

VARIABILIDAD HIDROLÓGICA INTER/INTRA-ANUAL EN UN ÁREA MEDITERRÁNEA DE MONTAÑA. I – EFECTO DE LA ESCALA TEMPORAL DE MEDICIÓN DE LA HUMEDAD DEL SUELO

P. Llorens¹, J. Latron¹, C. Rubio², N. Martínez-Carreras³, J. García-Pintado⁴, P. García-Estríngana¹, 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, pilar.llorens@idaea.csic.es

² Lab-Ferrer y Departamento de Suelos e Ingeniería Agroalimentaria, UPC, Castelldefels.

³ Department of Environment and Agro-Biotechnologies. Centre de Recherche Public – Gabriel Lippmann, Belvaux, Luxemburgo.

⁴ Instituto Euromediterráneo del Agua, Murcia.

RESUMEN. El contenido de agua en el suelo es una variable esencial en hidrología, con una influencia muy importante sobre las interacciones suelo-atmósfera así como sobre ciertos procesos hidrológicos como la generación de escorrentía. Además, el contenido de agua en el suelo se caracteriza por una gran variabilidad espacio-temporal, que aumenta marcadamente la no-linealidad de los procesos hidrológicos.

La cuenca de Can Vila (situada en las cuencas de investigación de Vallcebre, NE España), ha sido monitorizada desde 1995 para la caracterización de su respuesta hidrológica y de su dinámica interna. En esta cuenca, donde la topografía original fue modificada en el siglo XIX por la construcción de pequeñas terrazas de cultivo actualmente abandonadas, se ha monitorizado una terraza (1000 m²) con 128 sondas de TDR automáticas situadas en una malla regular con la finalidad de capturar la dinámica espacio-temporal local de la humedad en los 30 primeros centímetros de suelo.

Este artículo evalúa el efecto de la escala temporal de medición de la humedad del suelo, basándose en el análisis comparativo de la humedad medida a distintas escalas temporales, que van desde la sub-horaria (20 minutos) a la quincenal, durante un periodo con una elevada variabilidad en la humedad del suelo.

ABSTRACT. Soil water content is an essential variable in hydrology, with an important influence on soil-atmosphere interactions and on hydrological processes such as runoff generation. In addition, soil water content is characterized by high spatial and temporal variability, which markedly increases the non-linearity of hydrological processes.

The Can Vila catchment (located in the Vallcebre research, catchments NE Spain) has been monitored since 1995 not only for the characterization of its hydrologic response but also its internal dynamics. In this basin, as in most slopes of the area, the original topography was modified by the construction of small terraces for agricultural purposes in the XIXth century, now abandoned. In order to capture the local spatial and temporal dynamics of water content in the first 30 cm of the soil a terrace (1000 m²) has been monitored with 128 automatic TDR probes placed in a regular grid.

The paper presents a comparative analysis of soil moisture measurements in a wide range of temporal scales

ranging from sub-hourly (20 minutes) to fortnightly for a period of elevated variability in soil moisture, in order to evaluate the effect of the timescale in soil moisture evaluation.

1.- Introducción

El contenido de agua en el suelo es una variable esencial en hidrología, que tiene una influencia muy importante sobre algunos procesos hidrológicos como las crecidas, o sobre las interacciones suelo-atmósfera (Loague, 1992; Famiglietti et al. 1998; Bárdossy y Lehmann, 1998). El contenido de agua en el suelo, además, se caracteriza por una elevada variabilidad tanto espacial como temporal (por. Ej. Brocca et al., 2010; Martínez-Fernández y Ceballos, 2005; Western y Grayson, 1998; Wilson et al. 2003; Western et al. 2004), que aumenta marcadamente la no-linealidad de los procesos hidrológicos.

En la mayoría de los estudios hidrológicos sería deseable disponer de mediciones detalladas del contenido de agua del suelo, sin embargo debido a diversas limitaciones (económicas, técnicas, logísticas) es difícil obtener series temporales de esta variable con suficiente resolución temporal además de representatividad espacial. Estas limitaciones hacen que sea difícil utilizar las mediciones ‘in situ’ en estudios a escalas mayores. Por este motivo, entre otros, la humedad se estima también a partir de sensores remotos y/o procesos de agregación utilizando modelos hidrológicos o climáticos (Robinson et al., 2008; Vereecken et al., 2008).

