

VARIABILIDAD ESPACIO-TEMPORAL DE LA HUMEDAD EN DISTINTOS SISTEMAS DE MANEJO DEL SUELO

Espejo-Pérez, Antonio Jesús^{1*}; Vanderlinden, Karl¹; García-Tejero, Iván¹; Jiménez-Bocanegra, Juan Antonio¹; Perea-Torres, Francisco¹; García-Baqueró, Jorge¹ y Muriel-Fernández, José Luis¹

IFAPA, Centro *Las Torres-Tomejil*, Ctra. Sevilla-Cazalla, km 12.2, 41200 Alcalá del Río (Sevilla)
e-mail: antonioj.espejo@juntadeandalucia.es

Palabras clave: humedad de suelo (θ), variabilidad espacio-temporal, siembra directa (SD), sensores FDR

RESUMEN. *La medición de la humedad del suelo (θ) usando técnicas poco destructivas permite estudiar con un mayor detalle su evolución espacio-temporal. El objetivo de este estudio es evaluar la variabilidad espacio-temporal de la θ en una parcela experimental donde se comparan distintos sistemas de manejo del suelo usando una sonda de capacitancia (Diviner 2000), así como calibrarla y validarla con datos de humedad observados gravimétricamente (θ_g). Los resultados observados indican un amplio rango de θ_g comprendidas entre 0.05-0.35 g g⁻¹, y la necesidad de usar calibraciones locales para estimar con más detalle la humedad del suelo empleando este sensor. Los coeficientes de determinación encontrados al calibrar el sensor fueron cercanos a 0.90. Tras analizar la estabilidad temporal de la θ se aprecia cómo en siembra directa (SD) hubo una mayor cantidad de agua disponible para el cultivo durante la mayor parte del año, especialmente en los primeros 30 cm del perfil.*

Key words: soil moisture content, spatio-temporal variability, direct seeding (DS), FDR sensors

ABSTRACT. *Using non-destructive measurement techniques a detailed analysis can be made of the spatio-temporal variability of soil water content (θ). The objective of this study was to evaluate the spatio-temporal variability of θ on a experimental dryland field where different tillage strategies are being compared, using the Diviner 2000 capacitance sensor. Measurements were calibrated and validated against gravimetric soil moisture observations (θ_g). Results show a large range of θ_g values (0.05 - 0.35 g g⁻¹) and the necessity for site-specific calibration. Coefficients of determination near 0.90 were obtained. After the temporal stability of the θ patterns we observed that plant water availability was larger in the direct drill treatment, specially in the 0-30 cm horizon.*

1. INTRODUCCIÓN

La evolución espacio-temporal de la humedad del suelo a escala de parcela o microcuena es controlada por factores edafohidrológicos y topográficos que interactúan de forma compleja. En general se suele observar una relación cóncava entre la desviación típica (s) y la humedad media, con un máximo para valores de humedad intermedios y un mínimo para suelos secos o saturados (Famiglietti *et al.*, 2008), indicando que el número de observaciones necesarias para estimar la humedad con cierta fiabilidad depende de la humedad media. Otro aspecto a tener en cuenta es el fenómeno de la *estabilidad temporal* o *persistencia temporal* de patrones de humedad del suelo (Vachaud *et al.*, 1985;), observada de manera rutinaria en distintas condiciones (Pachepsky *et al.*, 2005; Guber *et al.*, 2008). La estabilidad temporal da lugar a puntos donde las series temporales de la humedad son muy similares a la serie media de la zona de estudio, lo que permite optimizar la red de medición una vez identificados estos puntos.

En este estudio se comparan las mediciones realizadas con un sensor de capacitancia con datos de humedad gravimétrica, observados en una malla de puntos situados en un ensayo de manejo de suelo. Los objetivos son i)

comparar los datos observados con una sonda Diviner 2000 (Sentek Sensor Technologies, Australia) con datos gravimétricos y proponer una calibración específica para suelos arcillosos, y ii) evaluar la capacidad de este sensor para caracterizar patrones de la humedad del suelo y de su estabilidad temporal, en distintos sistemas de manejo, con el fin de optimizar el diseño de la red de medición.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Parcela de estudio, metodología e instrumentación

El trabajo se desarrolló en la finca experimental Tomejil (Carmona, Sevilla), donde se mantiene desde 1984 un ensayo en el que se comparan distintos sistemas de manejo de suelo en una rotación trigo-girasol-leguminosa (Ordóñez *et al.*, 2007). El suelo se clasifica como Typic Haploxerert (Soil Survey Staff, 1999), con un contenido medio de arcilla de 60%.

En primavera de 2007 se instalaron un conjunto de 18 tubos de medida repartidos equitativamente entre las subparcelas de siembra directa (SD) y laboreo convencional (LC). La Figura 1 muestra la red de puntos de medición. Se realizaron mediciones de la humedad del suelo con un Diviner 2000 en 25 momentos en el tiempo hasta 1 m de profundidad con incrementos de 10 cm acompañados de mediciones gravimétricas de la humedad del suelo a profundidades de 0-10 y de 25-35 cm a menos de 1 m de distancia de los tubos.

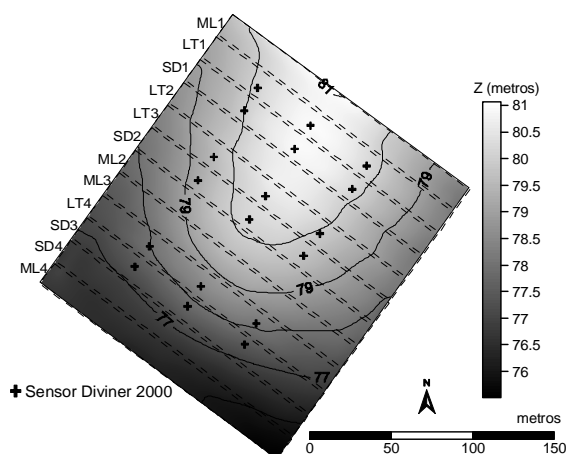


Figura 1. Diseño experimental y topografía, aumentada 10 veces, de la parcela Tomejil. Superpuestas se muestran las parcelas estudiadas de los manejos Laboreo Tradicional (LT), Mínimo Laboreo (ML) y Siembra Directa (SD).

El sistema registrador del sensor transforma la frecuencia normalizada (SF) en humedad volumétrica (θ) empleando la siguiente relación empírica, siendo a , b y c coeficientes de la calibración.

$$\theta = \left(\frac{SF-c}{a} \right)^{1/b} \quad (1)$$

2.2. Análisis de los datos

Para evitar el efecto que tiene el cambio de la densidad aparente con la desecación del suelo, se trabaja la humedad en términos gravimétricos (θ_g , g g⁻¹). Los parámetros a y b y c (Ec. 1) se han ajustado empleando valores medios espaciales de SF y humedad gravimétrica ($\langle SF \rangle$ y $\langle \theta_g \rangle$ respectivamente), que se calculan como:

$$\langle SF_{jk} \rangle = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^n SF_{ij} \quad (2)$$

siendo SF_{ijk} el valor SF de cada punto i , muestreo j y profundidad k ; n es el número de puntos observados.

Se han ajustado relaciones empíricas entre los valores medios espaciales de cada muestreo y el coeficiente de variación (CV) y su desviación típica (s) correspondientes, para determinar el número de mediciones necesarias para determinar con precisión la humedad (Famiglietti et al., 2008), usando la siguiente relación:

$$N = \left(t_{m,n} \frac{s}{d} \right)^2 \quad (3)$$

siendo $t_{m,n}$ la inversa del estadístico t de Student para una probabilidad m con n grados de libertad, y N el número de puntos necesarios para determinar con un error de $\pm d$ $g\ g^{-1}$ la θ con una confianza del 95%.

