

ESTABILIDAD TEMPORAL DE LA HUMEDAD EDÁFICA BAJO DIFERENTES CONDICIONES AMBIENTALES MEDITERRÁNEAS Y DE USO DEL SUELO

J. Martínez Fernández, A. Ceballos Barbancho, S. Casado Ledesma y C. Morán Tejeda

Departamento de Geografía. Universidad de Salamanca. Cervantes 3. 37002. Salamanca. jmf@usal.es

RESUMEN. En este trabajo se analiza la estabilidad temporal del contenido de humedad del suelo en tres áreas situadas a lo largo de un transecto en el suroeste de la cuenca del Duero. Se han utilizado los datos de las redes de estaciones de medición de la humedad del suelo de tres cuencas experimentales de la Universidad de Salamanca: C.E. de Rinconada (62 ha, bosque de roble, 18 estaciones), C.E. de Morille (34 ha, dehesa de encina, 11 estaciones) y C.E. de Villamor (100 ha, uso agrícola, 11 estaciones). La base de datos está constituida por registros de humedad del suelo medidos en 40 estaciones, durante un periodo de 15 meses (de enero de 2002 a marzo de 2003). En cada estación se mide la humedad quincenalmente mediante TDR (Time Domain Reflectometry), con sondas colocadas horizontalmente a diferentes profundidades, hasta la base del perfil. Las estaciones se distribuyen espacialmente a lo largo de transectos perpendiculares al fondo de valle de la cuenca. La evolución temporal de los patrones de estabilidad muestra una gran persistencia durante el periodo de observaciones. Analizado globalmente, el contenido de humedad presenta una elevada estabilidad temporal a lo largo de todas las series. Se ha detectado, en los tres casos analizados, que el periodo de máxima estabilidad, en términos de mínima varianza, coincide con el de menor contenido de humedad del suelo. Se ha observado un diferente comportamiento entre las tres cuencas en relación con el uso del suelo de cada una. La cuenca de Rinconada (bosque denso) muestra un menor rango de variación en las diferencias relativas, valores muy reducidos de varianza durante todo el periodo de mediciones y una relación simple y directa entre contenido de humedad e inestabilidad temporal. Esta cuenca es, además, la única en la que es posible identificar claramente la estación de medición representativa del valor medio. En Morille (dehesa) y Villamor (cultivos), la heterogeneidad debida al uso del suelo es mayor y se manifiesta en un comportamiento mucho más complejo en términos de estabilidad temporal.

ABSTRACT. In the present work we analysed the temporal stability of soil moisture contents in three areas located along a transect in the SW of the Duero basin. We used data from the soil moisture measuring stations

network of three experimental catchments established by the University of Salamanca: Rinconada (62 Ha, dense oak forest, 18 stations); Morille (35 Ha, open holm-oak forest, 11 stations) and Villamor (100 Ha, agricultural use, 11 stations). The database employed contains soil moisture measurements taken at 40 stations over a period of 15 months (from January 2002 to March 2003). At each station, soil moisture was recorded fortnightly using Time Domain Reflectometry (TDR), with probes placed horizontally at different depths down to the base of the profile. Spatially, the stations are distributed along transects perpendicular to the valley bottom of the experimental catchment. The temporal evolution of the stability patterns points to great persistence along the observation period. Analysed globally, the soil moisture content shows high temporal stability along all the series. In all three cases analysed, it was observed that the period of maximum stability -in terms of minimum variance- coincided with the lowest soil moisture content. A different kind of behaviour was observed between the three basins with respect to soil use in each. The Rinconada basin (dense forest) shows a lower range of variation in relative differences, very reduced variance values throughout the measurement period, and a simple and direct relationship between the soil moisture content and temporal instability. Additionally, this catchment is the only one in which it is possible to clearly identify the measuring station representative of the mean value. At Morille, (open forest) and Villamor (crops), the heterogeneity due to soil use is greater and is manifest in a much more complex type of behaviour in terms of temporal stability.

