

UN MÉTODO APROXIMADO PARA ESTIMAR CAUDALES MEDIOS MENSUALES EN PEQUEÑAS CUENCAS DE MONTAÑA

JOSÉ CARLOS ROBREDO SÁNCHEZ¹, IGNACIO ROJO NÚÑEZ²
Y JUAN ÁNGEL MINTEGUI AGUIRRE¹

RESUMEN

Se expone un método aproximado para determinar el caudal medio mensual en pequeñas cuencas de montaña, basado en la suma de los caudales superficiales y subterráneos medios mensuales. Los primeros estimados mediante unas correlaciones precipitación/escorrentía, establecidas a partir de un estudio, realizado por ROJO (2004), del comportamiento de dos pequeñas cuencas de montaña de la Sierra de Guadarrama (cuencas de los ríos Moros, 38,36 km², y Riaza, 36,43 km²) en el periodo 1966-80. Los segundos aplicando el procedimiento de THORNTHWAITE & MATHER (1955) extendido a toda la cuenca y también modificado por ROJO (2004). Los resultados obtenidos con el citado método en la sección de salida de las cuencas estudiadas, se compararon con las mediciones registradas en el periodo 1966-80 en las estaciones de aforo núm. 9 (río Riaza) y núm. 51 (río Moros) de la Confederación Hidrográfica del Duero. La simulación también se aplicó en la cuenca del arroyo del Romeral, 2,70 km², que discurre por el monte de la Jurisdicción en El Escorial, con los datos disponibles del periodo 1915-17 en una antigua estación foronómica, operativa a principios del siglo XX, ubicada en dicho arroyo. En los tres casos se comprobó la idoneidad del método propuesto.

Palabras clave: Escorrentías superficiales y subterráneas, conversión de escorrentías en caudales, relación entre la escorrentía superficial mensual y la precipitación mensual.

SUMMARY

An approximate method to determine the mean monthly flow in small mountain catchments is presented, which is based on the sum of mean monthly surface and groundwater runoff. Surface runoff was calculated from the rainfall-runoff correlation established by ROJO (2004) for two small mountain catchments in the Guadarrama mountain range (The Moros River basin, with 38.36 km², and the Riaza River basin, with 36.43 km²) in the period 1966-80. Groundwater runoff was calculated applying the THORNTHWAITE & MATHER (1955) procedure, extended to the whole catchment and modified by ROJO (2004). The results obtained with this method were compared with

¹ Universidad Politécnica de Madrid; E. T. S. Ingenieros de Montes; Departamento Ingeniería Forestal; Unidad de Hidráulica e Hidrología; Ciudad Universitaria s/n, 28040 MADRID. josecarlos.robredo@upm.es

² Dirección General de Medio Ambiente. Región de Murcia. 30008 MURCIA.

Recibido: 02/11/2011.

Aceptado: 05/12/2011.

observed data at the study catchments outlet, using the flow gauges n° 9 (Riaza River) and n° 51 (Moros River) of the Duero River Basin Authority, in the period 1966-80. The simulation was also applied to the Romeral stream basin, of 2.70 km², which is located at the Monte de la Jurisdicción (Jurisdicción Forest) in El Escorial, using for comparison the available data from the period 1915-17, using the records of an old flow gauge, operative at the beginning of the 20th century. For all the three study cases, the suitability of the proposed method was proved.

Key words: surface and groundwater runoff; runoff-streamflow conversion; monthly surface runoff and monthly rainfall relationship.

INTRODUCCIÓN

El estudio del medio físico de las cuencas hidrográficas ha posibilitado el desarrollo de modelos cada vez más complejos, que permiten considerar la gran variabilidad de factores que condicionan el ciclo del agua, simular su dinámica y establecer modelos hidrológicos distribuidos con base física, como el SHE (ABBOT *et al.*, 1986) o el SHETRAN (EWEN *et al.* 2002) incluso el modelo de ROBREDO *et al.* (1994) más sencillo que los dos anteriores.

Sin embargo, estos modelos resultan muy complejos para aplicarlos en la mayoría de las cuencas forestales de montaña; muchas de ellas carentes de la información necesaria para alimentarlos y a posteriori para calibrarlos. Por otra parte, en la práctica tanto de la Hidráulica Torrencial como de la Hidrología Forestal en nuestro país, ha sido más frecuente el empleo de modelos hidrológicos integrados, orientados a fines específicos como el cálculo de caudales de avenida en determinadas secciones de un cauce torrencial; como el modelo CAUDAL3 desarrollado por ROBREDO (1993).

Dado que los caudales ordinarios de los cursos de montaña presentan cada día mayor interés, tanto como base hidrológica para interpretar los caudales ecológicos, como para servir de referencia en la instalación de minicentrales en las áreas de montaña, entre otros usos posibles; el cubrir la necesidad de estimarlos con una aproximación razonable, fue el objetivo del modelo desarrollado por ROJO (2004) en la memoria de su tesis doctoral: «Modelo para

estimar las disponibilidades hídricas en una cuenca de carácter forestal. Aplicación a las cuencas de los ríos Moros y Riaza» que posteriormente lo simplificó parcialmente ROJO *et al.* (2009).

Ante la frecuencia de eventos torrenciales (precipitaciones o fusiones del manto de nieve) que inciden en las áreas de montaña, el conocimiento de los caudales máximos de crecida que corresponden a la escorrentía superficial presenta especial relevancia; pero también resulta importante estimar los caudales ordinarios asociados a la escorrentía sub-superficial o subterránea, que son más estables y uniformes en el tiempo y en definitiva suponen mayores aportaciones de agua.

OBJETIVO

Se pretende establecer un método aproximado y sencillo para determinar el caudal medio mensual en pequeñas cuencas de montaña, basado en la suma de los caudales superficiales y subterráneos medios mensuales. Los volúmenes de agua correspondientes a los primeros se estiman mediante unas correlaciones precipitación/escorrentía, establecidas a partir del estudio del comportamiento de dos pequeñas cuencas de montaña de la Sierra de Guadarrama (cuencas de los ríos Moros y Riaza) realizado por ROJO (2004) para el periodo 1966-80. Los segundos aplicando el procedimiento THORNTHWAITE & MATHER (1955) extendido a una cuenca por ROJO (2004). El método se estructura de modo que pueda aplicarse utilizando una información general básica (la que normalmente facilita la

Agencia Estatal de Meteorología), como son los valores medios mensuales de temperaturas y precipitaciones.

