

SEGUIMIENTO DE LA SALINIDAD DEL SUELO EN UN OLIVAR REGADO CON AGUAS REGENERADAS USANDO TOMOGRAFÍA DE INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

K. Vanderlinden^{1*}, G. Martinez², M. Ramos¹, A. Laguna², T. Vanwalleghem³, A. Peña⁴, R. Carbonel¹, R. Ordóñez¹, J.V. Giráldez^{3,5}

¹IFAPA, Centro Alameda del Obispo, Avda. Menéndez Pidal s/n, 14004 Córdoba, España. karl.vanderlinden@juntadeandalucia.es

²Dpto. de Física Aplicada, Universidad de Córdoba, Edificio Albert Einstein. Ctra. Madrid km 396, 14071 Córdoba, España. gonzalo.martinez@uco.es, fallalua@uco.es

³Dpto. de Agronomía, Universidad de Córdoba, Edificio da Vinci. Ctra. Madrid km 396, 14071 Córdoba, España. ag2vavat@uco.es, ag1gicej@uco.es

⁴Dept. de Ingeniería Rural, Universidad de Córdoba, Edificio da Vinci. Ctra. Madrid km 396, 14071 Córdoba, España. ir1peala@uco.es

⁵Dept. de Agronomía, Instituto de Agricultura Sostenible, CSIC, Avda. Menéndez Pidal s/n, 14004 Córdoba, España. ag1gicej@uco.es

RESUMEN. El riego con aguas salinas regeneradas provenientes de la industria de la aceituna de mesa requiere un seguimiento de la calidad del suelo para garantizar la sostenibilidad de esta práctica a largo plazo. Se parte de la hipótesis de que sensores de inducción electromagnética permiten realizar tal seguimiento en un olivar en el sur de España. La conductividad eléctrica aparente (CEa) medida en 2013 mostró una relación lineal con la CE_{1:5} del suelo superficial y permitió identificar zonas de elevada CEa en las depresiones de la finca, reflejando la presencia de capas freáticas salinas colgadas. Una nueva medición de la CEa en 2017 arrojó resultados similares y fue usado para estimar, mediante un código de inversión, la distribución real de la conductividad eléctrica en el perfil del suelo, aunque no se pudieron identificar relaciones claras con las propiedades del suelo, posiblemente como resultado de la variabilidad espacial de la humedad del suelo en función de la topografía. Pese a la implementación de una estrategia de riego más conservadora, los resultados mostraron un aumento de la salinidad en el 15% de la superficie de la finca desde 2013, con mayores incrementos a mayor profundidad.

ABSTRACT. Irrigation with regenerated saline table olive processing wastewater requires continuous monitoring of soil quality to assure its long-term sustainability. The starting hypothesis of this work is that electromagnetic induction soil sensing allows such monitoring effort in an olive orchard in southern Spain. Apparent electrical conductivity (ECa) was measured in 2013 and showed a lineal relationship with surface soil EC_{1:5} and allowed identification of areas with high ECa in low elevation zones of the farm, as a result of the presence of shallow perched saline water tables. A second ECa measurement in 2017 showed similar spatial ECa patterns and was used to estimate the distribution of the electrical conductivity across the soil profile using inversion software, although no clear relationships with soil properties could be inferred, possibly as consequence of spatially variable soil water contents as influenced by topography. Despite the implementation of a more conservative irrigation strategy, results showed that the salinity increased since 2013 in about 15% of the study area, with larger increments in the deepest horizons.

1.- Introducción

El uso agrícola de aguas regeneradas provenientes de la industria agroalimentaria supone una alternativa prometedora a la gestión tradicional de sus efluentes que suele acarrear problemas de carácter ambiental, paisajístico, económico o legal. No sólo supone el riego con este efluente un evidente ahorro de agua, sino también permite a las empresas avanzar en el cierre del ciclo integral del agua y alcanzar a largo plazo una mayor sostenibilidad de sus procesos productivos.

Las plantas de procesamiento de aceituna de mesa que generan aguas residuales salinas son un ejemplo de tales industrias. Tradicionalmente estas aguas son alojadas en balsas de evaporación donde se recuperan los sólidos que son posteriormente desechados. Murillo et al. (2000) comprobó que estas aguas residuales son inapropiadas para regar olivos debido a su elevado contenido en sodio. No obstante, el olivo es moderadamente tolerante a la salinidad (Melgar et al., 2009) y estudios piloto han demostrado que tras un tratamiento previo y la mezcla con agua de lluvia o subterránea para alcanzar concentraciones de sal tolerables se consigue una fuente segura de agua de riego que no daña a los árboles.

No obstante, estas prácticas requieren de un seguimiento en campo para asegurar su viabilidad agronómica y ambiental a medio y largo plazo. El seguimiento convencional de la salinidad requiere periódicamente de muestreos de suelo y análisis de laboratorio que son tediosos y costosos. Además, debido al carácter destructivo del muestreo de suelo no se pueden repetir las mediciones en el mismo sitio. De forma alternativa se propone el uso de sensores de inducción electromagnéticos (IEM) que permiten obtener información espacial detallada. Los sensores de IEM que se han convertido en uno de los métodos más populares para caracterizar a escala de parcela la variabilidad espacial de las propiedades y estados del suelo (Doolittle y Brevik, 2014). El carácter no intrusivo de las mediciones hace que el método sea particularmente apto

para medir en los suelos duros, secos y pedregosos que se encuentran en muchos olivares (Pedrera-Parrilla et al., 2016).

La técnica permite medir simultáneamente la conductividad eléctrica aparente (CEa) del suelo para distintas profundidades teóricas de exploración. Bajo condiciones no salinas la CEa está principalmente relacionada con el contenido en arcilla y agua, mientras que bajo condiciones salinas es la contribución de los solutos de la solución del suelo la que domina la CEa. La integración del sensor en una plataforma móvil georreferenciada permite abarcar grandes superficies y realizar miles de mediciones en poco tiempo. Los datos georreferenciados se usan para producir mapas de CEa y para relacionarlos con propiedades del suelo, como la salinidad, que se miden de forma independiente (Triantafyllis et al., 2002).

No obstante, este procedimiento solamente proporciona información sobre la distribución horizontal de la salinidad, pero no sobre su distribución vertical en el perfil del suelo. Recientemente se publicaron códigos que permiten realizar una inversión conjunta de las distintas señales de CEa (Triantafyllis y Monteiro Santos, 2013), que corresponden a distintas profundidades teóricas de exploración, para obtener la distribución vertical de la conductividad eléctrica real del suelo a partir de la cual se puede estimar la distribución de la salinidad de forma bi- y tridimensional (Huang et al., 2014).

Los objetivos de este trabajo son evaluar las consecuencias del riego con aguas salinas regeneradas para el suelo de un olivar y comprobar la utilidad de la tomografía de IEM para realizar el seguimiento a medio plazo de la salinidad del suelo.

2.- Materiales y Métodos

2.1. –Finca de estudio y mediciones realizadas

El estudio se llevó a cabo en un olivar situado en el sur de España con árboles de 60 años y un marco de plantación de 12 × 10 m. La parcela estuvo regada desde 2012 con aguas salinas regeneradas ($CE \approx 6 \text{ dS m}^{-1}$) provenientes del procesamiento de aceituna de mesa. En noviembre de 2013 se realizó una exploración preliminar de la finca con un sensor de inducción electromagnética. En base a los mapas de CEa resultantes de dicha medición (Fig. 1) se decidió la ubicación de 13 calicatas (Fig. 1) para las que se realizó una descripción completa del perfil del suelo en junio 2014.

En términos generales, el suelo que se desarrolla sobre la roca caliza se clasificó como calcixercept, aunque también se encontraron haploxererts y xerofluvents (Soil Survey Staff, 2014). Se tomaron también muestras del agua que afloró en el fondo de varias calicatas y se realizó un seguimiento durante los próximos años de los niveles de estas capas freáticas colgadas y de la calidad de sus aguas en piezómetros instalados con este fin. En la cercanía de las calicatas también se tomaron muestras superficiales de suelo (0-20 cm) en el centro de las calles y bajo los goteros para su análisis en laboratorio, con el fin de comparar los efectos locales de la aplicación del efluente. Debido a la predominancia de margas

y calizas en el subsuelo, los acuíferos de la zona presentan una elevada salinidad. La Fig. 1 muestra un mapa de la CEa (0-0.5 m) de la finca, medida en 2013, y la topografía, con la posición de las calicatas, el pozo y los puntos de muestreo.

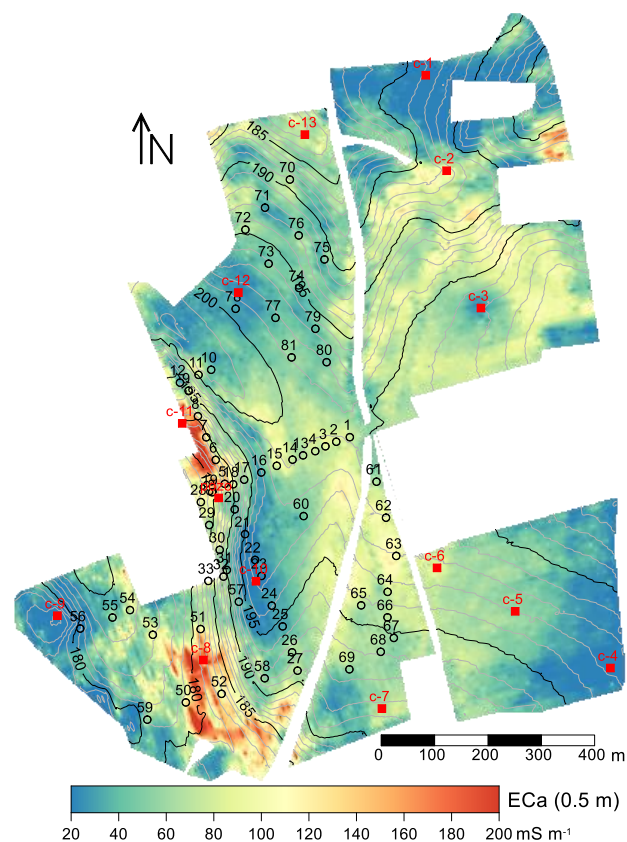


Fig. 1. Mapa de la CEa (0-0.5 m), medida en 2013, y la topografía de la finca experimental, así como la localización de las calicatas (símbolos con prefijo c) y los puntos de muestreo.

En base a los resultados de esta primera evaluación de la finca se recomendó bajar las dosis de riego, por lo que se implementó a partir de 2015 una estrategia de riego más conservadora. Para comprobar el efecto de este cambio en la salinidad de la parcela se realizó en febrero de 2017 otra medición de la CEa con el mismo sensor de inducción electromagnética. Aprovechando las obras de instalación de un nuevo sistema de riego se realizó durante 2017 en 65 puntos (Fig. 1) un muestreo de horizontes de 0.3 m de espesor hasta una profundidad de 1.2 m, para su posterior análisis en laboratorio. La conductividad eléctrica del extracto de pasta saturada (CEe) y de solución suelo-agua 1:5 ($CE_{1:5}$) se midió siguiendo la metodología expuesta en Corwin y Yemoto (2017). La razón de absorción de sodio (RAS) se calculó usando la relación $RAS = [Na^+]/([Ca^{2+}] + [Mg^{2+}])/2^{0.5}$, con la concentración de cationes en meq l⁻¹. El porcentaje de sodio intercambiable se estimó mediante la relación $PSI = 1.475 RAS/[1 + 0.0147 RAS]$ (U.S. Salinity Laboratory Staff, 1954).

2.2. – Medición e inversión de la CEa

La CEa se midió con un sensor de inducción electromagnética DUALEM-21 (Dualem Inc., Milton, Canadá). El sensor consiste en una bobina que transmite un campo electromagnético a baja frecuencia (9 kHz) y dos pares de bobinas receptoras con orientaciones horizontal y perpendicular con respecto a la transmisora. La distancia entre la bobina emisora y las bobinas receptoras con orientación perpendicular es 1.1 y 2.1 m, resultando en profundidades de exploración teóricas de 0-0.5 m y 0-1.0 m, respectivamente. Las bobinas receptoras con orientación horizontal se encuentran a distancias de 1 y 2 m de la receptora y exploran profundidades de 0-1.5 m y 0-3.0 m, respectivamente. El sensor está integrado en una plataforma móvil que consiste en un vehículo todoterreno ATV, equipado con un sistema de posicionamiento GPS-RTK y que arrastra el trineo de PVC que contiene el DUALEM-21. La medición se realizó con una velocidad entre 5 y 10 km/h por el centro de las calles entre olivos, obteniendo en cada punto de medición los cuatro valores de CEa correspondientes a las profundidades de exploración anteriormente indicadas.

La CEa medida por el sensor integra la conductividad eléctrica de un volumen de suelo y por tanto, depende no sólo de la salinidad, sino también de otras propiedades que influyen en aquella, tales como el contenido en arcilla, la humedad o la temperatura. Por esta razón es necesario determinar en cada aplicación qué propiedades del suelo predominan en las señales de CEa (Doolittle y Brevik, 2014).

Los datos obtenidos en campo se someten a un filtrado y se verifica su consistencia espacial dado que la presencia de elementos conductores como tuberías metálicas o elementos del vallado, así como los movimientos bruscos de la antena de GPS o los giros del sensor en torno a su eje, cambiando la configuración de las bobinas con respecto a la superficie del suelo y por tanto el resultado su medición, pueden resultar en valores anómalos de la CEa. Posteriormente se interpolaron los datos de CEa en una malla de 1×1 m.

Las cuatro señales integradas de CEa que proporciona el sensor DUALEM-21 se invirtieron con el código EM4Soil (EMTOMO, Lisboa) con el fin de obtener la distribución vertical de la conductividad real, σ . EM4Soil proporciona imágenes pseudo bi- o tridimensionales de la σ al condicionarlos a los valores de σ en puntos próximos al de estimación. Según la condición de suavizado en la estimación del perfil de σ , se consideran dos algoritmos de inversión (S1 y S2). Ambos son variaciones del método de regularización de Occam (de Groot-Hedlin and Constable, 1990) donde el algoritmo de inversión S2 produce variantes más suavizadas que S1. Dada la elevada CEa observada en esta finca se realizó la inversión usando la solución completa de campos electromagnéticos en suelos multicapa o de horizontes diferenciados (FS), usando distintos valores del factor de suavizado (*damping factor*, λ). Más detalles sobre el algoritmo de inversión pueden encontrarse en Triantafyllis y Monteiro Santos (2013).

3.- Resultados y Discusión

3.1.- CEa en 2013 y 2017

Las mediciones de la CEa en 2013 arrojaron información sobre la distribución horizontal y vertical de la salinidad en la finca. Se detectaron elevados valores de la CEa en las depresiones al pie de zonas con pendientes pronunciadas (Fig. 1), siendo indicativos de la acumulación de sales en estas áreas como resultado de flujos super- y subsuperficiales. La tabla 1 y la Fig. 2 muestran que la CEa incrementó con la profundidad de exploración en toda la finca, y particularmente en zonas de elevada CEa ($>125 \text{ mS m}^{-1}$), correspondientes con 10-15% de la superficie de la finca.

Tanto la elevada CEa ($> 200 \text{ mS m}^{-1}$) observada para la mayor profundidad de exploración como el sesgo positivo de las funciones de distribución muestran la acumulación artificial de material conductivo entre 1 y 3 m de profundidad (Fig. 2). La disminución del coeficiente de variación en función de la profundidad de exploración indica que dicho material conductivo se distribuye más homogéneamente en el subsuelo que en la proximidad de la superficie. Para la medición de 2017 estas tendencias en función de la profundidad son aún más pronunciadas. Esto, junto con el incremento de los valores medios (Tabla 1) de CEa entre 2013 y 2017 (salvo para la menor profundidad de exploración) demuestra que siguió la acumulación de material conductivo en el subsuelo durante este periodo, a pesar de la implementación de una estrategia de riego más conservadora.

Tabla 1. Estadísticos descriptivos de las cuatro señales de CEa medidas en 2013 y 2017. P: profundidad de exploración, n: número de mediciones, m: media, s: desviación típica, CV: coeficiente de variación

P m	año	n	m mS m ⁻¹	s	CV	sesgo	curt.
0-0.5	2013	31677	59.8	36.5	0.61	1.43	6.11
	2017	81806	58.8	35.0	0.60	1.98	8.49
0-1.0	2013	31306	84.2	45.0	0.53	1.55	6.61
	2017	78921	88.3	44.0	0.50	1.61	6.94
0-1.5	2013	31677	90.7	45.8	0.51	1.48	6.15
	2017	81806	97.3	45.2	0.46	1.47	6.22
0-3.0	2013	31306	106.1	46.8	0.44	1.50	5.62
	2017	78921	114.2	42.5	0.37	1.24	5.39

En la Fig. 2 se puede apreciar para la profundidad de exploración 0-0.5 m que la CEa ha disminuido solamente en zonas con valores intermedios ($50\text{-}100 \text{ mS m}^{-1}$). Para las demás profundidades de exploración se observa un incremento de la CEa en prácticamente todo el intervalo de valores y en particular para 0-3.0 m. Las condiciones ambientales en los que se realizaron ambas mediciones no fueron idénticas, por lo que éstas podrían tener una influencia sobre las diferencias observadas en la Fig. 2. La temperatura del suelo a 0.6 m de profundidad fue en noviembre 2013 (19°C), 5°C superior a la medida a la

misma profundidad en febrero 2017 (14°C), lo que supone aproximadamente un incremento de 10% de la CEa en 2013 con respecto a 2017, sólo como consecuencia de la diferencia de temperatura (Ma et al., 2011). En general, y en consonancia con las prácticas de laboratorio, se recomienda corregir los datos de CEa respecto a la temperatura de referencia de 25°C. No obstante, la temperatura no es constante en el perfil del suelo y muestra mayor variación en los horizontes más superficiales, por lo que no resulta evidente aplicar esta corrección en condiciones de campo y por lo que no se ha realizado en este estudio. De cara a la interpretación de los resultados que se muestran a continuación hay que tener en cuenta que el incremento de la CEa entre las mediciones de 2013 y 2017 (Tabla 1 y Fig. 2) será aún mayor si se tuviera en cuenta el efecto de la temperatura del suelo.

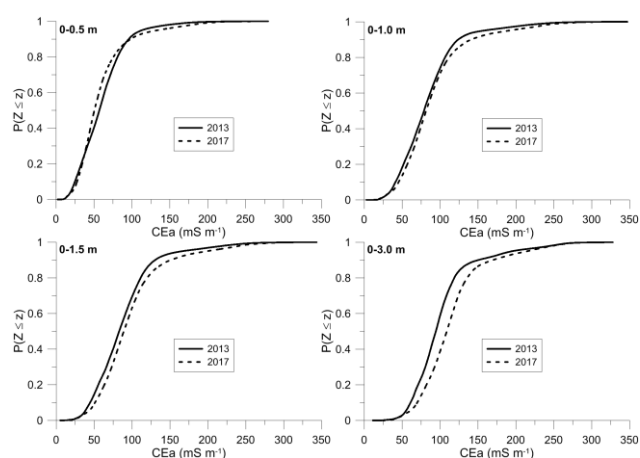


Fig. 2. Funciones de distribución de la CEa interpolada, correspondientes a las mediciones de noviembre 2013 y febrero 2017 para las cuatro profundidades de exploración que proporciona el sensor DUALEM-21.

3.2.– Cambio de la CEa entre 2013 y 2017

La Fig. 3 muestra los mapas de la diferencia de CEa (Δ CEa) entre 2013 y 2017 para las cuatro profundidades de exploración. Los patrones espaciales son similares para las cuatro señales de CEa, con los mayores incrementos ($> 60 \text{ mS m}^{-1}$) en las áreas con valores más elevados de CEa (Fig. 1). En amplias zonas de la finca se observa también una disminución de la CEa, particularmente para las señales más superficiales, como resultado de los cambios introducidos en el manejo del riego. A pesar del incremento generalizado que se observa en la Fig. 3 para la señal más profunda (0-3.0 m), los valores más elevados son inferiores a los que se observan para las demás señales. Esto queda también patente de la comparación de las funciones de distribución representadas en la Fig. 4, donde a partir de valores de Δ CEa $> 25 \text{ mS m}^{-1}$ la curva correspondiente a la señal más profunda supera gradualmente a la de las demás señales, indicando una menor probabilidad de ocurrencia de los valores de Δ CEa más elevados.

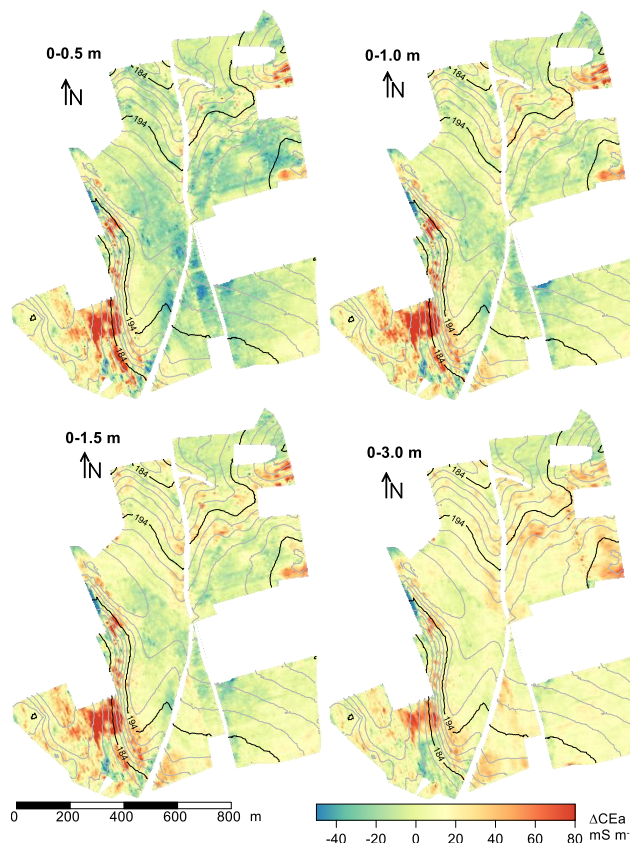


Fig. 3. Distribución espacial de la diferencia entre la CEa de 2017 y 2013, Δ CEa, para las cuatro profundidades de exploración que proporciona el DUALEM-21. Los valores positivos corresponden a un incremento de la CEa entre 2013 y 2017.

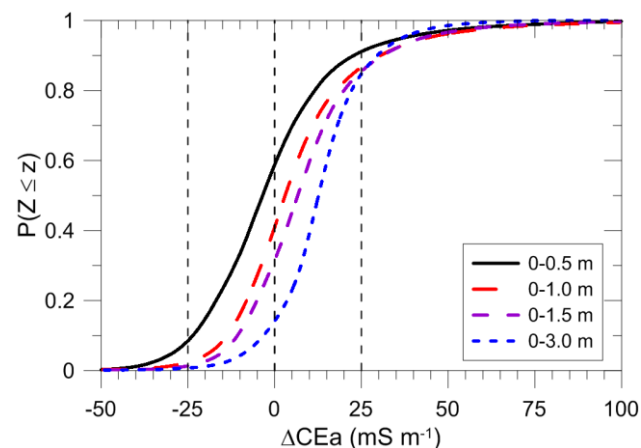


Fig. 4. Funciones de distribución de la Δ CEa para las cuatro profundidades de exploración que proporciona el sensor DUALEM-21. Los valores positivos corresponden a un incremento de la CEa entre 2013 y 2017.

Con el fin de cuantificar de forma objetiva la evolución espacial de la CEa en la finca se propone usar la probabilidad de sobrepasar un valor determinado de cambio de la CEa como indicador. La Fig. 4 muestra las funciones de distribución correspondientes a los datos interpolados de la Fig. 3. Para tener en cuenta los errores introducidos por las distintas condiciones de medición en 2013 y 2017, tales como la temperatura y la humedad del suelo o la temperatura ambiental, se consideran valores umbrales de -25 y 25 mS m^{-1} para identificar la relativa importancia de

las zonas donde la CEa incrementó o disminuyó (Tabla 2).

En términos de proporción de la superficie de la finca, para la señal más superficial (0-0.5 m) se observa que aproximadamente en 9% de la superficie de la finca la CEa incrementó en más de 25 mS m^{-1} , mientras que para las demás señales esta proporción se sitúa en torno a 15%. Considerando el umbral de $\Delta \text{CEa} > 50 \text{ mS m}^{-1}$ (Tabla 2), dicha proporción es 1.5% para la señal más profunda (0-3.0 m) y aproximadamente 3% para las demás señales. Esto indica que la CEa somera y profunda en las zonas de elevada CEa (Fig. 1) son controladas por distintos mecanismos y que la ΔCEa correspondiente a las distintas señales refleja cambios en distintos volúmenes de material conductivo presente en el subsuelo. La señal superficial (0-0.5 m) muestra que la CEa disminuyó entre 2013 y 2017 con más de 25 mS m^{-1} ($\Delta \text{CEa} < -25 \text{ mS m}^{-1}$) en 8.5% de la superficie de la finca, mientras que las demás señales arrojan proporciones decrecientes entre 2.7 y 0.7% en función de la profundidad de exploración.

Tabla 2. Probabilidades, $P(Z \leq z)$, del cambio de CEa entre 2013 y 2017 para las cuatro profundidades de exploración que proporciona el DUALEM-21.

	0-0.5 m	0-1.0 m	0-1.5 m	0-3.0 m
$z = 50 \text{ mS m}^{-1}$	0.971	0.962	0.966	0.985
$z = 25 \text{ mS m}^{-1}$	0.911	0.866	0.854	0.847
$z = 0 \text{ mS m}^{-1}$	0.587	0.409	0.315	0.141
$z = -25 \text{ mS m}^{-1}$	0.085	0.024	0.013	0.007

3.2. – Resultados analíticos y relación con la CEa

Los resultados analíticos de suelo y agua obtenidos en las calicatas entre junio 2014 y julio 2015 confirman la existencia de capas freáticas colgadas, aparentemente independientes, cuyas aguas muestran una calidad variable según el momento del año agronómico. La Fig. 5 muestra que se alcanzaron valores mínimos de la CE hacia finales de la primavera, como consecuencia de la dilución de la solución del suelo por las lluvias invernales y primaverales y la ausencia de riego con aguas regeneradas salinas, para alcanzar valores máximos en verano como resultado del riego y los efectos de la elevada evaporación que caracteriza dicha época. Esto es particularmente evidente para la calicata c-8 (Fig. 1), situada en una zona de elevada CEa. La falta de buenas condiciones de drenaje, posiblemente como consecuencia del creciente contenido en arcilla con la profundidad, alcanzando 50-60% en el punto c-8 (datos no mostrados) puede contribuir a la formación de capas freáticas colgadas en esta zona, al igual que en otras zonas de la finca donde se observó una elevada CEa. A modo de comparación se proporciona también en la Fig. 5 la CE medida en junio de 2014 en el arroyo que pasa por la zona norte de la finca en la cercanía de la calicata c-13 y en el pozo (Fig. 1).

Considerando la CE de estas aguas en combinación con su RAS, que varía entre 10 y $5 (\text{meq/l})^{0.5}$, podemos concluir que en principio no supone ningún riesgo su uso con fines de riego, según la clasificación propuesta por Ayers y Westcot (1985).

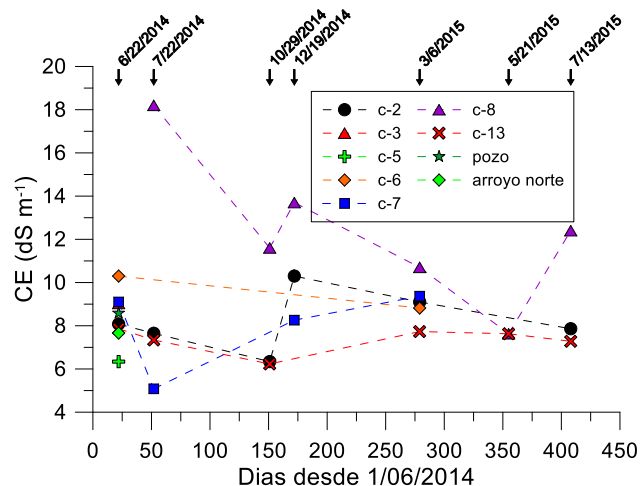


Fig. 5. