

USO DE UN SENSOR DE INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA PARA DETECTAR ZONAS CON UN MANEJO DIFERENCIADO DEL SUELO

G. Martínez, K. Vanderlinden, J. A. Jiménez, R. Romero, I. García, J. L. Muriel

IFAPA, Centro Las Torres-Tomejil, Ctra. Sevilla-Cazalla km 12.2, 41200 Alcalá del Río (Sevilla).
gonzalo.martinez.ext@juntadeandalucia.es

RESUMEN. El uso de equipos de inducción electromagnética (EIE) para medir la conductividad eléctrica aparente del suelo (CE_a) puede reducir el esfuerzo económico y humano que conlleva la monitorización en campo de los cambios que el manejo produce en el suelo. Durante el año 2006 se realizaron cuatro muestreos de suelo y de CE_a , empleando un EIE móvil, en una parcela donde se compara experimentalmente el laboreo convencional (LC), la siembra directa (SD) y el mínimo laboreo (ML). Se observó que los mapas de CE_a transformada, medida en superficie y en profundidad, mostraron patrones similares dentro de la parcela a lo largo del tiempo con coeficientes de correlación entre fechas por encima de 0.7. Un análisis de componentes principales (ACP) mostró que el primer CP explicaba el 87 % de la variación total del conjunto de datos. Asimismo se observó una evolución diferente de las parcelas en LC frente a aquellas en ML y SD. Seleccionando tres parcelas de cada tratamiento para formar bloques, y realizando un estudio de las varianzas, en los bloques seleccionados, se observaron altas variaciones entre parcelas del mismo bloque y una variación alta entre bloques relacionada con la topografía. Asimismo, se observó que, generalmente, la CE_a en las parcelas de LC cambió más que en las de ML y SD y que la CE_a fue superior en estas. Por lo tanto, en esta parcela experimental, la información proporcionada por la CE_a permitió realizar una clasificación y delimitación de las zonas bajo distintos manejos del suelo, con independencia del momento en que se realizó el muestreo. Asimismo permitió representar de forma rápida y eficaz los efectos que el manejo produce en el suelo.

ABSTRACT. Soil sensing using mobile electromagnetic induction devices can considerably reduce the economic and human effort involved in monitoring changes in the soil caused by tillage. Bulk soil electrical conductivity (CE_a) measurements were spatially taken at four different dates during 2006 in the framework of a long-term tillage experiment for the evaluation of the agronomic consequences of Conventional Tillage (LC), Minimum Tillage (ML) and Direct Drilling (SD). CE_a transformed data measured at both the surface layer and at a deeper depth showed field-scale spatial patterns, which remained constant throughout the time. Correlation coefficient between sampling dates was higher than 0.7 and a principal component analysis from the whole dataset showed that

87% of total variation was explained by the first principal component. Spatio-temporal evolution of LC plots was, generally, different from ML and SD plots. Forming blocks of three plots with the different management methods, and carrying out analyses of variance in them, great variations between plots in the same block and a high variation between blocks related to their topography were detected. Generally, CE_a in the LC plots was more variable than in the ML and SD plots, which exhibited higher CE_a values. Results showed that, under these field conditions, CE_a was a valuable tool for the evaluation and classification of areas inside a field. Moreover, CE_a could display fast and accurately the effects in the soil caused by its management.

1.- Introducción

El manejo del suelo produce cambios en sus propiedades físicas y químicas (Green et al., 2003; Ordóñez et al., 2006), que pueden ser detectadas de forma rápida mediante sensores. La estimación espacio-temporal de estas propiedades a escala de parcela proporciona información que permite comprender y predecir mejor los cambios ocurridos. No obstante, la variabilidad natural del suelo dificulta la interpretación de las medidas. Hay métodos no destructivos que evalúan cuantitativamente la variabilidad espacial de las propiedades del suelo. Entre estos métodos cabe destacar la inducción electromagnética (IE) que mide de manera no invasiva la conductividad eléctrica aparente (CE_a) del suelo. Por ello la IE se empleó inicialmente con resultados satisfactorios en estudios de salinidad del suelo (Rhoades 1976), ya que la concentración de iones en la solución del suelo es el principal factor que afecta a la CE_a . En suelos no salinos la CE_a depende de otras propiedades como el contenido de humedad, textura o densidad aparente. Esto llevó a autores como Kachanoski et al. (1988) o Martínez y Vanderlinden (2007) a estudiar la relación entre el contenido de humedad del suelo y la CE_a . En un suelo franco, se observó una alta correlación, entre ambas variables, mientras que en un suelo arcilloso, la correlación fue baja. No obstante estos autores observaron una relación espacial entre estas variables. Otros autores como Cockx et al. (2005) o Vitharana et al. (2006) han empleado la CE_a con éxito para clasificar propiedades físicas y químicas del suelo. McCutcheon et al. (2006)