METODOLOGÍA

Fundamentos del método propuesto

El método propuesto para el cálculo del caudal mensual medio en pequeñas cuencas de montaña, se fundamenta en un modelo integrado desarrollado por ROJO (2004) en el transcurso de la investigación que condujo a la memoria de su tesis doctoral. El esquema de este modelo, mostrado en la Figura 1, presenta la siguiente estructura: *a)* un balance hídrico del agua en el suelo, para simular con ello el comportamiento del agua subterránea, cuyo desarrollo aparece en el lado izquierdo del esquema representado en la Figura 1, y *b)* un modelo de estimación de las escorrentías directas, que en la Figura 1 se representa por Q (mm), basado en datos diarios de precipitación y en la aplicación del método del Número de Curva del USDA SOIL CONSERVATION SERVICE (1956) para estimar la escorrentía superficial. La diferencia entre la precipitación registrada P (mm) y la escorrentía superficial Q

(mm), obtenida con el procedimiento comentado, establece la parte de la precipitación incorporada al suelo INF (mm). Estos cálculos se realizaron inicialmente con valores diarios (P_d , Q_d , inf); posteriormente por suma de los mismos se transformaron en mensuales (P , Q , INF)

Para el balance hídrico el autor utilizó el procedimiento de THORNTHWAITE & MATHER (1955), pero introduciendo como precipitación únicamente la parte de la misma incorporada al suelo INF (mm).

Sumando a la escorrentía unitaria mensual R (mm) procedente del agua subterránea, aportada por el balance hídrico a la salida de la cuenca, la escorrentía directa superficial unitaria mensual Q (mm), anteriormente calculada, se obtuvo la escorrentía unitaria mensual total ($R+Q$); que extendida a toda la superficie de la cuenca y utilizando las unidades adecuadas, proporcionó el caudal mensual medio a la salida de la cuenca ($m^3 \cdot s^{-1}$). Este valor se contrastó posteriormente con los valores aportados en el mismo periodo en los aforos situados a la salida de la cuenca.

Las variables de entrada (precipitación y temperatura media) se corrigieron ajustándolas a

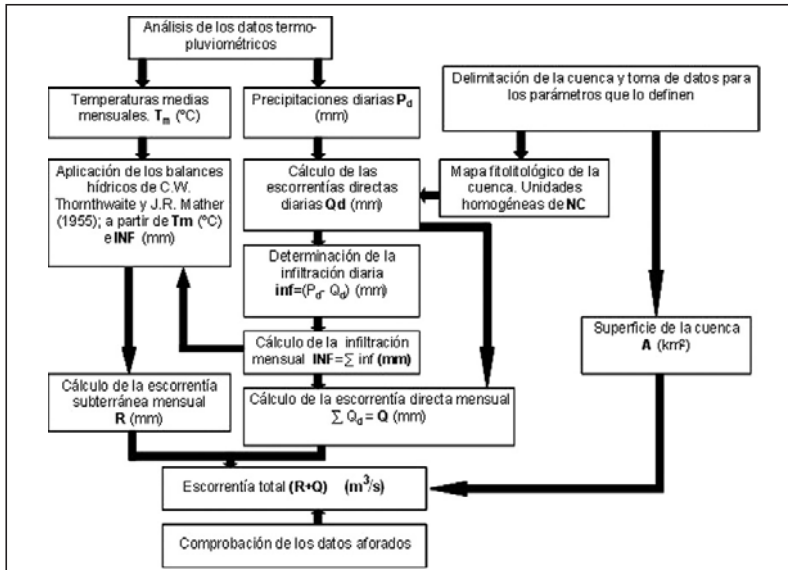


Figura 1. Esquema del modelo integrado propuesto para la determinación de los caudales medios continuos en una cuenca de montaña ROJO (2004).

Figure 1. Diagram of the integrated model proposed for continuous mean streamflow determination in mountain catchments, ROJO (2004).

una altitud correspondiente a la media de la cuenca vertiente y considerado las características medias de la misma; mientras que las variables resultado (caudales) se situaron en la sección de salida o sección final de la cuenca. Para la corrección de los valores meteorológicos aportados por las estaciones seleccionadas, se utilizaron los gradientes de 8% de precipitación y 0,65°C de temperatura, ambos por cada 100 m de incremento en altitud, propuestos por GANDULLO (1994).

Los resultados de la aplicación del modelo integrado a las dos pequeñas cuencas de montaña de la Sierra de Guadarrama (cuencas de los ríos Moros, 38,36 km², y Riaza, 36,43 km²) para el periodo 1966-80, se comprobaron con los caudales aforados en las secciones finales de las mismas cuencas, donde se ubican las estaciones núm. 51 en el caso del río Moros y núm. 9 en el caso del río Riaza de la Confederación Hidrográfica del Duero. El ajuste entre los caudales aforados y los simulados con el modelo integrado ROJO (2004) en dichas estaciones, se llevó a cabo para ambas cuencas utilizando los algoritmos siguientes: *Error Medio (EM)*, que define el sesgo de una población y tiene por valor óptimo el cero; mide el error medio sistemático entre las simulaciones y las observaciones COFFEY *et al.* (1999). Las unidades son las mismas en ambas variables.

$$EM = \frac{\sum_{i=1}^T ei}{T}$$

Error Cuadrático Medio (ECM), que permite comparar el ajuste entre los datos simulados y los datos observados. Las unidades son las mismas en ambos datos. Los mejores valores del *ECM* son los próximos a cero, ya que cuando *ECM* es cero la relación es perfecta, puede presentar cualquier valor positivo.

$$EMC = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^T (ei)^2}{T}}$$

Coefficiente de Eficiencia de Nash & Sutcliffe (CE), permite verificar el grado de relación 1:1 de los datos en análisis y fue establecido por NASH & SUTCLIFFE (1970). Su rango varía desde -∞ a 1. El valor uno indica el ajuste perfecto. Un valor mayor de 0,7 se considera como estadísticamente ajustado; pero la precisión de un modelo depende siempre de la aplicación requerida.

$$CE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^T (ei)^2}{\left(\sum_{i=1}^T (Q_{oi} - Q_{om})^2\right)}$$

En las ecuaciones anteriores sus términos representan:

$ei = Q_{si} - Q_{oi}$ donde: $1 \leq i \leq T$

Q_{si} el caudal simulado con el modelo en el instante de tiempo i .

Q_{oi} el caudal aforado (observado) en el instante de tiempo i .

Q_{om} el caudal medio de la serie aforada u observada

T , el tiempo total de la simulación-observación

En la cuenca del río Moros los algoritmos anteriores aportaron los valores siguientes:

$EM = -0,005$; $ECM = 0,348$; $CE = 0,459$

En la cuenca del río Riaza fueron:

$EM = -0,322$; $ECM = 0,349$; $CE = 0,412$.

Tratándose de los procesos que se analizan, estos valores representan un rango de ajuste apropiado, superior a los habituales en situaciones similares; lo que valida la adecuación del modelo para el objetivo previsto.

