

## DINÁMICA ESPACIO-TEMPORAL DE LA HUMEDAD DEL SUELO EN UN ÁREA DE MONTAÑA MEDITERRÁNEA. CUENCAS EXPERIMENTALES DE VALLCEBRE (ALTO LLOBREGAT)

P. Llorens, J. Latron y F. Gallart

Institut de Ciències de la Terra 'Jaume Almera'. CSIC. Solé i Sabarís, s/n. 08028 Barcelona. pllorens@ija.csic.es

**RESUMEN.** La humedad volumétrica del suelo, utilizando el método TDR, se viene registrando desde 1993 en las cuencas experimentales de Vallcebre con la finalidad de evaluar sus variaciones espacio-temporales y establecer relaciones con los procesos hidrológicos. Los registros de humedad del suelo se realizan semanalmente en 10 perfiles representativos de las diferentes unidades geocológicas definidas. Estos perfiles constan de sondas de 20 cm insertas verticalmente en el suelo a 4 profundidades (entre 0 y 80 cm). Los resultados obtenidos muestran que la posición topográfica y el tipo de cubierta vegetal (bosque o pastos) son los principales factores que controlan los patrones de humedad del suelo. La variabilidad espacial de la humedad entre perfiles es mínima en condiciones de sequía y de saturación, registrándose las máximas diferencias en condiciones intermedias. La información obtenida ha sido utilizada para determinar la reserva hídrica a escala de cuenca a partir de una metodología basada en la combinación de la información topográfica (MDE) y de cubiertas vegetales (mapa de usos del suelo) con los registros de humedad del suelo medidos en las diferentes unidades representativas. La reserva de agua a escala de cuenca obtenida con este método es difícil de validar. Sin embargo, tanto su correlación con los niveles freáticos medidos, como la coherencia de los balances de agua mensuales en los que esta reserva ha sido incorporada, confirman la validez de la metodología elaborada.

**ABSTRACT.** Since 1993 soil water content has been measured in Vallcebre catchments using TDR technique in order to analyse soil water content spatial and temporal variability. Measurements were made weekly in 10 profiles representative of different geocological units. These profiles have four 20 cm length probes vertically inserted (between 0 and 80 cm). Results showed that topography and vegetation cover (forest or pasture) are the main factors controlling soil water content patterns. Spatial variability of water content is minimal in dry conditions and during saturation periods, contrarily the greatest differences have been observed in intermediate conditions.

This information has been used to determine the soil

water reserve at the catchment scale using a methodology based on the combination of topographic (DEM) and vegetation cover (land use map) information with soil water content measurements performed in the representative profiles. The catchment water reserve obtained is difficult to validate. Eventhough, its high correlation with measured phreatic levels and the coherence of monthly water balances performed using this information confirm the validity of the method.

---

### 1. Introducción

La importancia del conocimiento del contenido de agua en el suelo está ampliamente reconocida en hidrología (por ej. Grayson et al., 1997; Famiglietti et al., 1998; Bárdossy y Lehmann, 1998). Su influencia en los procesos hidrológicos condiciona fuertemente el funcionamiento de una cuenca, tanto a escala de crecida como a nivel del balance de agua. Sin embargo, a pesar de un gran número de trabajos de campo (véase la revisión de Famiglietti et al., 1998), los resultados obtenidos son a veces divergentes y hasta contradictorios. Según Famiglietti et al. (1998), una visión coherente de la variabilidad espacio-temporal de la humedad del suelo, y de los factores que la controlan, no está actualmente disponible.

En este contexto, los objetivos del presente estudio se concretan en: (a) la evaluación de las variaciones espacio-temporales de la humedad del suelo con la finalidad de establecer relaciones con los procesos hidrológicos y el balance hídrico. (b) la determinación de la reserva de agua en el suelo a escala de cuenca con la finalidad de establecer balances de agua a escala de tiempo inferior al año hidrológico.

