

FISIOGRAFIA DE LA CUENCA DEL DUERO

*M.ª Dolores Manso Orgaz, João Dias y Francisco Macedo
Departamento de Física (Área da Atmosfera).
Universidade de Aveiro, Portugal*

1. Resumen

Con un planímetro y un mapa que contiene la cuenca del Duero española y portuguesa, estimamos los parámetros necesarios para llevar a cabo un estudio minucioso de la geometría, forma de toda la cuenca y de su río principal, así como el tiempo de concentración de las aguas desde la cabecera del río Duero a la desembocadura.

1. Abstract

With the planimetry and the map that contains the Duero basin spanish and portuguese calculate the parameters necessary to bring out a very detailed study of geometry, shapes of overall the Duero basin and its main river, well as the time of concentration of the waters from the headwaters of the river until their end.

2. Introducción

Es de interés general proceder a la caracterización de los sistemas hidrológicos (por ejemplo una cuenca), toda vez que el tipo de escorrentía observado es de gran importancia para diversos tipos de actividades humanas.

Para averiguar cuál es la respuesta del sistema a la precipitación es necesario efectuar un estudio, hecho en conjunto por meteorólogos e hidrólogos, en el cual la fisiografía tiene un papel dominante. Así, es posible llegar a conclusiones en base únicamente a la observación del sistema,

pues un sistema con igual origen geológico, expuesto al mismo tipo de clima y constituido por los mismos materiales representa formas geométricas semejantes (Faria, 1976), lo que nos conduce a un resultado tipo para cada uno de los casos. En lo que se refiere al tipo de estructura de los sistemas subterráneos, que también es bastante importante, éste no será tratado.

Los sistemas hidrológicos son sistemas físicos abiertos, con cambios constantes de masa y energía a través de las diversas fronteras. En el caso que nos vamos a referir la entrada de masa se da a través de la precipitación; en cuanto que la salida se hace a través de la escorrentía de agua y de las sustancias sólidas.

Hemos de referir que este género de sistemas es generalmente no estacionario, a pesar de que algunas de sus características, cuando son consideradas en intervalos de corta duración, se presentan constantes (por ejemplo: la topografía y los sistemas acuíferos).

3. Geometría y caracterización de la cuenca hidrográfica del río Duero

La respuesta de un sistema hidrológico al régimen de precipitación depende en gran parte de su fisiografía. Así, conociendo las principales características fisiográficas y geométricas de la cuenca en estudio es posible estimar su comportamiento cuando se conocen algunas variables meteorológicas, sobre todo la precipitación. Sabemos la estrecha correspondencia que esas características tienen con el régimen hidrológico;

ello hace posible establecer relaciones entre los parámetros fisiográficos y geométricos, y con el comportamiento hidrológico de otras cuencas. Esto nos permite determinar indirectamente valores hidrológicos en secciones de interés, donde no hay datos de observación y, sobre todo, en regiones en que por razones de orden económico o fisiográfico no es posible la instalación de estaciones meteorológicas.

3.1. Area de drenaje

Es la superficie de la cuenca (en proyección horizontal), limitada por divisorias topográficas, fue determinada por planimetría en un mapa del Servicio Meteorológico Español (modelo H. 10), con una escala 1 : 750.000. El resultado a que llegamos, después de diez medidas, fue:

$$A=97.170,15 \pm 64,10 \text{ km}^2.$$

El área de drenaje de la cuenca hidrológica del río Duero, que constituye uno de los elementos básicos para la determinación de otros parámetros fisiográficos es por lo tanto de 97.170 km².

3.2. Perímetro de la cuenca

Fue determinado de modo idéntico, habiendo sido utilizado el mismo mapa. Después de diez medidas, el resultado obtenido fue de:

$$P=1.985,48 \pm 10,41 \text{ km.}$$

El perímetro de la cuenca hidrográfica del río Duero será entonces de 1.985 m.

3.3. Longitud del río más largo

Recurriendo de nuevo al mismo mapa y utilizando un proceso semejante a los anteriores, llegamos al resultado de:

$$Lr=874,32 \pm 6,88 \text{ km.}$$

El valor encontrado para la longitud del río más largo es entonces de 874 km.

