

VARIABILIDAD HIDROLÓGICA INTER/INTRA-ANUAL EN UN ÁREA MEDITERRÁNEA DE MONTAÑA. II – DINÁMICA ESPACIO-TEMPORAL DE LA HUMEDAD DEL SUELO A ESCALA DE CUENCA

P. Garcia-Estringana¹, J. Latron¹, P. Llorens¹ y F. Gallart¹.

¹ Grupo de Hidrología Superficial y Erosión, Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA-CSIC). Jordi Girona, 18-26. 08034-Barcelona, España. pablo.garcia@idaea.csic.es

RESUMEN. La región mediterránea es una de las más vulnerables al cambio climático. La humedad del suelo, que juega un papel clave en la hidrología, afectando a los procesos de infiltración, escorrentía y a la evapotranspiración, también se ve influida por procesos de cambio global. El contenido de humedad del suelo es variable debido a las condiciones meteorológicas cambiantes, las propiedades del suelo y la vegetación. Muchos modelos requieren información sobre la variabilidad de la humedad del suelo, tanto en el espacio como en el tiempo, pero existe poca información de series temporales detalladas en áreas mediterráneas. La técnica “time domain reflectometry” (TDR) se empleó para evaluar la distribución espacial y temporal de la humedad del suelo en un área de montaña mediterránea. Se midió el contenido de humedad del suelo semanalmente entre 1998 y 2003, a 4 profundidades diferentes (0–20, 20–40, 40–60 y 60–80 cm) en 8 perfiles representativos de diferentes unidades geocológicas en las cuencas de investigación de Vallcebre (NE España). Los resultados obtenidos muestran diferencias en la humedad del suelo entre perfiles relacionadas por un lado con las diferentes cubiertas vegetales, y por otro con la diferente situación topográfica. Los períodos de sequía reducen la humedad del suelo en todos los puntos de la cuenca, disminuyendo las diferencias entre perfiles. La dinámica de la humedad del suelo observada evidencia la existencia de perfiles más sensibles a la sequía, en los que la humedad se reduce más bruscamente, mientras que otros puntos muestran una dinámica más regular. Las mayores diferencias entre perfiles se observan en condiciones hídricas ni muy secas ni muy húmedas, momento en que los suelos bajo cubierta forestal presentan un mayor déficit hídrico relativo.

ABSTRACT. Soil moisture plays a central role in hydrology affecting runoff, infiltration and evapotranspiration processes. The water content of soil layers is highly variable both in space and time, partly due to the variability of meteorological conditions, soil properties and vegetation. The knowledge of soil moisture dynamics at reasonable temporal and spatial resolutions is therefore required to improve hydrological understanding and modeling in a global change context. In the Mediterranean area, defined as one of the most vulnerable areas to climate change there is however a severe lack of detailed soil moisture data sets. The objective of this work is to investigate the inter/intra-annual spatial and temporal distribution of soil moisture in a Mediterranean mountain area using the detailed hydrological data set gathered in the

Vallcebre Research catchments (NE Spain). Using “time domain reflectometry” (TDR), soil water content was measured weekly between 1998 and 2003, at four different depths (0–20, 20–40, 40–60 and 60–80 cm) at nine profiles representative of different geocologic units. Results obtained revealed that soil moisture differences were related to different vegetal covers and to different topographic characteristics of soil profiles. Drought periods reduce soil moisture for the whole catchments, reducing differences among soil profiles. Soil moisture dynamics show that there are more sensitive areas to drought in which soil moisture reduces abruptly, while there are other areas in which soil moisture dynamics is more regular. The most important differences in soil moisture among soil profiles were observed in intermediate conditions, neither very humid, nor very dry conditions. In these conditions soils under forest cover present a greater water relative deficit.