2. Material y métodos

2.1. Área de estudio

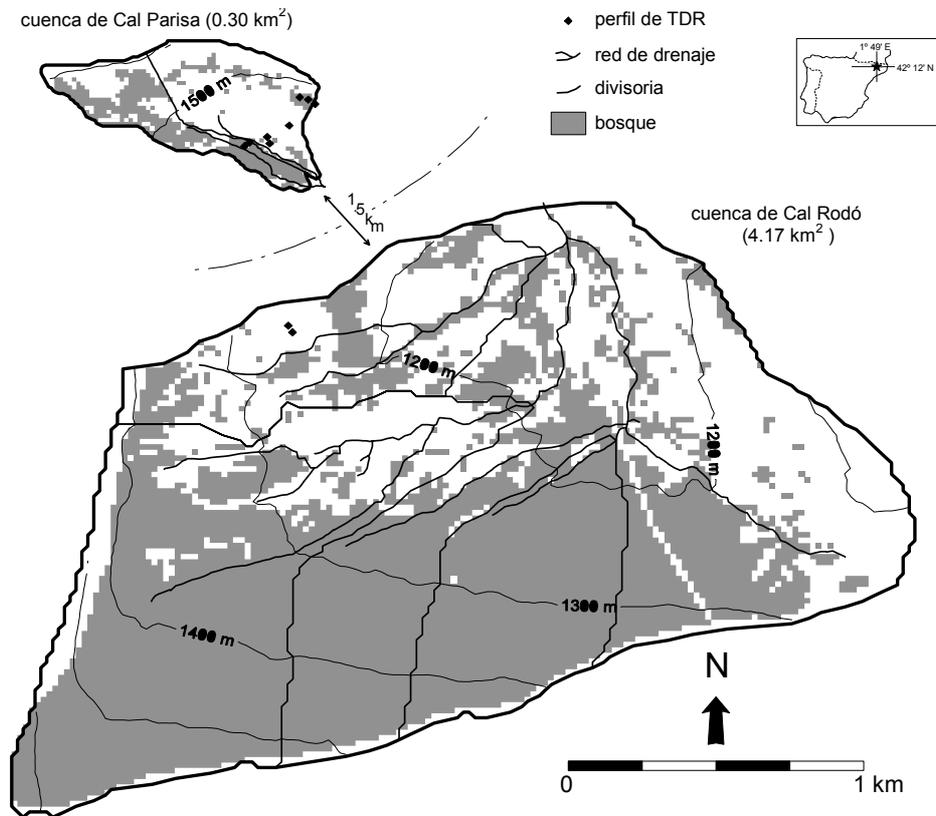
Las cuencas experimentales de Vallcebre están situadas en el Prepirineo catalán. El substrato geológico lo forman arcillas, margas y calizas continentales del Paleoceno. El clima es mediterráneo montano con una precipitación media anual de 924 mm y una evapotranspiración de referencia de 700 mm. La mayor parte de las vertientes fueron aterrazadas para el uso agrícola, sufriendo un progresivo abandono desde mediados del siglo XX. En la actualidad una parte importante de los cultivos abandonados han dado lugar la extensión de la cubierta forestal gracias a la forestación espontánea por *Pinus sylvestris* (Poyatos et al., en prensa).

El conjunto de cuencas experimentales de Vallcebre lo forman 6 cuencas aforadas con tamaños entre 0.16 y 4.17 Km<sup>2</sup>, tres se incluyen en la cuenca de Cal Rodó y las otras dos forman la cuenca de Cal Parisa (fig. 1) (Gallart et al., 1998).

La instrumentación de las cuencas se inició en 1989 (Llorens y Gallart, 1992), aunque el presente artículo se basa en la instrumentación puesta en marcha en 1994 (Gallart et al., 1997) que consta, además de los perfiles de medición de la humedad del suelo que se describen en el siguiente apartado, de 2 estaciones meteorológicas, 12 pluviómetros registradores, 6 estaciones de aforo, 8 piezómetros y una parcela de medición de interceptación y transpiración forestal.

