izquierda (Fig. 1). La altura máxima de la cuenca se alcanza en la cima del monte Gorbea, con 1.482 m de altitud, situado en el extremo noroccidental, y el punto más bajo se alcanza en la desembocadura en el río Ebro, a 450 m. Su red de drenaje ha sido labrada sobre materiales carbonatados del Cretácico Superior y el Terciario, sobre los cuales se han asentado materiales cuaternarios en la zona del fondo de valle. Cuenta con unas características climáticas de transición entre el clima puramente oceánico y el mediterráneo (RUIZ URRESTARAZU, 1982), con precipitaciones medias anuales que oscilan entre los 500 mm del tramo bajo y 1.500 mm del tramo alto. Se diferencian tres comarcas ambientales: las montañas de la divisoria cantábrico-mediterránea, los valles y montañas subatlánticos y los valles y montañas submediterráneos (ASEGINOLAZA *et al.*, 1988). En la primera comarca los hayedos potenciales han sido relegados a zonas de roquedo y sus espacios ocupados por plantaciones forestales, el brezal argomal y prebrezales; en el segundo ambiente dominan los cultivos inscritos sobre los terrenos potenciales del robledal, que han quedado relegados a pequeños bosquetes isla, además en los pequeños cerros se sitúan los quejigales y en laderas de umbría los hayedos. Por último, en los valles y montañas submediterráneos, los quejigales quedan relegados a cerros y sus espacios están ocupados por cultivos y formaciones del tipo enebrales-pasto con junquillo (ASEGINOLAZA *et al.*, 1990). En el centro de la cuenca se localiza un sistema de embalses que regula 416 km<sup>2</sup> de cuenca, y que por tanto modifica en parte las respuestas que la morfometría puede ejercer sobre las crecidas.

Las principales subcuencas del río se muestran en el Fig. 2, siendo la de mayor entidad la cuenca del río Ayuda, con 309 km<sup>2</sup>, que drena los ámbitos más submediterráneos de la cuenca; seguida de la del río Santa Engracia, con 178 km<sup>2</sup>, la más septentrional y con mayor aportación pluviométrica; Alegría, con 115,7 km<sup>2</sup>; Zayas, 91,94 km<sup>2</sup>; Santo Tomás, 74,38 km<sup>2</sup> y Oka, 33,51 km<sup>2</sup>.

## II. ÁREA DE ESTUDIO

Las cuencas más grandes tienden a recoger mayor cantidad de precipitación que las pequeñas, por lo que en principio la crecida es más voluminosa; sin embargo, el tiempo de respuesta entre la precipitación y el pico de crecida y la duración del caudal de la tormenta es más larga. Pero además, cuando la tormenta precipita sólo en una parte de la cuenca, la atenuación en el hidrograma de crecida resultante es mayor, a medida que se mueve a través de la red de drenaje hacia la sección de cierre, en una cuenca amplia que en una pequeña.

En lo que al Zadorra se refiere es la subcuenca del Ayuda la que mayor entidad presenta (Cuadro 1), sin embargo al drenar ámbitos climáticos más secos no es la cuenca que mayor incidencia presente en las crecidas.



(Fuente: Confederación Hidrográfica del Ebro, Gobierno Vasco y elaboración propia).

**Figura 2.** La cuenca del río Zadorra y sus subcuencas.

**Cuadro 1**  
SUPERFICIE DE LA CUENCA PRINCIPAL Y SUBCUENCAS

Cuenca	Área (km <sup>2</sup> )
<b>Barrundia</b>	89,31
<b>Santa Engracia</b>	178,02
<b>Alegría</b>	115,77
<b>Santo Tomás</b>	74,38
<b>Zayas</b>	91,93
<b>Oka</b>	33,51
<b>Ayuda</b>	307,96
<b>Zadorra-Total</b>	<b>1361,28</b>

Elaboración propia.

### III. PENDIENTE

Otra de las propiedades de la cuenca es la pendiente; las cuencas de mayores pendientes tienen una escorrentía más veloz y sus hidrogramas, por tanto, tienden a responder más rápidamente a la precipitación, incrementando los caudales punta (SHERMAN, 1932; HORTON, 1945; STRAHLER, 1964). Las cuencas más alargadas tienden a una respuesta más difusa, en comparación con las respuestas de tormentas de caudales altos en cuencas compactas. Esto se debe a que la escorrentía que drena todos los límites de una cuenca compacta tiene distancias similares de trayecto desde todos los cuadrantes y llega al colector principal al mismo tiempo, mientras que en cuencas de forma alargada al agua le cuesta bastante más circular desde la parte alta de la cuenca hasta el final. Así pues, la forma de la cuenca y el modelo de red de drenaje se combinan para influenciar en el tamaño y forma de los picos de crecida a la salida de la cuenca (WARD y ROBINSON, 2000).

En la cuenca del Zadorra se dan lugares con fuertes pendientes, en los límites de la cuenca y una gran zona bastante llana. Si analizamos la pendiente de los diferentes cursos fluviales es la del río Santo Tomás la que mayores pendientes presenta (36,74%) y que por tanto mayor rapidez en la concentración de las aguas puede producir, seguido muy de cerca por el río Barrundia (34,67%), Oka (28,33%) y Alegría (20,39%). También son considerables las del río Zayas (15,14%) y algo menos el Ayuda (11,84%), el río Santa Engracia mientras tanto apenas presenta un 5,2% y finalmente el río principal con una escasa pendiente del 0,7%, alcanzando en su primer tramo una pendiente del 13%, pero que luego rápidamente se suaviza.