emplearon la CE_a para estudiar espacio-temporalmente la evolución de una parcela con franjas alternativas de suelo en barbecho y cultivado con trigo, así como el efecto que los cambios en el contenido de humedad y textura del suelo tenían en la CE_a .

Los objetivos de este trabajo son comparar la distribución de la variabilidad espacio-temporal de la CE_a del suelo mediante IE en una parcela experimental con distintos sistemas de manejo e identificar las fuentes de esta variación tanto en el espacio como en el tiempo.

2.- Material y métodos

2.1. Area de estudio

La parcela empleada se encuadrada en un ensayo de manejo de suelo a largo plazo que comenzó en 1982 en la finca Tomejil (37°24'N, 5°35'W, 79 msnm). En esta parcela se están evaluando los efectos que producen diferentes manejos -Mínimo Laboreo (ML), Siembra Directa (SD) y Laboreo Convencional (LC)- en las características del suelo y en el rendimiento de los cultivos, dentro de una rotación trigo-girasol-leguminosa (Perea, 2002; Ordóñez et al., 2006) (Fig. 1). El suelo es muy arcilloso, con un contenido en arcilla superior al 60%. Pertenece al Subgrupo Chromic Haploxerert (Soil Survey Staff, 1999). Las cuatro repeticiones de los tratamientos ML, SD y LC están distribuidas al azar (Fig. 1). La topografía de la parcela muestra que la zona más alta está incluida en las primeras parcelas (al NE) mientras que la zona más baja corresponde a las últimas parcelas, situadas al SO (Fig. 2).

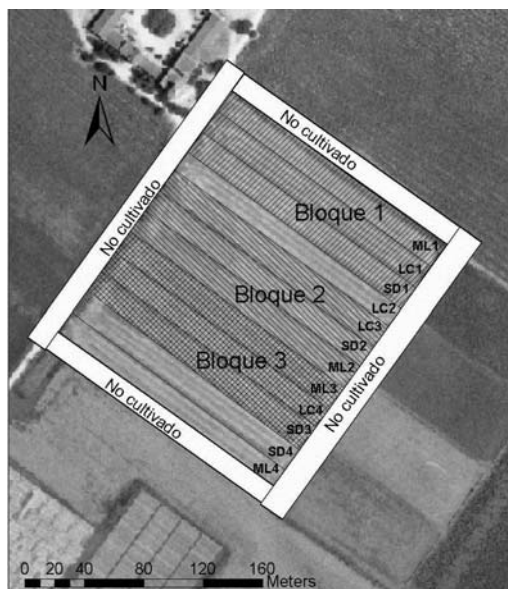


Fig. 1. Imagen aérea de la parcela estudiada y diseño experimental. Mínimo Laboreo (ML), Siembra Directa (SD) y Laboreo Convencional (LC). Bloques considerados con los tratamientos distribuidos al azar.

El clima de la zona es mediterráneo con una precipitación media de 495 mm, marcada estacionalidad y gran diferencia entre años (CV = 37 %). Las temperaturas medias varían entre 10 °C durante el invierno y 35 °C durante el verano, con temperaturas máximas superiores a los 40°C.

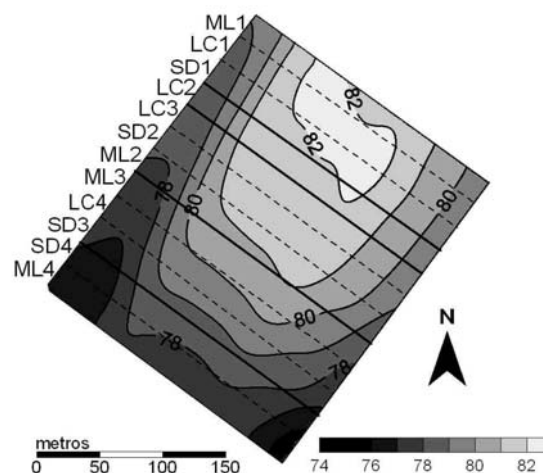


Fig. 2. Topografía de la parcela experimental. Altura en msnm.

2.2. Equipo móvil de inducción electromagnética

Se empleó un sensor de inducción electromagnética EM38DD (Geonics Limited, Ontario, Canadá) que consta de dos dipolos superpuestos perpendicularmente que miden la CE_a tanto en la superficie del suelo (CE_{aH}) como en profundidad (CE_{aV}). El dipolo situado en posición horizontal tiene mayor sensibilidad en el horizonte superficial (entre 0 y 0.4 m de profundidad), mientras que el dipolo situado verticalmente tiene su máxima sensibilidad entre 0.75 y 1.5 m (McNeil, 1980). El principio de operación de este sensor consiste en la emisión de un campo magnético, al interactuar con las cargas eléctricas presentes en el suelo, induce un nuevo campo magnético de modo que son recibidos ambos en la otra bobina del dipolo, siendo la relación entre los campos emitido y el total recibido proporcional a la CE_a del suelo. Las lecturas de CE_{aH} y CE_{aV} son registrados automáticamente cada segundo en un ordenador de campo en donde son geo-referenciadas mediante un sistema DGPS. Todos los componentes están integrados en un equipo móvil de inducción electromagnética (EMIE) (Fig. 3).

2.3. Muestreo del suelo

Para comparar el efecto que el contenido de humedad u otros parámetros dinámicos del suelo puedan tener en la CE_a tal y como habían observado Kachanoski et al. (1988) o McCutcheon et al. (2006) se realizaron mediciones de CE_{aV} y CE_{aH} con el EMIE en cuatro fechas durante el año 2006. Así, se midió en diferentes condiciones de humedad edáfica del horizonte superficial del suelo: húmedo, (cuando la consistencia superficial del suelo dejaba acceso),

intermedio y seco (Tabla 1). Se tomaron las medidas cada segundo y la velocidad de desplazamiento fue de 10-15 km h⁻¹ en líneas separadas entre sí por 4 m, transversalmente a las subparcelas del ensayo.

Tabla 1. Temperatura media (T_{med}), humedad gravimétrica (θ_g), fechas de las labores realizadas en la finca experimental durante los muestreos realizados y cobertura del suelo durante los muestreos.

Fecha	T_{med} (°C)	θ_g (kg/kg)	Labores previas	Cobertura	
03-III-06	1	11.4	0.23	Vertedera I-06 - LC Chisel II-06 - ML	Residuo trigo - SD / suelo desnudo- LC,ML
29-III-06	2	14.4	0.23	-	Residuo trigo - SD / suelo desnudo- LC,ML
06-X-06	3	20.2	0.20	-	Residuo girasol- SD / suelo desnudo.LC,ML
15-XI-06	4	14.6	0.28	Chisel X-06 - LC,ML	Residuo girasol- SD / suelo desnudo.LC,ML

En cada fecha se realizó también un muestreo de los primeros 0.12 m del suelo en varios puntos de las parcelas para determinar su humedad gravimétrica (θ_g). La duración de los muestreos fue lo suficientemente breve (30 min aproximadamente) para poder despreciar el efecto de los cambios de temperatura en las observaciones de CE_a (Robinson et al., 2004). Tal como recomiendan estos autores se protegió el equipo de la radiación para evitar el calentamiento diferenciado de sus componentes y el efecto que esto puede tener sobre la medida de CE_a



Fig. 3. Equipo móvil de inducción electromagnética. (1) ATV; (2) receptor DGPS (3) ordenador de campo; (4) antena DGPS; (5) trineo con sensor EM38DD

2.4. Transformación de los datos y teoría geoestadística

Se normalizaron los datos de CE_{aV} y CE_{aH} (V_{ns} y H_{ns} respectivamente) previamente al análisis usando el programa *nscores* de GSLIB (Deutsch y Journel, 1998). Esta transformación permite comparar directamente la distribución espacial de CE_{aV} y CE_{aH} en las distintas fechas,

garantiza la normalidad de los datos, requerida por algunos métodos estadísticos, y elimina el efecto de la temperatura en los diferentes muestreos. La transformación consiste en, una vez obtenida la función de distribución de probabilidad de un conjunto de datos, asignar, a estos, valores cuya probabilidad es igual, de una distribución normal tipificada (Fig. 4, Goovaerts, 1997).