**Tabla 1.** Características geocológicas de los perfiles de medición de la humedad del suelo. Los símbolos corresponden a la leyenda de los gráficos.

	WPT <sub>1</sub>	WPT <sub>2</sub>	WPT <sub>3</sub>	WVT <sub>1</sub>	WVT <sub>2</sub>	WPC <sub>1</sub>	WPC <sub>2</sub>	WPF <sub>1</sub>	WPF <sub>2</sub>	WPF <sub>3</sub>
Cuenca	Cal Parisa	Cal Parisa	Cal Parisa	Cal Rodó	Cal Rodó	Cal Parisa				
Unidad	terracea	terracea	terracea	terracea	Terraza	vertiente	vertiente	vertiente	vertiente	vertiente
Situación en terraza	central	externa	hondonada	interna	central	-	-	-	-	-
Cubierta vegetal	pastos mesófilos	pastos mesófilos	pastos hidrófilos	pastos mesófilos	pastos mesófilos	claro en bosque	claro en bosque	bosque	bosque	bosque



**Fig. 1.** Mapa de situación de las cuencas de Cal Parisa y Cal Rodó. En la cuenca de Cal Parisa se realizan las medidas de humedad del suelo para el cálculo de la reserva en la cuenca de Cal Rodó.

## 2.2. Medición de la humedad del suelo

Los perfiles de suelo a monitorizar fueron seleccionados considerando de un lado la posición topográfica de cada perfil y de otro lado el tipo de cubierta vegetal, dentro de cada unidad geocológica previamente diferenciada (tabla 1, fig. 1). Los registros de humedad volumétrica del suelo se realizan semanalmente en 10 perfiles, que constan de cuatro sondas de 20 cm cada una, insertas verticalmente en el suelo a 4 profundidades (0-20, 20-40, 40-60 y 60-80 cm), utilizando un probador de cables Tektronix 1502C (Rabadà, 1995).

## 2.3. Cálculo de la reserva

La metodología presentada (basada en un SIG) es simple y solo necesita, además del contenido de agua del suelo, un Modelo Digital de Elevación (MDE) y un mapa de los usos del suelo. El procedimiento consiste, en primer lugar, en identificar dentro de la cuenca de Cal Parisa los perfiles de TDR (Time Domain Reflectometry) que tienen unas características (situación topográfica y cubierta vegetal) parecidas a aquellas encontradas en la cuenca de Cal Rodó. 5 perfiles han sido finalmente utilizados: WPF<sub>1</sub>, WPF<sub>2</sub>, WPC<sub>1</sub>, WPT<sub>1</sub>, WPT<sub>3</sub> (tabla 1). A continuación, 2 tratamientos distintos se han efectuado en paralelo: (a) elaboración de un mapa de clases de humedad del suelo combinando la información topográfica (MDE) y la relativa a los usos del suelo. Para este tratamiento se han realizado 2 pasos intermedios: el cálculo del índice topográfico (Beven y Kirkby, 1979) de la cuenca que indica el grado de saturación de cada píxel, y la simplificación del mapa de usos del suelo. (b) elaboración de un mapa de profundidades del suelo que permite un cálculo más ajustado de la reserva de agua, entendida como la cantidad de agua almacenada en un perfil (en mm). Este mapa se obtiene, como el anterior, de la combinación del MDE y del mapa de usos del suelo. En este caso también se han realizado 2 pasos intermedios: la obtención de un mapa con 3 unidades geomorfológicas y la de un mapa de pendientes. El mapa de profundidades se elabora utilizando para cada unidad geomorfológica una relación pendiente/profundidad calibrada a partir de perfiles sísmicos de refracción realizados en la cuenca.

