

CUANTIFICACIÓN DEL EFECTO DEL MANEJO DEL SUELO EN LA RESPUESTA HIDROLÓGICA DE UNA PARCELA USANDO UN SENSOR DE INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

Gonzalo Martínez^{1*}, Karl Vanderlinden¹, Esther Rodríguez¹, Juan Vicente Giráldez², José L. Muriel¹
y F. Perea¹

1: Grupo de investigación suelo y Agua.
Área de Producción Ecológica y Recursos Naturales
IFAPA, Junta de Andalucía
Centro Las Torres-Tomejil, Crtra. Sevilla-Cazalla, km 12.2. 41200 Alcalá del Río (Sevilla)
e-mail: gonzalo.martinez@juntadeandalucia.es, web: <http://www.agroehidroecologia.org>

2: Departamento de Agronomía,
Universidad de Córdoba e Instituto de Agricultura Sostenible, CSIC,
Campus de Rabanales, Edificio da Vinci. Ctra. Madrid, km 396, 14071 Córdoba

Palabras clave: Respuesta Hidrológica, Conductividad Eléctrica Aparente, Manejo de Suelo, Red de Desagüe

RESUMEN. Conocer la variabilidad espacial de la humedad del suelo de una parcela o mini-cuenca permite entender mejor su respuesta hidrológica. Los sensores de inducción electromagnética permiten medir con facilidad a esta escala la conductividad eléctrica aparente (CE_a) que puede ser relacionada con la humedad. En este trabajo, se evalúa la evolución de la CE_a en una parcela sometida a distintos sistemas de manejo: laboreo tradicional y mínimo y siembra directa, en dos periodos con diferentes precipitaciones; uno con chubascos muy intensos y otro con una lluvia moderada. Los resultados muestran los incrementos conjuntos de humedad del suelo y de la CE_a y su relación con el relieve de la parcela. La influencia del sistema de manejo sobre la humedad es más evidente cuando la intensidad de la precipitación es elevada.

ABSTRACT. The hydrological response of a field-plot depends on the spatial variability of soil moisture. The spatial pattern of soil moisture can be estimated from related physical properties, like the apparent electrical conductivity (CE_a), which is easily measured with geophysical sensors. The hydrological behavior of a field-plot subjected to different soil management systems: conventional, minimum and no-tillage, has been analyzed in two periods one with an intense shower, and other with less intense rainfall. Both soil moisture and CE_a increase after the rain events modulated by influence of topography. The effect of the soil management system is more apparent after the big shower than after the less intense event.

1. INTRODUCCIÓN

La mayor parte de los flujos de agua, calor y otros nutrientes que ocurren en la zona subsaturada del suelo y que son responsables de la ecología de una parcela o cuenca, dependen, principalmente, de la humedad del mismo (Rodríguez-Iturbe et al., 2001). No obstante su medida a esta escala es muy costosa, por lo que es conveniente recurrir a sensores geofísicos, en particular electromagnéticos (Robinson et al., 2008). Con ellos, a partir de la determinación de otras variables como la conductividad eléctrica aparente (CE_a) (Corwin y Farahani, 2008), que se efectúa con gran facilidad, se puede inferir la humedad del suelo (Muñoz-Carpena et al., 2005; Robinson et al., 2008). Estos sensores pueden estar fijos, dando una medida puntual de la CE_a y una estimación de la humedad del suelo, o bien ser móviles, como los de inducción electromagnética, que pueden medir la CE_a en un número de puntos mayor y cubrir una gran superficie. La manipulación de la información adquirida con los sensores móviles, como la substracción de la influencia de algunas propiedades estáticas como el contenido de arcilla o la profundidad del suelo (Abdu et al., 2008; Saey et al., 2008), mejora la estimación de la humedad e indica detalles del perfil del suelo en una parcela o cuenca (Martínez et al., 2009). El objetivo de este trabajo es la evaluación de la respuesta hidrológica de

una parcela con sistemas de manejo diferentes en distintas condiciones de precipitación: una con un aguacero intenso y otra con chubascos de mayor duración y menor intensidad.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Parcela estudiada