1.- Introducción

La humedad del suelo es clave para comprender los procesos hidrológicos y climáticos, siendo fundamental en las relaciones suelo-atmósfera (Bárdossy y Lehmann, 1998, Vereecken et al., 2008). Se caracteriza por una gran variabilidad espacial y temporal (por ej. Grayson et al., 1997, Martínez-Fernández y Ceballos, 2003, Western et al. 2004) ya que depende de factores como la meteorología, la topografía, las propiedades del suelo y la vegetación (Grayson et al., 1997, Lawrence and Hornberger, 2007). Un conocimiento preciso de la variabilidad espacial y temporal de la humedad del suelo a escala de cuenca es necesario en los modelos hidrológicos (Beven, 2001). Esta tarea es especialmente importante en regiones de montaña mediterránea, donde el clima presenta un patrón estacional y una alta variabilidad inter-annual, que la hacen vulnerable al proceso de cambio climático. Además la vegetación está cambiando como consecuencia del abandono de las terrazas agrarias construidas durante finales del siglo XIX y principios del siglo XX (Poyatos et al., 2003, Delgado et al., 2010). Estos dos cambios afectan a los procesos hidrológicos y han de ser convenientemente evaluados (Kundzewicz et al., 2007). Separar la importancia relativa de los factores individuales sobre la humedad del suelo es complejo, porque algunos interaccionan entre sí lo que introduce incertidumbre en la relación entre la humedad del suelo y los factores que la controlan. Entre los factores más estudiados se encuentran la topografía y la vegetación. Una

topografía en terrazas influye sobre los patrones de saturación de los suelos (Gallart et al., 1994). La influencia de la vegetación es diferente según el tipo de vegetación, ya que la transpiración es diferente para vegetación de porte arbóreo o herbáceo, y para una misma especie difiere según la fenología, especialmente en regiones con una marcada estacionalidad (Vivoni et al., 2008). Por eso es necesario mejorar el conocimiento de la relación entre vegetación y humedad del suelo (Western et al., 2004, Hernández-Santana et al., 2008). Otro factor que complica el estudio de la variabilidad de la humedad del suelo es que las variaciones que suceden a una determinada escala pueden cambiar con la humedad media del suelo. Pese al gran número de trabajos todavía no hay consenso sobre la relación existente entre el valor medio de humedad del suelo y su varianza (Famiglietti et al., 2008).

El objetivo del presente estudio es analizar la variabilidad espacial y temporal, inter e intraanual, de la humedad del suelo en un área de montaña mediterránea utilizando la base de datos hidrológica detallada en las cuencas experimentales de Vallcebre en el periodo comprendido entre 1998 y 2003, que presenta un amplio rango de condiciones de humedad.

2.- Material y Métodos

El área de estudio se localiza en las cuencas experimentales de Vallcebre, situadas en el margen sureste de los Pirineos, en la cabecera del río Llobregat, Noreste de la Península Ibérica (42°12'N, 1°49'E) (Gallart et al., 2005, Latron et al., 2009). El substrato de las cuencas lo forman margas y calizas continentales del Paleoceno. El clima es sub-Mediterráneo con una precipitación media anual de 924 mm y una evapotranspiración potencial de 700 mm (Gallart et al., 2002), mostrando una alta variabilidad inter-anual. Los suelos tienen una textura franco-limosa y están caracterizados por un rápido descenso de su conductividad hidráulica con la profundidad (Haro et al., 1992). Durante la segunda mitad del siglo XIX se construyeron terrazas con fines agrarios en el 70 % de las vertientes de la cuenca, para ser paulatinamente abandonadas durante la segunda mitad del siglo XX. En consecuencia predominan los pastos, aunque se está produciendo un proceso de reforestación espontánea con *Pinus sylvestris* (Poyatos et al., 2003, Delgado et al., 2010) que cubre actualmente más de un 35 % de la cuenca, aunque la vegetación climática se corresponde con la asociación *Buxo- sempervirentis-Quercetum pubescentis*. Como consecuencia del aterrazamiento, el espesor del suelo muestra importantes variaciones, oscilando desde menos de 50 cm en la parte central de las terrazas a más de 2 o 3 metros en la parte externa de las mismas (Llorens y Gallart, 2000).

Las cuencas de Vallcebre están instrumentadas con dos estaciones meteorológicas, una red de pluviómetros, varias estaciones de aforo y piezómetros. La serie de datos de humedad del suelo comenzó en 1993 y se prolonga hasta la actualidad. Para el presente estudio se seleccionaron 5 años,

el período entre 1998 y 2003, excluyendo el año 1999 por ausencia de información durante ese año.