La estabilidad temporal de la θ fue cuantificada usando la aproximación de Pachepsky *et al.* (2005), la cual es similar a la propuesta con anterioridad por Vachaud *et al.* (1985). La humedad relativa β_{ikj} para cada punto muestreado de localización i , profundidad k y momento j es:

$$\beta_{ikj} = \frac{\theta_{ikj}}{\bar{\theta}_{kj}} \quad (4)$$

siendo θ_{ikj} la humedad medida en un tiempo j para el punto i y profundidad k ; y $\bar{\theta}_{kj}$ el valor promedio de la humedad medida de todos los puntos (N) para un momento de tiempo j .

El índice de estabilidad temporal para cada punto muestreado se obtiene con:

$$\beta_{ik} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^n \beta_{ij} \quad (5)$$

Valores elevados de β_{ik} -superiores a la unidad o valor medio relativo- indican que estos puntos permanecieron muy húmedos la mayor parte del tiempo, y viceversa si son inferiores.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Análisis exploratorio de los datos

La Tabla 1 resume el análisis descriptivo de los datos observados, diferenciando en el mismo la metodología de medición de la humedad (gravimetría y sensor), el manejo de suelo y la profundidad muestreada. Los valores de la media, mediana y curtosis ponen de manifiesto que las poblaciones se asemejan a una distribución normal y por otro lado presentan una gran similitud entre las dos metodologías.

No se observan diferencias significativas en θ entre LC y SD en la profundidad de 10 cm tanto con el empleo del sensor como gravimétricamente, sí bien en la profundidad de 30 cm se encontraron diferencias significativas con ambas metodologías ($p < 0.05$). La varianza disminuye con el aumento de la profundidad y es mayor en superficie en SD. Las últimas tres filas de la Tabla 1 muestran cómo se reparte esta variabilidad entre la variabilidad temporal (B) y la variabilidad espacial (W). La mayor parte de esta varianza se puede explicar con la variabilidad en el tiempo, siendo mayor en el intervalo de 10 cm para SD y en profundidad mayor para LC. En cuanto a la variabilidad espacial, que contribuye en menor manera a la variabilidad total, la variabilidad espacial hallada gravimétricamente es igual para ambas profundidades para ambos manejos. Por otro lado, aunque no lo son significativamente en SD la variabilidad es mayor para las dos profundidades de muestreo usando el sensor. Si se compara el intervalo completo (0-30 cm) incluyendo ambos manejos de suelo, con el empleo del sensor se encontró una mayor variabilidad asociada a la variación temporal (B), y en el caso de la variabilidad espacial (W) se obtuvo una menor variación con el empleo de éste.

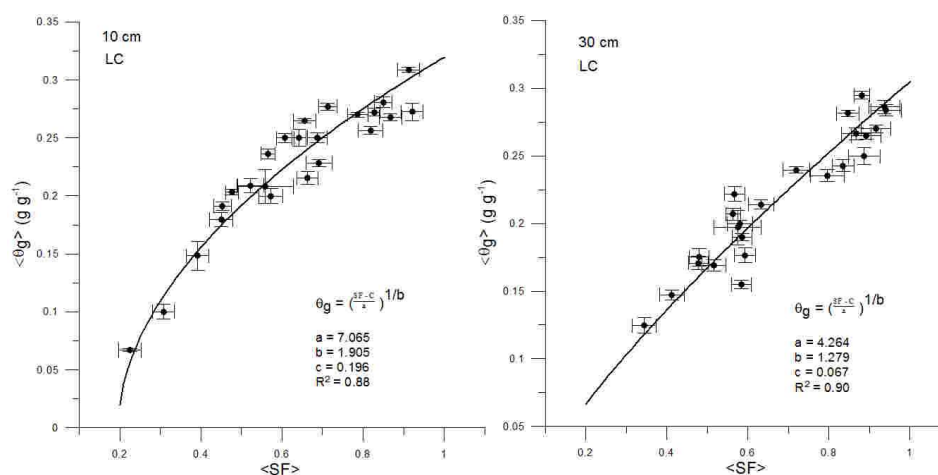
Tabla 1. Resumen de estadísticos descriptivos, periodo comprendido entre 23/01/08-11/03/09. B: varianza entre grupos de muestras tomadas en diferentes momentos de tiempo; W: varianza dentro de grupos de muestras tomadas en el mismo momento de tiempo

