

NOTA TÉCNICA

INTEGRACIÓN PARAMÉTRICA DE VARIABLES AMBIENTALES EN MODELOS HIDROLÓGICOS EN LA COMUNIDAD VALENCIANA

Alfredo Blanco Andray, Otilio Sánchez Palomares y Agustín Rubio Sánchez

Universidad Politécnica de Madrid. E.T.S. de Ingenieros de Montes. Ciudad Universitaria s/n. 28040-MADRID (España). Correo electrónico: alfredo.blanco@upm.es

Resumen

En este trabajo, ensayado y aplicado en la Comunidad Valenciana, se proponen métodos de actuación para integrar la información ambiental más relevante en el funcionamiento hídrico de los ecosistemas forestales. Se utiliza un modelo hidrológico basado en el cálculo de balances hídricos del complejo suelo-vegetación que reutiliza sub-modelos de varios autores, aplicándolos a cada unidad elemental del territorio mediante la utilización de herramientas informáticas tipo GIS. Los resultados pueden ser muy relevantes para la gestión forestal, y ambiental en general, del territorio.

Palabras clave: *Balances hídricos, Infiltración, Escorrentía, SIG, Ecología paramétrica*

INTRODUCCIÓN

La relación existente entre el régimen de precipitaciones y los volúmenes de agua disponibles en ríos y arroyos ha suscitado siempre enorme interés. Los estudios de base se remontan a principios del siglo pasado (GREEN Y AMPT, 1911; HORTON, 1933, 1940; PHILIP 1957; KIRKHAM, 1947). Un aspecto clave ha sido profundizar en la dependencia entre las tasas de infiltración y el contenido previo de humedad del suelo (PHILIP, 1957; HOLTAN, 1961, 1975). Así mismo, se ha profundizado en la relación entre dicha infiltración y los tipos de cubiertas vegetales (HORTON, 1940; MUSGRAVE, 1955; MARSH, 1978; HUBER et al., 1981; LÓPEZ Y MINTEGUI, 1986; MINTEGUI Y ROBREDO, 1993). En especial destaca el método del N° de curva o N° hidrológico, propuesto por el Soil

Conservation Service del U.S.D.A. (1978), con sucesivas mejoras posteriores (PONCE, 1989). Todos estos conocimientos han tenido una gran repercusión en el manejo y gestión de aguas, utilizando la cuenca hidrográfica como unidad.

Los modelos hidrológicos basados en el cálculo de balances hídricos han tenido un notable desarrollo en los últimos años debido a la expansión de las herramientas y aplicaciones informáticas (SIG) que permiten procesar un número muy elevado de variables territoriales con un alto grado de precisión (BLANCO Y SÁNCHEZ, 2003; SAMPER et al., 2005; CORREA et al., 2005). La integración de variables clásicas, como son las de origen climático (precipitaciones, temperaturas, etc.), o geomorfológico (litologías, pendientes, etc.), junto con otras variables ambientales extraídas del complejo suelo-vegetación, contribuyen a perfeccionar la exactitud

de estos modelos, en la medida que crece el nivel de información disponible.

Por otro lado, los balances hídricos aplicables a un perfil de suelo, como pieza clave que son de dichos modelos hidrológicos, han alcanzado un grado de sofisticación tal que, si bien es necesario todavía profundizar en la consistencia de algunos procesos, arrojan un gran volumen de información sobre el comportamiento hídrico del suelo (THORNTHWAITE Y MATHER, 1957; PENMAN, 1948, 1963; CEREZUELA, 1977; MONTERO DE BURGOS Y GONZÁLEZ REBOLLAR, 1974; UNESCO, 1981; THOMAS, 1981, 1983; FRAGALA et al., 2005). Pero uno de los grandes escollos de los sistemas de balances hídricos estriba en evaluar con exactitud la capacidad de retención de agua del suelo. Por ello, algunos autores han puesto a punto métodos indirectos de cálculo para paliar este problema (SÁNCHEZ Y BLANCO, 1985; GANDULLO, 1985).