Finalmente, combinando el mapa de clases de humedad del suelo con el mapa de profundidades del suelo, se obtiene el mapa de clases de reserva de agua en el suelo donde cada píxel tiene definido el perfil de TDR correspondiente (entre los 5 inicialmente seleccionados) así como la profundidad de suelo a la que tienen que aplicarse los valores de humedad para el cálculo de su reserva de agua. El cálculo de la reserva a escala de cuenca se realiza entonces integrando el valor de la reserva calculada para cada uno de los píxeles.

## 3. Resultados y discusión

### 3.1. Variabilidad de la humedad del suelo

El análisis de la estabilidad temporal, de la humedad del suelo (Vachaud et al., 1985) nos permite definir la persistencia de un modelo de comportamiento de cada perfil de medida respecto al resto de los perfiles estudiados a lo largo del tiempo.

La figura 2 muestra los 10 perfiles estudiados ordenados de más secos a más húmedos en función del valor de la 'diferencia relativa' en cada caso. Podemos observar unas diferencias relativas significativas a ambos lados de la media. Estas son mayores en el caso de los perfiles más húmedos, llegando a más del 50% para el perfil WPT<sub>3</sub> que se mantiene gran parte del año saturado, y son menores para los perfiles más secos, llegando a valores del -20%. Cabe destacar aquí que los 4 perfiles más secos corresponden a perfiles bajo bosque, mientras que los perfiles en vertiente tienen los valores próximos a la media y los perfiles en terrazas son diferentes entre ellos tendiendo a ser bastante más húmedos que la media.

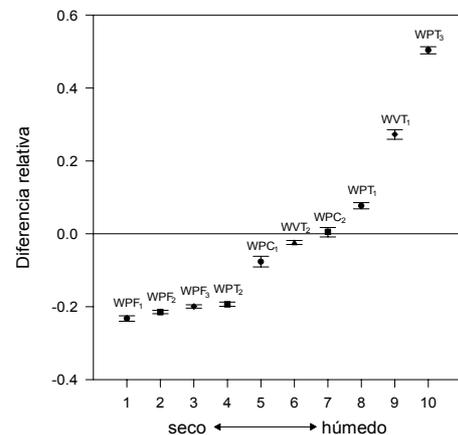


Fig. 2. Ordenación de los perfiles de humedad del suelo, de más seco a más húmedo en función de la diferencia relativa entre el valor medio (y error estándar) de cada perfil y el promedio de todos los perfiles.

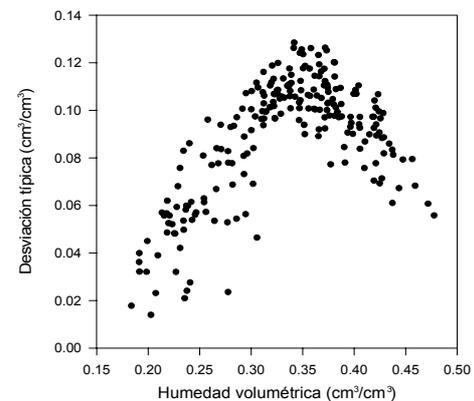


Fig. 3. Relación entre la humedad volumétrica media y su variabilidad (desviación típica). Cada punto corresponde a un día de medición.

La representación de la relación entre la humedad volumétrica media y su variabilidad (desviación típica)

para cada semana de medida nos permite analizar las variaciones espacio-temporales de la humedad (fig. 3).

Este análisis pone de manifiesto que en condiciones muy secas o de saturación, los perfiles son más similares, y es en condiciones intermedias, en nuestro caso entre 0.30 y 0.40 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup> cuando se registran las mayores diferencias entre perfiles. El análisis de la estacionalidad de la humedad del suelo para el período de estudio está descrito en Gallart et al. (2002).

### 3.2. Reserva de agua a escala de cuenca

El mapa de clases de reserva de agua en el suelo (fig. 4) elaborado tal como se describe en la metodología es la información distribuida de base que permite determinar a partir de las medidas de humedad la reserva de agua en la cuenca de Cal Rodó o alguna de sus subcuencas. Esta aproximación, aunque de utilidad, tiene sus limitaciones, como pueden ser el papel primordial que se le atribuye a la topografía, o el no disponer de información de humedad del suelo a mayor profundidad (Latron, 2003).