Medida	LC				SD				Total	
	θ_g		SF		θ_g		SF		θ_g	SF
Prof (cm)	10 cm	30 cm	10 cm	30 cm	10 cm	30 cm	10 cm	30 cm	0-30 cm	
media	0.22	0.22*	0.63	0.68*	0.23	0.22*	0.65	0.71*	0.22	0.67
mediana	0.23	0.21	0.64	0.64	0.24	0.21	0.65	0.70	0.22	0.67
moda	0.24	-	0.53	0.97	-	-	0.56	0.83	0.24	0.56
Mín	0.06	0.06	0.11	0.23	0.06	0.08	0.13	0.23	0.06	0.11
máx	0.32	0.33	0.98	1.02	0.55	0.43	1.02	1.00	0.55	1.02
rango	0.27	0.27	0.87	0.79	0.49	0.35	0.88	0.77	0.49	0.91
curtosis	0.56	-0.75	-0.49	-1.11	1.44	0.03	-0.36	-0.27	0.77	-0.49
s ²	0.003	0.003	0.039	0.040	0.004	0.002	0.037	0.026	0.003	0.036
N	435	435	428	426	432	429	430	424	1731	1708
B	0.003	0.003	0.038	0.038	0.004	0.002	0.034	0.019	0.0032	0.033
W	0.001	0.001	0.006	0.008	0.001	0.001	0.008	0.011	0.001	0.0001
F	4.21	4.79	6.59	4.46	3.83	3.03	4.00	1.73	2.48	2.67

* Relación significativa, $p < 0.05$

3.2. Calibración SF- θ_g

La Figura 2 representa los valores de SF medidos con la correspondiente θ_g determinada para esa situación y profundidad de muestreo (10 y 30 cm). Para la calibración se han usado valores medios espaciales de 24 muestreos en los 18 puntos (Ec. 2), realizándose dos repeticiones por punto en el caso de la humedad obtenida por gravimetría (θ_g). Los puntos con humedades por debajo del 10% corresponden a los muestreos realizados el 3 de Julio, 18 de Septiembre y 18 de Noviembre de 2008. Los coeficientes de determinación encontrados al ajustar la ecuación 1 son cercanos a 0.90 para las profundidades de 10 y 30 cm.