Finalmente, la simplificación que han propuesto algunos autores (CASTILLO et al., 1997a, 1997b; BLANCO et al., 1998, 2000) del método del N° de curva del Soil Conservation Service (U.S.D.A., 1978), permiten hacerlo aplicable a cada punto del territorio a partir de datos climatológicos proporcionados por la mayoría de los observatorios, y de información sobre la vegetación y el suelo proveniente de fuentes ya existentes o muestreos puntuales de campo. La aplicación de este modelo hidrológico a cada punto del territorio, combinado con el cálculo del balance hídrico del complejo suelo-vegetación, proporciona un volumen de información considerable sobre el funcionamiento hídrico del sistema, de gran utilidad no solo para la gestión forestal, sino para la gestión ambiental en general.

En este trabajo, valiéndose de los instrumentos teóricos anteriormente señalados, se pretende describir los fundamentos que sustentan la aplicación de un modelo hidrológico al territorio de la Comunidad Valenciana, destacando como resultados los valores cuantitativos más relevantes que arrojó dicha aplicación.

MATERIAL Y MÉTODOS

En este estudio, aplicado a todo el territorio forestal de la Comunidad Valenciana, se han

combinado tres modelos de cálculo: modelo de capacidad de retención de agua del suelo, según ideas de SÁNCHEZ Y BLANCO (1985) y GANDULLO (1985); modelo de infiltraciones y escorrentías, adaptación del método del n° de curva, según ideas de BLANCO et al. (1998, 2000); y modelo de balances hídricos, según ideas de GANDULLO (1985) y BLANCO et al. (1998, 2000)

La información utilizada ha sido la siguiente:

- Datos climáticos de precipitaciones mensuales, temperaturas mensuales, media de las máximas y media de las mínimas aplicados a una malla de puntos de 500 metros, elaborada por la empresa VAERSA.
- Modelos digitales de elevaciones (MDT) con malla de 25 metros.
- Cartografía de usos del suelo de la Comunidad Valenciana generada por VAERSA a partir del III Inventario Forestal Nacional, que utiliza el Mapa Forestal (MMA, 2010), como base cartográfica y del Sistema de Información Sobre Ocupación del Suelo en España (IGN, 2009).
- Cartografía correspondiente a 75 hojas del Mapa Geológico de España a escala 1:50.000 (IGME, 1972).
- Archivo de datos de días de lluvia por estaciones y años observados con datos mensuales, con un total de 274.025 registros para el total de la Comunidad Valenciana (CEAM, 1994).
- Base de datos de suelos FOREDAF, perteneciente a la Unidad de Ecología y Suelos de la ETS de Ingenieros de Montes de la Universidad Politécnica de Madrid. De ella, se han utilizado 57 perfiles de suelos correspondientes a la Comunidad Valenciana.
- Datos procedentes del muestreo de 58 perfiles de suelos distribuidos por la región.
- Base de datos de suelos de la fundación Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo (CEAM), suministrada por VAERSA.

Como herramienta informática se utilizó Arc-Gis 9.2.

Sobre la base del MDT, y mediante manipulación con GIS, se han obtenido las correspondientes coberturas de *altimetrías* y *pendientes*. Del Mapa Geológico de España se han extraído *clases litológicas* en diferentes niveles de concreción. A partir del Mapa Forestal y el SIOSE se han sintetizado los *usos del suelo* en diferentes

niveles de concreción. Los parámetros climatológicos obtenidos han sido: *precipitaciones medias mensuales, temperaturas medias mensuales y nº de días de lluvia al mes y cuantía del aguacero medio máximo mensual*. Por integración de los datos colectados de suelos, litologías y usos del suelo, y mediante el establecimiento de varios modelos predictivos que aluden a diferentes combinaciones de litología-vegetación, se ha calculado la *capacidad de retención de agua del suelo (CRA)*. Y, como resultado de la aplicación del modelo de balances hídricos (que, a su vez, incorpora el submodelo de precipitaciones y escorrentías), se han obtenido los siguientes parámetros climo-edáficos: *escorrentía superficial, infiltración, evapotranspiración real, reserva de agua del suelo y drenaje interno* (también llamado, drenaje profundo). Posteriormente, para una mejor visualización e interpretación, todos los parámetros estudiados se han discretizado en clases o intervalos, susceptibles de proporcionar salidas cartográficas impresas.