La parcela de ensayos está en la finca experimental Tomejil, en el término municipal de Carmona (Sevilla). En esta parcela, en el otoño de 1982, se inició un proyecto de evaluación de sistemas de laboreo a largo plazo, probándose el laboreo tradicional (LT), laboreo mínimo (ML) y nulo o siembra directa (SD) en una rotación trigo-girasol-leguminosa (Ordóñez et al., 2007). El clima es mediterráneo con una precipitación media anual de 470 mm. El suelo, formado sobre margas del mioceno, es un Haploxerert típico, (Soil Survey Staff, 1999), con un contenido de arcilla que oscila entre el 50 y el 64 % y una profundidad variable, sufre procesos de expansión y contracción durante el humedecimiento y desecado, presentando abundantes grietas, tanto en la dirección vertical del perfil, como lateralmente, posibilitando un flujo subsuperficial del agua (Lozano, 2008). La parcela que tiene una superficie de 3,5 ha, está bordeada por un camino en su borde noroeste y cuenta con una sonda envirosca (Sentek Ltd.) que monitoriza la humedad del suelo hasta una profundidad de 0,9 m. En ella se dispusieron cuatro subparcelas correspondientes a los sistemas de manejo LT, ML y SD, con dimensiones unitarias de 15x180 m, en un diseño experimental de bloques al azar (Figura 1).

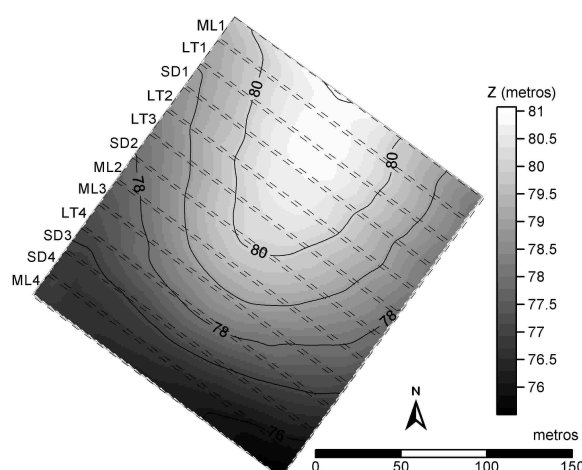


Figura 1. Diseño experimental y topografía de la parcela. Se muestran las subparcelas estudiadas correspondientes a los sistemas de manejo laboreo tradicional (LT), laboreo mínimo (ML) y siembra directa (SD).

2.2 Mediciones de la CEa del suelo.

Entre los años 2007 y 2009 (Tabla 1) se realizaron cuatro mediciones de CE_a con un sensor de IE, EM38DD en diferentes condiciones de humedad del suelo. Las dos primeras mediciones corresponden al periodo previo a la siembra del trigo, mientras que las dos últimas se realizaron antes de realizar la siembra del girasol. Las mediciones se realizaron en pasadas separadas entre sí por 3 m, a lo largo de líneas transversales a las subparcelas con una separación entre mediciones de cada pasada de 2 m. El sensor EM38DD consta de dos sensores superpuestos que miden simultáneamente la CE_a en la superficie del suelo (CE_{as}) y a una profundidad mayor (CE_{ap}), dependiendo de las características de ambos sensores y de la conductividad del suelo (Callegary et al., 2007). Al finalizar cada campaña se midieron la CE_{ap} y CE_{as} en una línea diagonal para comprobar que la deriva en las mediciones de CE_a sea admisible.

2.3 Interpolación de datos espaciales.

Se obtuvieron mapas continuos de CE_{as} y CE_{ap} y elevación por interpolación óptima, krigado ordinario (KO), basado en la autocorrelación espacial de las observaciones en puntos cercanos al punto de estimación (Goovaerts, 1997). Para la interpolación se usó el programa VESPER (Minasny et al., 2002) que permite un cálculo local del variograma. Se ajustó, en cada punto de estimación, un modelo al variograma, ponderando por la relación entre el número de puntos involucrados en el cálculo del variograma y su desviación típica, esférico para las CE_{as} y CE_{ap} , y gaussiano para la topografía.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Análisis exploratorio de los datos.

