

## EFFECTO DEL MANEJO DEL SUELO SOBRE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE LA HUMEDAD DEL SUELO A ESCALA DE PARCELA

A. Pedrera-Parrilla<sup>1</sup>, K. Vanderlinden<sup>1</sup>, A.J. Espejo-Pérez<sup>2</sup>, J.V. Giráldez-Cervera<sup>2</sup>, J.L. Muriel-Fernández<sup>1</sup>

<sup>1</sup>IFAPA, Centro Las Torres-Tomejil, Alcalá del Río (Sevilla), España, [aura.pedrera.ext@juntadeandalucia.es](mailto:aura.pedrera.ext@juntadeandalucia.es)

<sup>2</sup>Departamento de Agronomía, Universidad de Córdoba e Instituto de Agricultura Sostenible, CSIC, Córdoba, España

**RESUMEN.** Con este trabajo se pretende mejorar nuestro conocimiento sobre la dinámica y la organización de la humedad del suelo a escala de parcela, con el fin de optimizar su determinación e interpretación en aplicaciones hidrológicas y agrícolas. Se realizaron periódicamente mediciones de la humedad gravimétrica durante los años 2008, 2009 y, enero y febrero de 2010 en 54 puntos en un ensayo de manejo del suelo, con una rotación trigo-girasol-leguminosa. Se estimó el patrón de la humedad del suelo que se mantiene estable en el tiempo y se identificaron los puntos más húmedos, los más secos y los que mejor representan la humedad media de la parcela durante el período de medición. Se caracterizó la variación de la humedad en este suelo arcilloso, y se relacionó con el sistema de manejo del mismo, así como con la topografía. Para ello se evaluaron las relaciones entre la desviación típica, el coeficiente de variación y el sesgo con la humedad gravimétrica media del suelo de la parcela experimental. Se determinaron en laboratorio las curvas de retención para cada sistema de manejo, ajustando el modelo de Brooks y Corey, a partir del cual se exploró la posibilidad de inferir la relación entre la desviación típica o el coeficiente de variación y la humedad media para cada sistema de manejo.

**ABSTRACT.** Soil moisture is a key variable for physical, chemical and biological processes that occur on the soil-plant-atmosphere system. This work aims at improving our understanding of soil moisture dynamics and organization, at field scale, in order to optimize its determination and interpretation for hydrological and agricultural applications. Gravimetric soil water content was measured on 38 moments during the years 2008, 2009 and, January and February, 2010, with a wheat-sunflower-legume rotation, at 54 locations, to compare different soil management systems. We estimated the time-stable pattern and identified the sampling points that best represented the wettest, the driest and the average water content during the sampling period. Gravimetric water content in this clay soil was found to be related to the management system, as well as to topography. We evaluated the relationship between the standard deviation, the coefficient of variation and the skewness coefficient, and the field-average gravimetric soil water content. Soil water retention curves for each management system were determined, and fitted with the Brooks and Corey model, and we explored the possibility of using these to infer the relationships between the standard deviation, or the coefficient of variation, and the field-average water content for each management system.

### 1.- Introducción

La humedad del suelo regula la interacción entre la superficie de la Tierra y la atmósfera, influye por tanto en el tiempo y el clima (Entekhabi, 1995), y determina la conversión de precipitación en escorrentía (Dunne et al., 1975). El agua también es determinante para el crecimiento de las plantas (Rodríguez-Iturbe, 2000), así como para los procesos físicos y biogeoquímicos que ocurren en el suelo (White, 1997), cumpliendo así un importante papel en la organización de los ecosistemas naturales y de la biodiversidad. Gran parte de las prácticas agrícolas, entre ellas el riego, influyen en la dinámica espacial y temporal de la humedad del suelo en la zona radical (Vereecken et al., 2008). En particular, el manejo del suelo afecta directamente las propiedades físicas del mismo y con ello los procesos implicados en el balance de agua y su aprovechamiento por los cultivos.