Pero la aplicación del modelo integrado de ROJO (2004) resulta muy compleja, pues precisa de precipitaciones diarias. El método propuesto a continuación simplifica este problema utilizando: a) para estimar el porcen-

taje de escorrentía directa mensual, unas regresiones lineales en función de la precipitación mensual, obtenidas a partir del análisis de los valores mensuales de escorrentía superficial, deducidas tras la aplicación diaria del procedimiento del NC del USDA. SOIL CONSERVATION SERVICE (1956) a las cuencas del río Moros y del río Riaza durante el periodo 1966-80 y su posterior integración a nivel mensual, ROJO (2004); *b*) para las escorrentías procedentes de aguas subterráneas, una extensión a la cuenca vertiente del procedimiento de THORNTHWAITE & MATHER (1955), en el que al dato de la precipitación mensual se le resta la cantidad de la escorrentía superficial o escorrentía directa; *c*) el caudal medio mensual resultante es la suma de la aportación superficial, calculada utilizando las regresiones comentadas, más la aportación estimada mediante el balance hídrico calculado según THORNTHWAITE Y MATHER (1955) con las modificaciones incorporadas a dicho procedimiento, anteriormente comentadas.

Información de partida

El método propuesto se ha aplicado también a las cabeceras de las cuencas de los ríos Moros (38,36 km²) y Riaza, (36,43 km²) ubicadas en la provincia de Segovia y a la cuenca del arroyo del Romeral, que discurre por el monte de la Jurisdicción en el término municipal de El Escorial en la provincia de Madrid. Todas ellas estaban provistas de estaciones de aforo en funcionamiento en las fechas que se realizaron

los estudios: 1966-80 en el caso de las cuencas segovianas y 1915-17 en la cuenca madrileña.

Evidentemente, tanto el modelo integrado como el método propuesto han precisado y precisan de información sobre el estado físico de las cuencas estudiadas. A continuación se comentan los elementos más significativos de las cuencas segovianas, que tienen mayor repercusión en los comportamientos hidrológicos de las mismas.

Las cuencas de los ríos Moros y Riaza están situadas en la vertiente norte del Sistema Central y sus características de forma y relieve son similares, presentando una altitud media de 1618 m y 1503 m snm respectivamente. Las caracterizaciones climáticas, edáficas y ecológicas de ambas cuencas fueron descritas por GANDULLO *et al.* (1976) y en el caso de la vegetación se corroboraron mediante un reconocimiento de campo posterior.

La clasificación en los tipos hidrológicos A, B, C y D (que se establece en el procedimiento del NC del USDA-SCS) de los suelos presentes en las citadas cuencas, se llevó a cabo a partir de un estudio geológico-litológico realizado a ambas cuencas en el transcurso de la tesis doctoral de ROJO (2004); completándose con la información edafológica de las mismas obtenida de los resultados de los análisis efectuados a cuatro muestras de suelo en el caso de la cuenca del río Moros y de cinco en el de la cuenca del río Riaza GANDULLO *et al.* (1976). El resultado de estas operaciones se sintetiza en la Tabla 1. En cuanto a los valores del NC se

Cuenca vertiente	Posición fisiográfica	Profundidad (cm.)	Textura	Perfil edáfico	Tipo de suelo según el SCS
Río Moros	Fondo de valle	100	Franco-arenosa	A(B)C	B-C
	Ladera	75-50	Franco-arenosa	AC	B-C
	Cumbre	25	Franco-arenosa	AC	D
Río Riaza	Fondo de valle	100-125	Franca	A(B)C	C
	Ladera	100-50	Franca	AC	C
	Cumbre	50-25	Franca	AC	C-D

Tabla 1. Tipos de suelos según la clasificación del USDA-SCS en las cuencas de los ríos Moros y Riaza.
Table 1. Soil types of the Moros and Riaza river basins according to the USDA-SCS classification.

asignaron en función de las distintas combinaciones de tipo de suelo y vegetación o uso del suelo en cada una de las diferentes zonas de ambas cuencas, como se muestra en la Tabla 2. Los valores medios de NC_{medio} para las mismas, en condición II (de humedad normal del suelo), fueron 73 para la cuenca del río Moros y 77 para la del río Rianza.

La capacidad media de retención de agua en el suelo, necesaria en el cálculo de los balances hídricos de ambas cuencas, se estimó también a través de los datos edafológicos disponibles, comentados anteriormente, estableciendo para definir las una $CC_{media} = 92$ mm.

Las restantes variables requeridas, tanto para el modelo integrado como para el método

propuesto, se obtuvieron a partir de la información meteorológica diaria o mensual (dependiendo de la información necesaria en cada situación) proporcionada por el Instituto Nacional de Meteorología (actual Agencia Estatal de Meteorología) y, en el caso concreto de de la cuenca del arroyo de El Romeral, de la información particular disponible CAMPO (1917). También se tuvo en cuenta, en el análisis de los datos diarios de precipitaciones y temperaturas, la posibilidad de existencia de un manto de nieve, que retardase la incorporación del dato de la precipitación al fenómeno de infiltración/escorrentía; así como la integración de los resultados a escala mensual. Todo ello contribuyó a establecer para las citadas cuencas una relación entre la precipitación mensual y la escorrentía directa (su-

CUENCA	Uso del suelo (vegetación)	SUELO	NC_i	Sup. (ha)	NC_{medio}
RÍO MOROS	Improductivo	-	98	14,00	
	Herbáceas	D	84	0,00	
	Herbáceas/arbustivas	C	86	700,00	
	Herbácea/arbórea/arbustiva	C	86	0,00	
	Herbácea/arbórea	C	86	0,00	
	Arbórea/arbustiva	C	86	0,00	
	Arbóreas en buen estado	B-C	63	941,00	
	Arbórea en regular estado	B-C	70	1.508,00	
	Arbóreas en mal estado	C	78	673,00	
TOTAL				3.836,00	73
RÍO RIAZA	Improductivo	-	98	46,00	
	Herbáceas	C	79	514,00	
	Herbáceas/arbustivas	C-D	77	1.622,00	
	Herbácea/arbórea/arbustiva	C-D	77	0,00	
	Herbácea/arbórea	C-D	78	0,00	
	Arbórea/arbustiva	C	78	0,00	
	Arbóreas en buen estado	C	70	235,00	
	Arbórea en regular estado	C	74	0,00	
	Arbóreas en mal estado	C	78	1.226,00	
TOTAL				3.643,00	77

Tabla 2. Números de Curva (NC_i) en las diferentes zonas de las cuencas de los ríos Moros y Rianza y Números de Curva medio (NC_{medio}) de cada una de las cuencas

Table 2. Curve Numbers (NC_i) for the different areas of the Moros and Rianza river basins and averaged Curve Number (NC_{medio}) for each watershed.