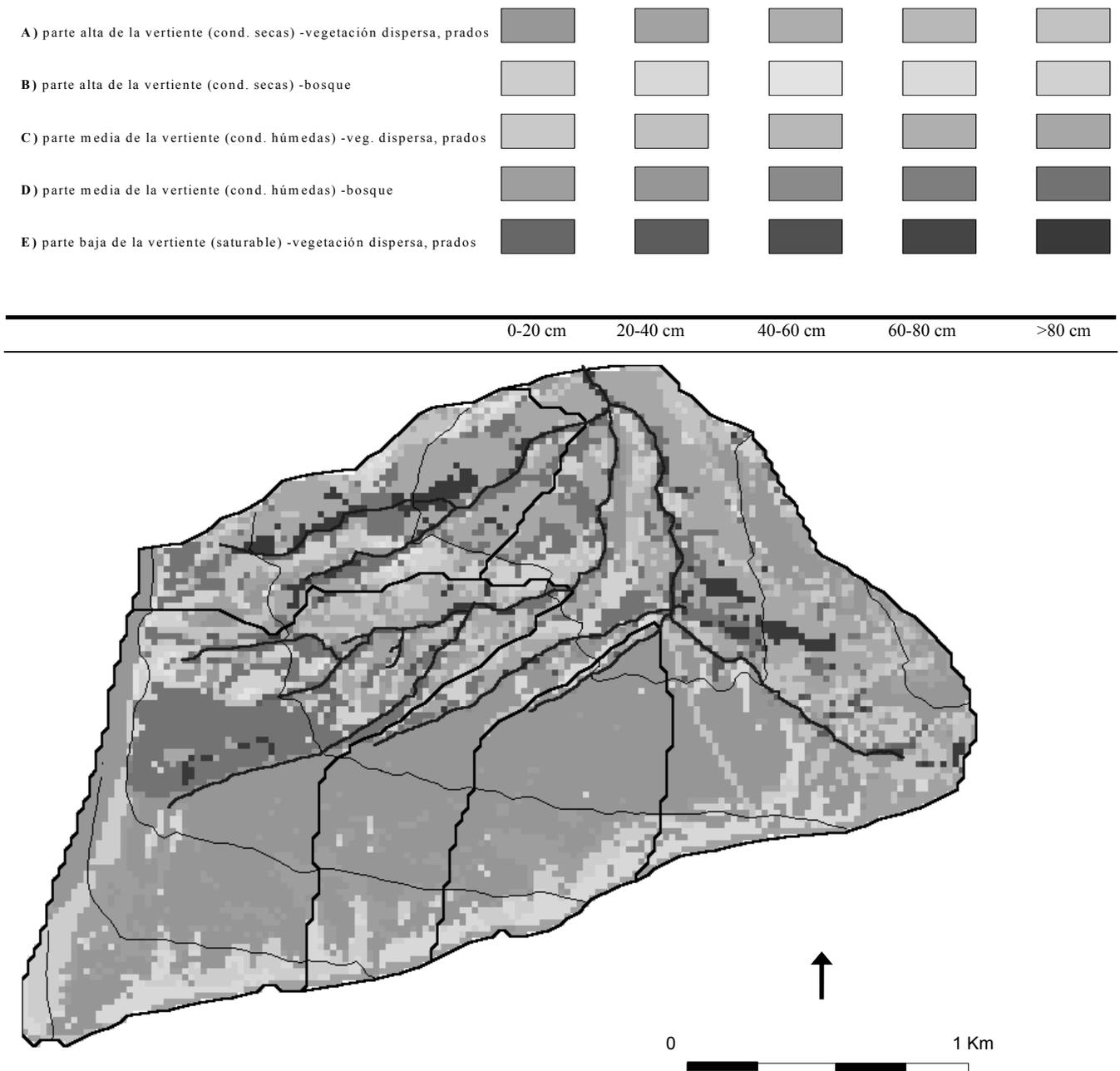


Fig. 4. Distribución de las clases de reserva de agua en el suelo en la cuenca de Cal Rodó.