Vachaud et al. (1985) fueron de los primeros en analizar la estabilidad temporal de la humedad del suelo, observando que algunos puntos conservan la propiedad de representar el contenido medio de agua y los valores extremos alcanzados en la parcela en cualquier momento. Shao et al. (2010) introdujeron recientemente el uso del *mean absolute bias error* (MABE) en el análisis, para identificar puntos que permanecen estables en el tiempo, es decir, aquellos que pueden utilizarse para reflejar el contenido medio de una parcela con un determinado error. Los resultados de este tipo de análisis permiten reducir el número de observaciones, objetivo que, mediante otros procedimientos, también consiguieron Famiglietti et al. (2008), quienes exploraron la relación entre la desviación típica de la humedad del suelo, el coeficiente de variación, y el coeficiente de sesgo con el contenido medio de agua del suelo a seis escalas diferentes entre 2,5 m y 50 km. Se obtuvieron unas relaciones empíricas entre la variabilidad espacial de la humedad del suelo y su valor medio. Vereecken et al. (2007), utilizaron el análisis estocástico de Zhang et al. (1998) para predecir la variabilidad de la humedad en el suelo y mostrar cómo los parámetros de la curva de retención (Brooks y Corey (1964)) y su variabilidad espacial determinan la forma de la función desviación típica-contenido medio de humedad. Demostraron también que las propiedades hidráulicas del suelo y su variabilidad pueden ser estimadas, de forma inversa, a partir de un conjunto de medidas puntuales de humedad.

El objetivo general de este trabajo es caracterizar la variación espacial y temporal de la humedad gravimétrica en un suelo arcilloso, evaluando y contrastando el efecto de distintos factores como el tiempo, la profundidad de muestreo, el manejo del suelo, y la orientación del mismo. Para ello se ha determinado el patrón de la humedad del suelo que se mantiene estable en el tiempo, se han establecido relaciones empíricas entre la desviación típica y el coeficiente de variación con la humedad media observada, se ha evaluado el efecto del manejo sobre la curva de retención y sobre la variabilidad de la humedad del suelo y se ha explorado la posibilidad de inferir la relación entre la desviación típica y/o el coeficiente de variación y la humedad media a partir de la curva de retención.

## 2.- Materiales y métodos

El estudio se realizó en la finca experimental Tomejil, del IFAPA (37° 24' N, 5° 35' E, 79 msnm), localizada en la vega de Carmona, donde se realiza desde el otoño de 1982 un ensayo comparativo de distintos sistemas de manejo de suelo, situado aproximadamente en la divisoria de agua entre el río Corbones al N y el Guadaira al S.

La parcela está dividida en doce parcelas elementales de 15x180m (Fig. 1), donde se alternan tres sistemas de manejo distintos. En este trabajo solamente se considerarán las parcelas de siembra directa (SD) y las de laboreo tradicional (LT). Por laboreo tradicional (LT) se entiende el conjunto de labores, que iban desde la quema de los rastrojos al final de la recolección, que hoy está ya prohibida, hasta la preparación del lecho de siembra, lo que se consigue por un pase de vertedera profunda, 0.3-0.4 m, y sucesivos pases de cultivador para reducir el tamaño de los terrones que dejó la vertedera. El tratamiento de siembra directa (SD) se reduce a la siembra, que se suele hacer con una sembradora *ad hoc*, controlando las malas hierbas con herbicidas.