Todos los parámetros derivados del balance hídrico vienen expresados en forma cuantitativa ($l \cdot m^{-2}$) para cada punto (o celda) del territorio. Esto permite extraer resultados globales para superficies más amplias (provincias) o incluso para la totalidad de la Comunidad Valenciana mediante una operación relativamente sencilla de realizar: Puesto que se conoce el valor de los parámetros anteriormente calculados en cada celda de ($25 \times 25 = 625 m^2$), el volumen de agua (precipitada, escurrida, infiltrada, etc.) en cada celda c_i será $y_i = 625 \times x_i l \cdot m^{-2}$. Esto último permitirá la representación cartográfica de los resultados. Y el volumen total para una superficie de territorial de n celdas, será la suma individualizada de todas las celdas de esa superficie: $\sum y_i$ (de $i = 1$ hasta n). Es lo que se ha denominado *balance hídrico* global.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Dado, como es sabido, el gran volumen de información y salidas cartográficas que genera el tratamiento con GIS, solo se destacan algunos resultados por su especial relevancia.

El tipo de uso más representado en la Comunidad es “no arbolado (matorral o/y pastizal, humedales)”, con poco más de un 31% de

superficie total. Los usos netamente forestales “arbolado claro”, y “arbolado denso”, representan otro 20% del territorio total. Castellón posee tanta superficie de bosques densos como Valencia y Alicante juntos (Figura 1).

La tasa de precipitación media anual es relativamente moderada (350 – 550 mm) en más del 50% de la Comunidad, y realmente escasa (<350 mm) en casi un 15% del territorio. La provincia de Alicante recibe menos de 350 mm en más del 50% de su territorio (Tabla 1).

El máximo aguacero medio mensual se produce en la zona NE de Alicante y en el SW de Valencia.

En el conjunto de la Comunidad, hay más del 40% de superficie con suelos cuya CRA es inferior a 150 mm, lo que constituye una cifra claramente desfavorable (Figura 2).

Sorprende que las escorrentías más graves no solo se producen en las áreas de mayor pendiente, como es el caso del norte de la provincia de Alicante, sino en zonas de muy escasa pen-

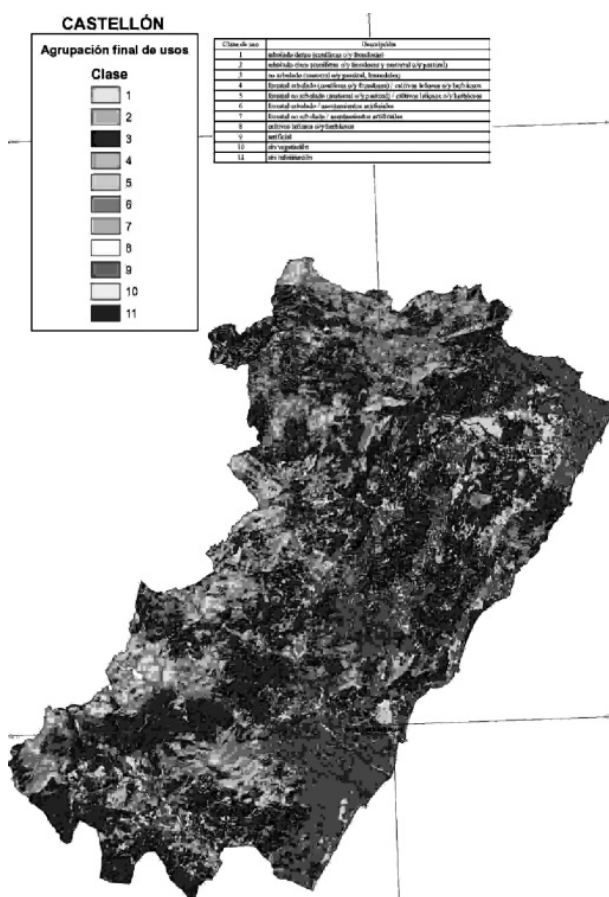


Figura 1. Usos del suelo de la provincia de Castellón

P. anual (mm)	Provincia						Total comunidad	
	Alicante		Castellón		Valencia			
	ha	% del total provincia	ha	% del total provincia	ha	% del total provincia	ha	% del total comunidad
< 350	309.033	53.07	0	0.00	0	0.00	309.033	13.28
350 - 450	83.980	14.42	59	0.01	220.619	20.40	304.658	13.09
450 - 550	55.822	9.59	352.664	53.15	600.710	55.55	1.009.197	43.37
550 - 650	58.315	10.01	273.150	41.17	180.600	16.70	512.065	22.00
> 650	75.159	12.91	37.645	5.67	79435	7.35	192.239	8.26
Totales	582.309	100.00	663.519	100.00	1.081.365	100.00	2.327.193	100.00