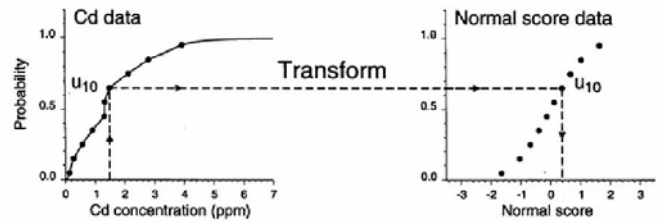


Fig. 4. Ejemplo de la transformación *nscores*, en Goovaerts (1997)

Se obtuvo un mapa en detalle de toda la parcela, interpolando mediante krigeado ordinario (KO). Este método de interpolación tiene en cuenta la autocorrelación espacial de una variable aleatoria Z , expresada mediante su semivariograma (Goovaerts, 1997):

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} [z(\mathbf{x}_i) - z(\mathbf{x}_i + h)]^2 \tag{1}$$

donde $z(\mathbf{x}_i)$ es el dato de Z en el punto \mathbf{x}_i , y n es el número de datos separados por una distancia h . La variable aleatoria se puede descomponer en tres términos:

$$Z(\mathbf{x}) = m(\mathbf{x}) + \zeta'(\mathbf{x}) + \zeta''(\mathbf{x}) \tag{2}$$

siendo $m(\mathbf{x})$ el valor esperado de Z , $\zeta'(\mathbf{x})$ un término aleatorio espacialmente dependiente y $\zeta''(\mathbf{x})$ un ruido aleatorio espacialmente independiente. En el KO se considera $m(\mathbf{x})$ constante y desconocida en todo el dominio de forma que el valor estimado de Z será:

$$Z_{KO}^*(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^{n(\mathbf{x}_i)} \lambda_i^{KO} z(\mathbf{x}_i) \tag{3}$$

Esta igualdad se cumple para $\sum \lambda_i^{KO} = 1$ obteniéndose los pesos λ_i^{KO} a partir del semivariograma y la resolución del sistema de ecuaciones de KO (Goovaerts, 1997).

Para interpolar los datos de CE_a transformados (V_{ns} y H_{ns}), se empleó el programa VESPER (Minasny et al., 2002), ya que para variables medidas con una alta densidad, como en este caso, permite realizar un cálculo local del semivariograma. A partir de los mapas de las variables transformadas en las diferentes fechas, se calculó la media y la varianza para cada píxel.

2.5. Análisis de componentes principales.

El análisis de componentes principales (ACP) (Davis, 2002) es un análisis de factores que intenta identificar variables o factores subyacentes, que explican el patrón de las correlaciones entre diferentes variables observadas. De esta forma se reduce el número de las variables originales identificando unas combinaciones lineales de aquellas, los factores o componentes, CP, que explican la mayor parte de la variabilidad observada. El primer componente tiene la mayor (máxima) varianza. Los sucesivos componentes explican progresivamente un porcentaje menor de la varianza. Se emplearon los datos interpolados de V_{ns} y H_{ns} , para garantizar que cada conjunto de datos consta del mismo número de observaciones en los mismos puntos. El número de variables usadas fue de 6 correspondiente a los valores de V_{ns} y H_{ns} para cada muestreo.

3.- Resultados y discusión

3.1. Variabilidad temporal

Comparando los datos obtenidos en los cuatro muestreos en fechas diferentes, se observa que, contrario a lo que se observó para CE_{aV} , el valor medio de CE_{aH} en el muestreo 3 fue mayor que los demás. Este hecho se puede deber a la mayor temperatura en esta fecha con respecto al resto, ya que como habían observado Robinson et al. (2004), dentro de un amplio intervalo de temperatura, una mayor temperatura produce un valor superior de CE_a . Se observó que la variación fue similar, aunque generalmente mayor en la superficie del suelo, CE_{aH} (CV = 19%), que en profundidad, CE_{aV} (CV = 15%). Asimismo la asimetría en la distribución de los datos observada tanto con CE_{aV} como con CE_{aH} junto con las diferentes condiciones ambientales observadas, en los muestreos, recomendó su transformación mediante nscores (Goovaerts, 1997), para interpretar las diferencias que existen entre parcelas de manejos distintos, y trabajar con intervalos de valores iguales para todas las fechas.