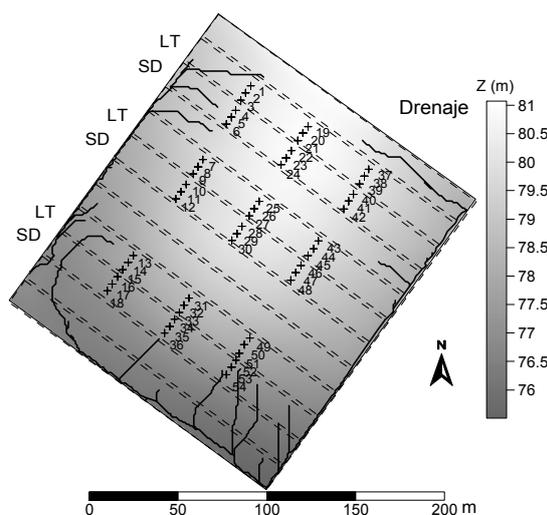


Fig. 1. Esquema de la parcela de estudio con la posición de los 54 puntos donde se midió la humedad del suelo, las parcelas en laboreo tradicional (LT) y siembra directa (SD), la topografía y las líneas de drenaje.

La productividad del suelo es parecida, en principio, en ambos sistemas de manejo. La ventaja de la siembra directa es, esencialmente, la reducción de los costes de cultivo, y la protección del suelo frente a los agentes erosivos. Cuando la precipitación anual es inferior a la media, la mejor conservación del agua en el suelo bajo siembra directa induce un aumento de la productividad con respecto a la del cultivo tradicional (Ordóñez et al., 2006).

La parcela de estudio presenta un relieve suave con una zona más elevada cercana a la zona perimetral situada hacia el noreste de la parcela, como puede verse en la Fig. 1. La máxima diferencia de cotas en la parcela es aproximadamente 5 m. En la misma figura pueden también observarse las líneas de desagüe, todas próximas al perímetro, en las zonas más bajas de la parcela.

Se realizó la medida y análisis de los datos de humedad gravimétrica a distintas profundidades y fechas, comparando ambos manejos, periódicamente y preferiblemente tras la ocurrencia de lluvia, durante los años 2008, 2009 y, enero y febrero de 2010. Para ello se determinó la humedad gravimétrica de las muestras siguiendo el método termo-gravimétrico (e.g. Topp y Ferré, 2002). Las muestras de suelo se extrajeron en campo mediante una barrena tipo Edelman de 5 cm de diámetro y se secaron en una estufa de aire forzado a 105 °C durante 48 h. De forma paralela se realizó la determinación, el ajuste y el análisis de los datos de la curva de retención, comparando ambos manejos. Se tomaron 54 muestras apenas alteradas de suelo superficial en cilindros de acero inoxidable de 5 cm de alto y con un diámetro interno de 4 cm. Las muestras se colocaron en mesas de arena y caolín (Eijkelpamp Agrisearch Equipment, Holanda) y se midió la pérdida de agua de las mismas por pesada después de alcanzar el equilibrio para los distintos potenciales impuestos. Para valores del potencial del agua del suelo inferior a -1000 hPa se empleó un psicrómetro (WP4-TE, Decagon Devices, Inc., EEUU). Por último se ajustó la serie de datos a una función mediante el modelo potencial de Brooks y Corey (1964).

Se realizó un análisis exploratorio según profundidad y manejo para los datos gravimétricos en las distintas fechas de muestreo y, siguiendo el procedimiento descrito por Famiglietti et al. (2008), se ajustaron relaciones empíricas entre la desviación típica y el coeficiente de variación de la humedad media del suelo,  $\sigma(\langle\theta\rangle)$ ,  $CV(\langle\theta\rangle)$ . Se ajustó una función exponencial a la relación entre el CV y el contenido medio de humedad del suelo:

$$CV = k_1 \exp(k_2 \langle\theta\rangle) \quad (1)$$

siendo  $k_1$  y  $k_2$  parámetros y  $\langle\theta\rangle$  el contenido medio de humedad del suelo. Y se empleó la expresión:

$$\sigma = k_1 \langle\theta\rangle \exp(-k_2 \langle\theta\rangle) \quad (2)$$

Las ecuaciones (1-2) permiten estimar el intervalo de confianza del contenido medio de humedad de la parcela

con un número de puntos muestrales ( $N$ ) dado, así como estimar el número de puntos necesarios para alcanzar una determinada confianza. Por ejemplo, el número de muestras requeridas para alcanzar una precisión de  $\pm 0,010$  con un 95% de confianza puede calcularse mediante la ecuación:

$$N = \left( t_{0,975,N} \cdot \frac{\sigma}{0,010} \right)^2 \quad (3)$$

donde  $N$  es el número de muestras y  $t$  es la distribución t-Student.