Los datos observados se muestran en la tabla 1. Las medidas correspondientes al mes de febrero de 2009, muestreo número 4, fueron superiores a las del resto de muestreos, seguidas por las del muestreo número 2, del 29 de noviembre de 2007. Estas dos mediciones coincidieron con las mayores humedades ($0,34 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ en el muestreo 2 y $0,46 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ en el muestreo 4), tras unos chubascos de 129 mm acumulados entre los muestreos primero y segundo, y de 73 mm acumulados entre el 1 y el 17 de febrero, antes del muestreo 4. En las mediciones de febrero de 2009, la elevada humedad precedente en el suelo y la precipitación de 197 mm, entre los muestreos tercero y cuarto, dieron lugar a valores de CE_{as} y CE_{ap} mayores en este muestreo que en el muestreo 2, de noviembre de 2007. Asimismo, el chubasco del 20 de noviembre de 2007, de 115 mm, produjo una gran pérdida de agua por escorrentía, sin elevar la humedad del suelo de forma proporcional a ese volumen total de agua. La mediciones que se realizaron en el primer muestreo, el 7 de noviembre de 2007, dieron los valores más bajos de CE_{as} y CE_{ap} , coincidiendo con la menor humedad del suelo ($0,23 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$), seguidas por las realizadas el 20 de noviembre de 2008, con una humedad de $0,25 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$, superior a la de la primera medición. Debido al contenido elevado de arcilla de este suelo, y a la relación positiva que hay entre CE_a y el porcentaje de arcilla (Vitharana et al., 2006; Weller et al., 2007), los valores de CE_{as} y CE_{ap} son superiores a los obtenidos en otros trabajos (Abdu et al., 2008; Jabro et al., 2008; Vitharana et al., 2008). Por lo general, el coeficiente de variación fue menor en las mediciones realizadas con una humedad mayor y fue superior para CE_{as} . Estos valores fueron mínimos para la fecha 4, en la que la parcela se había humedecido de una forma más homogénea. A diferencia de lo que comentan Jabro et al., (2008) o Vitharana et al., (2008), el coeficiente de variación en la superficie fue mayor que en profundidad debido a que este suelo no está formado por aportes sedimentarios externos. Las mediciones realizadas con el suelo más seco, muestreos 1 y 3, reflejaron valores mínimos de CE_{ap} y CE_{as} muy similares, $42\text{-}43 \text{ mSm}^{-1}$ y $14\text{-}22 \text{ mSm}^{-1}$ respectivamente. En el caso de CE_{ap} los valores máximos correspondieron a las mediciones realizadas con el suelo húmedo, 2 y 4, y fueron similares entre sí. Los valores máximos de CE_{as} fueron más diferentes entre sí como consecuencia de la mayor variabilidad de CE_{as} . En general, el sesgo de las mediciones de CE_a no fue elevado aunque mostró la presencia de una cola en la distribución con valores mayores de CE_a , especialmente en la CE_{as} de la medición de Febrero de 2009, que corresponde a la zona de descarga de la parcela.

Las diferencias de CE_a correspondientes a los muestreos de noviembre de 2007 y para la diferencia entre los muestreos de noviembre de 2008 y febrero de 2009, muestran un incremento generalizado que corresponde con aumentos en la humedad del suelo. Se observa que el incremento medio que se obtiene entre las mediciones de noviembre de 2007 es superior al de noviembre de 2008-febrero de 2009. No obstante, como ya se había adelantado, el incremento en el muestreo de noviembre de 2007 es más localizado y se parte de una CE_a menor, por lo que la CE_a tras el periodo de infiltración es menor. El incremento que se produce en la CE_{ap} es mayor que el que se observa en la CE_{as} como consecuencia del aumento de humedad del suelo, del solapamiento en la medida entre CE_{as} y CE_{ap} y de la desecación que comienza a producirse en la superficie del suelo. Se observa que la curtosis que corresponde a las diferencias de CE_a de noviembre de 2007 fue menor que el resto. La curtosis menor y el sesgo pequeño que tienen las diferencias de CE_a para estas fechas son consecuencia de la bimodalidad de la función de distribución que muestran las diferencias de CE_{ap} y CE_{as} de noviembre de 2007.

TABLA 1. Estadísticos descriptivos de las mediciones de CE_a , $mS\ m^{-1}$, profundas (CE_{ap}) y superficiales (CE_{as}), y de las diferencias entre los datos interpolados por KO DE CE_{ap} Y CE_{as} PARA LAS FECHAS 8-7, 12-11 Y 13-12; err. est. es el error típico de las medias de la población; Q25, Q50 y Q75 representan los cuantiles 25, 50 y 75 y K la curtosis de la función de distribución de probabilidad.