3.4. Forma de la cuenca

La forma de la cuenca resulta de la proyección de su frontera sobre un plano horizontal. La forma superficial es importante en el estudio de su comportamiento hidrológico, sobre todo en la determinación del tiempo de concentración. En su caracterización para ir más allá de su descripción cualitativa (cuenca alargada, ramificada, etc.), se puede recurrir a algunos parámetros de orden cuantitativo, procurando relacionarlos con formas geométricas conocidas.

3.4.1. Índice de compacidad o de Gravelius K_c

Pretende relacionar la forma de la cuenca con un círculo, y viene definido por un cociente entre el perímetro de la cuenca P y el perímetro de un círculo de área igual al de la cuenca. Está definido por la siguiente expresión:

$$K_c = P/P_0 \quad P_0 = 2 \cdot \pi \cdot r$$

y, a partir del área $r = (A/\pi)^{1/2}$, ya resulta:

$$K_c = 1/2 \cdot \pi \cdot^{-3/2} \cdot P \cdot A^{-1/2} = 0,28 \cdot P \cdot A^{-1/2}.$$

El valor de K_c es mayor o igual a la unidad, sólo será igual cuando la forma de la cuenca sea circular. Se trata de un número adimensional y varía con la forma, siendo independiente del tamaño.

El resultado a que llegamos es de $K_c = 1,78$. En general se considera que valores inferiores a 1,60 corresponden a cuencas compactas, con lo que podemos confirmar que la cuenca del Duero es poco compacta (Milmoso, 1986).

3.4.2. Factor de forma K_f

Relaciona la longitud media de la cuenca y la del río más largo de la forma siguiente:

$$K_f = L/Lr,$$

(K_f , factor de forma; L_r , longitud del río mayor; A , área de la cuenca, y L , longitud media de la cuenca), definida por:

$$L = A/L_r,$$

de donde nos da

$$K_f = A/L_r^2.$$

Sustituyendo los valores anteriores, nos da:

$$K_f = 0,13.$$

Constituye otro índice de la mayor o menor tendencia para que ocurran inundaciones en una cuenca hidrográfica (Faria, 197).

El valor de $K_f = 0,13$ nos dice que el río Duero no está sometido a inundaciones, pues presenta una forma estrecha y larga con un factor de forma inferior a uno. En el caso ideal de que la cuenca tuviese forma cuadrada, el valor de K_f sería uno.

3.4.3 Cociente de alargamiento R_a

Definido por (Gonçalves, 1985):

$$R_a = D/L_r,$$

en la que D es el diámetro de un círculo de área igual al de la cuenca (A). En función del área es

$$R_a = 1,13/L_r \cdot A^{1/2}.$$

Parece que estos valores de R_a , según Faria *et al.* (1981), están relacionados con el relieve. Así, los valores de R_a próximos a uno son típicos de regiones de relieves con poca pendiente; en cambio los valores de 0,6 y 0,8 están asociados a cuencas que presentan relieves con altas pendientes. Para el río Duero obtuvimos $R_a = 0,40$, lo que nos indica que esta cuenca presenta un relieve con pendiente pequeña. La pendiente de los terrenos controla en gran parte la velocidad de escorrentía superficial.

3.5. El relieve

Representa una característica predominante sobre el tiempo de régimen hidrológico y climatológico de la cuenca. Así, es imprescindible la determinación de algunos parámetros que caractericen el relieve en las cuencas hidrográficas. Los que más se utilizan los indicamos a continuación.

3.5.1. Curvas hipsométricas

Indican las áreas de las superficies (en porcentaje del área total) situadas por encima o por debajo de las diferentes curvas de nivel (fig. 1).