Para estudiar la estabilidad temporal se calculó la probabilidad acumulada para el día más seco y el más húmedo, diferenciando ambos sistemas de manejo. Para cada fecha y cada manejo se espera que aquellos puntos que se correspondan con una probabilidad del 50% representen la humedad media de la parcela. Se calculó también la diferencia relativa media (DRM) mediante la técnica propuesta por Vachaud et al. (1985) para analizar la estabilidad temporal, que consiste en calcular el valor medio de humedad en cada punto, en el tiempo.

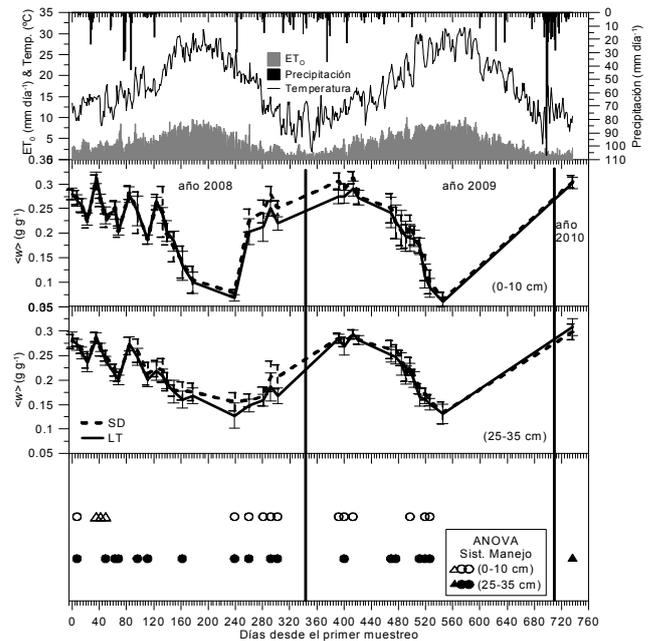
Finalmente, siguiendo la propuesta de Vereecken et al. (2007) se utilizaron las expresiones desarrolladas por Zhang et al. (1998) para inferir la relación entre la desviación típica y el coeficiente de variación con la humedad media, a partir de las curvas de retención, utilizando los parámetros del modelo de Brooks y Corey (1964).

### 3.- Resultados y discusión

Se puede apreciar en la Fig. 2 la evolución temporal de la humedad gravimétrica media y la desviación típica para 38 fechas de muestreo entre el 2008 y 2010, distinguiendo dos sistemas de manejo y dos profundidades. Se muestra también la precipitación, la temperatura y la evaporación (Fig. 2) El 2 de Junio de 2009 (día 548 desde el primer muestreo) representa el día de muestreo más seco y el 2 de Febrero de 2010 (día 740 desde el primer muestreo) el más húmedo. En la figura, triángulos y círculos representan aquellos muestreos en los que se han encontrado diferencias significativas ( $P < 0.05\%$ ) entre LT y SD, respectivamente, para las dos profundidades estudiadas.

Es posible observar que en el horizonte superior la humedad varía más con el tiempo que en el horizonte inferior, debido a que es ahí, donde más influyen los cambios en el flujo suelo-atmósfera. Se observa también que tanto al principio de la estación lluviosa como en la estación seca el suelo está más húmedo bajo SD que bajo LT en ambas profundidades, mientras que, durante la estación lluviosa las diferencias son menos llamativas, generalmente en toda la estación seca y la diferencia entre ambos tratamientos es significativa, a favor de la SD. Esto puede deberse a que, en la estación seca, el suelo en SD está más húmedo que el suelo en LT debido a la capa de residuos de cultivos del año anterior que actúa reduciendo el ratio de evaporación, por delgada o poco densa que sea, y a que, con las primeras lluvias, la grietas superficiales en SD mantienen abierta una vía preferencial para la infiltración

del agua de lluvia, en contraste con las grietas cerradas en superficie por la labor ejecutada tras la recolección en LT.



**Fig.2.** Evolución temporal del contenido medio de agua en la parcela y la desviación típica, para laboreo tradicional (LT) y siembra directa (SD), y horizontes entre 0-10 y 25-35 cm. Arriba, evolución de la evaporación, precipitación y temperatura. Abajo, LT ( $\triangle$ ,  $\blacktriangle$ ) y SD ( $\square$ ,  $\bullet$ ) indican una humedad media significativamente superior en SD y LT.

Los puntos que mejor representan el contenido medio de humedad del suelo, obtenidos a partir del cálculo de la probabilidad acumulada, se muestran en la tabla 1.

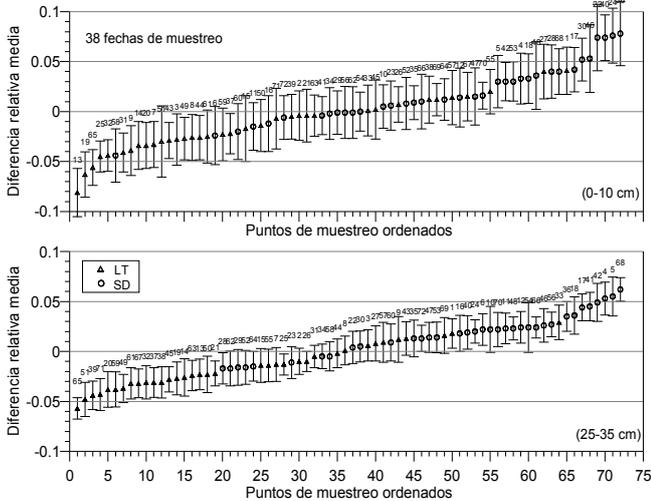
**Tabla 1.** Puntos cuya DRM corresponde con una probabilidad acumulada del 50%, para el día más seco (7 Junio 2009) y el más húmedo (2 Febrero 2010)

Profundidad	7 Jun 2009		2 Feb 2010	
	LT	SD	LT	SD
(0-10)	31	5	33	28
(25-35)	45	48	32	34

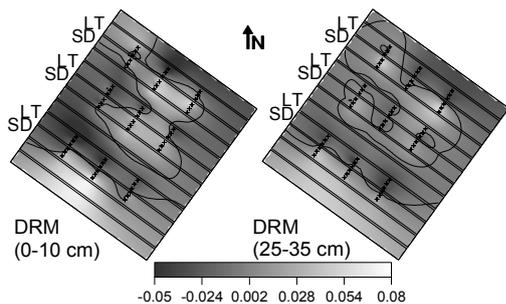
Ordenando la diferencia relativa media (DRM) de todos los puntos, distinguiendo ambos sistemas de manejo y ambas profundidades (Fig. 3), se pueden identificar los puntos con valores de DRM próximos a cero, es decir aquellos que representan el contenido medio de humedad en el suelo. Los valores máximo y mínimo representan, en cambio, los puntos más alejados del contenido medio de humedad.

Los mapas de la Fig. 4 muestran la DRM para ambas profundidades y la línea de contorno DRM=0. Nótese que generalmente los valores positivos de la DRM se corresponden con la siembra directa mientras que los negativos se corresponden con el laboreo tradicional (Fig. 3) Para identificar el punto representativo del contenido medio de humedad no solo se ha considera aquel con una DRM más próxima a cero, sino el que a la vez tiene una menor desviación típica, en este estudio el punto 32

muestra la variabilidad más baja y por tanto presenta mayor estabilidad temporal, a -0.05 unidades de DRM del valor medio.