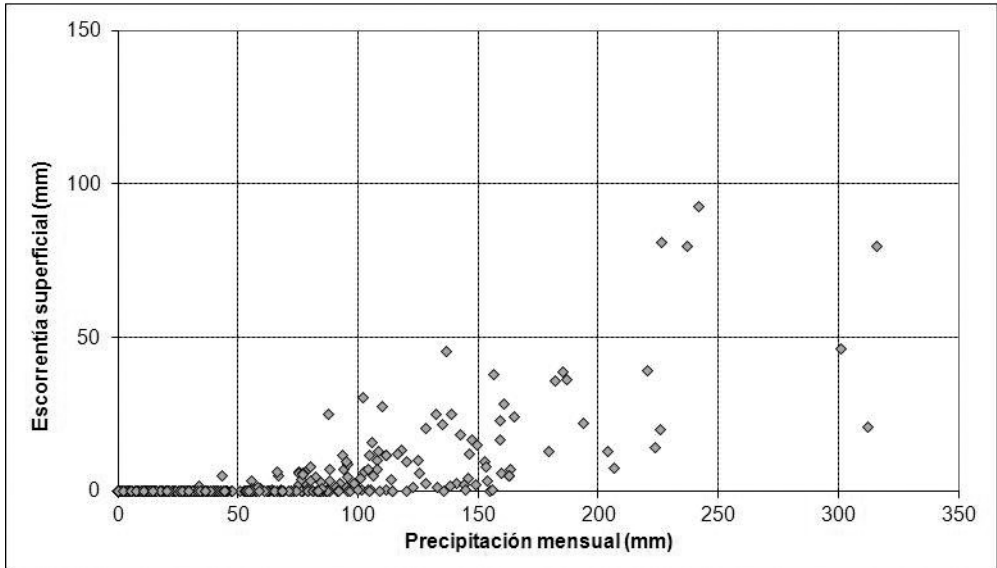


Figura 2. Datos estimados de escurrentía superficial mensual frente a los valores correspondientes de precipitación total mensual.
 Figure 2. Estimated monthly surface runoff Vs. total monthly precipitation

	Segovia-Observatorio núm. 2465		Navacerrada-Puerto núm. 2462	
Altitud	1005 m snm		1890 m snm	
MESES	Temperatura media: T_m (° C)	Precipitación P (mm)	Temperatura media: T_m (° C)	Precipitación P (mm)
ENE	4,30	47,71	-0,41	179,61
FEB	5,29	39,03	-1,04	189,01
MAR	6,45	42,17	-0,11	130,63
ABR	8,83	40,83	1,93	133,73
MAY	12,52	58,36	5,71	158,20
JUN	17,03	41,91	10,73	82,27
JUL	21,27	19,81	15,61	29,39
AGO	20,83	15,80	15,38	29,52
SEP	17,51	32,73	12,03	63,49
OCT	12,30	45,87	6,55	167,13
NOV	6,89	48,27	1,98	193,63
DIC	3,85	36,98	-0,37	160,38

Tabla 3. Valores de temperatura y precipitación media mensual interanual correspondientes a las estaciones meteorológicas de Segovia-Observatorio y Navacerrada-Puerto, para el periodo entre 1966 y 1980.

Table 3. Interannual mean monthly temperature and precipitation from weather stations of Segovia-Observatorio and Navacerrada-Puerto for the period 1966-1980.

perficial) mensual, que permite la aplicación del método objeto específico de este documento.

Esta relación entre precipitación mensual y escorrentía directa (superficial) mensual también ha permitido dar unos valores de *Porcentaje de Escorrentía Directa*, concepto utilizado por MONTERO DE BURGOS (1974) y que diferencia entre los dos posibles caminos de la precipitación, en principio muy distintos, como son la vía superficial (rápida) y la vía sub-superficial (lenta). En la Figura 2 se aprecian los valores de escorrentía directa estimados por ROJO (2004) y que han sido utilizados para establecer las regresiones mensuales.

En lo que sigue, para la información meteorológica se han utilizado los valores de la estación de Segovia-Observatorio (núm. 2465), situada a una altitud de 1005 m snm y la estación de Navacerrada-Puerto (núm. 2462), situada a una altitud de 1890 m snm, cuyos datos se muestran en la Tabla 3.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para la exposición de los resultados se establece la secuencia siguiente: *a)* los relativos a la estimación de los porcentajes mensuales de escorrentía directa o superficial Q (mm) a partir de los módulos pluviométricos mensuales P (mm) y *b)* los que se refieren a los caudales medios mensuales resultantes en la sección de salida de la cuenca.

Estimación de los porcentajes mensuales de escorrentía directa superficial Q (mm) a partir de los módulos pluviométricos mensuales P (mm)

Para deducir una regla general, a fin de obtener valores de la escorrentía directa superficial a partir de los datos mensuales de precipitación, se integraron los datos de las dos cuencas (las de los ríos Moros y Riaza) en un mismo bloque de información, para así obtener un criterio lo más generalizable posible, dentro de la limitación que supone trabajar con cuencas de

características similares.

Como regla general se observó que para precipitaciones mensuales bajas, la escorrentía superficial que cabe esperar es prácticamente nula. A partir del intervalo entre 75 a 100 mm aparece una aportación superficial directa a la red de drenaje.

Partiendo de este punto, se ajustó, para cada mes del año, una regresión lineal entre el valor de la precipitación mensual por encima del umbral de 75 mm y la escorrentía superficial estimada mediante el método del Número de Curva. La pendiente de estas regresiones se muestra en la Tabla 4. Analizando los meses por separado, se detectan cuatro grupos; cada uno de ellos con una tendencia determinada. Esta información puede servir de base para estimar la escorrentía directa mensual, partiendo de la precipitación del mes en entornos similares al estudiado. Los grupos mencionados son:

- 1) El que comprende los meses de julio, agosto y septiembre, en los que la escorrentía superficial es prácticamente nula, por tratarse de meses de escasa precipitación y con el perfil edáfico seco, que permitiría retener la precipitación de un evento torrencial intenso, aunque lógicamente aislado, si llegase ocurrir en algún momento. A esa tendencia prácticamente nula le corresponde una pendiente media para estos meses de 0,0237 mm/mm.
- 2) En el mes de octubre los valores de la escorrentía para precipitaciones superiores a 75 mm presentan una tendencia que se puede definir por una línea de 0,0819 mm/mm de pendiente. Esta baja respuesta señala la gran capacidad de retención de humedad que todavía presenta el suelo, tras un verano en el que se ha secado gran parte del mismo.
- 3) El formado por los meses de noviembre, diciembre, enero, febrero, marzo y abril en los que la respuesta de la escorrentía es máxima. En estos meses las precipitaciones pueden llegar a ser importantes y el suelo se encuentra cada vez más saturado por la es-

Meses del año	Pendiente	R2
Enero	0,3723	0,8871
Febrero	0,3062	0,1896
Marzo	0,3028	0,5744
Abril	0,4062	0,7513
Mayo	0,1805	0,7265
Junio	0,2191	0,0170
Julio	0,0110	-0,2666
Agosto	0,0301	-1,2297
Septiembre	0,0301	-0,0608
Octubre	0,0819	0,7973
Noviembre	0,2927	0,5284
Diciembre	0,3439	0,9492

Tabla 4. Pendiente de la línea de tendencia que relaciona la precipitación mensual por encima de 75 mm y la escorrentía superficial estimada mediante el método del Número de Curva para dicha precipitación; en la última columna aparece el coeficiente de correlación.