Tabla 2. Estadísticos descriptivos de la CE_a ($mS \cdot m^{-1}$) observada durante los cuatro muestreos.

	N	Mín	Máx	Media	s^2	Asimetría	Curtosis
CE_{aV}	I	8256	92	189.	125.	249.	0.97
	II	6264	107.	244.	139.	413.	1.43
	III	6836	27.4	96.5	47.6	93.9	1.58
	IV	1980	87.4	169.	115.	178.	1.31
CE_{aH}	I	8256	25.4	110.	62.6	141.	0.45
	II	6264	41.1	150.	69.6	251.	1.28
	III	6836	52.1	145	82.0	163.	1.34
	IV	1980	33.3	99.5	54.2	98.0	1.40

Del ACP se desprende que la primera CP explica un 86%

de la variación total de los datos interpolados mientras que las dos primeras CP explican el 95% de la variación, debido a la elevada correlación temporal entre las variables estudiadas (Tabla 3; Fig. 5). Asimismo los pesos de todas las variables para la CP1 son muy similares y próximos a 0.9. Esto quiere decir que los distintos conjuntos de datos de CE_a representan los mismos tipos de variación y que aparece una estabilidad temporal en los patrones de variación de esta propiedad. Estos datos muestran un comportamiento diferente a los resultados obtenidos por McCutcheon et al. (2006) para condiciones de suelo franco o franco-arenoso, con mayores pendientes y muestreos más espaciados en el tiempo. Se observaron en este caso coeficientes de correlación entre 0.7 y 0.9.

Las correlaciones más bajas observadas entre fechas coincidieron con las comparaciones realizadas con la fecha 3, donde los valores de contenido de humedad fueron menores (Tabla 1) y cuando existía una mayor distancia en el tiempo. No obstante, pese a estas correlaciones altas se observan algunas diferencias V_{ns} y H_{ns} entre las fechas muestreadas. Esto se debe a que las vías de paso o transmisión de los campos magnéticos aplicados al suelo en la medida de la CE_a , están afectados por numerosos parámetros y no siempre es el mismo parámetro el que afecta en mayor medida a su observación.

Tabla 3. Coeficientes de correlación entre las diferentes fechas de muestreo de V_{ns} y H_{ns}

	H_{ns1}	H_{ns2}	H_{ns3}
H_{ns2}	0.88		
H_{ns3}	0.67	0.75	
H_{ns4}	0.72	0.83	0.90

	V_{ns1}	V_{ns2}	V_{ns3}
V_{ns2}	0.96		
V_{ns3}	0.78	0.84	
V_{ns4}	0.84	0.88	0.94

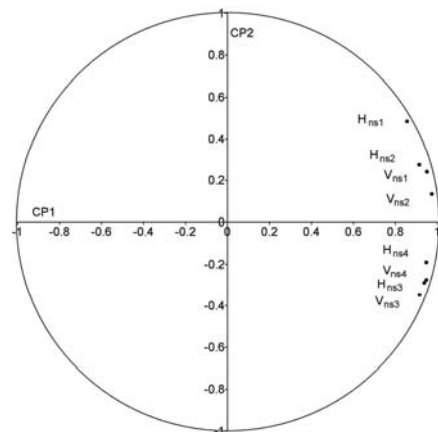


Fig. 5. Círculo de correlación mostrando la configuración de las variables V_{ns} y H_{ns} para las cuatro fechas de muestreo, en el plano definido por las dos primeras componentes principales (CP1 y CP2).

La primera labor de vertedera (Tabla 1) puede ser la

responsable de la mayor diferenciación de las parcelas de LC en estos muestreos al alterar un mayor volumen de suelo, mientras que la segunda no produce un efecto tan marcado en CE_a tal y como se pudo observar de la comparación entre parcelas de ML y SD para las dos primeras fechas muestreadas (Fig. 6).