Tabla 1. Precipitación media anual por provincias y comunidad

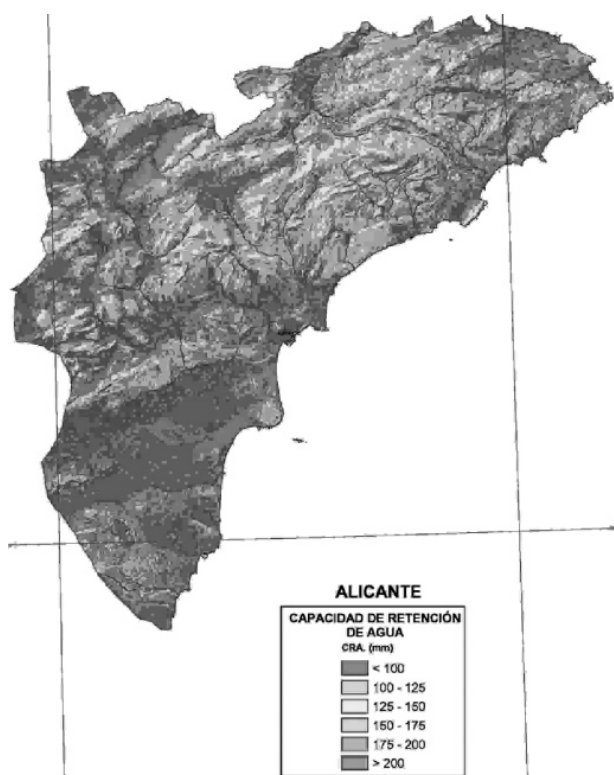


Figura 2. Capacidad de Retención de Agua. Provincia de Alicante

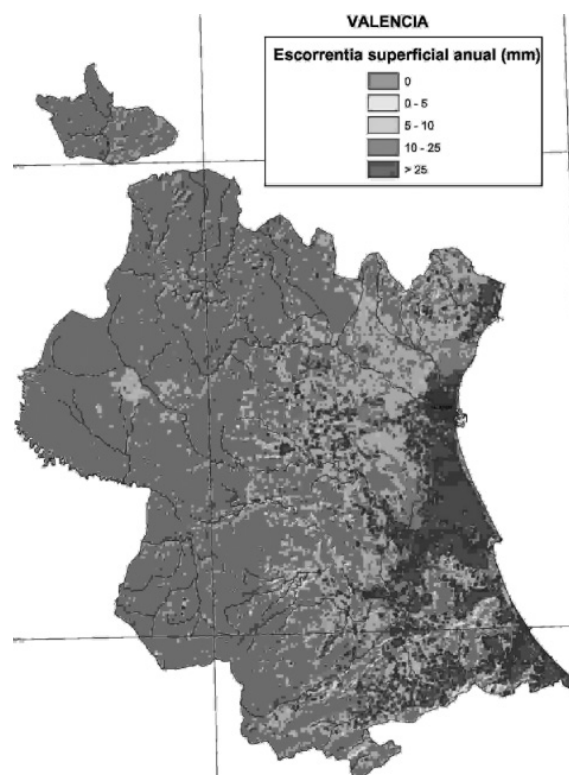


Figura 3. Escorrentía Superficial. Provincia de Valencia

diente (todo el entorno costero al sur de Valencia y el entorno de Castellón), seguramente por la escasa protección del suelo u otras circunstancias, a priori no fácilmente detectables, pero contempladas en el modelo (Figura 3).

La provincia con mayores niveles de agua infiltrada en el terreno es la de Castellón; le siguen Valencia y Alicante, por orden decreciente.

Los territorios con mayor reserva media de agua en el suelo se encuentran en el centro-norte de la Comunidad (norte de Alicante y sur de Valen-

cia) y en el norte de Castellón, con valores superiores a 100 mm. Por el contrario, más de la mitad-sur de Alicante, posee unos niveles ínfimos de humedad media en el suelo (<20 mm) (Figura 4).

Destaca que en, casi un 50% de la Comunidad, no hay drenaje de agua a los acuíferos; esto es especialmente relevante en Alicante, donde cerca del 70% de la provincia no contribuye con agua a los acuíferos subterráneos. Las zonas que registran mayor drenaje interno (por tanto, mayor recarga de acuíferos) se sitúan, de

nuevo, en la sierra norte de Alicante, en el sur de Valencia y en las sierras del norte de Castellón. Todas ellas registran drenajes superiores a los 50 mm por año (Figura 5).