La figura 5 muestra la evolución temporal de la reserva de agua en el suelo, calculada según el método descrito, para la cuenca de Cal Rodó y la subcuenca de Can Vila. En esta figura se observa una evolución paralela de la reserva en ambas cuencas, sin embargo cabe remarcar una diferencia de unos 100 mm entre ambas cuencas. Dicha diferencia se explica por el hecho de que Can Vila tiene un 80% de su superficie con suelos profundos, mientras que Cal Rodó tiene una parte importante de su superficie (50%) con suelos poco profundos.

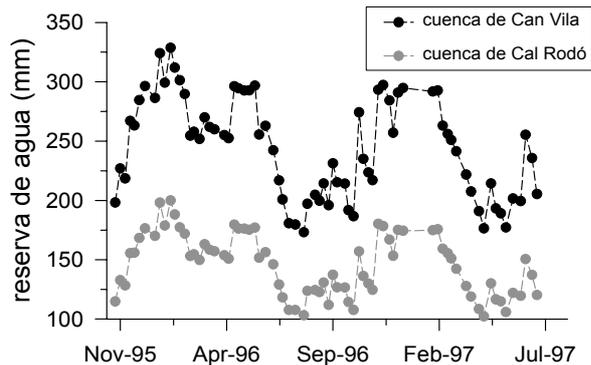


Fig. 5. Evolución temporal de las reservas de agua en el suelo, en la cuenca de Cal Rodó y la subcuenca de Can Vila.

La reserva de agua obtenida de esta manera a escala de cuenca es difícil de validar. Sin embargo, presenta una muy buena correlación con los niveles freáticos someros medidos dentro de la cuenca de Cal Rodó (fig. 6). Esta correlación es buena tanto en condiciones secas como húmedas, sin embargo pueden producirse desajustes en condiciones de recarga después de un largo período seco. Estos desajustes se deben a que la humectación rápida de los suelos recarga lentamente (debido a la baja conductividad hidráulica) la capa freática que se encuentra a niveles muy bajos.

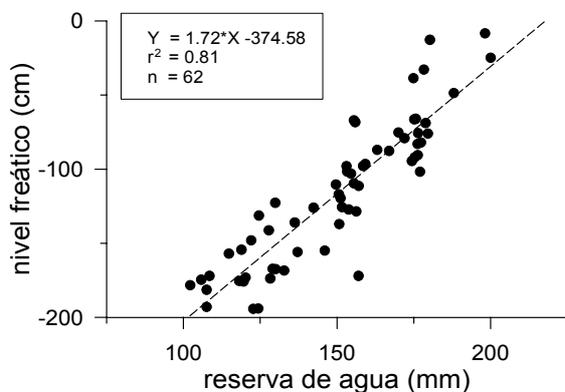


Fig. 6. Relación entre la reserva de agua en el suelo en Cal Rodó y el nivel freático medido dentro de la cuenca.

#### 4. Conclusiones

Los resultados obtenidos muestran diferencias importantes en el contenido de agua en el suelo relacionadas por un lado por las diferentes cubiertas vegetales, y por el otro por la situación topográfica de los perfiles. Se producen unas condiciones de mayor estrés hídrico del suelo en los perfiles situados bajo cubiertas forestales, como consecuencia de la reducción de los aportes de agua al suelo provocada por una mayor interceptación del agua de lluvia por la vegetación de mayor porte. La situación topográfica, en primer lugar su situación en vertientes o en terrazas, pero también su posición concreta en una terraza (parte interna o externa) tiene un papel importante en la determinación de las variaciones espaciales de la humedad. Es de remarcar, por ejemplo, que con frecuencia las partes internas de las terrazas tienen unos contenidos de humedad más altos que las partes más externas, estas diferencias son debidas principalmente a la estructura del perfil en cada situación, determinada por la misma construcción de las terrazas. Finalmente es importante destacar que cuando las condiciones hídricas no son ni extremadamente secas ni muy húmedas, se registran las mayores diferencias entre perfiles, y los suelos bajo cubierta forestal muestran el déficit hídrico relativo más acusado. En condiciones de fuerte sequía estival las humedades volumétricas de los perfiles tienden a igualarse, produciéndose un fenómeno similar en condiciones de saturación.