**Cuadro 2**  
PENDIENTE DE LOS RÍOS PRINCIPALES

Cuenca	Pendiente (%)
<b>Barrundia</b>	34,67
<b>Santa Engracia</b>	5,2
<b>Alegría</b>	20,39
<b>Santo Tomás</b>	36,74
<b>Zayas</b>	15,14
<b>Oka</b>	28,33
<b>Ayuda</b>	11,84
<b>Zadorra-Total</b>	<b>0,7</b>

### IV. ÍNDICES DE COMPACIDAD, CIRCULARIDAD Y ELONGACIÓN

La forma de la cuenca ha sido comparada con diferentes formas ideales, algunas con más éxito que otras. El índice de compacidad de Gravelius (GRAVELIUS, 1914) compara la longitud del perímetro con la circunferencia de un círculo con igual superficie que la cuenca. El índice de circularidad de Miller (MILLER, 1953) compara el área de la cuenca con el área de un círculo cuya circunferencia es igual al perímetro de la cuenca, es decir, lo contrario al

índice de Gravelius. La razón de elongación compara la longitud del eje mayor de la cuenca con el diámetro de un círculo de igual área, mientras que el factor de forma de HORTON compara el área de la cuenca con la de un cuadrado con los lados iguales al eje mayor de la cuenca.

El índice de compacidad de una cuenca o índice de Gravelius ( $I_c$ ) (GRAVELIUS, 1914; HORTON, 1932; JARDÍ, 1985), nos señala la mayor o menor compacidad de la cuenca a través de la relación entre el perímetro de la cuenca y la circunferencia del círculo que tenga la misma superficie que la cuenca:

$$I_c = 0,28 \frac{P}{\sqrt{S}}$$

Cuanto más cercano esté el índice a la unidad, se considera que la cuenca tiene una forma más circular y que por tanto es más compacta, y va aumentando conforme disminuye la compacidad.

El índice de compacidad de la totalidad de la cuenca del Zadorra es de 1,44 (Cuadro 3), de manera que podemos considerar que la cuenca tiene una forma un tanto ovalada, y la compacidad no es muy alta. Teniendo en cuenta que cuanto más redonda es una cuenca más tarda en llegar la onda de crecida a la desembocadura, pero al mismo tiempo más acusado es el caudal punta, se puede decir que en la cuenca del Zadorra las características morfométricas relativas a la compacidad no intensifican el vigor de las crecidas, al menos en la desembocadura. De todas las subcuencas, la del Santo Tomás es la que se acerca más a la circularidad, mientras que las cuencas del Santa Engracia y Zayas son las menos compactas. Se han obtenido también los índices de compacidad del río Zadorra en los puntos de desembocadura de

**Cuadro 3**  
ÍNDICE DE COMPACIDAD DE LA CUENCA DEL ZADORRA Y SUBCUENCAS

Cuenca	Área (km <sup>2</sup> )	Perímetro (km)	$I_c$
<b>Barrundia</b>	89,31	50,53	1,5
<b>Santa Engracia</b>	178,02	75,26	1,58
<b>Alegría</b>	115,77	58,84	1,53
<b>Santo Tomás</b>	74,38	40,09	1,30
<b>Zayas</b>	91,93	54,63	1,59
<b>Oka</b>	33,51	29,13	1,41
<b>Ayuda</b>	307,96	93,19	1,49
<b>Zadorra hasta Sta. Engracia</b>	275,11	96,89	1,64
<b>Zadorra hasta Alegría</b>	468,43	151,45	1,96
<b>Zadorra hasta Zayas</b>	745,98	168,61	1,73
<b>Zadorra-Total</b>	<b>1361,28</b>	<b>190</b>	<b>1,44</b>

Elaboración propia.

tres afluentes, Santa Engracia, Alegría y Zayas, para analizar la simultaneidad que puedan presentar las ondas de avenida y los efectos de intensificación que pueda producir en las crecidas. En los tres casos el curso principal del Zadorra en el punto de confluencia presenta índices de compacidad mayores, especialmente en los casos del Zadorra hasta el Alegría (1,96) y del Zadorra hasta el Zayas (1,73). Ello indica mayor vigorosidad a priori de los afluentes en ese punto, aunque la onda de crecida pueda empezar a manifestarse antes en el curso principal.

El factor de circularidad de Miller ( $R_c$ ) (MILLER, 1953), donde se pone en relación el área de la cuenca y el área de un círculo de igual perímetro:

$$R_c = \frac{4\pi A}{P^2}$$

Los valores oscilan entre 0 y 1, y el máximo valor equivale a la unidad, lo que correspondería a una cuenca de forma circular.

Atendiendo a los resultados del factor de circularidad de Miller para la cuenca del Zadorra y sus subcuencas (Cuadro 4), la forma más y menos circular corresponden de nuevo a las subcuencas del Santo Tomás, y Santa Engracia y Zayas, respectivamente. La cuenca del Zadorra con un factor de 0,47 podemos considerarla de escasa circularidad. Los puntos del Zadorra coincidentes con la confluencia de los ríos Santa Engracia, Alegría y Zayas presentan valores muy bajos de circularidad, especialmente en la confluencia con el río Alegría. Lo cual vuelve a concluir que en general esta característica morfométrica no intensifica las crecidas del río y una mayor vigorosidad, en principio, de los afluentes que del colector principal en sus puntos de confluencia.

**Cuadro 4**  
FACTOR DE CIRCULARIDAD DE LA CUENCA DEL ZADORRA Y SUBCUENCAS

Cuenca	Área (km <sup>2</sup> )	Perímetro (km)	$R_c$
<b>Barrundia</b>	89,31	50,53	0,44
<b>Santa Engracia</b>	178,02	75,26	0,39
<b>Alegría</b>	115,77	58,84	0,42
<b>Santo Tomás</b>	74,38	40,09	0,58
<b>Zayas</b>	91,93	54,63	0,39
<b>Oka</b>	33,51	29,13	0,5
<b>Ayuda</b>	307,96	93,19	0,44
<b>Zadorra hasta Sta. Engracia</b>	275,11	96,89	0,36
<b>Zadorra hasta Alegría</b>	468,43	151,45	0,25
<b>Zadorra hasta Zayas</b>	745,98	168,61	0,33
<b>Zadorra-Total</b>	<b>1361,28</b>	<b>190</b>	<b>0,47</b>

Elaboración propia.