Table 4. Slope of the trend line relating monthly rainfall above 75 mm and surface runoff calculated from the Curve Number method; coefficient of correlation in the last column

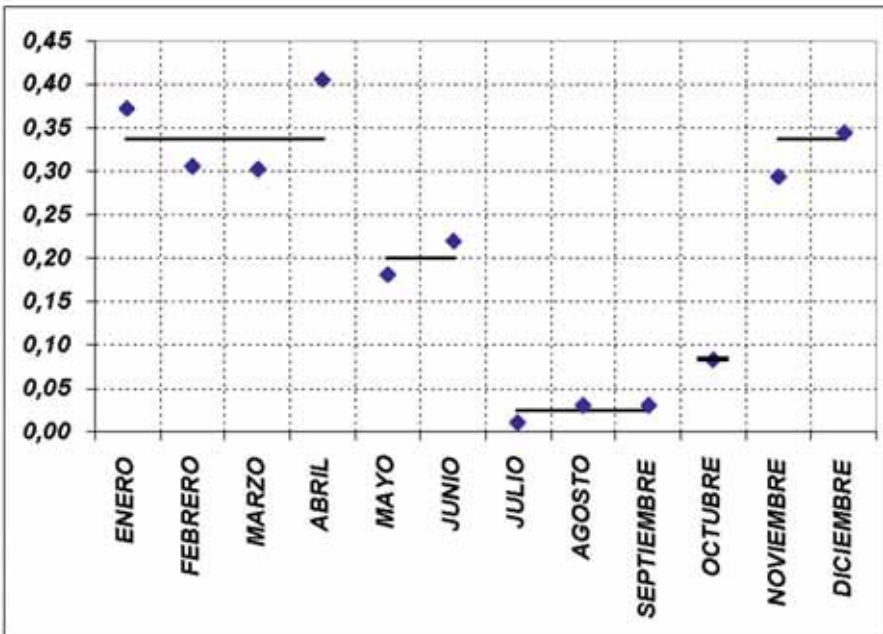


Figura 3. Representación gráfica de la pendiente de la línea de tendencia que relaciona la precipitación mensual por encima de 75 mm y la escorrentía superficial estimada mediante el método del Número de Curva; para cada mes y los valores medios para los cuatro grupos que se establecen a nivel anual.

Figure 3. Graphic representation of the trend line slope relating monthly rainfall above 75 mm and surface runoff calculated from the Curve Number method, shown by month and mean values for the four annual groups.

casa evapotranspiración debida a las bajas temperaturas del periodo. Para este intervalo del año la tendencia de la escorrentía superficial se puede representar, como un valor medio de todos los meses, por 0,3374 mm/mm de pendiente para una precipitación mensual que exceda de los 75 mm.

- 4) El que abarca los meses de mayo y junio, en los que la temperatura activa la evapotranspiración y contribuye al secado el suelo, lo suficiente como para que la respuesta de la escorrentía directa se reduzca con respecto a los meses anteriores. En este caso, la pendiente de la línea que representa la tenden-

cia de la escorrentía superficial resulta 0,1998 mm/mm.

La Figura 3 muestra los valores de la pendiente correspondiente a cada mes y la pendiente media de cada uno de los cuatro grupos establecidos. La información gráfica anterior se completa con la Figura 4 en la que, a modo de ejemplos, se muestra las tendencias de la correlación entre la precipitación mensual por encima de los 75 mm y la escorrentía directa para los meses de marzo, mayo, septiembre y octubre; ajustada a una regresión lineal, de la que se da su ecuación y coeficiente de correlación.

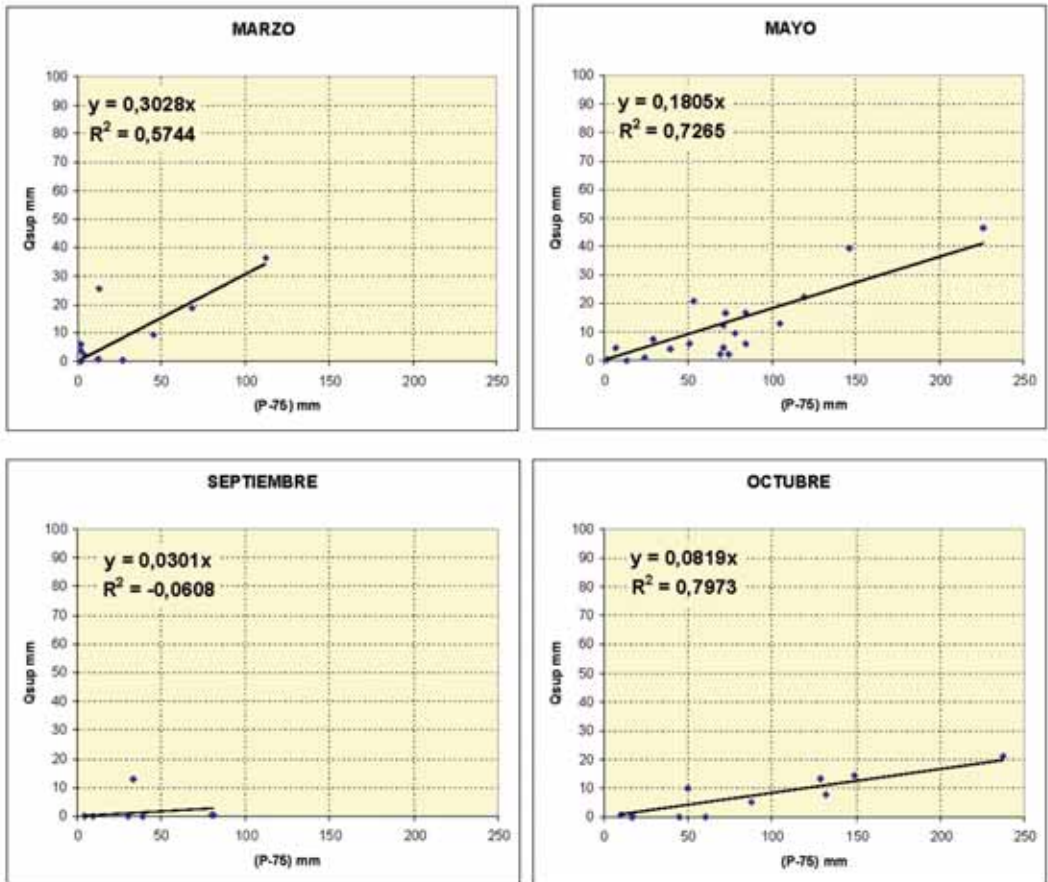


Figura 4. Distintas tendencias de respuesta en escorrentía superficial en función del módulo pluviométrico mensual, restados los primeros 75 mm del mismo.