Las pequeñas diferencias observadas entre los muestreos 1 y 2 podrían deberse a cambios en la densidad aparente del suelo o al avance del agua a través del perfil. Entre los muestreos 3 y 4 las diferencias que se observan son mínimas (Fig. 6) y pueden ser atribuibles principalmente a la humedad (Tabla 1) y a cambios que se dan en la densidad aparente del suelo, siendo estas diferencias comparables a las que existen entre los muestreos 1 y 2.

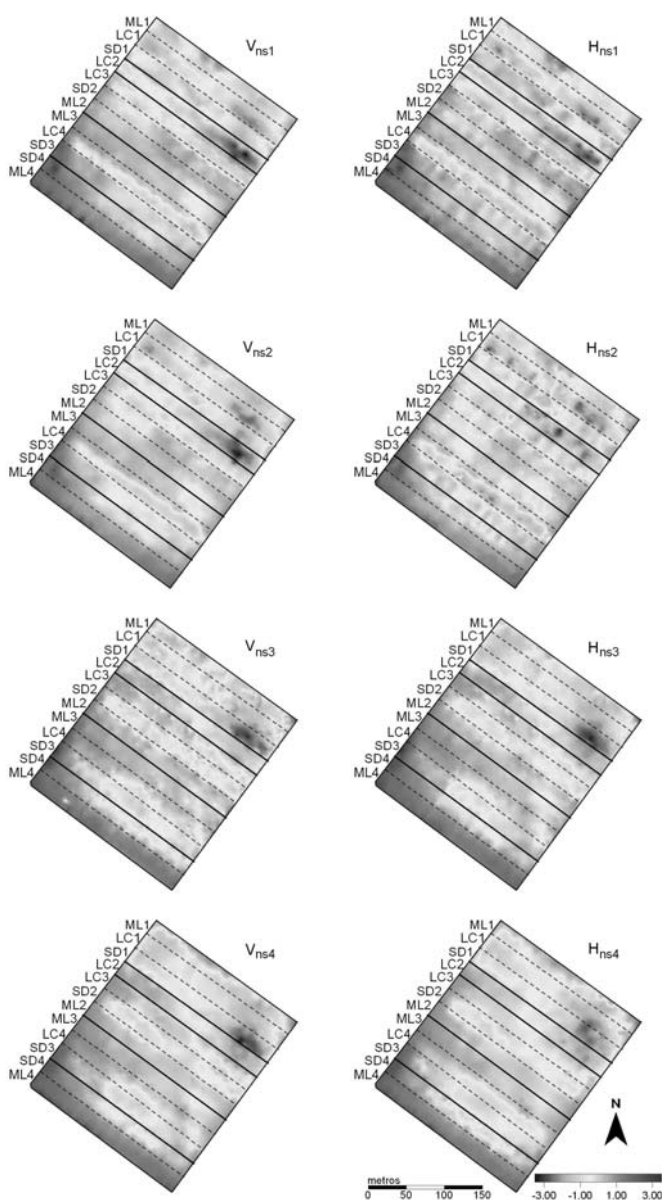


Fig. 6. Mapas de V_{ns} y H_{ns} obtenidos con krigeado ordinario para la parcela experimental en las diferentes fechas muestreadas. Las líneas gruesas y las líneas discontinuas indican separación entre bloques y parcelas respectivamente.

3.2. Variabilidad espacial. Detección de manejo diferenciado.

Para realizar un análisis espacial de la parcela experimental, se seleccionaron 9 de las 12 subparcelas para formar 3 bloques en los que los tratamientos seguían distribuidos al azar (Fig. 1).

Los mapas de la Fig. 6 muestran los valores interpolados de V_{ns} y H_{ns} en las diferentes fechas de muestreo, para el interior de las parcelas, excluyendo el terreno no cultivado. Se observaron en general valores más bajos en las parcelas de LC en comparación con las de ML y SD, tanto en el horizonte superficial del suelo (H_{ns}), como en profundidad (V_{ns}). Asimismo, se observó que las parcelas de ML generalmente tuvieron los valores más altos, siendo este efecto más apreciable en la parcela ML3, al ser la zona más baja en la que descarga la mayor parte de la parcela (Fig. 2). La topografía también explica gran parte de la variación entre parcelas de un mismo tratamiento y situadas en distintos bloques, siendo la CE_a mayor en las zonas de menor altitud y menor pendiente.