La humedad del suelo se midió mediante la técnica TDR en ocho perfiles distribuidos en las principales unidades geológicas (Fig 1). Estos perfiles están formados por 4 sondas de 20cm insertadas verticalmente a cuatro profundidades diferentes 0-20 cm, 20-40 cm, 40-60 cm y 60-80 cm. Cada semana se realizaba una lectura empleando un Tektronix 1502-C. El contenido de agua en el suelo se calcula utilizando la relación de Topp et al. (1980).

Se realizaron fotografías de la cubierta vegetal que cubría cada perfil. Para ello se tomaron fotografías desde abajo con una cámara Nikon D300S empleando un objetivo FishEye 180° 1:2.8D EX 15-mm SIGMA lens. Las imágenes digitales fueron analizadas con el software Gap Light Analyzer v. 2.0 (Fraser, 1999).

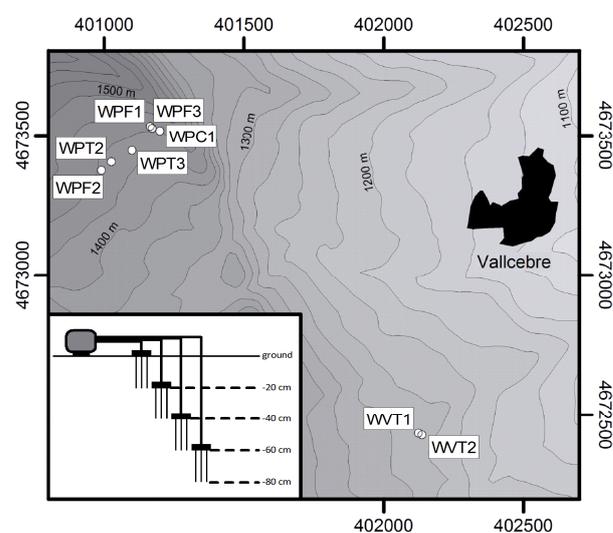


Fig 1. Mapa general de las cuencas experimentales de Vallcebre, mostrando la localización de los perfiles de medición de la humedad del suelo y representación esquemática de un perfil.

3.- Resultados y discusión

La Fig. 2 muestra la evolución temporal de la humedad del suelo durante el periodo de estudio. La humedad del suelo se redujo estacionalmente en verano. Los perfiles situados en terrazas abandonadas cubiertas por pasto, como WPT3 y WVT1, fueron los que presentaron valores más elevados, mientras que los situados en vertientes y cubiertos por bosque fueron los que presentaron valores más bajos (Fig. 2 y Tabla 1). Al agrupar los perfiles por el factor topografía se observó que el valor medio de humedad del suelo en los perfiles situados en terrazas fue de $0.29 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ siendo estadísticamente significativamente mayor que los perfiles situados en vertiente con $0.23 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. Asimismo, al agrupar los perfiles en función del factor vegetación (prado/bosque), se observó que el valor medio de humedad del suelo en los perfiles situados en prado fue de $0.30 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, siendo estadísticamente significativamente mayor que los perfiles situados bajo bosque con $0.23 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. Las

terrazas favorecen la saturación mientras que la pendiente favorece el flujo vertical, reduciendo la humedad del suelo. Por otro lado la vegetación arbórea intercepta más precipitación y transpira más que la vegetación herbácea, reduciendo la humedad del suelo (Gallart et al., 2002; Llorens y Domingo, 2007).

Tabla 1. Caracterización de los perfiles de medición de la humedad del suelo. $\theta_{0-80\text{cm}}$: humedad volumétrica entre 0 y 80cm de profundidad, N=224 V=vertiente y T=terrazza

	Situación y Pendiente (%)	Tipo de cubierta	Cubierta arbórea (%)	$\theta_{0-80\text{cm}}$		
				Media	STD	Mediana
WPF1	V 36	Pinar	71	0.19	0.08	0.17
WPF2	V 19	Pinar	98	0.23	0.06	0.22
WPF3	V 31	Pinar	76	0.23	0.07	0.22
WPC1	V 28	Pasto	-	0.27	0.07	0.29
WVT1	T 16	Pasto	-	0.34	0.09	0.35
WVT2	T 13	Pasto	-	0.27	0.07	0.30
WPT2	T 22	Pasto	-	0.24	0.10	0.23
WPT3	T 22	Pasto	-	0.37	0.14	0.44