1. Introducción

La humedad del suelo es una variable de estado clave para entender un gran número de procesos hidrológicos que, a su vez, están implicados en una gran variedad de procesos naturales (geomorfológicos, climáticos, ecológicos, etc.) que actúan a diferentes escalas espacio-temporales (Entin et al. 2000). La humedad del suelo es uno de los principales

factores en la dinámica infiltración/escorrentía. Interviene directamente en la separación de la radiación neta entre calor sensible y latente. Determina la cantidad de agua disponible para la evapotranspiración. Controla el flujo subsuperficial y la migración de productos químicos hacia el acuífero. La humedad antecedente del suelo en una cuenca es un factor clave en la modelización hidrológica y de la erosión. El conocimiento del comportamiento de la humedad del suelo y su distribución espacio-temporal aporta una información esencial para los modelos climáticos.

Desde hace décadas, se ha prestado una gran atención al estudio de la variabilidad espacial de las propiedades hídricas de los suelos (Nielsen et al. 1973), pero se conoce mucho menos sobre su variabilidad temporal. En los últimos tiempos ha habido un interés creciente por analizar la dinámica temporal del contenido de humedad de los suelos, sobre todo, desde la aparición del artículo de Vachaud et al. (1985). En ese trabajo se introdujo el concepto de estabilidad temporal como la asociación temporal invariable entre localización espacial y valores estadísticos paramétricos clásicos de una determinada propiedad del suelo. Dichos autores demostraron que determinados puntos de muestreo expresaban el comportamiento medio de toda la zona estudiada, mientras que otros eran característicos de los valores extremos. De esta forma, la estabilidad temporal de la humedad del suelo es el reflejo de la persistencia temporal de la estructura espacial (Kachanoski y de Jong, 1988).

Diversos trabajos han analizado la dinámica temporal de diferentes propiedades edáficas (Goovarerts y Chiang, 1993), con especial atención a las propiedades hidrológicas. Jaynes y Humsaker (1989) estudian la estabilidad temporal de la infiltración y su aplicación a la irrigación. Van Pelt y Wierenga (2001) analizan la estabilidad temporal del potencial matricial del suelo de cara a optimizar la estrategia de muestreo. El estudio de la variabilidad espacio-temporal del contenido de humedad del suelo ha sido abordado por diversos autores, con diferentes objetivos y escalas espacio-temporales de análisis (Kachanoski y de Jong, 1988; Van Wesenbeeck y Kachanoski, 1988; Jaynes y Humsaker, 1989; Comegna y Basile, 1994; Famiglietti et al. 1998; Grayson y Western, 1998; Gómez-Plaza et al. 2000; Hupet y Vanclooster, 2002; Martínez-Fernández y Ceballos, 2003).

En este artículo se analiza la estabilidad temporal de la humedad del suelo a partir de los datos de las redes de estaciones de medición instaladas en tres cuencas experimentales, durante quince meses de mediciones. Cada una de las cuencas representa diferentes condiciones ambientales y usos del suelo, dentro de un mismo contexto climático. Los objetivos específicos son: (1) conocer el comportamiento temporal de cada estación de medición y de la cuenca; (2) identificar cuales son los puntos representativos, tanto del valor medio de la zona, como de los diferentes estados de humedad; (3) comprobar la relación existente entre grado de humedad y estabilidad temporal; y (4) identificar la influencia de los usos del suelo en los patrones temporales de la humedad del suelo.

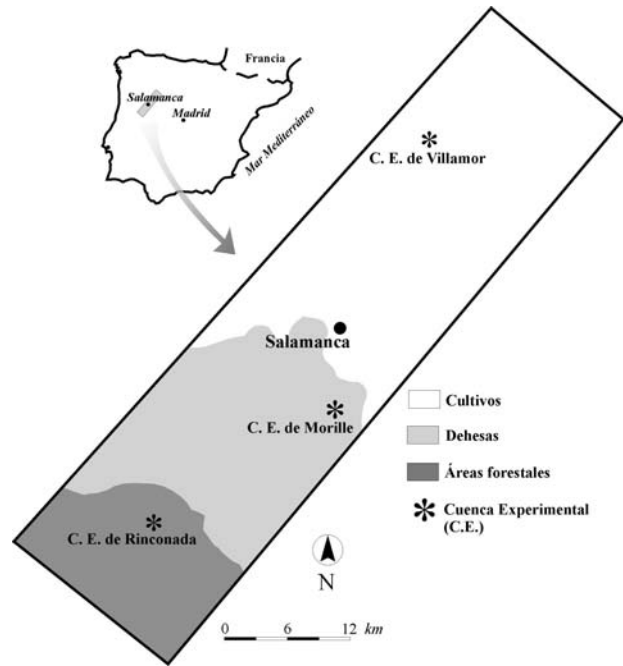


Fig. 1. Localización de las cuencas experimentales.