Figure 4. Different trends for surface runoff response depending on the monthly rainfall rate after subtracting the first 75 mm.

Determinación de los caudales medios mensuales resultantes en la sección de salida de la cuenca

La determinación de los caudales medios mensuales en la sección de salida de la cuenca implica, además de estimar las escorrentías superficiales Q (mm), como se ha expuesto en el epígrafe anterior; estimar también las escorrentías subterráneas. Para estas últimas se aplicó el procedimiento de cálculo del balance hídrico de THORNTHWAITE & MATHER (1955), con la variante de introducir en su desarrollo la precipitación que realmente se incorpora al suelo $(P-Q) = INF$ (mm), en sustitución de la precipitación mensual P (mm). A través de este balance hídrico medio interanual se determina el valor de la escorrentía procedente del agua subterránea R (mm). A continuación la suma de las escorrentías $Q + R$ (mm) se transforma en caudal en la sección de salida de la cuenca en función de la superficie de ésta. Todos los

cálculos se realizaron con la información procedente de las estaciones meteorológicas: Segovia-Observatorio y Navacerrada-Puerto.

Los resultados obtenidos de los caudales medios mensuales en la sección de salida de las cuencas de cabecera de los ríos Moros y Riaza, obtenidos con el método propuesto y a partir de la información meteorológica indicada, se muestran en las Figuras 5 y 6; junto con las aportaciones reales de esas mismas cuencas registradas en sus correspondientes estaciones de aforo.

La Figura 5 muestra los resultados de los caudales medios mensuales obtenidos con el método propuesto utilizando la información de las estaciones de Segovia-Observatorio y Navacerrada-Puerto, comparados con los valores de sus aportaciones reales correspondientes. En la Figura 5 los datos meteorológicos, tanto de la precipitación como en la temperatura, están modificados en función del gradiente altitudinal para adaptarse al punto representativo de la orografía de cada una de las cuencas. En la Figura 6 los datos meteorológicos no han sido sometidos a ninguna modificación.

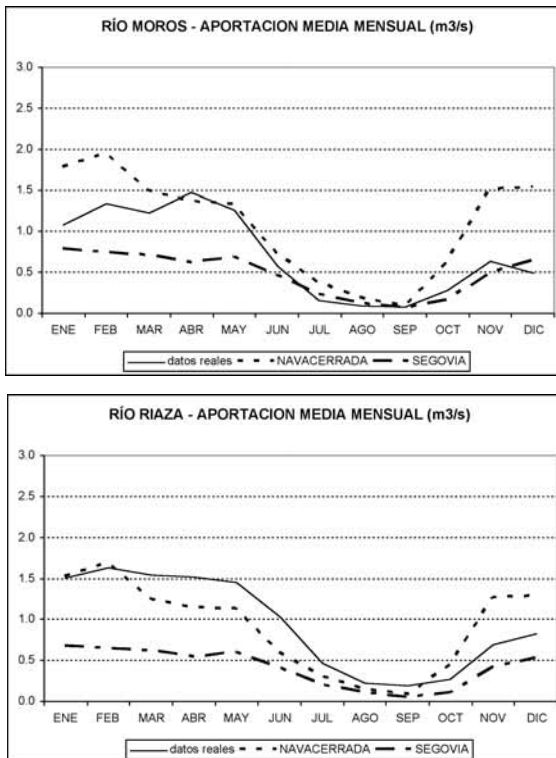


Figura 5. Caudales medios mensuales simulados a partir de los datos de las estaciones meteorológicas situadas en el entorno de las cuencas, modificando los datos originales en función de los gradientes altitudinales de precipitación y temperatura.

Figure 5. Mean monthly streamflow simulated using data from weather stations placed on the study basins surroundings, modifying the original data depending on the precipitation and temperature altitudinal gradient.

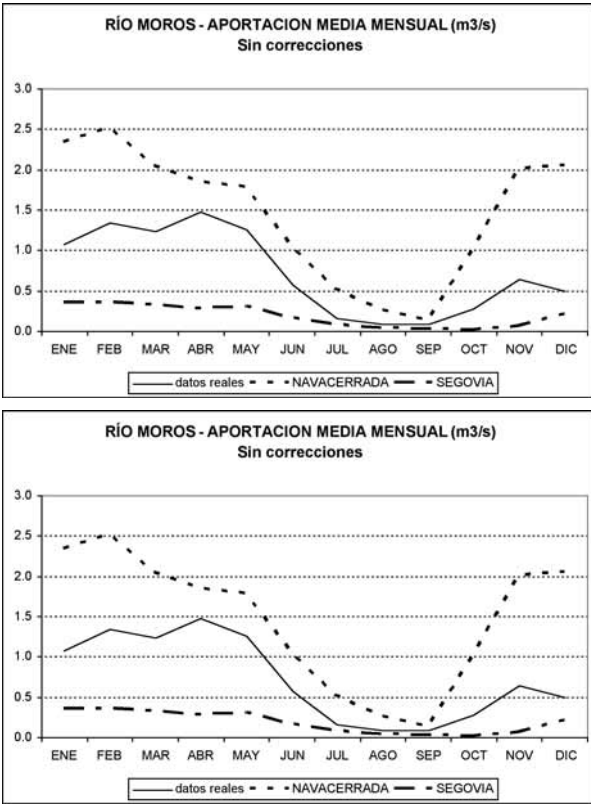


Figura 6. Caudales medios mensuales simulados sin modificar los datos originales en función de los gradientes altitudinales de precipitación y temperatura.

Figure 6. Mean monthly streamflow simulated without modifying the original data depending on the precipitation and temperature altitudinal gradient.

Se observa que, si bien en rasgos generales los datos corregidos de la estación de Navacerrada se ajustan mejor al balance de los caudales aforados en ambas cuencas, en los meses de verano y otoño quedan mejor representados con la información procedente de la estación de Segovia. Es importante hacer notar que en cualquier caso se mueve dentro del mismo orden de magnitud en los caudales y que, de no haberse realizado las correcciones comentadas, los resultados estarían más alejados de los registros reales, como se puede apreciar en la Figura 6.

Es evidente que los buenos resultados de la aplicación del método, radican en la disponibilidad de una información meteorológica que represente fielmente las condiciones a las que está sometida la cuenca en estudio y que los gradientes de corrección sean los adecuados.

Como se observa, la utilización de información de la zona puede proporcionar resultados aceptables; sin embargo, son claramente mejores o por lo menos indican que sería aconsejable buscar información de algún observatorio que reflejara mejor las condiciones del área en cuestión.

Cabría preguntarse si, en el caso de disponer de una información detallada de la precipitación y de la temperatura que se registran en la cuenca, el método podría mejorar los valores estimados y en que grado podría hacerlo.