Fecha	ID.	n	media	err. est.	Q25	Q50	Q75	Min	Max	Desv.tip	CV	Sesgo	K
CE_{ap}													
07.11.2007	1	5612	82,1	0,22	70,9	79,8	92,6	42,5	157,0	264,4	0,20	0,57	3,46
29.11.2007	2	5449	113,8	0,26	99,9	113,8	124,8	65,9	190,3	363,1	0,17	0,54	3,61
20.11.2008	3	4899	95,8	0,26	84,4	95,0	107,4	43,3	173,5	329,8	0,19	0,32	3,83
18.11.2009	4	5591	122,3	0,22	111,4	121,0	132,4	73,1	192,8	261,1	0,13	0,58	4,28
CE_{as}													
07.11.2007	1	5612	41,0	0,15	33,5	39,5	48,0	14,3	91,6	120,2	0,27	0,59	3,49
29.11.2007	2	5449	76,8	0,18	67,4	76,8	84,6	40,5	130,1	168,6	0,17	0,49	3,81
20.11.2008	3	4899	58,8	0,19	49,5	57,9	67,0	21,9	127,5	177,5	0,23	0,45	3,93
18.02.2009	4	5591	83,7	0,16	75,3	82,9	90,8	47,0	141,3	149,9	0,15	0,81	4,76
Diferencia – CE_{ap}													
29-07.11.2007		36240	32,0	0,07	21,0	30,0	42,3	2,1	80,1	12,6	0,39	0,48	2,54
18.02.09-20.11.08		36240	26,1	0,04	20,7	25,7	30,8	-5,8	89,8	8,4	0,32	0,41	4,15
Diferencia – CE_{as}													
29-07.11.2007		36240	36,1	0,05	27,4	35,0	44,5	9,3	77,6	10,2	0,28	0,36	2,44
18.02.09-20.11.08		36240	24,8	0,04	20,0	24,3	29,0	-10,9	73,4	7,1	0,29	0,56	4,60

3.2 Evaluación del comportamiento hidrológico de la parcela

La topografía, tanto de la parcela en general, como de las subparcelas, no es uniforme como muestra la Figura 1. La profundidad del suelo es variable, encontrándose zonas con una mayor profundidad, en el borde sureste de las subparcelas LT1-LT3 y zonas con una profundidad menor hacia la mitad de la subparcela ML3 o en la zona noroeste de LT2-SD2. Las diferencias de relieve junto con el efecto de la profundidad de la zona radical y la aparición de grietas horizontales y verticales, influyen en la dinámica del agua del suelo. Se aprecia una zona amplia con la mayor elevación, 80-81 m, que abarca la parte central de las subparcelas (ML1-LT3) a partir de la cual existe un flujo subsuperficial y divergente que deseca los perfiles correspondientes. En los mapas de la figura 2 se muestran las líneas de desagüe calculadas, observándose que gran parte de la parcela acaba produciendo escorrentía y sedimentos, que pueden llegar a las subparcelas ML4 y SD4. Asimismo, una gran cantidad de agua y sedimentos procedentes de una parcela próxima alcanzan el extremo noroeste de la parcela SD3. Esta contribución, sumada a la de los sedimentos descargados por la parcela de estudio, han podido generar una pequeña elevación en el terreno que separa las líneas de desagüe que mueren en la parte noroeste de las parcelas ML4 y SD4 (Figs. 2 y 3). La escorrentía que puede generarse por el lado sureste de la parcela es rápidamente evacuada debido a la mayor pendiente en esta zona y a la ausencia de una barrera física que pueda retener tal flujo.

La figura 2 muestra los patrones espaciales de CE_{ap} en la época más húmeda, 29 de noviembre de 2007 y 18 de febrero de 2009. En estos muestreos se observan zonas con una CE_{ap} elevada en el borde noroeste de las subparcelas SD2 a la ML4, coincidiendo con la menor altitud, hacia las que las líneas de desagüe encauzan la escorrentía de la mayor parte de la parcela, y que se consideran más húmedas (Vitharana et al., 2008; Abdu et al., 2008). Las líneas de desagüe de la parte sureste de las subparcelas ML1 y LT2, con una profundidad mayor, evacuan el agua más rápidamente al no encontrar obstáculos. Estas líneas coinciden con las zonas en las que la CE_{ap} fue menor en noviembre de 2007 y en febrero de 2009. El mapa correspondiente al muestreo de noviembre de 2007 muestra analogías con el de febrero de 2009 en cuanto a las zonas de acumulación y producción de escorrentía y se diferencian principalmente en su humedad, menor en noviembre de 2007. Analizando conjuntamente ambos mapas, si se considera que el mapa de noviembre 2007 muestra una situación de desecación progresiva respecto al de febrero de 2009, se observa que la parte sureste de las subparcelas ML1 a la LT3, se seca más rápidamente que otras zonas. Este hecho se debe a la mayor pendiente que tiene esta zona y a su orientación por lo que recibe una mayor radiación e inciden sobre ella los vientos secos de levante.