En la Fig. 3 se representan las curvas de frecuencia acumulada de los valores de humedad del suelo (0-80cm) durante el periodo de estudio (a), y considerando un año seco, 1998 (b) y otro húmedo, 2002 (c). Nuevamente se observó que los dos perfiles más húmedos estaban situados en terrazas cubiertas con pastos (WPT3 y WVT1), en los que el 50 % de las observaciones presentaron valores superiores a $0.34 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, muy por encima del resto de perfiles, mientras que el perfil más seco estaba situado en una vertiente con bosque (WPF1) en el que el 50 % de los valores fueron menores de $0.18 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (Fig 3a). Si

se comparan los dos perfiles más húmedos (WPT3 y WVT1) se observa como la curva de frecuencia de WVT1 es más suave y solamente cambia ligeramente la pendiente entorno al 80 % de los casos, mientras que en WPT3 la pendiente es suave hasta el 50 %, momento en el que cambia bruscamente. Este patrón se mantuvo, con pequeñas diferencias, durante el año más seco, 1998 (Fig 3b). En cambio, durante el año más húmedo, 2002 (Fig 3c), el patrón de WPT3 cambió radicalmente, presentando una curva de frecuencia mucho más suave. Estos resultados indican que los perfiles tienen diferente sensibilidad a la sequía. WVT1 presenta un comportamiento más constante y apenas se seca, ni siquiera en el año más seco, mientras que WPT3 presenta un patrón muy contrastado dependiendo de las condiciones de humedad; apenas se seca el año es húmedo pero se seca más bruscamente cuanto más seco es el año.

Considerando los ocho perfiles, el coeficiente de variación medio de la humedad del suelo para el conjunto del período fue del 26.5 %, siendo 1998 y 2002 los dos años con mayores coeficientes de variación medio de 29 %. Estos valores son más elevados que los obtenidos en estudios realizados en climas sub-húmedos y húmedos (por ej. Bell et al., 1980, Western et al., 2004 y Brocca et al., 2010), debido a que la zona de estudio se enmarca en una región de clima sub-mediterráneo con una amplia variabilidad pluviométrica.

Durante el año más seco, 1998, se observa cómo la desviación se va incrementando hasta alcanzar su máximo y comienza a descender en las pocas observaciones en las que el valor medio de humedad del suelo fue superior a $0.30 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. Durante el año más húmedo, 2002, también se observa como la desviación se incrementa hasta un máximo de 0.30 para después ir decreciendo.

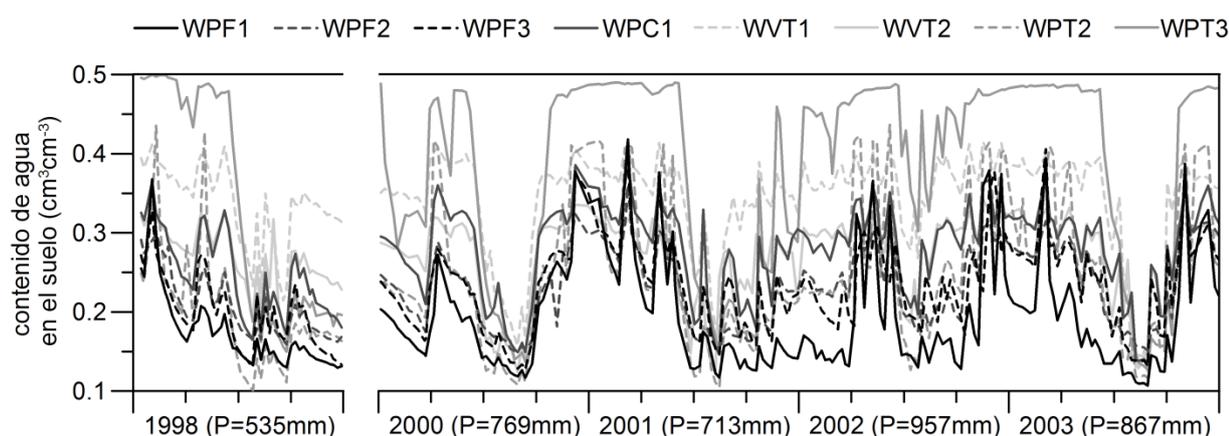


Fig 2. Evolución temporal de la humedad del suelo (0-80 cm) en cada perfil durante los años 1998, 2000, 2001, 2002 y 2003. (P es la precipitación anual).

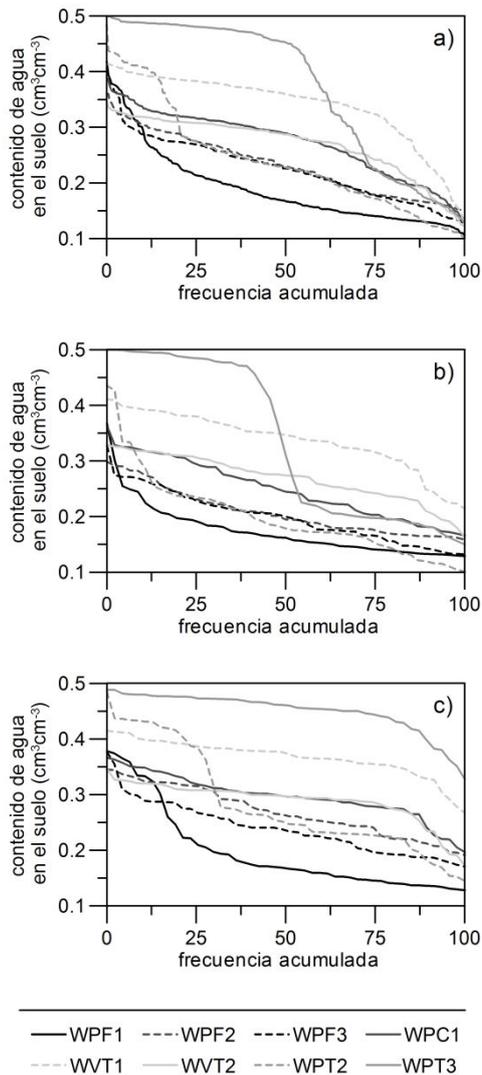


Fig 3. Curvas de frecuencia acumulada de la humedad del suelo de todo el perfil (0-80 cm) para el conjunto del periodo 1998.2000-2003 (Fig 3a), para el año más seco 1998 (Fig 3b) y para el año más húmedo 2002 (Fig 3c)

Este comportamiento es reflejo del comportamiento estacional de la humedad del suelo. El periodo seco, que empieza a finales de junio y termina en septiembre u octubre, hace que los perfiles se sequen reduciéndose las diferencias entre ellos. En cambio, cuando comienza el otoño, los perfiles comienzan a humedecerse, unos más rápidamente que otros, y por eso las diferencias se hacen máximas, hasta que poco a poco se van humedeciendo todos los perfiles y las diferencias vuelven a reducirse. Muchos autores se han interesado por el estudio de la evolución de la variabilidad espacial del contenido de agua del suelo en función de las condiciones de humedad, comparando la varianza (o el coeficiente de variación) del contenido de agua del suelo respecto al contenido medio. Los resultados obtenidos son diversos, en algunos trabajos (Hills y Reynolds, 1969; Bell et al., 1980; Robinson y Dean, 1993), la varianza del contenido de agua aumenta, en otros

disminuye (por ej. Herkelrath et al., 1991). Finalmente, algunos autores (Hawley et al., 1983; Charpentier y Groffman, 1992) señalan no haber observado ninguna relación entre la varianza del contenido de agua del suelo y su valor medio.

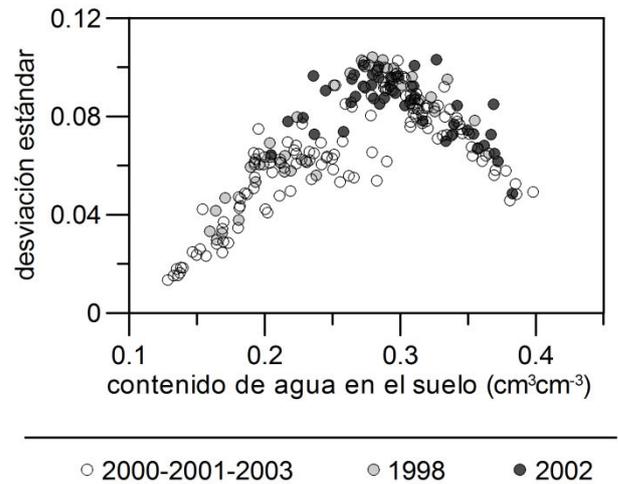


Fig 4. Relación entre la humedad del suelo de todo el perfil (0-80 cm) y su desviación estándar como un indicador de la variabilidad espacial de la humedad del suelo para el conjunto del periodo 1998.2000-2003, para el año más seco 1998 y para el año más húmedo 2002. Cada punto corresponde a un día de medición.

4.- Conclusiones

Los resultados obtenidos muestran diferencias importantes en la humedad del suelo relacionadas con las diferentes cubiertas vegetales, y con la situación topográfica de los perfiles. La humedad del suelo es inferior en las zonas bajo cubierta forestal, como consecuencia de la interceptación del agua de lluvia, y del mayor consumo de agua por transpiración. Por otro lado, la humedad del suelo es mayor en las terrazas que en las vertientes. Los periodos de sequía reducen la humedad del suelo en todos los puntos de la cuenca, disminuyendo las diferencias entre perfiles. La dinámica de la humedad del suelo observada muestra la existencia de zonas más sensibles a la sequía, en las que la humedad se reduce más bruscamente, mientras que otros puntos muestran una dinámica más regular. Cuando las condiciones hídricas no son ni muy secas, ni muy húmedas, se registran las mayores diferencias entre perfiles; en estas condiciones, los suelos bajo cubierta forestal presentan un mayor déficit hídrico relativo.

Agradecimientos. Esta investigación ha sido financiada por los proyectos Montes (Consolider-Ingenio Montes CSD2008-00040) y RespHiMed (CGL2010-18374) financiados por el Ministerio de Ciencia e Innovación. Las Cuencas de Investigación de Vallcebre funcionan también gracias al convenio RESEL entre el CSIC y la DGCONA. La contribución de Jérôme Latron ha sido posible gracias a un contrato de investigador del CSIC en el marco del programa Ramón y Cajal financiado por Ministerio de Ciencia e Innovación. Los autores agradecer la ayuda en los trabajos de campo a C. Rubio y X. Huguet.