Finalmente, la metodología desarrollada para la determinación de la reserva de agua en el suelo se presenta como una herramienta de gran utilidad para la determinación de la variación de volumen de agua almacenado en la cuenca a escala inferior a la anual, y aunque sea un método difícil de validar tanto su correlación con los niveles freáticos medidos, como la coherencia de los balances de agua mensuales en los que esta reserva ha sido incorporada, confirman la validez de la metodología elaborada.

*Agradecimientos.* Este trabajo ha sido financiado por el proyecto PROHISEM (REN2001-2268-C02-01/HID). Los autores agradecen la colaboración de O. Ávila, D. Rabadà y C. Salvany en diversos trabajos de campo.

#### Referencias

- Bárdossy A., Lehmann W. (1998): Spatial distribution of soil moisture in a small catchment. Part 1: geostatistical analysis. *J. Hydrol.*, 206: 1-15.
- Beven K. J., Kirkby M. J. (1979): A physically-based variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrol. Sci. Bul.*, 24 (1): 43-69.
- Famiglietti J. S., Rudnicki J. W., Rodell M. (1998): Variability in surface moisture content along a hillslope transect: Rattlesnake Hill, Texas. *J. Hydrol.*, 210: 259-281.
- Gallart F., Latron J., Llorens P., Rabadà D. (1997): Hydrological functioning of Mediterranean mountain basins in Vallcebre, Catalonia: Some challenges for hydrological modelling. *Hydrol. Proc.*, 9 (11) : 1263-1272.

- Gallart F., Llorens P., Latron J., Regüés D., Salvany C. (1998): Las cuencas experimentales de Vallcebre (I): Funcionamiento hidrológico. in: A. Gómez and F. Salvador (Eds), "Investigaciones recientes de la Geomorfología Española", 259-264.
- Gallart F., Llorens P., Latron J., Regüés D. (2002): Hydrological processes and their seasonal controls in a small Mediterranean mountain catchment in the Pyrenees. *Hydrol. Earth Sys. Sci.*, 6(3): 527-537.
- Grayson R. B., Western A. W., Chiew F. H. S., Blöschl G. (1997): Preferred states in spatial soil moisture patterns: Local and nonlocal controls. *Water Resour. Res.*, 33 (12): 2897-2908.
- Latron, J. (2003): *Estudio del funcionamiento hidrológico de una cuenca mediterránea de montaña (Vallcebre, Pirineos Catalanes)*. Tesis Doctoral. Facultat de Geologia, Universitat de Barcelona. 269 p.
- Llorens P., Gallart F. (1992): Small basin response in a Mediterranean abandoned farming area: research design and preliminary results. *Catena*, 19: 309-320.
- Poyatos, R; Llorens, P; Latron, J. (in press). Land use and cover change after agricultural abandonment in a Mediterranean mountainous area (Catalan Pre-Pyrenees). *Mountain Res. Dev.*
- Rabadà D. (1995): *Dinàmica hidrològica d'una petita conca pirenaica de camps abandonats amb pinedes en expansió (Alt Berguedà, Barcelona)*. Tesis Doctoral. Facultat de Geologia. Universitat de Barcelona. 321 p.
- Vachaud G., Passerat De Silane A., Balabanis P., Vauclin M. (1985): Temporal stability of spatially measured soil water probability density function. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 49: 822-827.