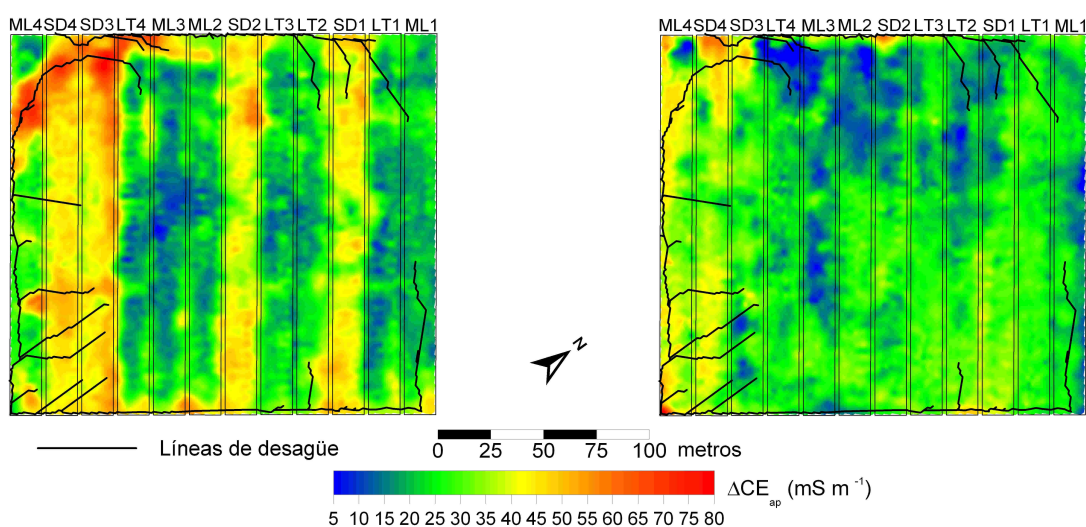


Figura 2. Mapas de CE_{ap} en las mediciones realizadas con mayor humedad del suelo, 29.Nov.2007 (izqda.) y 18.Feb.2009 (dcha.) en los que aparecen superpuestos los límites de las parcelas de manejo y la red de desagüe.

En la figura 3 se muestran los mapas obtenidos por diferencia de CE_{ap} entre los muestreos del 7 de noviembre y del 29 de noviembre de 2007 y entre el del 20 de noviembre de 2008 y el del 18 de febrero de 2009, omitiéndose los correspondientes a CE_{as} por mostrar unos patrones similares. Estos mapas reflejan la respuesta de la parcela a dos periodos lluviosos diferentes entre sí y revelan cambios en propiedades dinámicas del suelo, como la humedad, al sustraerse la CE_a de una situación seca. El mapa de diferencias de CE_{ap} de noviembre de 2007 representa la respuesta de la parcela a una lluvia muy intensa, 115 mm día^{-1} , mientras que las diferencias de noviembre de 2008 y febrero de 2009 muestran la respuesta a un periodo de lluvias de mayor duración y de intensidad media-baja. En estos casos los incrementos en la CE_{ap} se pueden relacionar con la infiltración y acumulación de agua en la parcela. Los incrementos mayores de CE_{ap} se deben a zonas receptoras de agua superficial y subsuperficial, o a zonas con mayor profundidad, como la zona sureste de las subparcelas LT1 a la LT2, como proponen Abdu et al., (2008). Es destacable el efecto que tiene la topografía en el aumento de CE_{ap} ya que en los dos casos, para periodos lluviosos diferentes entre sí, el mayor incremento de CE_a corresponde a la zona a la que vierte la mayor parte de la parcela y que está más influenciada por la redistribución del agua en el suelo.

Las características del evento lluvioso que representa la figura 3a, de gran intensidad, produce una gran recarga en el perfil del suelo y una diferenciación clara entre las parcelas manejadas en el tratamiento de SD y el resto, y que queda patente en la forma de la función de distribución de estas diferencias de CE_{ap} . Los datos correspondientes a la primera parte de la función de distribución de probabilidad de la figura 3a corresponde a puntos de las parcelas de LT y ML, mientras que la segunda parte de la función de distribución corresponde a las parcelas de SD. La cola final de la distribución comprende el área cercana a la zona de desagüe y que por tanto recibe un mayor volumen de agua. Aunque la infiltración pueda ser inicialmente mayor en las parcelas de LT y ML, como consecuencia de una porosidad mayor en el horizonte superficial cuando están labradas, la suela de labor que hay en ellas y la mayor compactación que tienen en horizontes más profundos (Agüera, 1986) producen una saturación del perfil más rápida y unas mayores pérdidas de agua por escorrentía. En cambio, las parcelas del tratamiento SD con una estructura más desarrollada, una profundidad efectiva del perfil mayor y una humedad menor antes de la lluvia, permiten un mayor volumen de infiltración y, por tanto, un mayor incremento de su humedad y de su CE_{ap} .