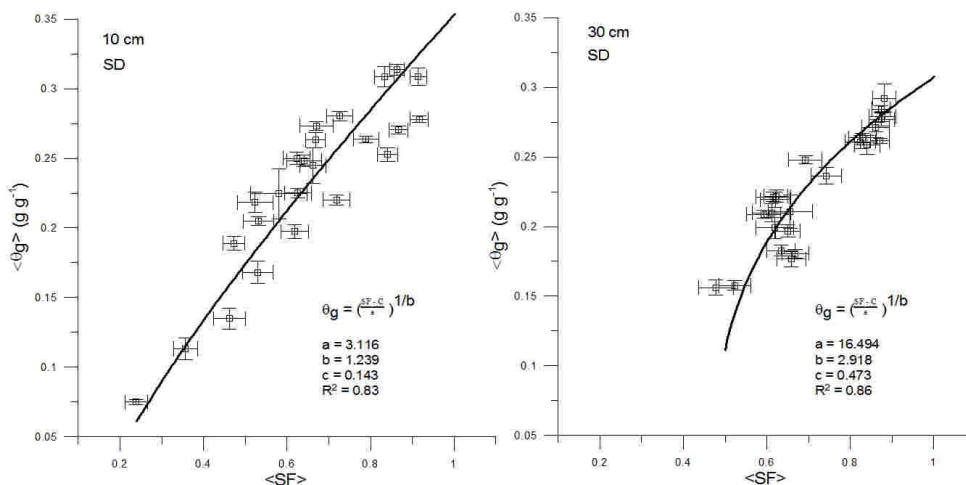


Figura 2. Relación entre SF media espacial (SF) y la humedad gravimétrica media espacial de cada muestreo (θ_g). La figura superior izquierda representa los valores para el manejo de SD y profundidad de 10 cm. De la misma manera las otras figuras representan la relación para la profundidad de 30 cm y manejo de suelo de SD. Las barras horizontales indican el error típico para el caso de la (θ_g) y las verticales el error típico para el caso de la (SF).

La Figura 3 representa la evolución de la humedad para las dos profundidades de muestreo y con ambos sistemas de medida (gravimetría y sensor) junto a la distribución de la precipitación y evapotranspiración de referencia (ET_0). La humedad representada medida por el sensor se ha obtenido empleando las calibraciones propuestas en la Figura 2 a partir de la correspondiente SF.

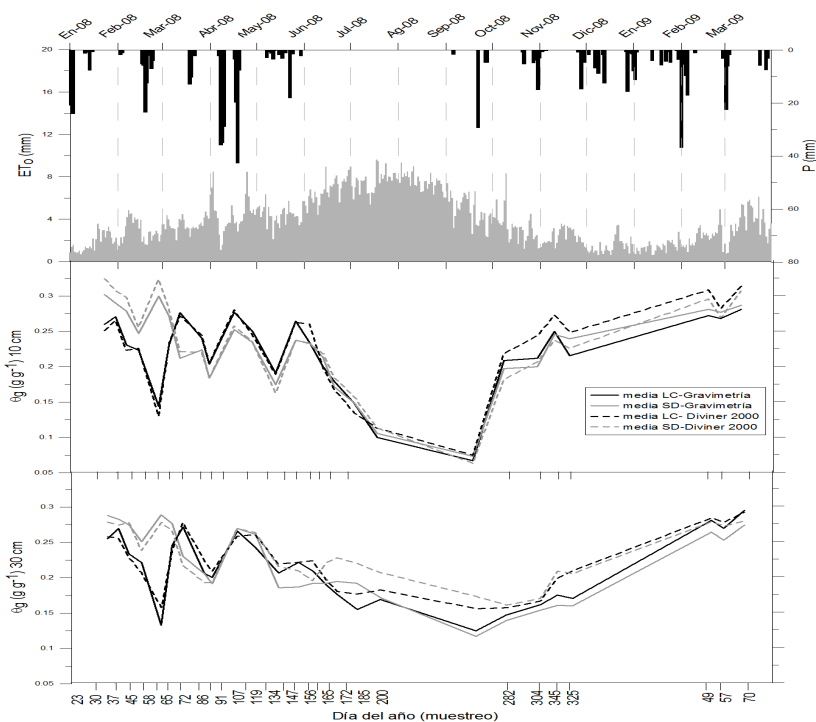


Figura 3. Evolución de la θ_g estimada a partir del Diviner 2000 y observada gravimétricamente en el periodo 23/01/08 – 11/03/09 para las profundidades de 10 y 30 cm, y manejos de suelo LC y SD, precipitación (P) y evapotranspiración de referencia (ET_0)

Se observa que para ambas profundidades la θ_g es mayor en el caso de SD, encontrándose diferencias significativas ($p < 0.95$) para la profundidad de 30 cm en los muestreos que se realizaron entre Junio 2008 y Marzo 2009. Las precipitaciones han sido generalmente de poca cuantía (inferiores a 40 mm), y en estas condiciones donde el suelo está alterado por el laboreo en el sistema de LC la infiltración es mayor, aunque a largo plazo en SD infiltra más agua y retiene más.