La razón de elongación ( $R_e$ ), es la relación entre el diámetro de un círculo con igual área que la de la cuenca y la longitud máxima de la misma. La fórmula propuesta por SCHUMM (1956) es la siguiente:

$$R_e = \frac{1,129A^{0,5}}{L}$$

Es la fórmula más extendida para calcular la razón de elongación, debido a que es la que mejor correlación guarda con la hidrología de la cuenca (LÓPEZ BERMÚDEZ *et al.*, 1988). Así valores de  $R_e$  inferiores a 1 implicarán formas alargadas, cuanto menor sea  $R_e$  más alargada será la forma de la cuenca (JARDÍ, 1985). A diferencia de los anteriores índices analizados, la razón de elongación atiende a la relación del área con el cauce principal que la drena. Sin embargo, la denominación de cauce principal es variable y muy subjetiva, en casos en los que no se dan fundamentos ni de ángulo, ni de tamaño, ni de cotas, que diferencien una subcuenca de otra, especialmente cuando nos encontramos en bajos órdenes jerárquicos (SENCIALES, 1999).

De los datos obtenidos en la cuenca del Zadorra y algunas de sus subcuencas (Cuadro 5) se deduce que todas tienen valores menores de 1, y por tanto que en general todas son alargadas; sin embargo, pueden apreciarse diferencias entre ellas. La cuenca del Zayas es la de menor índice de elongación, con un valor de 0,36. Hecho que corrobora lo indicado por SENCIALES (1999) respecto a que los índices más bajos se dan en áreas de gran meandricación y baja pendiente, siguiéndole en importancia las cuencas de montaña, escarpadas y alargadas. En el caso del río Zayas, dibuja numerosos meandros y gran parte de la cuenca

**Cuadro 5**  
**RAZÓN DE ELONGACIÓN DE LA CUENCA DEL ZADORRA Y SUBCUENCAS**

Cuenca	Área (km <sup>2</sup> )	Longitud (km)	$R_e$
<b>Barrundia</b>	89,31	19,18	0,56
<b>Santa Engracia</b>	178,02	34,94	0,43
<b>Alegría</b>	115,77	23,05	0,53
<b>Santo Tomás</b>	74,38	14,59	0,67
<b>Zayas</b>	91,93	30,11	0,36
<b>Oka</b>	33,51	13,27	0,49
<b>Ayuda</b>	307,96	48,30	0,41
<b>Zadorra hasta Sta. Engracia</b>	275,11	46,49	0,40
<b>Zadorra hasta Alegría</b>	468,43	49,19	0,50
<b>Zadorra hasta Zayas</b>	745,98	60,59	0,51
<b>Zadorra-Total</b>	<b>1.361,28</b>	<b>88,79</b>	<b>0,47</b>

Elaboración propia.



tiene bajas pendientes, pero la forma de la cuenca es claramente alargada. Los bajos valores del Ayuda y Santa Engracia, 0,41 y 0,43 respectivamente, se deben a la meandricación de ambos y bajas pendientes en amplios tramos del río. Entre los valores más altos encontramos el río Santo Tomás (0,67), Barrundia (0,56), Alegría (0,53), Oka (0,49) y Zadorra (0,47); si bien estos últimos valores también son inferiores a 1, se aprecian formas algo más circulares en comparación con el resto. En este caso el río Zadorra en la confluencia de los ríos Santa Engracia y Alegría presenta índices de elongación inferiores a las cuencas confluyentes, salvo en el caso del Zayas, que presenta formas más alargadas que la de la cuenca del río Zadorra en su punto de confluencia, favorecido por esa alta meandricación.

GREGORY y WALLING (1973) señalaron que cuanto más redonda es una cuenca más retardo existe entre el momento de precipitación y el momento de crecida en la desembocadura, pero al mismo tiempo, más acusada y súbita es la misma crecida, y por tanto más alto el riesgo de inundaciones (SALA y GAY, 1981). De modo que cabe esperar que apenas se den crecidas repentinas en ningún cauce de la red de drenaje, y por tanto sean muy escasas las crecidas relámpago, predominando las crecidas de valle, que son bastante previsibles.

En definitiva, los índices nos señalan formas fundamentalmente alargadas de la cuenca del río Zadorra y las de sus afluentes. Además la comparación de los índices de la subcuenca del río Alegría y la del río Zadorra en su punto de confluencia es de gran interés, dado que la confluencia se realiza en un ángulo de 90°, con graves riesgos de efectos de presa hidráulica, si a ello se le añade una sincronización de las ondas de avenida los efectos de las crecidas y los fuertes desbordamientos pueden intensificarse de manera clara. El análisis de los índices morfométricos indica que en principio la crecida empieza a notarse en el río Zadorra en primer lugar, ateniéndonos a su forma más alargada, en cambio es en el río Alegría donde esas crecidas pueden considerarse algo más vigorosas por su mayor compacidad y pendientes superiores. Sin embargo, el río Zadorra en ese punto se encuentra claramente condicionado por la situación de los embalses y la gestión de desembalses que pudiera realizarse en los momentos de crecida, por ello un retardo de la onda natural de avenida en fuertes crecidas, que obliguen a intensos desembalses, puede generar daños todavía mayores en ese punto de confluencia, dado que puede hacer coincidir los caudales punta de ambos cursos fluviales. Tal y como se ha comprobado que ya sucedió en el evento del 30 de diciembre de 1960 donde se señaló «*pues si la avenida del Zadorra se hubiera retrasado unas horas y atenuado su caudal, podían haber pasado previamente los máximos de las avenidas de los afluentes Alegría y Santo Tomás, aminorándose los desbordamientos de éste a su paso por la Zona Industrial*» (Expediente municipal 26/035/011).

## V. LA RED DE DRENAJE

La red de drenaje es el sistema jerarquizado de cauces, desde los pequeños surcos hasta los ríos, que confluyen unos en otros configurando un colector principal de toda una cuenca. Su función es el transporte de materia y energía en el interior de la cuenca. Desde una perspectiva ecológica es un ejemplo de autoorganización. La morfología de la red, la densidad de drenaje y los órdenes jerárquicos alcanzados son parámetros fundamentales de estudio que dependen de los caracteres geomorfológicos y bióticos del sistema.