Mientras que existe bastante información sobre la variabilidad espacial de la humedad del suelo, así como de la estabilidad temporal de la humedad del suelo (Vachaud et al., 1985), como parámetro indicador de la persistencia en el tiempo de una estructura espacial de la humedad, existe menos información sobre la agregación temporal. La frecuencia a la cual se realizan las mediciones es un factor clave para la estimación precisa de la humedad del suelo y por tanto, el análisis del efecto de la agregación temporal en la medición del contenido de agua del suelo un aspecto

importante a considerar. Tal y como indican Robinson et al (2008), además de la variabilidad espacial, es importante considerar la frecuencia de medición de la humedad del suelo en función principalmente de los procesos que se quieren estudiar, y si dichas mediciones presentan variaciones no estructuradas, el proceso de estudio no está suficientemente muestreado (en el tiempo o en el espacio, o en ambos).

La frecuencia de medición de la humedad del suelo en el campo varía considerablemente entre los estudios y puede ir desde frecuencias sub-horarias a frecuencias quincenales (o incluso mayores). Frente a esta elevada variabilidad, uno de los aspectos importantes a valorar es cuál es la escala temporal más apropiada para la medición de la humedad del suelo, en función de las propias necesidades de la investigación y de las otras variables relacionadas.

Este trabajo presenta un análisis comparativo de la humedad del suelo medida en un amplio rango de escalas temporales que van de la sub-horaria (20 minutos) a la quincenal.

2.- Material y métodos

La cuenca de Can Vila integrada en las cuencas de investigación de Vallcebre (Gallart et al., 2005; Latron et al., 2010; Llorens et al., 2010), está situada en la cabecera del río Llobregat en el Prepirineo catalán y tiene un área de 0.56 km². El clima es sub-mediterráneo con unos valores medios anuales de 862 ± 206 mm de precipitación y 823 mm de evapotranspiración de referencia. Los suelos desarrollados sobre un substrato margoso tienen una textura franco-limosa y se caracterizan por el descenso rápido de la conductividad hidráulica en profundidad (Rubio, 2005). Las terrazas de cultivo (normalmente entre 10 y 20 m de ancho) fueron construidas en el siglo XIX en más del 70% de la cuenca. La cuenca está cubierta principalmente por pastos, sin embargo, como resultado de la reforestación espontánea de las terrazas de cultivo (Poyatos et al. 2003), el bosque cubre actualmente un 34% de la cuenca.

Además de la estación de aforos y una estación meteorológica, el diseño instrumental de la cuenca, iniciado a principios de 1995, incluye una red de piezómetros, así como una red de sondas para la medición de la humedad del suelo por el método TDR (véase García-Estringana et al., este volumen).

Los resultados obtenidos hasta la actualidad (véase una síntesis en Latron et al. 2009) muestran la gran influencia de la estacionalidad de la precipitación y de la demanda evapotranspirativa en la dinámica y respuesta hidrológica de estas cuencas.

Además de la instrumentación a largo plazo, se monitorizó durante 2 años (2004-2006) una terraza con 128 sondas TDR. Esta terraza tiene una pendiente inferior al 10% y los suelos de textura franco-limosa tienen una notable homogeneidad textural, tanto lateral como vertical (Rubio, 2005).

Las sondas de TDR estaban colocadas en una red regular (2.5*2.5m) (Fig.1). Son sondas CS605 (Campbell

Scientific Inc.) de 30 cm insertas verticalmente en el suelo y controladas por 2 unidades idénticas que incluyen, 9 multiplexores SDMX50 y un equipo TDR100 conectado a un colector de datos CR10X, todos ellos de Campbell Scientific Inc. Cada unidad, controla también 18 termistores para la medición de la temperatura del suelo.

Las medidas se registraron cada 20 minutos con la finalidad de capturar las variaciones de la humedad del suelo durante los eventos lluviosos, manteniendo además una cantidad de datos recogidos razonable (12000 datos/día). El contenido de agua en el suelo se calculó utilizando la relación de Topp et al. (1980).

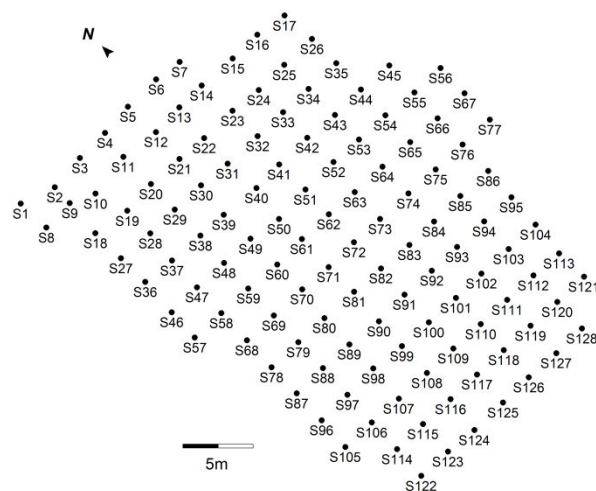


Fig.1. Esquema de la terraza monitorizada para la medida de la humedad del suelo.

3.- Resultados y Discusión

La dinámica temporal de la humedad media (promedio de las 128 sondas) de la terraza estudiada (y su variabilidad espacial) durante el periodo agosto-octubre del 2005 se presenta en la Fig. 2. Este período, representativo del período de humectación de la cuenca después del verano, tiene una marcada variabilidad en las condiciones de humedad del suelo. Considerando los valores cada 20 minutos la humedad media varía entre los 0.20 cm³cm⁻³ a inicios de agosto, alcanzando valores máximos de 0.43 cm³cm⁻³ durante un evento lluvioso en septiembre (Fig. 2a). Al agregar la escala temporal, pasando de las mediciones cada 20 minutos a valores diarios (Fig. 2b), semanales (Fig. 2c) y quincenales (Fig. 2d) (escogiendo una medida a las 6h de la mañana cada 1, 8 o 15 días), se observa que la humedad media del periodo es la misma si se mide a paso de tiempo de 20 minutos y diario (0.28 cm³cm⁻³), mientras que disminuye solo en un 1% si el paso de tiempo es semanal o quincenal. Los valores mínimos son idénticos en los 4 pasos de tiempo estudiados, mientras que los valores máximos se reducen un 10% en los dos pasos de tiempo mayores. Se observan pocas diferencias en la dispersión entorno a la humedad media

entre los diferentes pasos de tiempo. La comparación de las figuras pone claramente de manifiesto una importante disminución de la dinámica observable de la humedad del suelo a partir de la agregación a escala semanal y sobre todo a escala quincenal, que mantiene solo una tendencia general de humectación de la terraza.

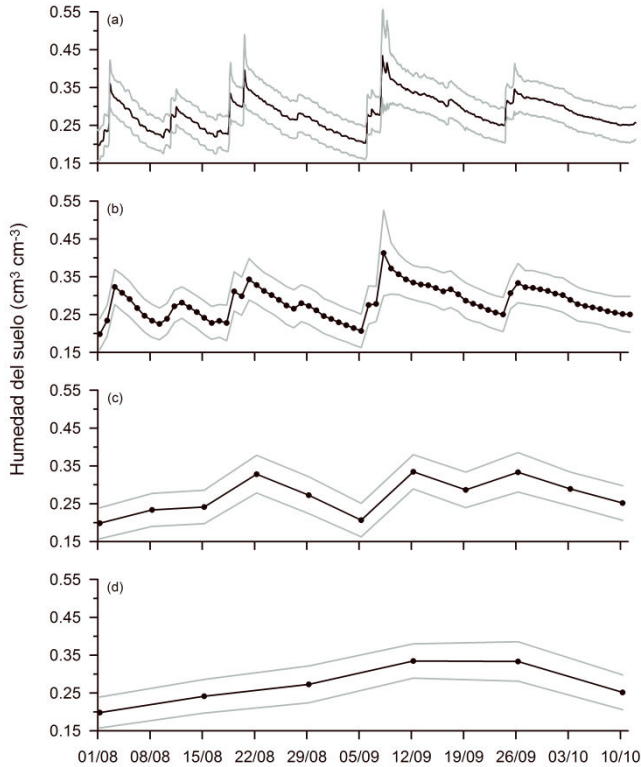


Fig. 2. Series temporales del contenido de agua en el suelo. (a) una medida cada 20 minutos, (b) una medida diaria, (c) una medida semanal y (d) una medida quincenal.

Con la finalidad de evaluar las diferencias en la humedad del suelo estimada a cada paso de tiempo, se ha agregado la humedad de los pasos de tiempo menores (20 minutos, diario, semanal) a paso de tiempo quincenal calculando la media aritmética sobre cada periodo de 15 días, es decir con 3 valores (datos semanales), 15 valores (datos diarios) y 1080 valores (medidos cada 20 minutos) respectivamente. Debido a que el periodo estudiado está formado solo por 5 quincenas, se ha calculado una media aritmética móvil con la finalidad de obtener un mayor número de valores y por tanto una mayor representatividad de los resultados. De esta agregación se desprende que una medida quincenal o semanal (Figs. 3 y 4) es poco representativa de la humedad media, para periodos de quince días, calculada como el promedio de los valores medidos cada 20 minutos.

En ambos casos, pero especialmente en el caso del paso de tiempo quincenal, la diferencia con el valor de referencia es muy acusada. Para valores de referencia (media quincenal con valores medidos cada 20 minutos) entre 0.25 y 0.33 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ una sola medida quincenal proporciona valores entre 0.21 y 0.41 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ (Fig. 4) y la media de tres valores proporciona humedades entre 0.23 y 0.33 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ (Fig. 4). En estas Figs. (3 y 4) sorprende la

escasa diferencia observada entre la agregación en quince días de los valores cada 20 minutos y diarios.

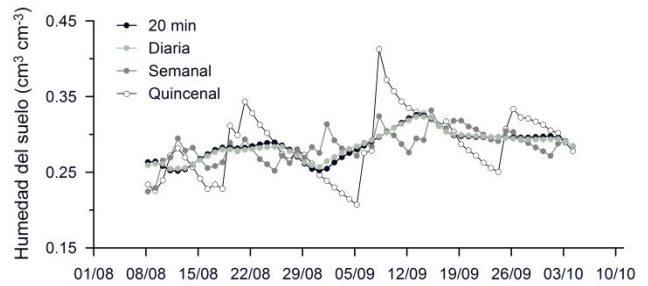


Fig. 3. Series temporales de la humedad del suelo calculada para periodos de 15 días. Cada valor se obtiene a partir de una media móvil de mediciones cada 20 minutos (1080 valores), diarias (15 valores), semanales (3 valores) o quincenales (1 valor).

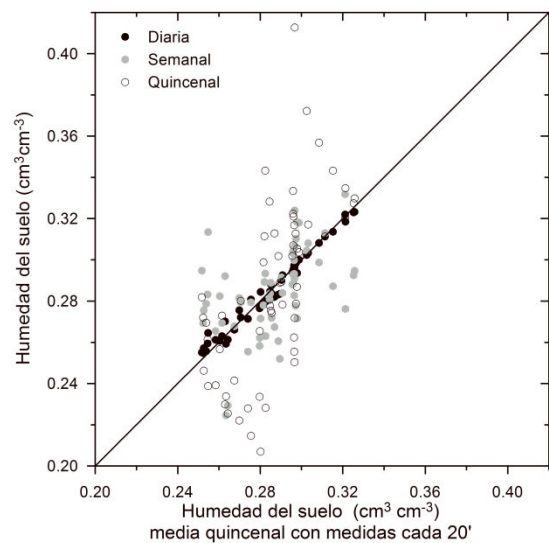


Fig. 4. Relación entre la humedad del suelo calculada para periodos de 15 días con mediciones cada 20 minutos (1080 valores) y la humedad del suelo para los mismos periodos calculada con valores diarios (15 valores), semanales (3 valores) y quincenales (1 valor).

Cabe esperar que las diferencias observadas entre pasos de agregación diario y de 20 minutos puedan ser más acusadas si se considerara un número menor de sondas, especialmente si éstas presentan una elevada variabilidad. Sin embargo un análisis similar realizado con una sola sonda (sonda S72, representativa de la parte central de la terraza y por tanto con una baja variabilidad temporal) proporciona resultados similares a los presentados aquí, por lo que es necesario verificar esta hipótesis.

4.- Conclusiones

Del análisis preliminar sobre efecto de la escala temporal de medición de la humedad del suelo, presentado en este trabajo, cabe destacar dos aspectos interesantes. En primer lugar, se observan pocas diferencias para el conjunto del periodo estudiado en la humedad media obtenida a

diferentes pasos de tiempo (20 minutos, diario, semanal y quincenal). En segundo lugar, una medida quincenal o semanal puede ser poco representativa de la humedad media que se observa durante un periodo de 15 días. La información obtenida en la terraza monitorizada permitirá completar el presente trabajo con el análisis de la variabilidad espacial, así como con la combinación de la variabilidad espacial y la agregación temporal.

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.

5.- Bibliografía

- Bárdossy A. y Lehmann W. (1998): Spatial distribution of soil moisture in a small catchment. Part I: geostatistical analysis. *Journal of Hydrology*, 206: 1-15.
- Brocca L., Melone F., Moramarco T., y Morbidelli R. (2010). Spatial-temporal variability of soil moisture and its estimation across scales, *Water Resources Research*, 46: W02516.
- Famiglietti J.S., Rudnicki J.W., y Rodell, M. (1998). Variability in surface moisture content along a hillslope transect: Rattlesnake Hill, Texas. *Journal of Hydrology*, 210: 259-281.
- Gallart, F., Latron, J., y Llorens, P. (2005). Catchment dynamics in a Mediterranean mountain environment. The Vallcebre research basins (south eastern Pyrenees) I: hydrology. In *Catchment Dynamics and River Processes: Mediterranean and Other Climate Regions*, Garcia C, Batalla RJ (eds). Elsevier: Amsterdam; 1-16.
- García-Estringana, P., Latron, J., Llorens, P., y Gallart, F. (2011): variabilidad hidrológica inter/intra-anual en un área mediterránea de montaña. II – dinámica espacio-temporal de la humedad del suelo a escala de cuenca. Estudios en la Zona no Saturada del Suelo, vol X.
- Latron, J., Llorens, P., y Gallart, F. (2009). The hydrology of Mediterranean mountain areas. *Geography Compass* 3/6: 2045-2064.
- Latron, J., Llorens, P., Soler, M., Poyatos, R., Rubio, C., Muzylo, A., Martínez-Carreras, N., Delgado, J., Regüés, D., Catari, G., Nord, G., y Gallart, F. (2010). Hydrology in a Mediterranean mountain environment—the Vallcebre research basins (northeastern Spain). I. 20 years of investigations of hydrological dynamics. In *Status and Perspectives of Hydrology in Small Basins*, IAHS Publ. 336. IAHS Press: Wallingford, UK.
- Llorens, P., Poyatos, R., Muzylo, A., Rubio, C., Latron, J., Delgado, J., y Gallart, F. (2010). Hydrology in a Mediterranean mountain environment—the Vallcebre research basins (northeastern Spain) III. Vegetation and water fluxes. In *Status and Perspectives of Hydrology in Small Basins*, IAHS Publ. 336. IAHS Press: Wallingford, UK.
- Loague, K (1992). Soil water content at R-5. Part 1. Spatial and temporal variability, *Journal of Hydrology*, 139 (1-4): 233-251
- Martínez-Fernández, J. y Ceballos, A. (2005). Mean soil moisture estimation using temporal stability analysis, *Journal of Hydrology*, 312 (1-4): 28-38.
- Poyatos, R., Latron, J. y Llorens, P. (2003). Land use and cover change in a Mediterranean mountainous area (Catalan Pre-Pyrenees). *Mountain Research and Development*, 23 (4): 52-58.
- Robinson, D.A., Campbell, C.S., Hopmans, J.W., Hornbuckle, B.K., Jones, S.B., Knight, R., Ogden, F., Selker, J. y Wendroth, O. (2008). Soil moisture measurement for ecological and hydrological watershed-scale observatories; a review. *Vadose Zone Journal*, 7(1): 358-389
- Rubio, C. (2005). *Hidrodinámica de los suelos en un área de montaña media Mediterránea sometida a cambios de uso y cubierta*. Tesis Doctoral. Universitat Autònoma de Barcelona. 194 pp.
- 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(3), 574-582
- Vachaud, G., Passerat De Silane, A., Balabanis, P., y Vauclin, M. (1985). Temporal stability of spatially measured soil water probability density function. *Soil Science Society of America Journal*, 49: 822-827.
- Vereecken, H., Huisman, J.A., Bogaen, H., Vanderborght, J., Vrugt, J.A., y Hopmans, J.W. (2008). On the value of soil moisture measurements in vadose zone hydrology: A review. *Water Resources Research*, 44: W00D06.
- Western, A.W. y Grayson, R.B. (1998). The Tarrawarra data set: Soil moisture patterns, soil characteristics, and hydrological flux. *Water Resources Research*, 34 (10): 2765-2768.
- Western, A.W., Zhou, S.L., Grayson, R.B., McMahon, T.A., Blöschl, G., y 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.
- Wilson, D.J., Western, A.W., Grayson, R.B., Berg, A.A., Lear, M.S., Rodell, M., Famiglietti, J.S., Woods, R.A., y McMahon, T.A. (2003). Spatial distribution of soil moisture over 6 and 30 cm depth, Mahurangi river catchment, New Zealand. *Journal of Hydrology*, 276: 254-274.