3.3. Variabilidad a escala de parcela

La Figura 4 muestra un mapa de la parcela sobre el que se superpone valores de la estabilidad temporal calculada siguiendo la metodología propuesta por Pachepsky *et al.* (2005) empleando por un lado los datos del sensor y por otro los muestreos gravimétricos para ambas profundidades. β_{ik} (Ec. 5) representa el valor relativo respecto a la media para cada situación.

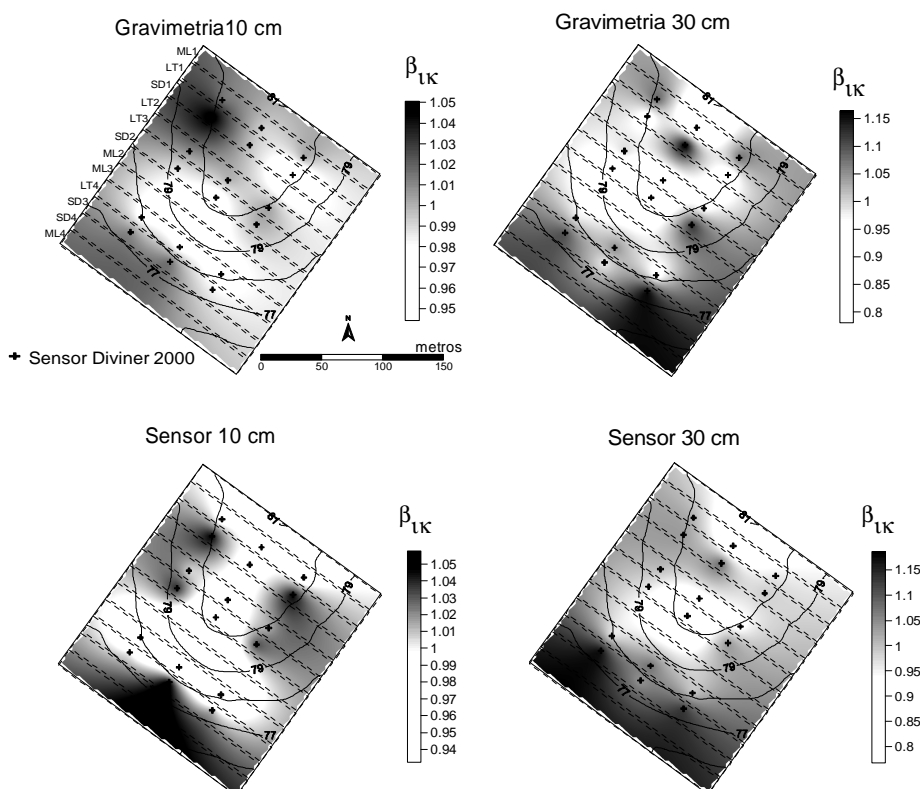


Figura 4. Mapas de diferencias relativas calculados (β_{ik}) para los puntos muestreados en las 25 fechas. La figura superior izquierda representa la aplicación de Pachepsky *et al.* (2005) usando valores de humedad obtenida por gravimetría para la profundidad de 0-10 cm durante el periodo 23/1/08 a 11/3/09. El mapa superior derecho representa los mismos valores pero para la profundidad de 25-35 cm. La figura inferior izquierda y derecha representan valores de diferencias relativas empleando datos medidos por el sensor para las mismas profundidades y periodo de muestreo.

Se observó que la zona de mayor cota de la parcela es la que tuvo un valor medio de θ más bajo en el periodo, y donde las variaciones en la θ fueron mayores. Los puntos más bajos son los más húmedos, debido a la aportación de agua de otras zonas más altas. Dentro de estos, el punto 6 tiene una gran variabilidad y un elevado valor de θ , que es razonable debido a la aportación de agua de una obra de paso que conduce la escorrentía de un camino que bordea la parcela, y hace permanecer este punto saturado parte del año. Las zonas con mayor pendiente

también presentaron una gran oscilación en el valor de la θ (figura superior derecha) debido consecuentemente a un mayor drenaje

Los patrones encontrados en ambas metodologías son similares, lo que nos indica que el sensor Diviner 2000, permite medir con eficacia la humedad del suelo en nuestras condiciones.