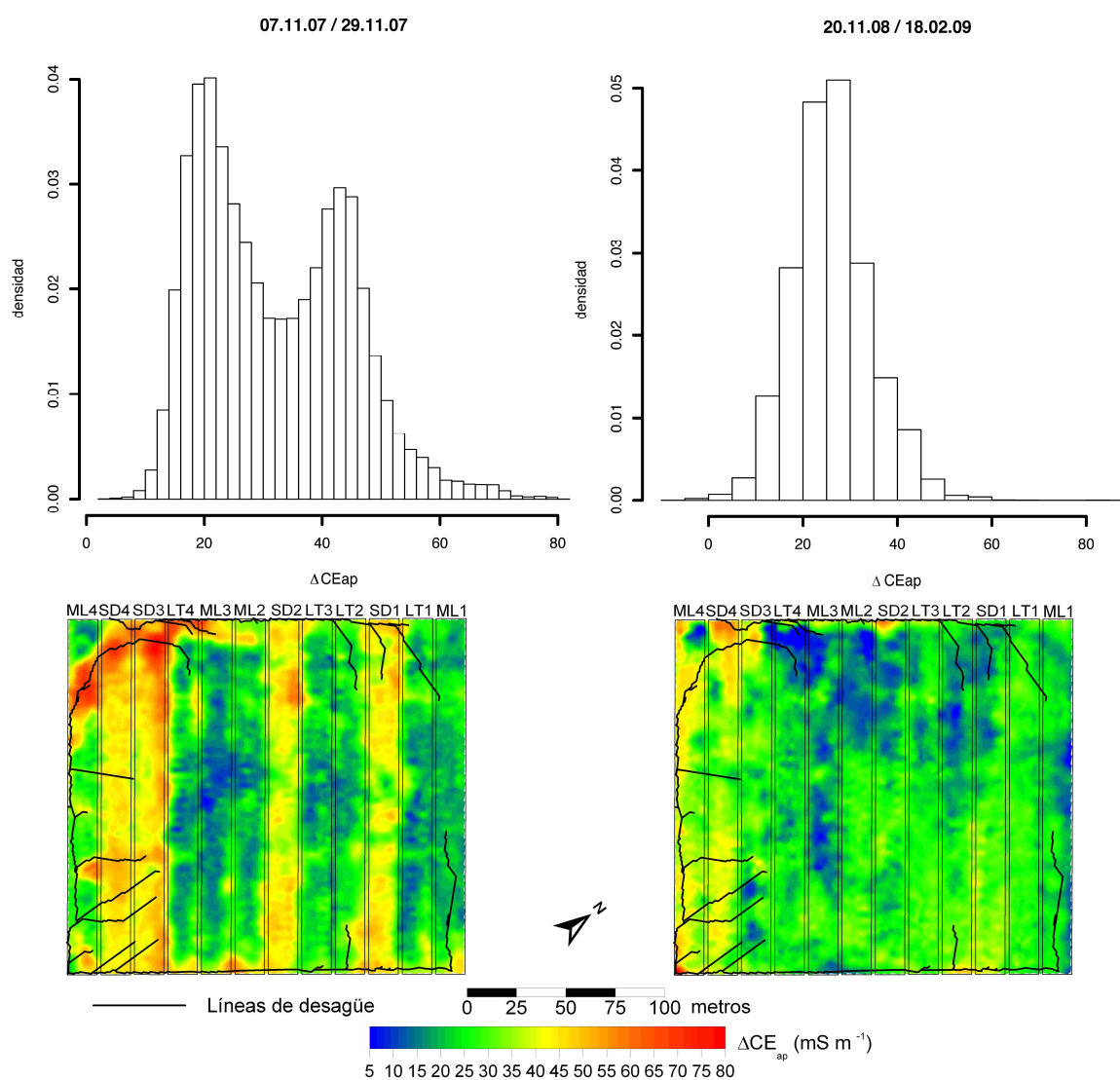


Figura 3. Mapas de diferencia de CE_{ap} entre las fechas 07.11.2007 y 29.11.2007 (a, izqda.) y de CE_{ap} 20.11.2008 y 18.02.2009 (b, dcha.). En los mapas aparecen superpuestos los límites de las parcelas con diferentes sistemas de manejo y la red de desagüe de la parcela. En la parte superior de la figura se muestran los histogramas correspondientes.