2. Material y métodos

2.1. Zona de estudio y diseño experimental

La zona de estudio está constituida por tres cuencas experimentales (entre 34 y 100 has) situadas en el suroeste de la cuenca del Duero, a lo largo de un transecto que va desde el Sistema Central hasta el centro de la misma (Figura 1) y bajo condiciones climáticas de tipo mediterráneo continentalizado. En poco más de 100 km, se pasa de una precipitación media anual de más de 1000 mm al sur, a menos de 400 mm en el extremo norte. La cuenca experimental de Rinconada (62 has) se encuentra en el extremo sur del transecto, en la sierra de Tamames (Prov. de Salamanca), tiene un uso forestal (roble, *Quercus pyrenaica*) y está equipada con una red de 18 estaciones de medición de la humedad del suelo desde abril de 2000. La cuenca experimental de Morille (34 has) se sitúa en el sector central del transecto, formando parte de un ecosistema de dehesa de encina (*Quercus ilex* sp. *ballota*), cuya dedicación es forestal y ganadera, y cuenta con 11 estaciones de medición de humedad del suelo operativas desde julio de 2001. La cuenca experimental de Villamor (100 has) está ubicada en el sureste de la provincia de Zamora, constituye el extremo más seco del transecto, su uso es agrícola (fundamentalmente cerealista) y desde diciembre de 2001 dispone de una red de 11 estaciones de medición de la humedad del suelo. Las estaciones en los tres casos están distribuidas en transectos (3 en Rinconada, 2 en Morille y 2 en Villamor) perpendiculares al fondo de valle de cada cuenca. Las características físicas e hídricas de los suelos de cada una de las cuencas aparecen en la Tabla 1.

Las estaciones de medición consisten en un perfil de suelo equipado con sondas de humedad, instaladas horizontalmente a diferentes profundidades hasta la base del mismo. Se trata de sondas de dos varillas, cuyas características técnicas se detallan en Martínez Fernández y Ceballos (2001), para la medición de la humedad con TDR (Time Domain Reflectometry) mediante un ecómetro Tektronix 1502C. Desde la instalación de cada una de las redes, se mide la humedad quincenalmente en cada estación.

Tabla 1. Características físicas e hídricas de los suelos.

	C. E. de Rinconada	C. E. de Morille	C. E. de Villamor
Materia orgánica (%)	3.3	1.9	0.6
Densidad Aparente (g.cm ⁻³)	1.3	1.4	1.6
Arena (%)	29.7	54.3	55.9
Limo (%)	53.4	30.8	19.8
Arcilla (%)	16.9	14.9	24.3
Clase textural	Limoso franco	Arenoso franco	Arenolimoso franco
Humedad a saturación (cm ³ .cm ⁻³)	0.530	0.490	0.425
Humedad a capacidad de campo (cm ³ .cm ⁻³)	0.193	0.155	0.187
Humedad en el punto de marchitamiento (cm ³ .cm ⁻³)	0.099	0.073	0.105

Para este trabajo se han utilizado las series de datos de las redes de estaciones de las tres cuencas, desde enero de 2002 a marzo de 2003 (15 meses). Por tanto, son 40 estaciones con un total de 181 sondas medidas en 31 ocasiones, es decir, más de 5600 datos.

2.2. Análisis estadístico

La estabilidad temporal fue definida por Vachaud et al (1985) como la asociación temporal invariable entre localización espacial y valores estadísticos paramétricos clásicos de una propiedad del suelo. Para el análisis de la estabilidad temporal de las series de humedad del suelo se han utilizado las siguientes técnicas estadísticas:

(i). El test paramétrico de diferencias relativas, propuesto por Vachaud et al. (1985), permite representar gráficamente los datos con el objeto de destacar las diferencias, en términos de constancia en la estabilidad temporal, entre puntos de muestreo. La diferencia relativa δ_{ij} se calcula a partir de

$$\bar{S}_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_{ij} \quad (1)$$

donde

$$\delta_{ij} = \frac{\Delta_{ij}}{\bar{S}_j} \quad (2)$$

y

$$\Delta_{ij} = S_{ij} - \bar{S}_j \quad (3)$$

Siendo S_{ij} el contenido de humedad en el punto i el día j y N los puntos de muestreo. Por tanto, la diferencia relativa media para cada punto viene definida como

$$\bar{\delta}_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \delta_{ij} \quad (4)$$

donde m es el número de días de muestreo.