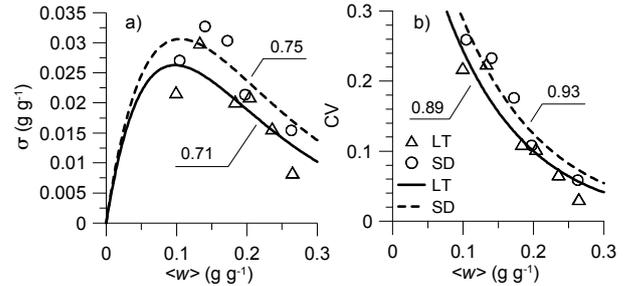


**Fig. 2.** Puntos de muestreo ordenados de forma creciente según su diferencia relativa media, para LT (▲) y SD (○) y a 0-10 y 25-35 cm. Las barras de error representan la desviación típica.



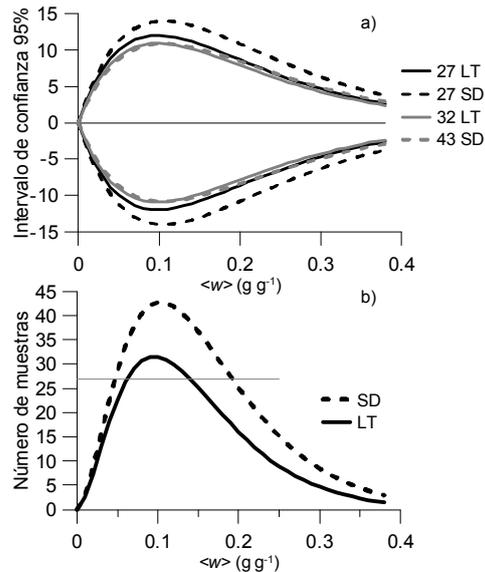
**Fig. 4.** Mapas de la diferencia relativa media para las profundidades 0-10 y 25-35 cm. La curva continua se corresponde con el valor de DRM=0.

Las relaciones entre la desviación típica y el coeficiente de variación frente al valor medio de la humedad en la parcela, para ambos sistemas de manejo y profundidades, mostraron las tendencias esperadas. Sin embargo, presentaban un ruido considerable debido a la distorsión que provoca la topografía en los valores de humedad intermedios, por lo que se repitió el análisis tomando los datos que pertenecían a un período de desecación que va desde el 26 de mayo de 2008 hasta el 18 de junio de 2008 (desde el día 136 hasta el día 240 desde el primer muestreo) a la profundidad (0-10) cm. A estos datos se le ajustaron las ecuaciones empíricas propuestas por Famiglietti et al. (2008) Se encontró la máxima variabilidad en 0.1-0.12 g/g, este valor es mayor en las parcelas de siembra directa y está ligeramente desplazado hacia la derecha (Fig. 5) Esto último puede deberse a que el laboreo tradicional homogeniza el suelo, mientras que la siembra directa lo estratifica a medida que transcurre el tiempo.



**Fig.5.** Relación entre la desviación típica y la humedad media (a) y el coeficiente de variación y la humedad media (b). Valores del R<sup>2</sup> para los distintos ajustes.

Usando la ecuación (3), se ha calculado el intervalo de confianza al 95% para 27 y 32 puntos de muestreo en laboreo tradicional y para 27 y 43 puntos en siembra directa y, la relación entre el número de muestras y el valor del contenido de agua medio de la parcela. Se observa que se necesita un 26% más de muestras en siembra directa para alcanzar la misma confianza que en laboreo tradicional y que la incertidumbre aumenta conforme disminuye la desviación típica y el número de puntos de muestreo (Fig. 6)



**Fig. 6** (a) Intervalo de confianza al 95% para 27 y 32 puntos de muestreo en LT y 27 y 43 puntos en SD y (b) número de muestras necesarias en cada sistema de manejo para obtener una precisión de 15 g/g.

La Fig. 7 muestra, en un mismo gráfico, las relaciones desviación típica y coeficiente de variación frente a la humedad media, para el período de desecación, a la profundidad 0-10 cm, distinguiendo entre ambos sistemas de manejo y utilizando los datos de humedad gravimétrica.

En la Fig. 8 se han representado las mismas relaciones de la Fig. 7, utilizando los datos de la curva de retención ajustados al modelo de Brooks y Corey (1964) (Fig. 8a) y los datos encajados mediante la ecuación de Zhang et al. (1998) (Fig. 8b). Las tendencias entre la Fig. 7 y la Fig. 8 son similares, sin embargo, las magnitudes son diferentes,

por ello se reajustaron los parámetros del modelo de Brooks y Corey (1964) en la Fig. 8b, que muestra similitudes tanto en tendencias como en valores, con la Fig. 7.

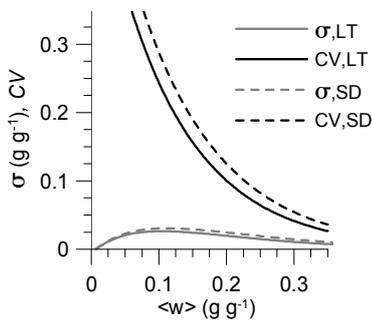


Fig. 7. Relaciones entre la desviación típica y el coeficiente de variación con el contenido de humedad medio, utilizando los datos gravimétricos.

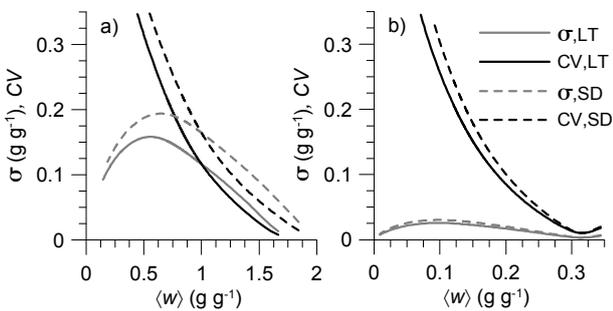


Fig. 8. Relación entre la desviación típica y la humedad media y el coeficiente de variación y la humedad media, (a) utilizando los parámetros obtenidos al ajustar el modelo de Brooks y Corey (1964) y (b) modificando los parámetros obtenidos al ajustar el modelo.

Para ver cómo se ajustaban a los datos, en cada sistema de manejo, se representó (Fig. 9) la curva de retención utilizando los parámetros de Brooks y Corey (1964) usados en las Figs. 8a (Fig. 9 (- -)) y 8b (Fig. 9 (—))

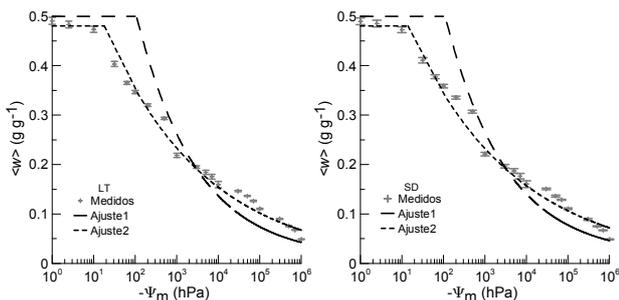


Fig. 9. Valores medios de la curva de retención obtenidos en las parcelas de LT y SD. Las barras de error representan la desviación típica. El Ajuste1 muestra el resultado al aplicar el modelo Brooks y Corey (1964) y el Ajuste2 el obtenido al modificar los parámetros del modelo.

Las curvas (Fig. 8b) son realistas, sin embargo no se ajustan bien a los datos (Fig. 9 (- -)), especialmente cerca del valor de entrada de aire.

#### 4.- Conclusiones

Con los resultados del análisis de estabilidad se identificó un patrón que se mantiene estable en el tiempo, con puntos que representan el valor máximo, mínimo y medio del contenido de agua del suelo, y se observó un efecto distorsionante de la topografía y del manejo de suelo. En relación a las diferencias entre ambos sistemas de manejo se obtuvo que las parcelas en siembra directa retienen significativamente más agua que las parcelas en laboreo tradicional tanto en el tiempo como en el rango de -100 a -500 hPa, además de presentar mayor variabilidad. Del análisis estadístico se concluyó que el número de muestras necesarias para alcanzar la máxima variabilidad es de 32 en laboreo tradicional y de 43 en siembra directa, ambos valores menores a los 54 puntos que actualmente se miden. Al inferir la relación entre la desviación típica y/o el coeficiente de variación y la humedad media a partir de la curva de retención se obtuvo que ambos, las tendencias y los órdenes de magnitud concuerdan en las relaciones, sin embargo para ello fue necesario modificar los parámetros del modelo de Brooks y Corey (1964).

*Agradecimientos.* Se agradece la financiación del Ministerio de Ciencia e Innovación y FEDER a través del proyecto AGL2009-12936-C03-03 y la de la CEIC (Junta de Andalucía) a través del proyecto AGR-4782. A. Pedreira agradece al IFAPA la beca predoctoral que está disfrutando y K. Vanderlinden agradece al Ministerio de Educación la ayuda de movilidad P2010-0191.

#### 5.-Bibliografía

Brooks, R.H. y Corey, A.T. 1964. Hydraulic properties of porous media. *Hydrol. Pap.* 3, Colo. State Univ., Fort Collins.

Dunne, T., Moore T.R. y Taylor, C.H. 1975. Recognition and prediction of runoff-producing zones in humid regions. *Hydrol. Sci. Bull.* 20: 305-327.

Entekhabi, D., 1995. Recent advances in land- atmosphere interaction research. *Rev. Geophys.* 33: 995-1003.

Famiglietti, J.S., Ryu, D., Berg, A.A., Rodell, M. y Jackson, T.J. 2008. Field observations of soil moisture variability across scales. *Water Resour. Res.* 44, W01423, doi:10.1029/2006WR005804.

Ordóñez, R., González, P., Giráldez, J.V. y Perea, F. 2006. Soil properties and crop yields after 21 years of direct drilling trials in southern Spain. *Soil Till. Res.* 94: 47-54.

Rodríguez-Iturbe, I., 2000. Ecohydrology: a hydrologic perspective of climate-soil-vegetation dynamics. *Water Resour. Res.* 36 :3-9.

Shao, M., Hu, W. y Reichardt, K. 2010. Using a new criterion to identify sites for mean soil water storage evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 74: 762-773.

Topp, G.C. y Ferré, P.A. 2002. Water Content. En: Dane y Topp (eds.) *Methods of soil analysis: Part 4-Physical methods.* SSSA Book Series: 5. Soil Science Society of America, Madison.

Vachaud, G., Passerat de Silans, A., Balabanis, P. y Vauclin, M. 1985. Temporal stability of spatially measured soil water probability density function. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49: 822-828.

Vereecken, H., Huisman, J.A., Bogena, 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 Resour. Res.*, 44, W00D06, doi:10.1029/2008WR006829.

Vereecken, H., Kamai, T., Harter, T., Kasteel, R., Hopmans, J.W. y Vanderborght, J. 2007. Explaining soil moisture variability as function of mean soil moisture: a stochastic unsaturated flow perspective.

*Geophys. Res. Lett.*, L22402, doi:10.1029/2007GL031813.

White, R.E., 1997. Principles and practice of soil science. The soil as a natural resource. Blackwell, Oxford.

Zhang, D.X., Wallstrom, T.C. y Winter, C.L. 1998. Stochastic analysis of steady-state unsaturated flow in heterogeneous media: Comparison of the Brooks-Corey and Gardner-Russo models. *Water Resour. Res.* 34: 1437-1449.