Y a modo de síntesis, vale la pena destacar el *balance hídrico global* de la Comunidad:

El territorio de la Comunidad valenciana recibe una precipitación total de 11.667,815 hm³ por año. De esta cantidad, 151,75 hm³ (1,3%) escurre superficialmente y, junto con las aguas subsuperficiales, alimenta a ríos y arroyos y nutre a los embalses. La práctica totalidad del agua se infiltra en el terreno (98,7%).

Un 4,7% de la lluvia caída drena a los acuíferos y va a incrementar, por tanto, las reservas subterráneas; un 11,4% constituye la reserva media de agua en el perfil edáfico del suelo; finalmente, el consumo de agua por las plantas y la evaporación del terreno (ETRM) suponen el 94%.

Se observa que la mayor parte del agua es evaporada o consumida por la vegetación, lo que, en principio, teniendo en cuenta la región climática de este estudio, es un resultado coherente con lo esperado.

Por otro lado, las aguas de escorrentía superficial, ciertamente escasas, (junto con la fracción difícilmente estimable de aguas subsuperficiales de circulación lateral), son las responsables de alimentar corrientes de agua (ríos) y láminas superficiales (embalses). Pese a su escasa representatividad en el balance global son, por otro lado, de notable poder erosivo, por la forma de producirse (eventos aislados) y por la desprotección del terreno.

A escala provincial, Valencia, en parte por ser la provincia de mayor extensión de la Comunidad, es la que recibe mayor aporte hídrico total de precipitaciones (PT). Sin embargo, en relación a la lluvia precipitada, es Alicante la que contribuye a generar más escorrentías superficiales (ESC) y Castellón la que menos. Asimismo, Alicante es la provincia que mayor porcentaje de agua infiltrada envía a los acuíferos, como delatan los valores de drenaje interno (DREN). Y también, Alicante, es la provincia en la que más secos se encuentran habitualmente sus suelos, como delata el bajo valor de la reserva media de agua del suelo (RES) (Tabla 2).