El análisis morfométrico y la obtención de la red de drenaje (Fig. 3) se ha realizado marcando todos los talweg que se apreciaban a partir de cartografía base a 1:50.000, tanto si resultaban cauces permanentes como no, dado que en momentos de crecidas todos esos cauces funcionan recolectando y transportando caudal. Para realizar la contabilización también se han tenido en cuenta la configuración de la red de drenaje del espacio cubierto por el agua de los pantanos, basándonos en la cartografía previa a su construcción. La escala se eligió por considerarse apropiada para las dimensiones de la cuenca (JARDÍ, 1985), a pesar de que ello puede suponer errores de hasta 50 m aproximadamente (SENCIALES, 1998, 1999), pero además se eligió por criterios de homogeneidad recomendables para el estudio de la morfometría fluvial, tal y como señaló SÁNCHEZ (1990) citando a autores como ROSELLÓ (1985), MARTÍNEZ (1986), CASTILLO y GONZÁLEZ (1986) y PÉREZ CUEVA (1988).

El estudio de la red de drenaje puede abordarse de dos formas, ambas indicadoras de los procesos erosivos actuales a través de la mutua influencia de sus parámetros y de la relación con los demás componentes del medio (CUESTA, 2001).

La primera forma consiste en un **análisis descriptivo de la red fluvial**, relacionándola con las características litológicas y geológicas del sustrato, como también con la forma y tex-

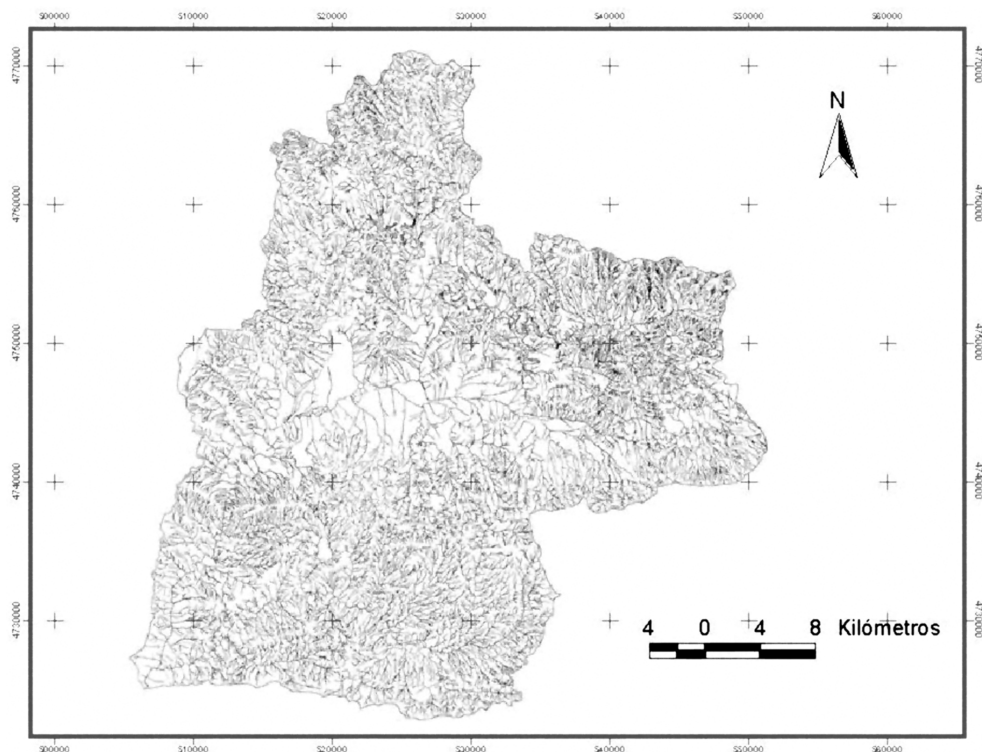


Figura 3. Red de drenaje de la cuenca del río Zadorra.

tura de la red de drenaje. Así la dinámica erosiva de la red hidrográfica es «el resultado de un sistema de transferencia de materia y energía cuyo grado de eficiencia se refleja en la disposición espacial de la red de drenaje» (COOKE y DOORNKAMP, 1974). Existen gran cantidad de estudios que realizan un análisis de la descripción y cuantificación de la red de drenaje, entre ellos los realizados por WAY (1978) y MORISAWA (1985).

En general podemos considerar la red de drenaje del Zadorra como de forma dendrítica; sin embargo, se pueden apreciar diferencias a lo largo y ancho de la cuenca. La forma más propiamente dendrítica se da en la zona entre la cuenca del Barrundia y el tramo alto del Zadorra, donde se da una alternancia entre las lutitas, margas, areniscas y calizas, y la cuenca del Ayuda, donde también hay presencia de lutitas. Los barrancos que descienden de Elgea y Urkillia, se pueden considerar que forman una red paralela, al igual que los que descienden de la sierra de Entzia, en la zona más suroriental. El río Arganzubi, afluente del Alegría y situado entre el tramo alto del Zadorra y el propio cauce del Alegría, presenta una disposición sub-paralela, condicionados por el relieve.

Además WAY (1978) estableció una clasificación de la red de drenaje atendiendo a la textura y la forma, en la que consideró la influencia de los factores litológicos, edáficos y topográficos, donde la permeabilidad del suelo juega un importante papel. Así la clasificó en tres grupos: fina, media y gruesa, en función de la densidad de hilillos de agua que la red ha sido capaz de excavar. En general la densidad es bastante elevada, y las zonas con menor densidad de drenaje coinciden con las zonas más llanas, cultivadas o urbanizadas (ciudad de Vitoria y el aeropuerto de Foronda), donde los cauces se encuentran canalizados e incluso embocinados, o también la parte de la cuenca del Alegría.