(ii). La desviación estándar de la diferencia relativa media en cada punto, $\sigma(\delta_i)$, fue calculada como estimador de la variabilidad temporal:

$$\sigma(\delta_i) = \sum_{j=1}^m \left(\frac{\delta_{ij} - \bar{\delta}_i}{m-1} \right)^{1/2} \quad (5)$$

Desde este punto de vista se definen como puntos de medición temporalmente estables aquellos con un reducido valor de $\sigma(\delta_i)$.

3. Resultados y discusión

En la figura 2 se muestra el resultado del análisis de estabilidad temporal para los datos medios de humedad de las estaciones de las tres cuencas durante el periodo de medición. Para una mejor comprensión de los resultados, los datos de diferencias relativas en cada caso han sido ordenados de menor a mayor, indicando la desviación estándar, $\sigma(\delta_i)$, mediante barras de error, por encima y por debajo del punto. Con este tipo de metodología es posible identificar los puntos que sistemáticamente sobrestiman o subestiman el valor medio de humedad. Únicamente una estación (MI3, Fig. 2b) presenta una diferencia relativa media por encima del 50% y una desviación típica (27.9%) también elevada, y se debe a que se trata de un punto situado en el fondo de valle de la cuenca de la dehesa, con dos metros de profundidad (el resto de estaciones no sobrepasa el metro), cuyo contenido de humedad está muy controlado por la concentración del flujo de escorrentía y por su elevada capacidad de almacenamiento de agua. En el resto de los casos (Fig. 2a, b y c) el rango de diferencias relativas es estrecho, especialmente en la cuenca de Rinconada, y de una magnitud similar tanto en las estaciones que se sitúan por encima del valor nulo como en las que están por debajo. El rango de variación de las diferencias relativas medias (entre $\pm 50\%$) es bastante similar al de otros estudios publicados (Comegna y Basile, 1994; Grayson y Western, 1998; Van Pelt y Wierenga, 2001), aunque hay que tener en cuenta que las tres zonas analizadas son más extensas que las de los trabajos citados y, por tanto, más diversas desde un punto de vista edáfico y fisiográfico. Estos datos son mucho más bajos que los obtenidos por Gómez-Plaza et al. (2000) en cuencas de menor superficie y bajo condiciones bio-climáticas

mediterráneas. Por tanto, el comportamiento de las tres cuencas, analizado globalmente, muestra una gran estabilidad temporal.

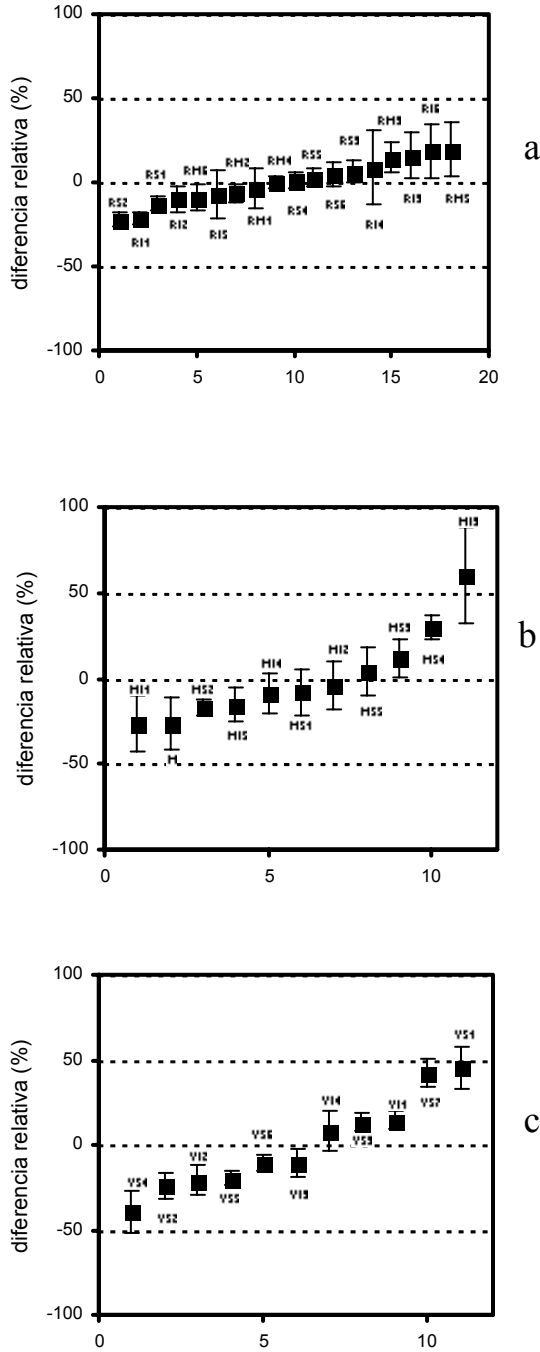


Fig. 2. Diferencias relativas de los valores de humedad media en cada estación: a, C.E. de Rinconada; b, C.E. de Morille; c, C.E. de Villamor.

La metodología utilizada permite la identificación de los puntos representativos para el control de la humedad media

(Grayson y Western, 1998), es decir, aquellos que se sitúan próximos al cero de diferencia relativa media y además tienen el valor mínimo de desviación estándar. Las estaciones correspondientes a dichos puntos serían aquellas que más se aproximarían al valor medio de humedad de toda la cuenca. La identificación rigurosa de estas estaciones resulta de gran utilidad ya que permitiría, a partir de ese momento, reducir el muestreo a un solo punto, cuando el único dato que se necesitara fuera el promedio. Si se utiliza el criterio del 5% de desviación estándar máxima, como ha sido propuesto en algún caso (Van Pelt y Wierenga, 2001), únicamente en la cuenca de Rinconada (estación RM4, Fig. 2a) es posible seleccionar la estación representativa de la humedad media de toda la cuenca. En las otras dos (Fig. 2b y c), ninguna de las estaciones se aproxima lo suficiente al valor nulo de diferencia relativa y al mismo tiempo tiene una desviación estándar inferior al 5%. Esto puede deberse, por un lado, a la mayor heterogeneidad espacial ligada a los usos del suelo de las cuencas de Morille y Villamor, y, por otro, a que quizá sea necesario en estos dos casos, por ese mismo motivo, un periodo de observaciones más largo.

En artículos publicados recientemente ha habido una cierta discrepancia sobre la relación existente entre estabilidad temporal y contenido de humedad en el suelo. Determinados autores consideran que existe una mayor estabilidad durante los periodos secos (Robinson y Dean, 1993; Famiglietti et al. 1998). Otros consideran que la inestabilidad es mayor cuando el suelo contiene menos humedad (Van Wesenbeeck y Kachanoski, 1988; Gómez-Plaza et al. 2000; Qiu et al. 2001; Hupet y Vanclooster, 2002). En un trabajo reciente, Martínez-Fernández y Ceballos (2003) han analizado la estabilidad temporal a partir de una serie de tres años de datos de una red de estaciones de medición de la humedad del suelo sobre un amplio territorio del centro de la cuenca del Duero y han encontrado una relación directa muy clara entre inestabilidad temporal y contenido de humedad. En la figura 3 se muestra la evolución que ha seguido el contenido de humedad y la varianza asociada a cada observación en las tres cuencas. Se observa un notable paralelismo entre media y varianza, más evidente en los casos de Morille y Villamor (Fig. 3b y c) y mucho menos en el de Rinconada (Fig. 3a). En este último caso la estabilidad temporal es muy alta en todo el periodo analizado, puesta de manifiesto por valores muy bajos de varianza en todo momento. En Rinconada la varianza media de la serie de observaciones es $0.0012 \text{ (cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})^2$, casi tres y cuatro veces inferior a la de Morille, $0.003 \text{ (cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})^2$, y Villamor, $0.0041 \text{ (cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})^2$, respectivamente. El valor mínimo de varianza en las tres cuencas siempre coincide con el periodo de menor contenido de humedad, siendo entre dos y tres veces inferior a los valores máximos de los periodos húmedos. No obstante, durante éstos últimos se observa una mayor variabilidad.

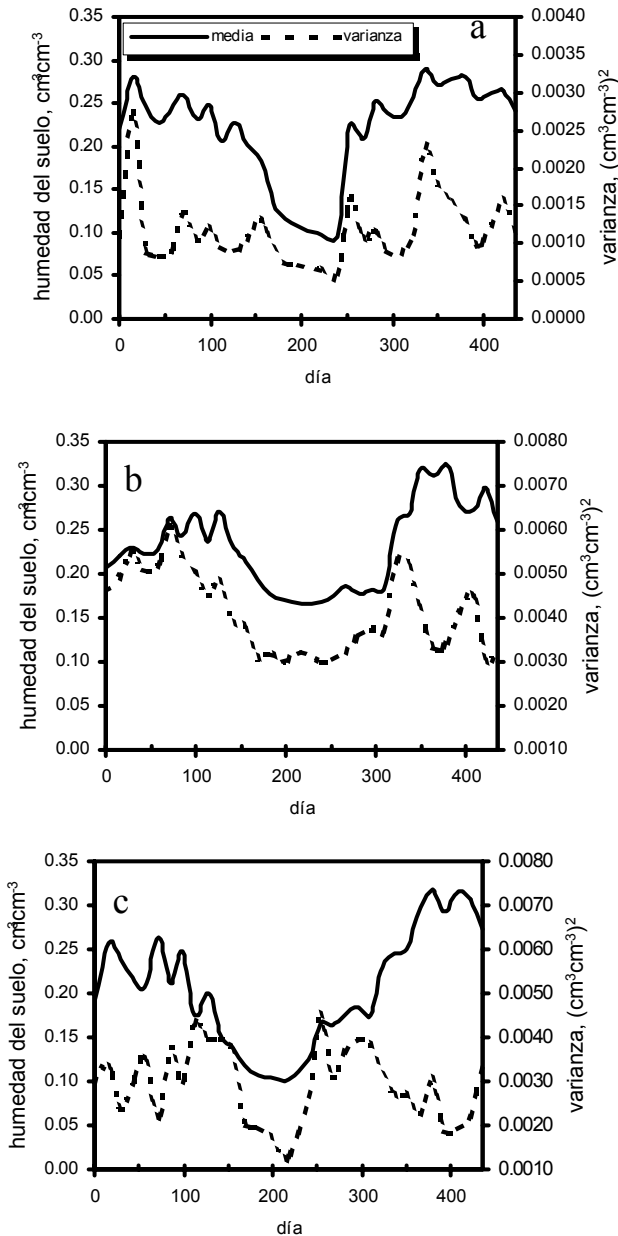


Fig. 3. Evolución de la varianza de las observaciones frente a la humedad del suelo media durante el periodo estudiado. (a, C.E. Rinconada; b, C.E. Morille; c, C.E. Villamor)

El análisis de regresión entre media y varianza muestra un comportamiento distinto según el caso. Mientras en Rinconada (Fig. 4a) existe una relación directa (modelo lineal, $R^2 = 0.38$) para todo el rango de mediciones, resultado similar al hallado en Martínez-Fernández y Ceballos (2003), en las otras cuencas la relación es más compleja. Tanto en Morille (Fig. 4b, modelo cúbico, $R^2 = 0.78$), como en Villamor (Fig. 4c, modelo cuadrático, $R^2 = 0.56$), parece detectarse un comportamiento opuesto para valores bajos y altos de humedad. Cuando el contenido de

agua es reducido la relación entre esta variable y la varianza es directa. Una relación similar aparece reflejada en Famiglietti et al. (1998), quienes obtienen una relación directa hasta un determinado valor de humedad, más allá del cual se hace difusa y difícil de establecer. Lo sorprendente de estas dos cuencas es que a partir de un cierto contenido de agua en el suelo la relación con la varianza de las observaciones se invierte claramente. En el caso de Morille ese contenido se sitúa en torno a $0.175 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ y en Villamor $0.250 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, valores que estarían asociados a las situaciones de mayor inestabilidad temporal en términos de varianza. En ambos casos dichos umbrales se han situado, durante el periodo analizado, en los meses de mayo y octubre. Esto equivaldría a decir que la máxima inestabilidad temporal se da en los periodos de transición, cuando el suelo se está secando o se está recargando de agua, inmediatamente antes y después del verano. El hecho de que a partir de ese valor umbral la estabilidad aumente a medida que lo hace el contenido de humedad podría explicarse por la aproximación al contenido de humedad a saturación. Esta variable presenta en Morille y Villamor una variabilidad espacial baja, con coeficientes de variación del 14% y 16%, respectivamente.

El diferente resultado hallado entre las tres cuencas podría estar relacionado con el uso del suelo de cada una. La cuenca de Rinconada está ocupada en un 90% por un denso bosque de roble, factor que contribuye a uniformar la respuesta hidrológica del suelo. Esto podría explicar el menor rango de variación en las diferencias relativas (Fig. 2), los valores tan reducidos de varianza durante todo el periodo de mediciones (Fig. 3) y la relación simple y directa entre contenido de humedad e inestabilidad temporal. Esta cuenca es, además, la única en la que es posible identificar claramente la estación de medición representativa del valor medio. En Morille y Villamor, la heterogeneidad debida al uso del suelo es mayor y se manifiesta en un comportamiento mucho más complejo en términos de estabilidad temporal. En el segundo caso, la existencia de cultivos hace que el comportamiento de los suelos sea diverso, en relación con la demanda evapotranspirativa de agua. La presencia de la dehesa en la cuenca de Morille determina diferencias notables en el reparto y en la conservación de humedad entre los espacios abiertos y aquellos que están ocupados por árboles (Joffre y Rambal, 1993).

4. Conclusiones

El análisis de estabilidad temporal pone de manifiesto la persistencia de los patrones de distribución espacial de la humedad del suelo y permite identificar aquellas situaciones o periodos en los que la variabilidad en la respuesta de los suelos es más alta. En este trabajo se ha llevado a cabo un análisis de estabilidad temporal comparado entre suelos situados bajo diferentes condiciones ambientales y de uso del suelo, dentro de un mismo contexto climático.

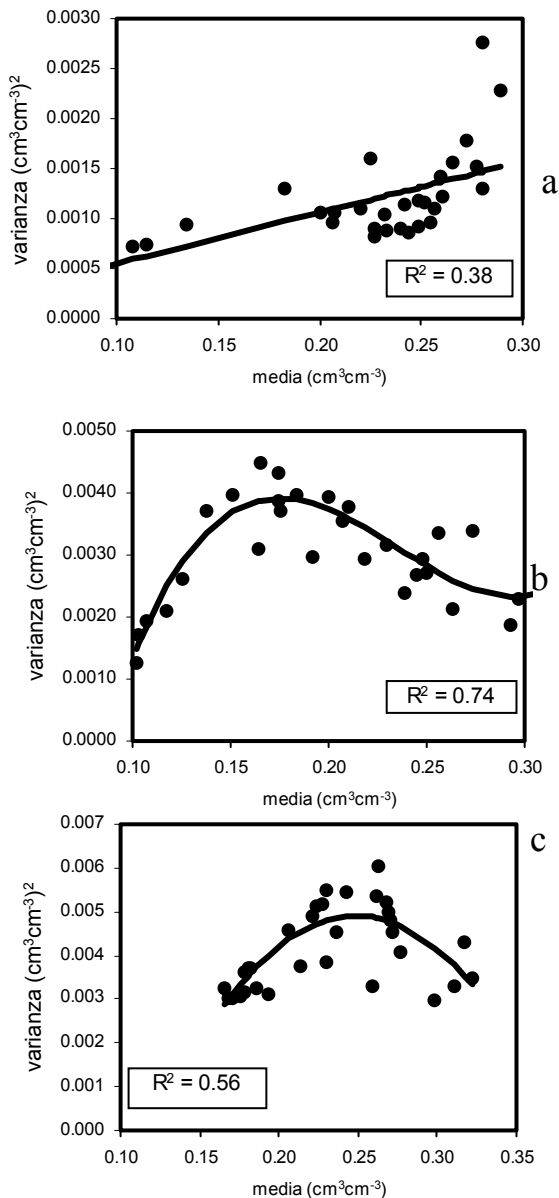


Fig. 4. Relación entre contenido de humedad del suelo y varianza (a, Rinconada; b, Morille; c, Villamor).

Frecuentemente se emplean las características físicas del suelo o los atributos topográficos, como variables que explican el comportamiento temporal del contenido de humedad del suelo. En este trabajo, el uso del suelo se ha mostrado como un factor importante para poder entender las diferencias encontradas en unos casos y otros. La presencia de bosque denso (C.E. de Rinconada) confiere a la dinámica de la humedad edáfica una gran estabilidad temporal, mientras que el bosque abierto (C.E. de Morille) o los cultivos (C.E. de Villamor) constituyen patrones de comportamiento mucho más variables.