Con esta finalidad se aplicó el método a una cuenca con información meteorológica detallada, aunque antigua. Se trata de la cuenca del arroyo del Romeral, situada en el monte de la Jurisdicción (San Lorenzo de El Escorial, Madrid). Esta cuenca estuvo instrumentalizada a

principios del siglo XX, cuando la entonces Escuela Especial de Ingenieros de Montes estaba ubicada en dicha localidad.

La cuenca disponía de siete pluviómetros repartidos por su superficie y en la sección de salida tenía una estación de aforos, hoy en día desaparecida, en el enclave de la Fuente de la Teja. Se ha considerado que el número de estaciones de registro y su localización a lo largo de la cuenca, permitían representar fielmente la meteorología a la que estuvo sometida la misma durante el periodo estudiado, desde septiembre de 1915 hasta agosto de 1917 (única información publicada de la época a la que se ha tenido acceso).

En este caso no se han corregido los valores de la precipitación y de la temperatura, dado que se han considerado directamente representados por los valores registrados sobre la superficie de la cuenca, limitándose a obtener un valor medio y aplicarlo posteriormente como

valor único representativo. En la Figura 7 se aprecia el buen ajuste obtenido, en este caso con la aplicación del balance hídrico de THORNTHWAITE & MATHER, en la estimación de las aportaciones del arroyo del Romeral y permite ser optimista en su aplicación a cuencas de características similares a las estudiadas.

CONCLUSIONES

1) Se ha presentado un método aproximado y sencillo para determinar el caudal medio mensual a la salida de una pequeña cuenca de montaña, basado en la suma de los caudales generados por las escorrentías superficiales y subterráneas. Las primeras, rápidas, estimadas mediante unas correlaciones precipitación/escorrentía –obtenidas a partir de un estudio del comportamiento hidrológico de dos pequeñas cuencas ubicadas en la vertiente norte de la Sierra de Guadarrama, realizado

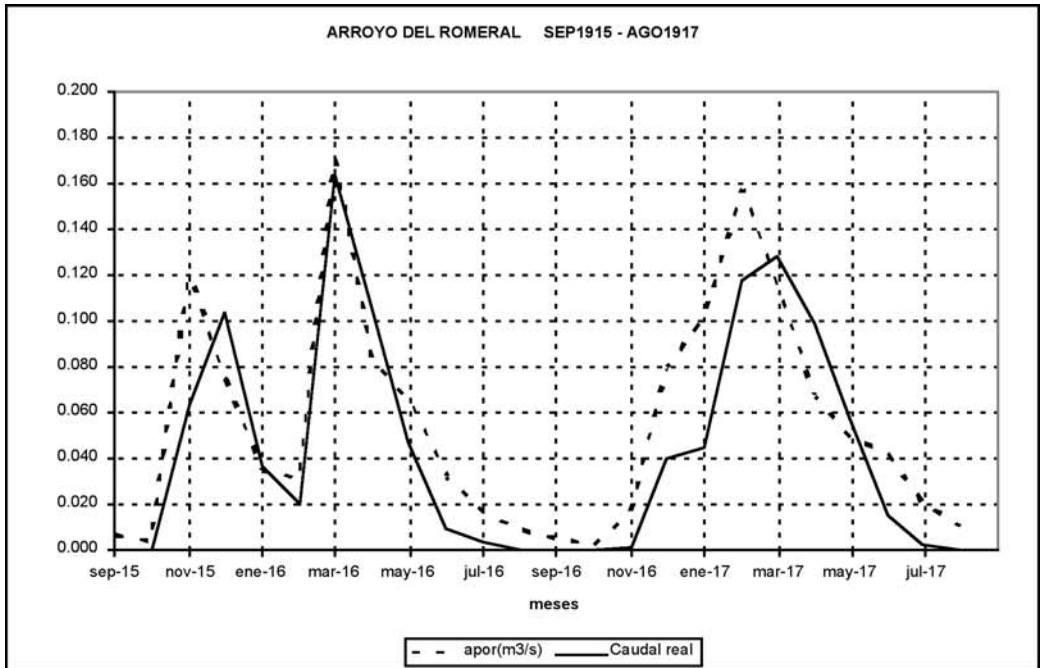


Figura 7. Simulación del caudal medio mensual en la cuenca del arroyo del Romeral.

Figure 7. Simulation of mean monthly streamflow in the Romeral stream basin.

por ROJO (2004)–. Las segundas, más dilatadas en el tiempo, utilizando el procedimiento del balance hídrico de THORNTHWAITE & MATHER (1955) con la modificación planteada por el propio método, que ha consistido en sustituir en el cálculo del balance hídrico la precipitación mensual P (mm) por la que realmente se incorpora al suelo INF (mm). Extendiendo ambas escorrentías a toda la cuenca, se han determinado sus correspondientes caudales en su sección de salida.

2) Para mejorar la aplicación del método, los datos de precipitación mensual y temperatura media mensual registrados en una estación meteorológica cercana a la cuenca en cuestión, se deben corregir atendiendo a la diferencia de altitud entre la mencionada estación y la altitud media de la cuenca. Se han realizado estos cálculos con datos de dos estaciones diferentes, una de altitud inferior a la de la cuenca y otra situada a mayor altitud, observando de esta forma el rango de variabilidad que puede aparecer al utilizar distintas estaciones de referencia, aplicando en ambos casos los mismos valores de gradiente, 8% de incremento de la precipitación por cada 100 m de aumento de altitud y 0,65 °C de disminución de la temperatura por cada 100 m de incremento de cota, propuestos como aproximación general por GANDULLO (1994). Se podrían haber utilizado los gradientes mensuales locales calculados a partir de los datos de las dos estaciones consideradas, pero el objetivo del método ha sido realizar una primera aproximación con la información más general disponible, asumiendo que en muchas ocasiones en la montaña no se dispone de un número de estaciones suficiente para calcular los gradientes locales.

3) En las tres cuencas analizadas (las de los ríos Moros y Riaza y la del arroyo del Romeral) el contraste entre los resultados obtenidos con la aplicación del método y los datos medidos en las estaciones de aforo situadas a la salida de las mismas, han aportado un buen ajuste dentro del orden de magnitud esperable en un procedimiento de primera aproximación, como es el que se facilita.

4) Se ha observado en la cuenca del río Moros que el gradiente de precipitación utilizado da mejores resultados cuando se aplica a los datos de la estación de Navacerrada, que cuando se aplica sobre los datos de la estación de Segovia durante los meses de febrero a junio, mientras que los datos de Segovia corregidos reflejarían mejor los meses de julio a enero. Sin embargo, en la cuenca del río Riaza ofrece mejores resultados la estación de Navacerrada a lo largo de todo el año.