El segundo enfoque, **la topología de la red de drenaje**, se analiza bajo un punto de vista cuantitativo, comparando las redes de las diversas subcuencas y relacionando internamente su propia estructura, poniendo de manifiesto observaciones significativas subyacentes entre formas y procesos hidrológicos y erosivos (CUESTA, 2001). Existen diferentes métodos de jerarquización de la red de drenaje, entre los que se encuentran los de HORTON (1945), STRAHLER (1964), SHREVE (1966) y SCHEIDEGGER (1965). Para establecer la jerarquización de los cauces de la cuenca del Zadorra hemos utilizado el método de STRAHLER, por ser el más difundido y sencillo de aplicar. Para ello, a partir de la representación de la red drenaje se realizó la jerarquización de los cauces.

De acuerdo con el Cuadro 6, la cuenca del Zadorra tiene un orden 7, que alcanza ya en el primer tramo del mismo, justo en la confluencia entre el tramo alto del Zadorra y el río Barrundia en la cola del embalse de Ullibarri. Muchas son las subcuencas que alcanzan el orden 6. Sin embargo en varios estudios se indica que la red de drenaje del Zadorra es solamente de orden 4 (RALLO *et al.*, 1992), lo que puede ser debido a que la jerarquización no se ha realizado de manera exhaustiva, marcando todos los surcos, sino a partir de los cauces principales.

En igualdad de condiciones en relación al área, clima y sustrato, cuanto más alto es el orden de la cuenca mayor es su grado de desarrollo fluvial (HORTON, 1945). Por tanto, debido a la tipología del sustrato y a la cobertura vegetal, la mayor jerarquización se da en el tramo alto del río Zadorra y no en la zona más al septentrional, en la subcuenca del Santa Engracia, donde la mayor pluviosidad haría prever una mayor jerarquización, sin embargo la mayor dureza de los materiales y una cobertura vegetal más densa disminuyen esa jerarquización.

**Cuadro 6**  
**SISTEMA DE ÓRDENES SEGÚN STRAHLER EN LA CUENCA DEL ZADORRA Y SUBCUENCAS**

Cuenca	Nº de orden	Nº de cauces	Cuenca	Nº de orden	Nº de cauces
Barrundia	1	833	Barrundia	1	833
	2	185		2	185
	3	46		3	46
	4	12		4	12
	5	3		5	3
	6	1		6	1
Santa Engracia	1	1554	Oka	1	243
	2	328		2	54
	3	73		3	14
	4	12		4	3
	5	3		5	1
	6	1	Ayuda	1	2649
Alegría	1	620		2	546
	2	139		3	133
	3	33		4	29
	4	6		5	9
	5	2		6	1
	6	1	<b>Zadorra Total</b>	1	10893
Santo Tomás	1	569		2	2330
	2	113		3	546
	3	25		4	123
	4	8		5	33
	5	3		6	7
	6	1		7	1

Elaboración propia.

De la clasificación jerárquica de los órdenes se establecieron algunas leyes, HORTON (1945) y STRAHLER (1964) definen una serie de leyes morfométricas relacionando el número de cauces, sus longitudes, pendientes y áreas de drenaje en una cuenca con el orden de cauces, basándose, por ejemplo, en que la longitud de los cauces afecta claramente a los ratios de recogida de aguas y su transmisión aguas abajo para el caso de la longitud, de igual modo para el resto de variables. Hemos aplicado la Razón de bifurcación ( $R_b$ ), que relaciona el número de cauces de un orden con el número de cauces de orden inmediatamente superior, por ser una de las variables más significativas de cara al comportamiento del sistema fluvial (CUESTA, 2001). HORTON (1945) estableció que según la ley de números de cauce «*el número de cauces de diferentes órdenes dentro de una cuenca dada tiende a aproximarse a una progresión geométrica inversa en la que el primer término es la unidad y la razón es una relación constante de bifurcación*».



Hemos obtenido los valores de Rb correspondientes a cada cuenca realizando una media aritmética de la relación de bifurcación hallada entre los diferentes órdenes de cada cuenca (RALLO, 1992). Otros autores como LLAMAS (1993) utilizan una media ponderada por el número de cauces de cada orden.

Los valores de Rb superiores a 4 indican una torrencialidad moderadamente alta (STRAHLER, 1964). No obstante, la comparación sólo es representativa entre cuencas o subcuencas que tengan el mismo orden. De manera que la cuenca del Ayuda, en comparación con el resto de cuencas de orden 6 se muestra como la más torrencial de todas, con una razón de bifurcación de 5,1, debido a la torrencialidad de su propia cabecera y la de los afluentes como Markinez, Saraso o Arrieta; los ríos de cabecera del Santa Engracia presentan una alta razón de bifurcación, 6,1, ya que salvan grandes desniveles por proceder de cimas como el Anboto, aunque la razón de bifurcación media de un valor inferior, ante la disminución de las pendientes en el tramo medio y bajo. El Zayas es la subcuenca menos torrencial, a pesar de tener un índice bastante alto, nace en las estribaciones del Gorbea, lo que le confiere cierta torrencialidad, pero la mayor parte de su curso lo realiza por zonas llanas que la atenúan. RALLO *et al.* (1992) comentan que «Álava es la zona más llana de la Comunidad Autónoma Vasca y sin embargo, sus cuencas más importantes (Omecillo, Bayas y Zadorra) presentan un  $Rb > 4,5$ . Esto se debe a que los segmentos de 1º orden de dichas cuencas nacen en zonas altas y de grandes pendientes (sierras de Orduña, Gorbea y Anboto) y, en el caso de los ríos Bayas y Zadorra, atraviesan también un área fragmentada por planos de fallas perpendiculares al eje de los mismos».

La relación de bifurcación también se relaciona con una diferente respuesta a las crecidas, más si se combina con otras características morfométricas de la cuenca como la compacidad (STRAHLER, 1964; WARD y ROBINSON, 2000). Anteriormente, en relación a la razón de elongación, se ha señalado que cuanto más redonda es una cuenca más retardo existe entre el momento de precipitación y el momento de crecida en la desembocadura, pero al mismo tiempo, más acusada y súbita es la misma crecida, y por tanto más alto el riesgo de inundaciones. Lo cual se puede relacionar con la razón de bifurcación, de forma que cuanto más redondeada es una cuenca, menor será la razón de bifurcación y mayor el riesgo de crecidas bruscas en la desembocadura (GREGORY y WALLING, 1973; PATTON, 1988; SALA y GAY, 1981). En este caso la menor razón de bifurcación corresponde al río Zayas, que sin embargo es el que presenta una forma más alargada, lo cual no parece corresponder con lo formulado por los anteriores autores, aspecto que ya señaló SENCIALES (1999). Las cuencas elongadas presentan un claro retardo de la concentración de la escorrentía a causa de la gran longitud del cauce principal, y con ello, mayor brusquedad de la crecida, una vez concentradas las aguas. El hecho de que esa sea precisamente la cuenca más alargada y que por el contrario presente la razón de bifurcación más baja, se corresponde con las bajas pendientes que presenta la cuenca en su tramo medio y bajo (SENCIALES, 1999), y que determinan las bajas pendientes de la totalidad del cauce (15,14%). Así este mismo autor indicó la lógica de que una baja razón de elongación generase bruscas crecidas, ante la incorporación más rápida y casi simultánea de los caudales de escorrentía de un aguacero, fluyendo casi a la vez hacia un mismo punto, lo cual sucede en el Zayas generando alguna crecida de rápida concentración.

## VI. DENSIDAD DE DRENAJE

La densidad de drenaje (Dd), (HORTON, 1945) es otra propiedad fundamental de una cuenca, que controla la eficiencia del drenaje (JONES, 1997) y señala el estado erosivo (SENCIALES, 1999):

$$Dd = \frac{\sum L}{S}$$

Se relaciona la longitud de la totalidad de cauces de la cuenca con la superficie de esta última.

Diversos autores han relacionado este parámetro con el clima y más concretamente la precipitación y su efectividad (MELTON, 1957; MADDUMA BANDARA, 1974; ABRAHAMS y PONCYNSKI, 1984). En lo que a su relación con la respuesta hidrológica y especialmente a las crecidas GREGORY y OVENDEN (1979) utilizaron la red de drenaje para estimar caudales punta, y DAY (1978) señaló la fuerte correlación entre el total de la longitud de la red de cauces y el caudal. Sin embargo no parece demostrarse mayor relación entre la densidad de drenaje y el caudal.

El valor obtenido es de 8,38 km/km<sup>2</sup>, lo que según STRAHLER (1964) indica una baja densidad de drenaje y una textura gruesa, por el recubrimiento vegetal y la litología (SENCIALES, 1999). Siguiendo a MORISAWA (1985) que relaciona la densidad de drenaje, el clima, la vegetación y la textura, el valor obtenido en la cuenca del Zadorra corresponde a un suelo permeable, en clima lluvioso con una buena cobertura de vegetación y una textura media. La densidad de drenaje obtenida por RALLO *et al* (1992), 0,46 km/km<sup>2</sup> para la cuenca del Zadorra, no tiene ningún valor desde el momento en que los cauces medidos fueron solamente los principales. Según CHORLEY (1969) y CARLSTON (1963) la densidad de drenaje afecta al tipo de escorrentía, y así en zonas de alta densidad la escorrentía recorre la superficie rápidamente, rebajando el tiempo de concentración e incrementando el pico de crecida, al haber menor infiltración. De manera que en el caso del Zadorra sucede lo contrario, se registran altas tasas de infiltración y alimentación del flujo subsuperficial, lo cual supone un factor de incremento en el tiempo de concentración y atenuamiento del caudal punta. A ello contribuye de manera importante las escasas pendientes de buena parte de la cuenca, la concentración parcelaria y los usos agrícolas, que han supuesto una simplificación y concentración de los cursos de agua.

HORTON (1945) definió 1/Dd como la constante de mantenimiento de canal, es decir, la superficie de terreno media necesaria para soportar una unidad de longitud del cauce, y sugirió que podía distinguir diferentes tipos de regímenes hidrológicos, ya que se daban valores menores en las regiones más húmedas. En el Zadorra el valor obtenido es de 0,12 km<sup>2</sup>/km, es decir que de media en la cuenca del Zadorra se necesitan 0,12 km<sup>2</sup> de cuenca para mantener un kilómetro de cauce, un valor que demuestra estar muy en relación con la pluviosidad de la cuenca, de manera que tiene un valor inferior a los de cuencas más mediterráneas del entorno como la del Ega y del Inglares, sin embargo tienen valor superior al de cuencas cantábricas de Gipuzkoa o Bizkaia.

La frecuencia de cauces (F) es una medida no métrica, que nos da el número de cauces por unidad de área, considerando cauce como un segmento del cauce de Strahler, es decir del punto en que inicia un tipo de orden hasta cuando cambia. En el caso del Zadorra la frecuencia de cauces es de 0,13, es un valor considerado como bajo, y en relación con la densidad de drenaje, y también relacionado con menores tasas de pluviosidad.

## VII. CONCLUSIONES

Del análisis morfométrico de la cuenca y la red de drenaje se desprende que la rapidez en la concentración de las aguas se ve favorecida especialmente por las pendientes, más que por los índices de compacidad y elongación, de manera que son las cabeceras de las subcuencas del río Santa Engracia, Santo Tomás Barrundia y Ayuda las que presentan crecidas de mayor peligrosidad debido a esas pendientes superiores que facilitan una rápida concentración de las aguas. En este sentido, la interpretación de los índices de compacidad y elongación, debe de tomarse con cautela, sin embargo la información aportada por la razón de bifurcación confirman lo concluido, siendo esas zonas las de mayor torrencialidad. En el resto de las subcuencas y en la totalidad de la del Zadorra, la vigorosidad de las crecidas es menor, indicando crecidas de tipo de fondo de valle. Por otro lado en el caso del río Zayas coincide el hecho de ser la cuenca más alargada y la de menor razón de bifurcación, que al tener unas bajas pendientes favorece la concentración de las aguas y la generación de crecidas. En las zonas de confluencia, los afluentes muestran mayor vigorosidad de sus crecidas que el colector principal.