No existen diferencias importantes entre los patrones espaciales observados en los diferentes muestreos, tal y como había mostrado el análisis temporal. Como se puede apreciar en las Fig. 6 y 7, así como en el estudio de las varianzas (Tabla 4), el bloque 1 muestra una mayor varianza en la CE_a en comparación con los demás bloques y muestra una mayor variación dentro de las parcelas que lo componen tanto para \bar{V}_{ns} ($W = 0.32$), como para \bar{H}_{ns} ($W = 0.27$). Se pueden destacar grandes diferencias entre la CE_a observada en los distintos tratamientos (B) dentro de cada bloque, estando expresada la mayor parte de la variación dentro de cada bloque por las diferencias que existen entre los tratamientos, frente a la variación que existe en las parcelas individuales (W). Esto refleja una diferenciación del suelo como consecuencia del manejo, refrendando los efectos observados en algunos parámetros químicos por Ordóñez et al. (2006) en esta misma parcela. En los muestreos 1 y 2 (Fig.6) se produce una diferenciación clara para H_{ns} y V_{ns} en las parcelas de LC.

Tabla 4. Estadísticos descriptivos, por bloques, de los valores normalizados de CE_{aV} y CE_{aH} para el promedio de cada píxel y análisis de las varianzas para los bloques seleccionados y el total de parcelas seleccionadas.

	\bar{V}_{ns}				\bar{H}_{ns}			
	bloque				bloque			
	1	2	3	Total	1	2	3	Total
N	24780	24644	24644	74068	24780	24644	24644	74068
m	-0.91	-0.13	0.05	-0.33	-0.78	-0.18	-0.03	-0.33
s ²	0.34	0.17	0.22	0.42	0.34	0.17	0.23	0.35
Mín	-2.46	-2.15	-1.03	-2.46	-2.40	-1.93	-1.39	-2.40
Máx	0.90	1.10	1.73	1.73	0.93	1.13	1.77	1.77
B	187	804	353	6488	859	955	642	3824
W	0.32	0.11	0.19	0.25	0.27	0.09	0.17	0.24
F	584	7309	1858	26480	3181	965	3776	15672

B: variación entre grupos, W: variación dentro de grupos, F: relación B/W

Se observó que la distribución de la variabilidad temporal (s^2), expresada como la variación en cada píxel de H_{ns} , mostró una mayor superficie con zonas de alta s^2 que la de V_{ns} , ya que como cabe esperar y como habían observado Ordóñez et al. (2006) hay una mayor variación tanto en el espacio como en el tiempo en la superficie del suelo que en profundidad (Fig. 7). Asimismo, la varianza de H_{ns} en ML fue menor que en SD y a su vez menor que en LC. No obstante, cabe destacar una zona en la parte inferior derecha de la parcela SD1 que presenta los mayores valores de s^2 , aunque el motivo de su aparición no parece claro con los datos de que se dispone.

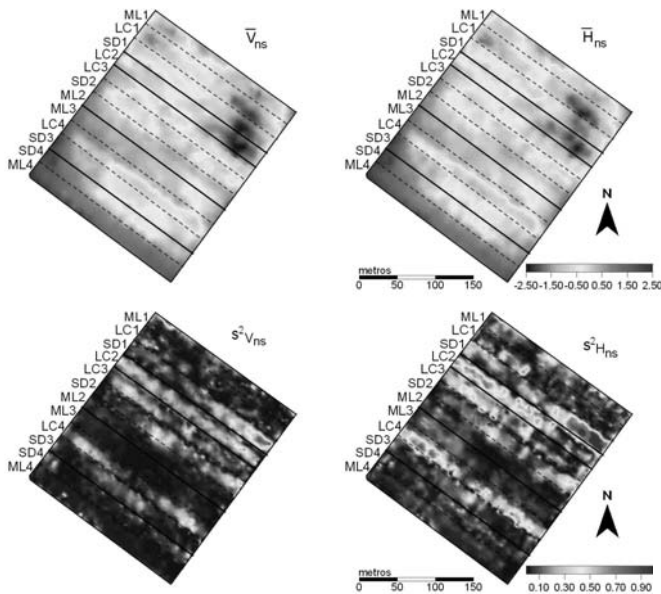


Fig. 7. Mapas de los valores medios y varianzas de V_{ns} y H_{ns} obtenidos en los muestreos realizados. Las líneas gruesas y las líneas discontinuas indican separación entre bloques y parcelas respectivamente.