5) Una aportación adicional surgida con el método propuesto ha sido que, al establecer las correlaciones entre la escorrentía mensual directa o superficial y la precipitación mensual, se han definido cuatro tipos de regresiones lineales claramente diferenciados por su pendiente, entre el valor de la precipitación mensual por encima del umbral de 75 mm y la escorrentía superficial estimada mediante el método del Número de Curva. Estas regresiones guardan una gran similitud con el concepto de *Porcentajes de Escorrentía Directa* definido por MONTERO DE BURGOS (1974) al establecer la capacidad bio-climática de una estación, lo que supone una información adicional en caso de plantearse la restauración hidrológico-forestal de la cuenca. A continuación se adjuntan las citadas regresiones:

- a) Noviembre-abril. Periodo de mayor respuesta de la escorrentía superficial o directa. Pendiente: 0,3374 mm/mm.
- b) Mayo-junio. Pendiente: 0,1998 mm/mm.
- c) Julio-septiembre. Periodo con una respuesta prácticamente nula de la escorrentía superficial. Pendiente: 0,0237 mm/mm.
- d) Octubre. Pendiente: 0,0819 mm/mm.

6) Por último, se ha tratado de diferenciar, en todo momento y con la mayor claridad posible, el modelo integrado elaborado por ROJO (2004) para estimar los caudales medios continuos en una cuenca de montaña y el método propuesto en este texto, que manteniendo el mismo objetivo, supone una simplificación del mismo. Conviene precisar que el método

propuesto se apoya en las regresiones establecidas entre la precipitación y escorrentía mensuales, obtenidas mediante un estudio del comportamiento del ciclo del agua en dos pequeñas cuencas ubicadas en la Sierra de Guadarrama, localizada en medio del Sistema Central; por lo que su aplicación se puede extender a dicho Sistema, pero no a otras cadenas montañosas de España, donde se requeriría de nuevas correlaciones precipitación-escorrentía obtenidas en pequeñas cuencas situadas en las mismas. El método tiene por tanto la virtualidad de poder extender el modelo integrado establecido por ROJO (2004) al entorno de las cuencas en donde ha sido aplicado.

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Nacional de Meteorología (actual Agencia Estatal de Meteorología) y a la Confederación Hidrográfica del Duero, por facilitar la información necesaria para realizar el modelo integrado para estimar los caudales medios continuos en una cuenca de montaña, ROJO (2004), cuya simplificación ha generado el método propuesto en este documento.

LISTA DE SÍMBOLOS

CC,	capacidad de retención de agua del suelo accesible por la vegetación en milímetros.
CC _{medio}	valor medio para la cuenca de la capacidad de retención de agua del suelo accesible por la vegetación en mm.
T _{m'}	temperatura media mensual corregida en altitud en °C.
P _{dr}	precipitación diaria corregida en altitud en mm.
P	precipitación mensual en mm.
Q _{dr}	escorrentía directa superficial diaria en mm.
Q	escorrentía directa superficial mensual en mm.
inf,	infiltración diaria en mm.
INF,	infiltración mensual en mm.
NC,	Número de Curva.
NC _{medio}	Número de Curva medio de la cuenca integrador de las características de suelo y vegetación existentes.
R,	aportación mensual de agua por escorrentía subterránea en mm.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBOTT, M. B., BATHURST, J. C., CUNGE, J. A., O'CONNELL, P. E. & RASMUSSEN, J. (1986). An introduction to the European Hydrological System - Systeme Hydrologique Europeen, SHE, 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system. *Journal of Hydrology*, 87, 45-49.
- CAMPO BARTOLOMÉ, M. (1915): Observaciones hidrológico-forestales en el monte «La Jurisdicción». *Selvicultura Española*. Madrid.
- CAMPO BARTOLOMÉ, M. (1917): Dos años de observaciones hidrológico-forestales en el monte «La Jurisdicción». *Selvicultura Española*. Madrid.
- COFFEY, M. E., WORKMAN, S. R., TARABA, J. L. & FOGLE, A. W. (1999). Procedures for evaluating daily streamflow predictions with the SWAT model, *ASAE*, 992104.
- EWEN, J., BATHURST, J. C., PARKIN, G., O'CONNELL, E., BIRKINSHAW, S., ADAMS, R., HILEY, R., KILSBY, C. & BURTON, A. (2002), SHETRAN physically-based distributed river basin modelling system. In: *Mathematical Modelling of Small Watershed Hydrology*, V.P. Singh, D. K. Frevert & S. P. Meyer (eds.). Water Resources Publications, Englewood, Colorado, USA, 43-68.
- GANDULLO, J. M., SÁNCHEZ PALOMARES, O. & GONZÁLEZ ALONSO, S. (1976): Contribución al estudio ecológico de la Sierra de Guadarrama. *An. INIA/ Serv. Recursos Naturales*.

- GANDULLO, J. M. (1994) *Climatología y ciencia del suelo*. Fundación Conde del Valle de Salazar. E. T. S. Ingenieros de Montes. Madrid, 403 pp.
- MINTEGUI, J. A. & ROBREDO J. C. (1993): *Métodos para la estimación de los efectos torrenciales en una cuenca hidrográfica. Manual para un programa básico*. Fundación Conde del Valle de Salazar. E. T. S. Ingenieros de Montes. Madrid, 88 pp.
- MISHRA, S. K. & SINGH, V. P. (2003) *Soil Conservation Service Curve Number Methodology*, Kluwer Academic Pub
- MONTERO DE BURGOS J. L. & GONZALEZ REBOLLAR J. L. (1974) *Diagramas Bioclimáticos*, ICONA - MAPA, 379 pp.
- NASH, J. E., SUTCLIFFE, J. V. (1970) River flow forecasting through conceptual models: I. A discussion of principles, *Journal of Hydrology*, 10, pp. 282-290.
- PONCE, V. M. (1989) *Engineering Hydrology: Principles and practices*, Prentice Hall. New Jersey, 640 pp.
- ROBREDO, J. C. & MINTEGUI, J. A. (1994) Diseño de un modelo distribuido elemental para el análisis del comportamiento hidrológico de una cuenca vertiente, *Ingeniería del Agua*. 1 (4), 79-102
- ROJO NÚÑEZ, I. (2004) Modelo para estimar las disponibilidades hídricas en una cuenca de carácter forestal. Aplicación a las cuencas de los ríos Moros y Riaza. Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería Forestal. E. T. S. Ingenieros de Montes. UPM, 215 pp.
- ROJO NÚÑEZ, I., ROBREDO SÁNCHEZ, J. C. & MINTEGUI AGUIRRE, J. A. (2009) Simplificación de un método para la estimación de caudales continuos en pequeñas cuencas de montaña, *5CFE01-410 Actas 5º Congreso Forestal Español: Montes y Sociedad: Saber qué hacer*; Ávila 21-25 septiembre, Editores SECF y Junta de Castilla y León, CD-ROM, 9 pp.
- THORNTHWAITE, C. W. & J. R. MATHER J. R. (1955): The Water Balance, *Publ. Climatol. Lab. Climatol. Drexel. Inst. Technol.* 8(1) 1-104.
- USDA SCS (1956) National Engineering Handbook, Hydrology, Section 4, Soil Conservation Service, US Department of Agriculture, Washington DC.