La densidad de drenaje indica una amplia cobertura vegetal y litología dura, además de unas altas tasas de infiltración y alimentación del flujo subsuperficial, que favorece el incremento del tiempo de concentración y el atenuamiento del caudal punta.

De manera que puede concluirse que las características morfométricas, en general, no incrementan, sino que más bien atenúan los efectos y la vigorosidad de las crecidas.

## BIBLIOGRAFÍA

- ABRAHAMAS, A.D. y PONCZYNSKI, J.J. (1984): «Drainage density in relation to precipitation intensity in the U.S.A.». *Journal of Hydrology*, nº 75, pp. 383-388.
- ANTIGÜEDAD, I. (1982): «Análisis de la red de drenaje en la interpretación estructural. Aplicación en la cuenca del río Nervión-Ibaizabal (Bizkaia-Araba)». *Lurralde*, nº 5, pp. 35-45.
- ASEGINOLAZA, C. *et al.* (1988): *Vegetación de la Comunidad Autónoma del País Vasco*. Vitoria, Viceconsejería de Medio Ambiente, Gobierno Vasco, 361 pp.
- ASEGINOLAZA, C. *et al.* (1990): *Mapa de vegetación de la Comunidad Autónoma del País Vasco*, 1:25.000. Vitoria-Gasteiz, Departamento de Urbanismo, Vivienda y Medio Ambiente, Viceconsejería de Medio Ambiente.
- CASTILLO, V. y GONZÁLEZ, S. (1986): «Caracterización morfológica de los paisajes fluviales madrileños». *Papeles de Geografía Física*, nº 11, pp. 53-62.
- CHORLEY, R.J. (1969): «The drainage basin as the fundamental geomorphic unit». In Chorley, R.J. (Ed.): *Introduction to Physical Hydrology*, London, Methuen, pp. 37-59.



- COOKE, R.U. y DOORNKAMP, J.C. (1974): *Geomorphology in Environmental Management*. Oxford University Press, 413 pp.
- CRUZ, J. y TAMÉS, P. (1983): «Análisis cuantitativo de la red de drenaje de la cuenca del río Deba». *Lurralde*, nº 6, pp. 95-117.
- CUESTA, M.J. (2001): *Dinámica erosiva en los paisajes de la cuenca del río Guadajoz (Córdoba y Jaén)*. Córdoba, Servicio de Publicaciones de la Universidad de Córdoba, 226 pp.
- DAY, D.G. (1978): «Drainage density changes during rainfall». *Earth Surface Processes* nº 3, pp. 319-326.
- Ente Vasco de la Energía (1991): *Mapa Geológico del País Vasco 1:200.000*. Instituto Tecnológico y Geominero de España y Ente Vasco de la Energía.
- ERASO, A. (1983): «Estudio morfométrico de las cuencas de los ríos Butrón, Oca, Lea y Artibai (Bizkaia)». *Lurralde*, nº 6, pp. 35-80.
- ERASO, A. y ANTIGÜEDAD, I. (1984): «Estudio de la transformación precipitación-aportación en relación con los parámetros físicos de las cuencas hidrográficas. Aplicación a cuatro cuencas de Bizkaia». *Lurralde*, nº 7, pp. 173-195.
- Expediente municipal 26/035/011, Inundaciones del río Zadorra, 1960. Archivo Municipal de Vitoria-Gasteiz.
- GARCÍA ROSSELL, L. y VEGA DE PEDRO, R. (1982): «Caracterización e índices parámetros de la red de drenaje de Sierra Nevada (España meridional)». *Tecniterrae* S-235, pp. 22-29.
- GRAVELIUS, H. (1914): *Flusskunde*. Goschen Verlagshan dlug Berlin. En Zavoianu, I. (1985): *Morphometry of Drainage Bassins*. Amsterdam, Elsevier.
- GREGORY, K.J. y OVENDEN, J.C. (1979): «Drainage network volumes and precipitation in Britain». *Trans. Inst. Br. Geogr.*, New Ser. 4, 1-11.
- GREGORY, K.J. & WALLING, D.E. (1973): *Drainage basin form and processes. A geomorphological approach*. London, Arnold, 472 pp.
- HORTON, R.E. (1932): «Drainage basin characteristics». *Transactions of the American Geophysical Union*, nº 13, pp. 350-361.
- HORTON, R.E. (1945): «Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology». *Bulletin of the Geological Society of America*, nº 56, pp. 275-370.
- IBISATE, A. (2004): *Las crecidas fluviales en el Zadorra: procesos, riesgos y propuestas de ordenación*. Tesis doctoral, 630 p. + anexo cartográfico (inédito).
- JARDÍ, M. (1985): «Forma de una cuenca de drenaje. Análisis de las variables morfométricas que nos la definen». *Revista de Geografía*, nº XIX, pp. 41-68.
- JONES, J.A.A. (1997): *Global hydrology: processes, resources and environmental management*. London, Addison-Wesley, 399 pp.
- LLAMAS, J. (1993): *Hidrología general. Principios y aplicaciones*. Bilbao, Universidad del País Vasco, 635 pp.
- LÓPEZ BERMÚDEZ, F. et al. (1988): *Geometría de cuencas fluviales: las redes de drenaje del alto Guadalentín*. Madrid, ICONA, Proyecto LUCDEME IV, 229 pp.
- LÓPEZ BERMÚDEZ, F. y ROMERO DÍAZ, M.A. (1989): «Relación entre escorrentías superficiales y características físicas y ambientales (Alto Guadalquivir)». En GIL OLCINA, A. y MORALES GIL, A. (coord.): *Avenidas fluviales e inundaciones en la*