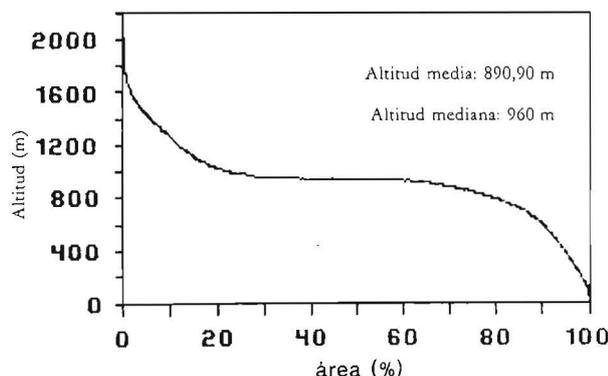


Figura 1.—Curva hipsométrica

Obtuvimos los valores indicados en el cuadro 1. Con estos valores construimos los histogramas de las áreas (fig. 2 y fig. 3).

3.5.2. Altitud media de la cuenca hidrográfica

En el gráfico hipsométrico, la altitud media correspondiente a la altura de un triángulo de área igual al área delimitada por la curva hipsométrica y por los ejes de coordenadas y de longitud igual al área de la base.

La altitud media de la cuenca hidrográfica fue determinada utilizando la ecuación

$$A_m = (\sum b_i \cdot A_i) / A,$$

siendo A_m la altitud media de la cuenca y b_i , el valor medio de las altitudes, entre las cuales fueron determinadas las áreas.

CUADRO 1
DISTRIBUCION DE LAS AREAS EN ALTITUD

Altitud (en m)	Area (valores simples)		Area (valores acumulados)	
	km ²	%	km ²	%
> 1.600	2.107,77	2,16	2.107,77	2,16
1.000-1.600	22.251,05	22,80	24.359,31	24,96
600-1.000	63.239,49	64,81	87.598,80	89,77
200- 600	8.705,97	8,92	96.304,77	98,69
0- 200	1.273,04	1,31	97.577,82	100,00

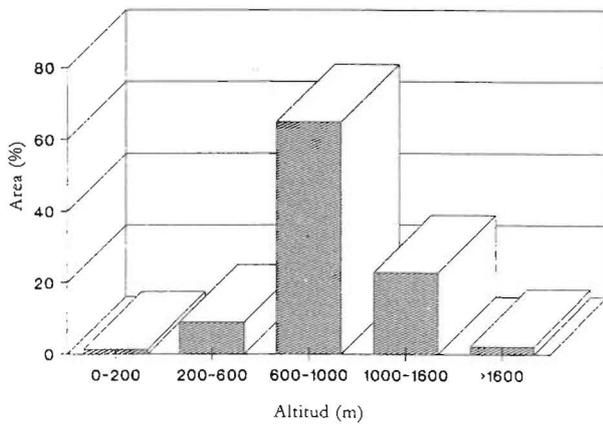


Figura 2.—Histograma de las áreas

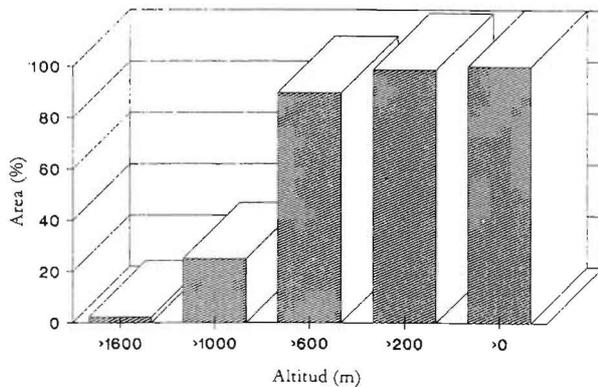


Figura 3.—Histograma de las áreas (valores acumulados)

En nuestro caso, como la sección de referencia coincide con la desembocadura del río Duero (altura es igual a cero), la altura media coincide con la altitud media:

$$H_m = 890,80 \text{ m.}$$

3.5.4. Rectángulo equivalente

Se destina fundamentalmente a estimar la influencia de las características geométricas de la cuenca en la escorrentía. Es usual admitir que una cuenca hidrográfica se comporta, desde el punto de vista hidrográfico, de un modo análogo a una cuenca de forma rectangular con el índice Gravelius, con la misma curva hipsométrica y constituida por el mismo tipo de rocas, suelo y vegetación. Para ese fin se dibuja un rectángulo de área A y perímetro P , iguales a los de la cuenca. Las curvas de nivel en el rectángulo equivalente son segmentos de recta paralelos al lado menor del rectángulo trazados de modo que se respete la hipsometría natural de la cuenca (fig. 4). Representando por L y l el lado mayor y menor del rectángulo respectivamente, tenemos para ambos las siguientes expresiones:

3.5.3. Altura media de la cuenca hidrográfica

Se define de forma semejante a la anterior, pero en vez de referirse a cotas por encima del nivel del mar (h , altitud) se refiere a cotas por encima de la sección considerada (H , alturas), o sea:

$$H_m = (\sum H_i \cdot A_i) \cdot A.$$

$$L = 0,89 \cdot K_c \cdot (A)^{1/2} \cdot (10 + (10,120/K_c)^2)^{1/2},$$

$$l = 0,89 \cdot K_c \cdot (A)^{1/2} \cdot (1 - (1,12/K_c)^2)^{1/2}.$$

Para el caso del río Duero, obtuvimos los siguientes valores:

$$L = 882,63 \text{ km y } l = 110,09 \text{ km.}$$

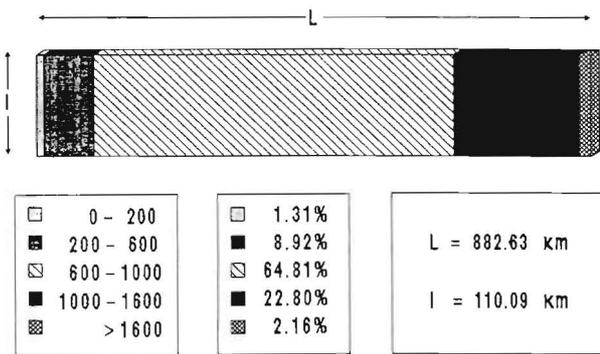


Figura 4.—Rectángulo equivalente

Para determinar las distancias a partir de la mayor altitud de las curvas de nivel del rectángulo equivalente, utilizamos una expresión de tipo

$$d_x (\text{área encima de } x) \cdot l$$

y obtenemos los valores del cuadro 2.

3.5.5. Pendiente media ponderada de la cuenca

Fue definida la pendiente media ponderada del rectángulo equivalente, mediante la expresión

$$K_b = \Delta b / (10 \cdot L),$$

donde Δb es la diferencia de nivel ($b_2 - b_1$) (m), L el lado mayor del rectángulo equivalente (km) y K_b el declive medio ponderado (%).

Para el río Duero tenemos:

$$K_b = 0,25 \%$$

Calculamos para las zonas de la cuenca comprendidas entre las altitudes 2.200-1.600,

CUADRO 3
PENDIENTES MEDIAS DE LAS AREAS
COMPREDIDAS ENTRE LAS CURVAS
DE NIVEL

Δb (m)	$K_b (\Delta b)$ (%)
2.200-1.600	3,08
1.600-1.000	0,30
1.000- 600	0,07
600- 200	0,51
200- 0	2,55

1.600-1.000, 1.000-600, 600-200 y 200-0 m, ya que se consideran las curvas de nivel representadas en el mapa. Obtuvimos los valores que constan en el cuadro 3 por aplicación de la fórmula que nos calcula la pendiente media ponderada.

3.5.6. Índice de la pendiente global

Corresponde a la pendiente media entre las altitudes correspondientes al 5 y al 95 % del área de la cuenca, medida en la curva hipsométrica y viene dada por

$$I_g = ((Z_5 - Z_{95}) / 10 \cdot L),$$

en que Z_5 y Z_{95} son altitudes correspondientes al 5 y al 95 % del área de la cuenca (m), L el lado mayor del rectángulo equivalente (m) y I_g el índice de declive global (%).

Los resultados a que llegamos fueron

$$Z_5 = 1.400 \text{ m} \quad \text{y} \quad Z_{95} = 400 \text{ m}.$$

Llevando estos valores a la ecuación del índice global, obtuvimos

$$I_g = 0,11 \%$$

3.5.7. Coeficiente de masividad

Es el coeficiente entre la altura media de la cuenca, en metros, y su superficie en proyección horizontal en kilómetros. Este parámetro alcanza valores elevados en cuencas pequeñas y que poseen grandes desniveles, y valores pequeños

CUADRO 2
DISTANCIAS A PARTIR DE LA MAYOR
ALTITUD (KM)

X_m	1.600	1.000	600	200
$d(x)$ km	19,15	221,27	795,70	874,78

para grandes cuencas con relieves poco acentuados, dando así una idea de la distribución del relieve de la cuenca, viene dada por

$$K_m = H_m / A,$$

donde K_m es el coeficiente de masividad, H_m la altura media de la cuenca y A el área de la cuenca.

Para el caso que estamos estudiando, resultó

$$K_m = 0,00917 \text{ m/km}^2.$$

3.5.8. Coeficiente orográfico

Resulta del producto de la altura media de la cuenca por el coeficiente de masividad. Este coeficiente nos muestra cuál es la influencia de la altura media o pendiente de la cuenca sobre la energía potencial del agua y sobre la escorrentía superficial, respectivamente:

$$K_o = H_m \cdot K_m,$$

en la que K_o es el coeficiente orográfico, K_m el coeficiente de masividad (en m/km^2) y H_m la altura media de la cuenca (en m), resultando para la cuenca del Duero el siguiente valor:

$$K_o = 8,17 \text{ m}^2/\text{km}^2.$$

4. Estudio del río Duero

4.1. Perfil del río más largo de la cuenca hidrográfica

Consiste en una curva que nos indica las longitudes del río más largo de la cuenca hidrográfica situados por encima o por debajo de las diferentes curvas de nivel (fig. 5).

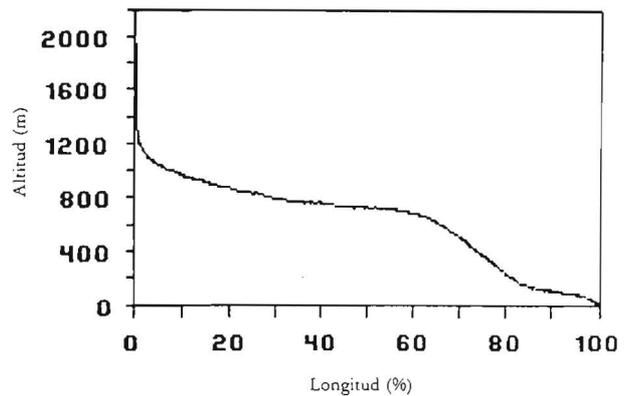


Figura 5.—Perfil del río más largo

4.2. Histograma de las longitudes

Da gráficamente la distribución de las longitudes del río más largo de la cuenca en función de la altitud. Utilizando los valores del cuadro 4, construimos el referido histograma (figs. 6 y 7).

CUADRO 4
LONGITUD Y PORCENTAJE DEL RIO DUERO

Altitud (en m)	Longitud (valores simples)		Longitud (valores acumulados)	
	km ²	%	km ²	%
> 2.000	1,68	0,19	1,68	0,19
1.800-2.000	1,02	0,12	2,70	0,31
1.600-1.800	1,32	0,15	4,02	0,46
1.400-1.600	1,65	0,19	5,67	0,65
1.200-1.400	5,26	0,60	10,93	1,25
1.000-1.200	65,07	7,39	76,00	8,64
800-1.000	198,30	22,52	274,30	31,16
600- 800	308,21	35,00	582,51	66,16
400- 600	67,08	7,62	649,59	73,78
200- 400	61,78	7,01	711,37	80,79
100- 200	98,76	11,21	810,13	92,00
0- 100	70,47	8,00	880,60	100,00