La figura 3b muestra una situación diferente a la anterior, con una precipitación más repartida a lo largo del tiempo, un total de 197 mm entre el 20 de noviembre de 2008 y el 18 de febrero de 2009, con una intensidad máxima de 37 mm día⁻¹. En esta situación no se observan diferencias claras entre manejos pese a que las parcelas de LT y ML habían sido labradas con anterioridad. La secuencia de precipitaciones que se dieron entre estas fechas produjo un humedecimiento gradual de toda la parcela y una acumulación mayor tanto en la zona de descarga como a lo largo de la subparcela ML4. Debido a su ubicación esta subparcela sufría problemas de encharcamiento tras períodos lluviosos, al recibir agua tanto por su esquina oeste, como por el resto de lados, lo que se resolvió haciendo una gavia en su borde occidental. Las zonas que menos incrementan su CE_{ap} fueron aquellas que estaban más húmedas y las que tienen una profundidad menor del suelo. La función de distribución de probabilidad de estas diferencias se aproxima a la función normal y muestra un incremento generalizado de la CE_a como consecuencia de un humedecimiento

homogéneo por toda la parcela.

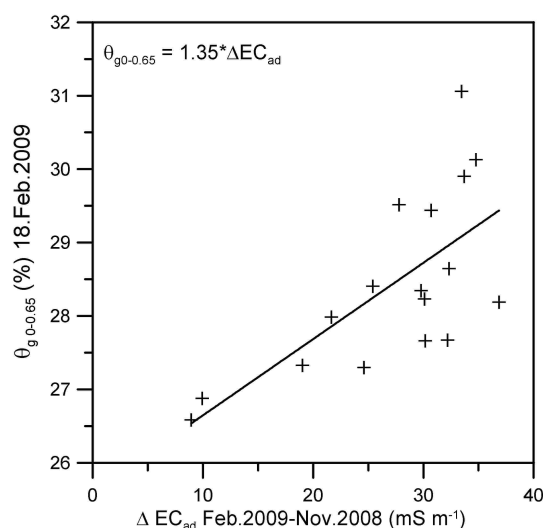


Figura 4. Relación entre el incremento de CE_{ad} entre el 20.11.2008 y el 18.02.2009 y la humedad gravimétrica del día 18.02.2009

La figura 4 muestra la relación que existe entre la humedad del suelo y los incrementos de CE_a que se produjeron entre noviembre de 2008 y febrero de 2009. Las zonas en las que más aumenta la CE_a corresponden a una humedad mayor. Este hecho confirma con la hipótesis de que las zonas en las que se da una infiltración mayor y las zonas que reciben un mayor flujo subsuperficial corresponden con zonas en las que se produce un aumento mayor de la CE_a . El coeficiente de determinación de la regresión lineal entre estas variables fue de 0,69 con el incremento de CE_{ad} y de 0,71 con CE_{as} , significativos ($p < 0,01$). Aunque la correlación entre estas variables sea inferior a la que han mostrado otros autores (Robinson et al., 2009) este hecho se debe al menor intervalo de variación de la humedad del suelo y a que la humedad medida en sus trabajos fue la volumétrica usando sensores electromagnéticos.

4. CONCLUSIONES

Se ha observado que la gran relación que existe entre la topografía de la parcela y su CE_a a través del movimiento de agua en el suelo, diferencia las zonas fuente y sumidero de agua y sedimentos. La topografía de la parcela provoca una desecación y humedecimiento del suelo diferente en cada zona, fácilmente detectables mediante su CE_a . La respuesta hidrológica de esta parcela no sólo depende del sistema de manejo sino también de las características de la lluvia. Tras chubascos intensos, la profundidad efectiva del suelo ejerce una mayor influencia que en el caso de lluvias más frecuentes pero con menor intensidad. En el caso de chubascos intensos el incremento en la CE_a y humedad del suelo es muy diferente para el tratamiento de SD y para los de LT y ML, mientras que cuando la lluvia es más suave, el incremento en la CE_a y la humedad final del suelo, dependen, principalmente, de la topografía y no del sistema de manejo. Asimismo se ha observado que las zonas en las que se da un aumento mayor de la CE_a tras un periodo lluvioso son zonas en las que la humedad del suelo, hasta una profundidad de 0,65 m, fue mayor.

Agradecimientos. Este trabajo se ha realizado con financiación del INIA a través del proyecto RTA2006-00058-CO3-02 y la beca PRE-2005, y con financiación de la Junta de Andalucía mediante el proyecto AGR2349 y la ayuda complementaria FIC07-06. Los autores agradecen el trabajo de laboratorio a J. García-Baquero y a J. Osuna de la Universidad de Córdoba y a M. Morón del IFAPA, por el montaje del sistema móvil de inducción electromagnética.