3.4. Organización espacial de la humedad

La Figura 5 muestra la organización espacial de la θ tanto gravimétricamente como medida con el sensor para ambos manejos de suelo. En este caso se evalúa el periodo de desecación comprendido entre el 4/6/08 y 18/9/08, en el cual se realizaron 10 mediciones con el sensor y 3 muestreos gravimétricos. Se ha explorado la relación entre el valor medio espacial de la humedad a 10 cm de profundidad en cada día de observación con ambas metodologías y su coeficiente de variación (CV) y desviación típica (s) (Famiglietti *et al.*, 2008).

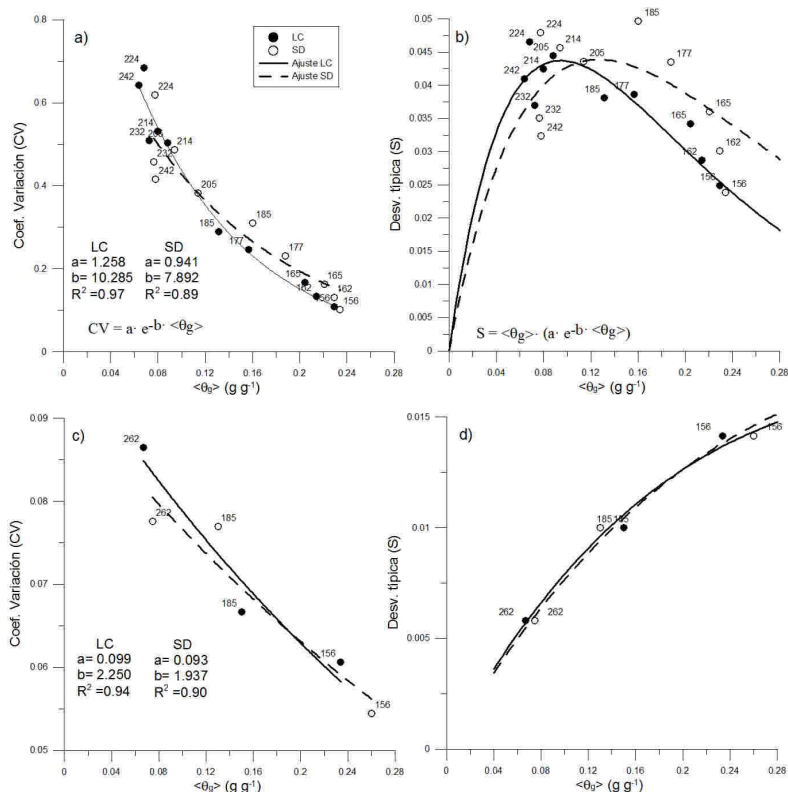


Figura 5. Relación entre la humedad media observada y medida con el sensor (θ), el CV (a y c) y la varianza, s, (b y d) para observaciones de humedad a 10 cm de profundidad comprendidos entre el 4/6/08 y el 18/9/08.

El CV disminuye con el incremento de la θ según una relación exponencial, como ya indicaron Charpentier y Groffman (1992) y más recientemente Famiglietti *et al.* (2008). Es interesante que para $\langle \theta_g \rangle$ bajas (0.1-0.12) la dispersión de valores en SD es menor que en LC, debiéndose a una mejor estructura y porosidad del suelo, capaz de retener más agua. El hecho de que este comportamiento se invierta en valores altos de $\langle \theta_g \rangle$ puede deberse a que durante las lluvias, el agua en el sistema de LC tiende a acumularse superficialmente provocando encharcamientos por la menor continuidad del perfil del suelo habiendo gran homogeneidad.