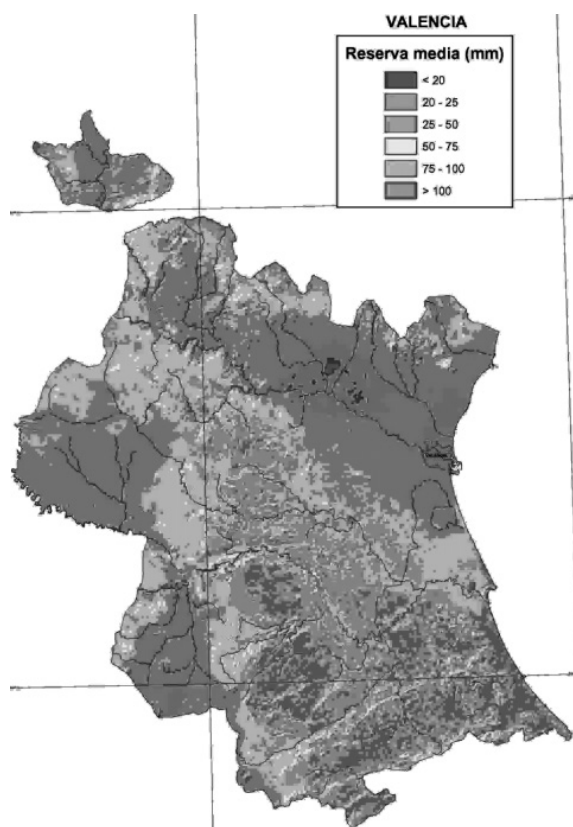


Figura 4. Reserva media de Valencia

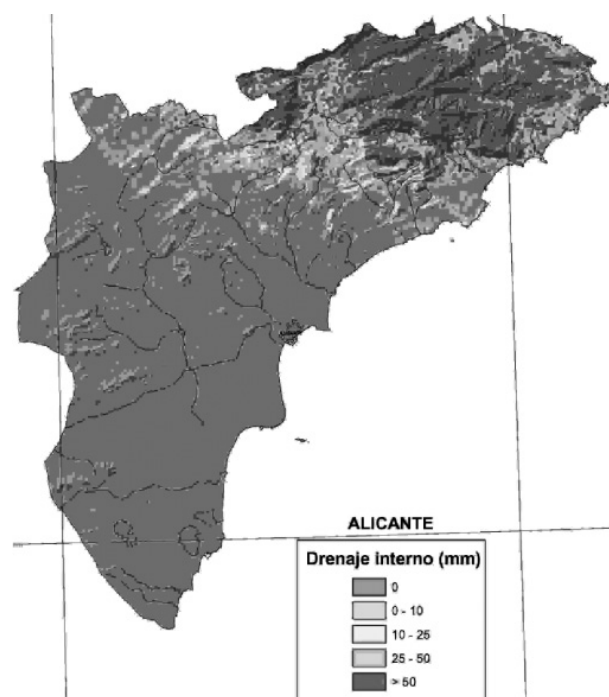


Figura 5. Drenaje interno. Provincia de Alicante

PARAM. HIDROL.	Provincia								Total Comunidad	
	Alicante		Castellón		Valencia		hm ³	% respecto a PT*		
	hm ³	% respecto a PT*	hm ³	% respecto a PT*	hm ³	% respecto a PT*			hm ³	% respecto a PT*
PT	2.430,015	100	3.703,150	100	5.534,649	100	11.667,815	100		
INF	2.385,773	98,2	3.679,836	99,4	5.450,556	98,5	11.516,166	98,7	100	
ESC	44,228	1,8								
DREN	158,194	6,5	179,764	4,9	208,544	3,8	546,502	4,7		
RES	197,727	0,8	466,231	12,6	666,604	12,0	1.330,562	11,4		
ETRM	2.227,431	91,7	3.499,051	94,5	5.241,342	94,7	10.967,824	94,0		

Tabla 2. Balance hídrico global del territorio, por provincias y comunidad. PT: Precipitación total INF: Infiltración ESC: Escorrentía superficial DREN: Drenaje interno RES: Reserva media de agua del suelo ETRM: Evapotranspiración real. *Aunque todos los porcentajes están calculados respecto a la precipitación total, solo el conjunto de la infiltración y escorrentía han de sumar 100 (los demás parámetros son subconjuntos de la infiltración)

Agradecimientos

Este estudio ha sido posible gracias a un convenio suscrito entre VAERSA y la Universidad Politécnica de Madrid, a través de la Fundación Conde del Valle de Salazar, en el año 2009. Nuestro especial agradecimiento a Javier de Vicente López, Jefe de Área de Planificación de VAERSA, que puso todos sus medios a nuestra disposición.

BIBLIOGRAFÍA

- BLANCO, A.; MARTÍNEZ, S. Y CISNEROS, C.; 1998. Un modelo de balances hídricos para cuencas hidrográficas: discusión, propuesta y aplicaciones. *TEMAS de Ciencia y Tecnología* 2(6): 11-20.
- BLANCO, A.; MARTÍNEZ, S.; SÁNCHEZ, O.; RUBIO, A.; CISNEROS, C.; PEDRO, E.; MORALES, R. Y SUSTAITA, F.; 2000. Aplicación de un modelo de balances hídricos en la cuenca alta del río Mixteco y determinación del binomio infiltración / escurrimiento con vistas a la reconstrucción de sus ecosistemas forestales. *Memoria del V Foro Estatal de Investigación Científica y Tecnológica*: 107-109. Oaxaca.
- BLANCO, A. Y SÁNCHEZ, O.; 2003. Discussion of a Detailed infiltration/runoff Model and its Extension to a Whole Watershed. *Actas de la Conference on Water and Society-Needs, Challenges, and Restrictions*. Vienna.
- CASTILLO, V.; MARTÍNEZ MENA, M. & ALBADALEJO, J.; 1997a. Runoff and soil loss response to vegetation removal in semiarid environment, *Soil Sci. Am. J.* 61(4): 1116-1121.
- CASTILLO, V.; MARTÍNEZ MENA, M. Y ALBADALEJO, J.; 1997b. Validez del método del n° de curva para el cálculo de caudales de escorrentía en áreas mediterráneas semiáridas. En: F. Puertas y M. Ribas (eds), *Actas del I Congreso Forestal Hispano-Luso y del II Congreso Forestal Español-IRATI 97*, II: 235-240. Gráficas Pamplona. Pamplona.
- CEAM; 1994. *Registros meteorológicos de la Fundación CEAM*. Comunidad Valenciana. Valencia.
- CEREZUELA, F.; 1977. *Evaporación y microclimas de la vertiente mediterránea del sur de España*. Universidad de Málaga. Málaga.
- CORREA, A.M. Y DÍAZ, C.H.; 2005. *Tesis: Implementación del Modelo Thomas para el Balance Hídrico Empleando la Herramienta Computacional HidroSIG-Java*, Capítulo 2. Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ingeniería.
- FRAGALA, F.; OBREGÓN, N., CARO, C.; FLECHAS, F. Y GARCÍA, O.; 2005. Aproximación a la estimación de la recarga de acuíferos mediante optimización matemática multidimensional de un modelo de balance hídrico. *Seminario Internacional La Hidroinformática en la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos*.
- GANDULLO, J.M.; 1985. *Ecología vegetal*. Fundación Conde del Valle de Salazar. E.T.S. de Ingenieros de Montes. Madrid.