- cuenca del Mediterráneo*. Alicante, Instituto Universitario de Geografía de la Universidad de Alicante. Caja de Ahorros del Mediterráneo, pp. 171-183.
- MADDUMA BANDARA, C.M. (1974): «Drainage density and effective precipitation». *Journal of Hydrology*, nº 21, pp. 187-190.
- MARTÍNEZ, J. (1986): «Características morfométricas y de la red de drenaje de algunas cuencas de la Sierra de los Álamos (Moratalla, Murcia)». *Papeles de Geografía Física*, nº 11, pp. 45-51.
- MELTON, M.A. (1957): *An Analysis of the Relation among Elements of Climate, Surface Properties and Geomorphology*. Tech. Rep. No. 11, Dept. of Geology, Columbia University, New York.
- MILLER, V.C. (1953): *A quantitative geomorphic study of drainage basin characteristics in the Clinch Mountain area, Virginia and Tennessee*. Office of Naval Research, Geography Branch, Project NR 389-042, Technical Report, 3, Columbia University.
- MORISAWA, M.E. (1968): *Streams: their dynamics and morphology*, New York, McGraw-Hill, 175 pp.
- MORISAWA, M.E. (1985): *Rivers: forms and process*. London, Longman, 222 pp.
- PATTON, P.C. (1988): «Drainage basin morphometry and floods». In Baker, V.R.; Kochel, R.C. & Patton, P.C. (Eds.): *Flood geomorphology*, New York, Wiley, pp. 51-64.
- PÉREZ CUEVA, A.J. (1988): *Geomorfología del sector ibérico valenciano —entre los ríos Mijares y Turia—*. Valencia, Dpto. de Geografía. Universidad de Valencia, 217 pp.
- RALLO, A. (Dir., 1992): *Caracterización hidrobiológica de la red fluvial de Álava y Gipuzkoa*. Vitoria-Gasteiz, Gobierno Vasco, 511 pp.
- ROMERO, M.A. y LÓPEZ BERMÚDEZ, F. (1987): «Morfometría de redes fluviales: revisión crítica de los parámetros más utilizados y aplicación al Alto Guadalquivir». *Papeles de Geografía Física*, nº 12, pp. 47-62.
- ROSELLÓ, V.M. (1985). «Los barrancos de la plataforma oriental de Palma de Mallorca». *Actas del IX Coloquio AGE*, 13 p.
- RUIZ URRESTARAZU, E. (1982): *La transición climática del Cantábrico Oriental al valle medio del Ebro*. Vitoria-Gasteiz, Diputación Foral de Álava, 650 pp.
- SALA, M. y GAY, R. (1981): «Algunos datos morfométricos de la cuenca del Isábena». *Notes de Geografía Física*, nº 4, pp. 41-65.
- SÁNCHEZ FABRE, M. (1990): «Caracterización morfométrica de la cuenca del río Ebrón. (Provincia de Teruel y Rincón de Ademuz)». *I Reunión Nacional de Geomorfología*, Teruel, pp. 509-520.
- SCHEIDEGGER, A.E. (1965): *The algebra of stream-order numbers*. United States Geological Survey Professional Paper 525-B, 187 pp.
- SCHUMM, S.A. (1956): «The evolution of drainage systems and slopes in badlands at Pearth Amboy, New Jersey». *Bulletin of the Geological Society of America*, nº 67, pp. 597-646.
- SENCIALES, J.M. y FERRE, E. (1992): «Análisis morfométrico de la cuenca del río Benamargosa (provincia de Málaga)». En López Bermúdez, F.; Conesa, C. y Romero, M.A. (Eds.): *Estudios de Geomorfología en España. Actas de la II Reunión Nacional de Geomorfología*, Murcia, S.E.G., pp. 365-375.
- Senciales, J.M. (1998): «El análisis morfológico de las cuencas fluviales aplicado al estudio hidrográfico». *Norba*, nº X, pp. 155-183.

- SENCIALES, J.M. (1999): *Redes fluviales. Metodología de Análisis*. Estudios y Ensayos, 34. Universidad de Málaga, 337 pp.
- SENCIALES, J.M. y FERRE, E. (1992): «Análisis morfométrico de la cuenca del río Benamargosa (provincia de Málaga)». En López Bermúdez, F.; Conesa, C. y Romero, M.A. (Eds.): *Estudios de Geomorfología en España. Actas de la II Reunión Nacional de Geomorfología*, Murcia, S.E.G., pp. 365-375.
- SERVICIO GEOGRÁFICO DEL EJÉRCITO. *Mapas topográficos del Ejército 1:50.000*. Elorrio (87), Orduña (111), Vitoria (112), Salvatierra (113), Alsasua (114), Miranda de Ebro (137), Nanclares de la Oca (138), La Puebla de Arganzón (138), Eulate (139), Haro (170).
- SHERMAN, L.K. (1932): «The relation of hydrographs of runoff to size and character of drainage basins». *Transactions of American Geophysical Union*, nº 13, pp. 332-339.
- SHREVE, R.L. (1966): «Statistical law of stream numbers». *Journal of Geology*, nº 74, pp. 17-37.
- STRAHLER, A.N. (1964): «Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks». In Chow, V.T. (Ed.): *Handbook of applied hydrology*. 4-39/4-76.
- VIDAL-ABARCA, M.R.; MONTES, C.; SUÁREZ, M.L. y RAMÍREZ-DÍAZ, L. (1987): «Caracterización morfométrica de la cuenca del río Segura: estudio cuantitativo de las formas de las subcuencas». *Papeles de Geografía Física*, nº 12, pp. 19-31.
- WARD, R.C. y ROBINSON, M. (2000): *Principles of Hydrology*. Suffolk, McGraw-Hill, 360 pp.
- WAY, D.S. (1978): *The interaction Between Urbanization and Land. Quality and Quantity in Environmental Planning and Design*. Harvard University, Cambridge.