4.- Conclusiones

Los resultados muestran que existe una gran estabilidad en los patrones de distribución de la conductividad eléctrica aparente del suelo (CE_a) a lo largo del tiempo para un amplio intervalo de humedades del suelo tal y como se deduce de la comparación visual de los mapas obtenidos, de las correlaciones calculadas entre fechas y del análisis de componentes principales de los datos interpolados de CE_a , mostrando la utilidad de esta medida a la hora de obtener una cartografía genérica de la parcela.

Se ha observado que la CE_a refleja diferencias en el manejo del suelo y en su evolución a lo largo del tiempo, mostrando las parcelas manejadas con LC una mayor

variación a lo largo del tiempo que aquellas manejadas con SD y ML, siendo estas diferencias mayores en la superficie del suelo que a una profundidad mayor como reflejan los mapas de varianzas de las respectivos valores de CE_a transformados (H_{ns} y V_{ns} respectivamente).

Agradecimientos. Este trabajo ha sido financiado con fondos del IFAPA (Proyecto FPU06-13) y del INIA (Proyecto RTA2006-00058-CO3-02). Los autores agradecen al Dr. F. Perea Torres por el mantenimiento del ensayo de la finca Tomejil y su asistencia en los trabajos de campo. G. Martínez agradece al INIA la beca de la que disfruta en la actualidad.

Bibliografía

- Cockx, L., Van Meirvenne, M., y Hofman, G. 2005. Characterization of nitrogen dynamics in a pasture soil by electromagnetic induction. *Biol Fertil Soils*, 42: 24–30.
- Davis, J.C. 2002. *Statistics and data analysis in geology*, 3ª ed. Wiley. Nueva York
- Deutsch, C. V. y Journel, A.G. 1998. *Gslib. Geostatistical software library and user's guide*. 2ª ed. Oxford Univ. Press. Nueva York.
- Goovaerts, P. 1997. *Geostatistics for natural resources evaluation*. Oxford Univ. Press, Londres.
- Green, T.R., Ahuja, L.R., y Benjamin, J.G. 2003. Advances and challenges in predicting agricultural management effects on soil hydraulic properties. *Geoderma*, 116:3-27.
- Kachanoski, R.G., Gregorich, E.G., Van-Wesenebeeck, I.J., 1988. Estimating spatial variations of soil water content using noncontacting electromagnetic inductive methods. *Can. J. Soil Sci.* 68, 715–722.
- Martínez, G., y K. Vanderlinden. 2007. Análisis de la relación espacial entre la humedad gravimétrica del suelo y la conductividad eléctrica aparente. En: Bellinfante, N. y Jordán, A. (Eds). *Tendencias actuales de la ciencia del suelo*, pp 29-36. Sevilla.
- McCutcheon, M.C., Farahani, H.J., Stednick, J.D., Buchleiter, G.W. y Green, T.R. 2006. Effects of soil water on apparent electrical conductivity and texture relationships in a dryland field. *Biosyst. Eng.*, 94:19-32.
- McNeill, J.D., 1980. Electromagnetic Terrain Conductivity Measurement at Low Induction Numbers. *Technical note TN-6*. Geonics Limited, Ontario.
- Minasny, B., McBratney, A.B., y Whelan, B.M.. 2002. *Vesper (Variogram Estimation and Spatial Prediction plus Error) version 1.6*. Australian Centre for Precision Agriculture. <http://www.usyd.edu.au/su/agric/acpa>.
- 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 Tillage Res.*, 94:47-54.
- Rhoades, J.D., Raats, P.A.C., y Prather, R.J. 1976. Effects of liquid-phase electrical conductivity, water content and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 40:651-655.
- Robinson, D.A., Lebron, I., Lesch, S.M., y Shouse, P. 2004. Minimizing drift in electrical conductivity measurements in high temperature environments using the EM-38. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 68:339-345.
- Soil Survey Staff, 1999. *Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil survey*. 2ª ed. USDA Agr. Hbk. n° 436, Washington.
- Vitharana, U.W.A., Van Meirvenne, M., Cockx, L., y Bourgeois, J. 2006. Identifying potential management zones in a layered soil using several sources of ancillary information. *Soil Use Manage.*, 22:405-413.