5.- Bibliografía

- Bárdossy, A., Lehmann, W. 1998: Spatial distribution of soil moisture in a small catchment. Part 1: geostatistical analysis. *Journal of Hydrology* 206, 1-15.
- Bell, K.R., Blanchard, B.J., Schmutge, T.J. y Witzczak, M.W. 1980. Analysis of surface moisture variations within large field sites. *Water Resources Research* 16, 796-810.
- Beven, K.J., 2001. *Rainfall-runoff modelling, The primer*. Wiley, Chichester.
- Brocca, L., Melone, F., Moramarco, T., Wagner, W. Hasenauer, S. 2010. ASCAT soil wetness index validation through in situ and modeled soil moisture data in central Italy. *Remote Sensing of Environment* 114, 2745-2755
- Charpentier, M., and Groffman, P. 1992. Soil moisture variability within remote sensing pixels, *Journal of Geophysical Research* 97, 18987 – 18995.
- Delgado, J., Llorens, P., Nord, G., Calder, I.R. and Gallart, F. 2010. Modelling the hydrological response of a Mediterranean medium-sized headwater basin subject to land cover change: The Cardener River basin (NE Spain). *Journal of Hydrology* 383, 125-134
- Famiglietti, J.S., Ryu, D., Berg, A.A., Rodell, M. y Jackson, T.J. 2008. Field observations of soil moisture variability across scales. *Water Resources Research* 44, W01423
- Fraser, S. 1999 Gap Light Analyzer (GLA), Version 2.0, Institute of Ecosystem Studies, Milbrook, NY (1999).
- Gallart, F., Llorens, P., and Latron, J. 1994. Studying the role of old agricultural terraces on runoff generation in a small Mediterranean mountainous basin. *Journal of Hydrology* 159, 291-303.
- Gallart, F., Llorens, P., Latron, J., and Regüés, D. 2002.. Hydrological processes and their seasonal controls in a small Mediterranean mountain catchment in the Pyrenees. *Hydrology and Earth System Sciences* 6, 527-537.
- Gallart, F., Latron, J., and Llorens, P. 2005b. Catchment dynamics in a Mediterranean mountain environment: the Vallcebre research basins (southeastern Pyrenees) I: hydrology. In: Garcia, C., and Batalla, R. J. (eds) *Catchment dynamics and river processes: Mediterranean and other climate regions*. Amsterdam: Elsevier, pp. 1-16.
- Grayson, R.B., Western, A.W., Chiew, F.H.S., and Blöschl, G. 1997. Preferred states in spatial soil moisture patterns: Local and nonlocal controls, *Water Resources Research* 33, 2897 – 2908.
- Hernandez-Santana, V., Martinez-Fernandez, J. and Moran, C. 2008. Estimation of tree water stress from item and soil water monitoring with time-domain reflectometry in two small forested basins in Spain. *Hydrological Processes* 22, 2493-2501.
- Hawley, M., Jackson, T. and McCuen, R. 1983. Surface soil moisture variation on small agricultural watersheds, *Journal of Hydrology* 62, 179 – 20
- Herkelrath, W.N., Hamburg, S.P. y Murphy, F. 1991. Automatic, real-time monitoring of soil moisture in a remote field area with time domain reflectometry. *Water Resources Research* 27, 857-864.
- Hills, T.C., Reynolds, S.G. 1969. Illustrations of soil moisture variability in selected areas and plots of different sizes. *Journal of Hydrology* 8, 27-47.
- Kundzewicz, Z. W., et al. (2007). Freshwater resources and their management. In: Parry, M. L., Canziani, O. F., Palutikof, J. P., van der Linden, P. J., and Hanson, C. E. (eds) *Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, pp. 173-210.
- Latron, J., Llorens, P., Gallart, F. 2009. The Hydrology of Mediterranean Mountain Areas. *Geography Compass* 3/6, 2045-2064.
- Lawrence, J.E., Hornberger, G.M. 2007. Soil moisture variability across climate zones, *Geophysical Research. Letters* 34, L20402.
- Llorens, P., Gallart, F. 2000. A simplified method for forest water storage capacity measurement. *Journal of Hydrology* 240, 131-144.
- Llorens, P., Domingo, F. 2007. Rainfall partitioning by vegetation under Mediterranean conditions. A review of studies in Europe. *Journal of Hydrology* 335, 37- 54
- Martinez-Fernandez, J., Ceballos, A. 2003. Temporal stability of soil moisture in a large-field experiment in Spain *Soil Science Society American Journal* 67, 1647- 1656.
- Poyatos, R., Latron, J., and Llorens, P. 2003. Land use and land cover change after agricultural abandonment – the case of a Mediterranean mountain area (Catalan Pre-Pyrenees). *Mountain Research and Development* 23, 362-368.
- Topp, G.C., Davis, J.L. y Annan, A.P. 1980: Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research* 16, 574-582.
- Vereecken, H., Huisman, J.A., Bogena, H., Vanderborght, J., Vrugt, J.A. and Hopmans. J.W. 2008. On the value of soil moisture measurements in vadose zone hydrology: A review. *Water Resources Research* 44, 21.
- Vivoni. E.R., Moreno, H.A., Mascaró, G., Rodríguez, J. C., Watts, C.J., Garatza-Payan, J. and Scott, R. 2008. Observed relation between evapotranspiration and soil moisture in the North American monsoon region. *Geophysical Research Letters* 35, L22403.
- Western, A.W., Zhou, S., Grayson, R.B., McMahon, T.A., Blöschl, G. and Wilson, D.J. 2004. Spatial correlation of soil moisture in small catchments and its relationship to dominant spatial hydrological processes. *Journal of Hydrology* 286, 113-134.