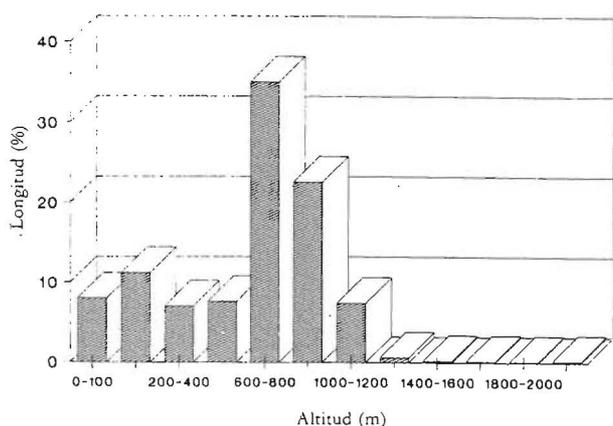


Figura 6.—Histograma de longitudes

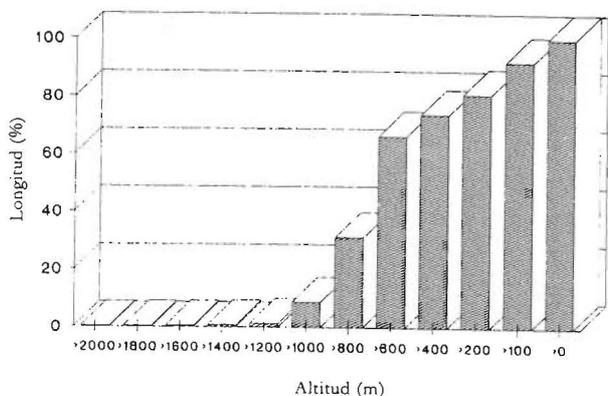


Figura 7.—Histograma de longitudes (valores acumulados)

4.3. Pendiente media del río

Viene dada por la siguiente expresión:

$$K_r = (H_u - H_m) / (10 \cdot L_r),$$

donde K_r es la pendiente media del río (%), H_u la altura máxima del río (m) y L_r la longitud del río (km), resultando para el río Duero el valor de

$$K_r = 0,24 \%$$

Calculamos ahora la pendiente media para las zonas del río comprendidas entre las alturas Δb ($b_2 - b_1$), indicadas en el cuadro 4, utilizando una expresión del tipo

$$K_r = \Delta b / (10 \cdot \text{longitud del río en el intervalo } b).$$

Obtuvimos los valores indicados en el cuadro 5.

CUADRO 5
PENDIENTE MEDIA DEL RIO MAS LARGO COMPRENDIDO ENTRE LAS CURVAS DE NIVEL

Δb (m)	K_b (Δb) (%)
2.200-2.000	11,90
2.000-1.800	19,61
1.800-1.600	15,15
1.600-1.400	12,12
1.400-1.200	3,80
1.200-1.000	0,81
1.000- 800	0,10
800- 600	0,06
600- 400	0,30
400- 200	0,32
200- 100	0,20
100- 0	0,28

5. Tiempo de concentración

Relativo a una sección dada del río, es el tiempo que el agua de precipitación lleva a recorrer el trayecto que va desde el punto más distante de la cuenta hasta la sección referida (WMO, 1965). Este concepto nos sirve para evaluar los caudales de inundaciones y para el estudio de los problemas de erosión. Nosotros calculamos el tiempo de concentración a través de fórmulas empíricas.

5.1. Fórmula de Giandoti

Definida (según Faria, 1978) como

$$T_c = (4 \cdot (A)^{1/2} + 105 \cdot L_r) / 0,8 \cdot (z)^{1/2},$$

en que A es el área de la cuenca (en km^2), L_r la longitud del río, desde su nacimiento a la desembocadura, Z la diferencia entre la altitud media de la cuenca y la altitud del río en la sección considerada (m) y T_c el tiempo de concentración (horas).

Para la desembocadura del río Duero fue de

$$T_c = 107,15 \text{ horas.}$$

$$(T_c = 4,046 \text{ días})$$

5.2. Fórmula de Torazza

$$T_c = 1,085 (A)^{1/2},$$

resultando

$$T_c = 338,22 \text{ horas.} \\ (T_c = 14,09 \text{ días})$$

5.3. Guía de la Organización Meteorológica Mundial (1965)

No existiendo mejor información, la *Guía de prácticas de hidroclimatología* (de la WMO, 1965) afirma que se puede considerar para la determinación del tiempo de concentración una velocidad de 1 m/s. Para la desembocadura del Duero tendremos:

$$T_c = 242,87 \text{ horas.} \\ (T_c = 10,11 \text{ días})$$

6. Conclusiones

Este estudio nos permitió determinar valores hidrográficos en secciones de interés, donde no haya datos de observación.