REFERENCIAS

- Abdu H., D.A. Robinson, M. Seyfried, y S.B. Jones, 2008. Geophysical imaging of watershed subsurface patterns and prediction of soil texture and water holding capacity. *Water Resour. Res.* 44, W00D18, doi:10.1029/2008WR007043.
- Agüera, J., 1986. Diseño y aplicación de un penetrómetro registrador de precisión para la determinación de la compactación en suelos agrícolas. Tesis Doctoral. Dpto. Ingeniería Rural, Universidad de Córdoba.
- Callegary, J.B., T.P.A. Ferré, y R.W. Groom, 2007. Vertical spatial sensitivity and exploration depth of low-induction-number electromagnetic-induction instruments. *Vadose Zone J.* 6,158–167.
- Corwin, D.L., y H. Farahani, 2008. Theoretical considerations of geophysical methods: Apparent soil electrical conductivity. En: B.J. Allred, J. Daniels, y R. Ehsani (eds.) *Handbook of Agricultural Geophysics*. CRC Press, Boca Raton.
- Goovaerts, P., 1997. *Geostatistics for natural resources evaluation*. Oxford Univ. Press, Oxford.
- Jabro, J.D., R.G. Evans, W.B. Stevens, y W.M. Iversen, 2008. Repeatability of soil apparent electrical conductivity measured by a coulter sensor. *Soil Sci.* 17, 35–45.
- Lozano, B., 2008. Estudio del comportamiento hídrico en ZNS de un vertisol del Valle Medio del Guadalquivir. Tesis Doctoral, Dpto. de Química Agrícola, Universidad de Córdoba.
- Minasny, B., A.B. McBratney, y B.M. Whelan, 2002. Vesper (variogram estimation and spatial prediction plus error) version 1.6. Aust. Ctr. Precis. Agric., Sydney.
- Martínez G., K. Vanderlinden, J.V. Giráldez, y J.L. Muriel, 2009. Geophysical characterization of soil moisture spatial patterns in a tillage experiment. *Geophys. Res. Abstr.* 11, EGU2009-3386-15.
- Muñoz-Carpena R., A. Ritter, y D. Bosch, 2005. Field-methods for monitoring soil water status. En: J. Álvarez-Benedí y R. Muñoz-Carpena (eds.) *Soil-Water-Solute Process Characterization - An Integrated Approach*. CRC Press, Boca Raton.
- Ordóñez, R., P. González, J.V. Giráldez, y F. Perea, 2007. Soil properties and crop yields after 21 years of direct drilling trials in southern Spain. *Soil Till. Res.* 94, 47–54.
- 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.
- Robinson D.A., A. Binley, N. Crook, F.D. Day-Lewis, T.P.A. Ferré, V.J.S. Grauch, R. Knight, M. Knoll, V. Lakshmi, R. Miller, J. Nyquist, L. Pellerin, y K. Singha, 2008. Advancing process-based watershed hydrological research using near-surface geophysics: a vision for, and review of, electrical and magnetic geophysical methods. *Hydrol. Proc.* 22, 3604-3635.
- Robinson D.A., I. Lebron, B. Kocar, K. Phan, M. Sampson, N. Crook, y S. Fendorf, 2009. Time-lapse geophysical imaging of soil moisture dynamics in tropical deltaic soils: An aid to interpreting hydrological and geochemical processes. *Water Resour. Res.* 45, W00D32, doi:10.1029/2008WR006984.
- Rodríguez-Iturbe I., A. Porporato, F. Laio, y L. Ridolfi, 2001. Plants in water-controlled ecosystems: active role in hydrologic processes and response to water stress. I Scope and general outline. *Adv. Water Resour.* 24, 695-705.
- Saey T., Simpson, D., U. Vitharana, H. Vermeersch, J. Vermang, y M. Van Meirvenne, 2008. Reconstructing the paleotopography beneath the loess cover with the aid of an electromagnetic induction sensor. *Catena* 74, 58-64.
- Soil Survey Staff, 1999. *Soil Taxonomy: A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys*. 2nd ed. USDA Agric. Handbk. 436. Washington.
- Vitharana, U.W.A., M. Van Meirvenne, D. Simpson, L. Cockx, y J. de Baerdemaeker, 2008. Key soil and topographic properties to delineate potential management classes for precision agriculture in the European loess area. *Geoderma* 143:206–215.
- Vitharana, U.W.A., M. Van Meirvenne, L. Cockx, y J. Bourgeois, 2006. Identifying potential management zones in a layered soil using several sources of ancillary information. *Soil Use Manage.* 22:405-413.
- Weller, U., M. Zipprich, M. Sommer, W. Zu Castell y M. Wehran, 2007. Mapping clay content across boundaries at the landscape scale with electromagnetic induction. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71: 1740-1747.