Se ha observado que los periodos de mayor estabilidad son aquellos en los que el contenido de agua en el suelo es menor. Los periodos críticos coinciden con estados de

humedad transitorios, inmediatamente anteriores y posteriores a la época estival. Bajo determinadas circunstancias es posible identificar puntos de muestreo representativos del valor medio de humedad del suelo de toda la cuenca. Esta información resulta de enorme interés en aspectos relacionados con el diseño y la planificación de los muestreos, la elección de la metodología para las mediciones o la escala de análisis.

Agradecimientos. Los autores quieren expresar su agradecimiento a la Junta de Castilla y León (Proyecto SA55-00A) y al Ministerio de Ciencia y Tecnología (Proyecto REN2000-1157), sin cuya financiación no habría sido posible la realización de este trabajo.

Referencias

- Comegna, V. y Basile, A. 1994. Temporal stability of spatial patterns of soil water storage in a cultivated Vesuvian soil. *Geoderma*. 62:299-310.
- Entin, J.K., A. Robock, K.Y. Vinnikov, S.E. Hollinger, S. Liu y A. Namkhai. 2000. Temporal and spatial scales of observed soil moisture variations in the extratropics. *J. of Geophys. Res.* 105:11865-11877.
- Famiglietti, J. S., J. W. Rudnicki y M. Rodell. 1998. Variability in surface moisture content along a hillslope transect: Rattlesnake Hill, Texas. *J. of Hydrology*. 210:259-281.
- Gómez-Plaza, A., J. Alvarez-Rogel, J. Albaladejo y V. M. Castillo. 2000. Spatial patterns and temporal stability of soil moisture across a range of scales in a semi-arid environment. *Hydrological Proc.* 14:1261-1277.
- Goovaerts, P. y C. N. Chiang. 1993. Temporal persistence of spatial patterns for mineralizable nitrogen and selected soil properties. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 57:372-381.
- Grayson, R. B. y A. W. Western. 1998. Towards areal estimation of soil water content from point measurements: time and space stability of mean response. *J. of Hydrology*. 207:68-82.
- Hupet, F. y M. Vanlooster. 2002. Intra-seasonal dynamics of soil moisture variability within a small agricultural maize cropped field. *J. of Hydrology*. 261:86-101.
- Jaynes, D. B. y D.J. Hunsaker. 1989. Spatial and temporal variability of water content and infiltration on a flood irrigated field. *Trans. ASAE*. 32:1229-1238.
- Joffre, R. y S. Rambal. 1993. How tree cover influences the water balance of Mediterranean rangelands. *Ecology*. 74: 570-582.
- Kachanoski, R.G. y E. de Jong. 1988. Scale dependence and the temporal persistence of spatial patterns of soil water storage. *Water Resour. Res.* 24:85-91.
- Martínez Fernández, J. y A. Ceballos Barbancho. 2001. Diseño y validación de una sonda TDR para la medición de la humedad del suelo. En (J.J. López, M. Quemada Eds.) *Zona no saturada. Investigaciones*. Universidad Pública de Navarra. Pamplona. 37-43.
- Martínez-Fernández, J. y A. Ceballos. 2003. Temporal stability of soil moisture in a large-field experiment in Spain. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* (en prensa)
- Nielsen, D.R., Biggar, J.W. y K.T. Erh. 1973. Spatial variability of field-measured soil-water properties. *Hilgardia*. 42:215-259.
- Qiu, Y., B. Fu, J. Wang y L. Chen. 2001. Spatial variability of soil moisture content and its relation to environmental indices in a semi-arid gully catchment of the Loess Plateau, China. *J. of Arid Environ.* 49:723-750.
- Robinson, M. y T.J. Dean 1993. Measurement of near surface soil water content using a capacitance probe. *Hydrological Proc.* 7:77-86.
- Vachaud, G., A. Passerat de Silans, P. Balabanis, y M. Vauclin. 1985. Temporal stability of spatially measured soil water probability density function. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 49:822-828.
- Van Pelt, R. S. y P. J. Wierenga. 2001. Temporal stability of spatially measured soil matrix potential probability density function. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 65:668-677.
- Van Wesenbeeck, I. J. y R. G. Kachanoski. 1988. Spatial and temporal distribution of soil water in the tilled layer under a corn crop. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 52:363-368.