Calculamos el área de la cuenca de 97.170 km², el perímetro de 1.985 km y la longitud del río de 874,32 km.

Por el índice de compacidad de Gravelius deducimos que la cuenca es poco compacta, pues $K_c = 1,78$. El factor de forma $K_f = 0,13$ nos informa de que no está sujeta a inundaciones, pues se trata de una cuenca estrecha y larga.

El coeficiente de prolongamiento nos informa de la pendiente media. Con un valor de $R_s = 0,40$ se deduce que se trata de una pendiente pequeña, ya que de hecho no llega a los valores de 0,6 a 0,8, donde está establecido que ese coeficiente corresponda a grandes pendientes y la cuenca que estamos estudiando sólo presenta grandes pendientes en algunas partes, pero tiene una gran área en la penillanura con un 65 % del área total, que se sitúa entre los 600 y los 1.000 m.

Para conocer mejor el relieve de la cuenca, determinamos las curvas hipsométricas en porcentaje del área total, construimos los histogramas de áreas, la altitud media de la cuenca ($A_m = 890,80$ m) y el rectángulo equivalente. Ya que es usual admitir que una cuenca hidrográfica se comporta, desde el punto de vista hidrológico, de forma análoga a una cuenca rectangular con el mismo índice de compacidad de Gravelius, con las mismas curvas hipsométricas y constituidas por los mismos tipos de rocas, suelo y vegetación. Una vez determinado este rectángulo equivalente, nos fue de mucha utilidad para hallar la pendiente media ponderada del rectángulo. Acabamos con un mejor conocimiento del relieve con los cálculos de los coeficientes de masividad y orográficos.

Hicimos un estudio similar para el río determinando su perfil, los histogramas de las longitudes y el tiempo de concentración de las aguas, desde su nacimiento a la desembocadura, mediante fórmulas empíricas: Giandoti, Torazza y la de la WMO (1965). No observamos gran coherencia; en los resultados de estas tres sólo las dos últimas se aproximan un poco, por lo que concluimos que el número de días que las aguas del Duero tardan en recorrer la larga trayectoria desde su nacimiento a la desembocadura oscila de 10 a 14 días.

Este estudio nos permitió conocer de alguna manera la cuenca del Duero y su río principal en su integridad, presentando una área de 97.170 km², de los que 78.648 km² corresponden a España (81 %) y los restantes 18.522 km² (19 %) a Portugal. En cuanto al río, con una longitud de 874 km, recorre 195 km (22 %) en Portugal, 112 km (13 %) sirven de frontera y 567 km (65 %) se sitúan en España.

8. Bibliografía

FARIA, J. (1976): *Contribuição para o estudo hidroclimatológico da bacia hidrográfica do rio Vouga*, Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica, Lisboa, vol. 2, núms. 1 e 2 (Jan-Jun), pp. 14-28.

- (1978): *Contribuição para o estudo hidroclimatológico da bacia hidrográfica do rio Mondego*, INMG, Lisboa, vol. 1, núm. 1 (Julho), pp. 74-223.
- *et al* (1981): *Estudo hidroclimatológico de região do Algarve*, fascículo XXVII de «O clima de Portugal». Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica, Lisboa.
- GONÇALVES, D. (1985): *Contribuição para o estudo do clima da bacia superior do rio Sabor* (influência da circulação geral e regional na estrutura da baixa atmosfera), Instituto Universitário de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real.
- INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA (1974): *Mapa tectónico de la Península Ibérica y Baleares*, escala 1 : 1.000.000. Madrid.
- MIMOSO, L. J. J. (1986): *Monografias hidrológicas dos principais cursos de água em Portugal continental*, DGRAH, Lisboa, pp. 149-205.
- RÍOS, J. M. (1986): *Geología de España. Libro jubilar*, tomo II. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.
- WMO (1965): *Guide de to hydrometeorological practice*, núm. 168, TP 82.