- GREEN Y AMP.; 1911. Cit. en Mintegui, J.A. y López, F., 1990.
- HOLTAN, H.N.; 1961. Cit. en Mintegui, J.A. y López, F., 1990.
- HOLTAN, H.N.; 1975. *A formulation for quantifying the influence of soil porosity and vegetation on infiltration*. UNESCO SC 75WS/100. París.
- HORTON, R.E.; 1933, 1940. Cit. en Mintegui, J.A. y López, F., 1990.
- HUBERT *et al.*; 1981. Cit. en Mintegui, J.A. y López, F., 1990. Cit. en López Cadenas, F. y Mintegui, J.A., 1986.
- IGN; 2009. *Sistema de Información Sobre Ocupación del Suelo en España*. Instituto Geográfico Nacional, Ministerio de Fomento. Madrid.
- IGME; 1972. *Maga Geológico de España 1:50.000*. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid.
- KIRKHAM; 1947. Cit. en Mintegui, J.A. y López, F., 1990.
- MARH, W.M.; 1978. *Environmental analysis for land use and site planning*. Mc Graw-Hill. New York.
- LÓPEZ CADENAS, F. Y MINTEGUI, J.A.; 1986. *Hidrología de Superficie*. Tomo I. Fundación Conde del Valle de Salazar. E.T.S. Ingenieros de Montes. Madrid.
- MMA; 2010. *Mapa Forestal de España E 1:50.000*. Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino. Madrid.
- MINTEGUI, J.A. Y LÓPEZ, F.; 1990. *La Ordenación Agrohídrológica en la Planificación*. Gobierno Vasco. Vitoria-Gasteiz.
- MINTEGUI AGUIRRE, J.A. Y ROBREDO SÁNCHEZ, 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. ETSI Montes. Madrid.
- MONTERO DE BURGOS, J.L. Y GONZÁLEZ REBOLLAR, J.L.; 1974. *Diagramas bioclimáticos*. ICONA. Madrid.
- MUSGRAVE, G.V.; 1955. How much of the rain enters the soil?. *In: The Yearbook of Agriculture*: 151-159. U.S. Dept. Agriculture. Washington.
- PENMAN, H.L.; 1948. Natural evaporation from open water, bar soil and grass. *Proc. Roy. Soc.*, A 193: 120.
- PHILIP; 1957. Cit. en Mintegui, J.A. y López, F., 1990.
- PONCE, V.M.; 1989. *Engineering Hydrology. Principles and Practices*. Prentice Hall. New Jersey.
- SAMPER, J.; GARCÍA, M.A.; PISANI, B.; ALVARES, D.; VARELA, A. Y LOSADA, J.A.; 2005. Modelos hidrológicos y sistemas de información geográfica para la estimación de los recursos hídricos: Aplicación de gis-balan a varias cuencas españolas. *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo Vol VII*. F.J.
- SÁNCHEZ, O. Y BLANCO, A.; 1985. Un modelo de estimación del equivalente de humedad de los suelos. *Montes* 4: 26-30.
- THOMAS; 1981, 1983. Cit en Correa, A.M. y Díaz, C.H. 2005.
- THORNTHWAITE, C.W. & MATHER, J.R.; 1957. *Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance*. Laboratory of Climatology, Publication nº 10. Centertown.
- UNESCO; 1981. *Methods for Water Balance Computation*. "Studies and Reports in Hydrology", No 17. UNESCO. París.
- U.S.D.A.; 1978. Soil Conservation Service. *Predicting rainfall erosion loesses. A guide to conservation planning*. Agriculture Handbook 537. Washington D.C.