Según Famiglietti *et al.* (2008) conocida la relación entre s y $\langle \theta_g \rangle$ se puede estimar el número de observaciones (puntos) necesarios para determinar la θ a escala de parcela (Ec. 3). La Figura 6 muestra el número de puntos

diviner necesarios para estimar la θ en los dos tratamientos estudiados con un error de $\pm 0,03 \text{ g g}^{-1}$ y una confianza del 95%, requiriéndose 9 puntos para determinar la $\langle \theta_g \rangle$ en ambos tratamientos cuando su valor es de 0.12 g g^{-1} , y 2 y 4 puntos (LC y SD) cuando $\langle \theta_g \rangle$ es de 0.28 g g^{-1} .

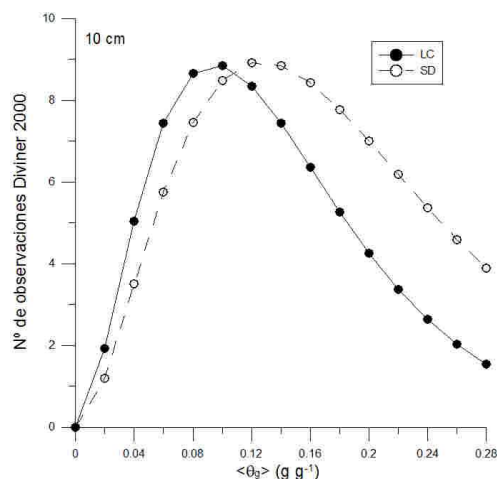


Figura 6. Numero de puntos Diviner necesarios para estimar la θ del tratamiento LC y SD con un error de $\pm 0,03 \text{ g g}^{-1}$ y $p > 95\%$.

4. CONCLUSIONES

Los resultados encontrados indican que el modelo propuesto para calibrar el sensor con muestras gravimétricas es bueno ($R^2=0.90$), lo que permite hacer más eficiente nuestra red de medición. El número de puntos Diviner dispuestos y su distribución en la parcela reproduce eficazmente la humedad de la parcela al encontrarse patrones espaciales coincidentes con los observados por gravimetría, y en estos la topografía explica gran parte de su distribución. Se puso de manifiesto que la mayor parte de la variabilidad estudiada a escala de parcela se explica con la variación temporal en contraste con la variación espacial, y es mayor en el sistema de SD. Asimismo se observa el efecto beneficioso que tiene el manejo de SD en estas parcelas, auxiliando al cultivo con una mayor cantidad de agua disponible en los primeros 30 cm.

Agradecimientos. Este trabajo se ha realizado con financiación del INIA a través del proyecto RTA2006-00058-CO3-02 y la ayuda complementaria FIC07-06. Los autores agradecen el trabajo de campo y laboratorio a E. Rodríguez y a M. Morón del IFAPA, y el mantenimiento de las parcelas al personal de la finca "Tomejil".

REFERENCIAS

- Charpentier, M.A. y Groffman, P.M. 1992. Soil Moisture Variability Within Remote Sensing Pixels, *J. Geophys. Res.*, 97(D17), 18,987–18,995
- 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.
- Guber, A.K., Gish, T.J., Pachepsky, Y.A., Van Genuchten, M.T., Daughtry, C.S.T., Nicholson T.J. y Cady, R.E. 2008. Temporal stability in soil water content patterns across agricultural fields. *Catena* 73, 125-133.
- Ordóñez, R., González, P., Giráldez, J.V. y Perea, F. 2007. Soil properties and crop yields after 21 years of direct drilling trials in southern Spain. *Soil Tillage Res.* 94, 47-54.
- Pachepsky, Y.A., Guber, A.K., y Jacques, D. 2005. Temporal persistence in vertical distributions of soil moisture contents. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69, 347–352.
- Soil Survey Staff, 1999. *Soil Taxonomy: A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys*. 2nd ed. Agric. Handbk. 436. U.S. Gov. Print. Office, Washington, DC
- 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.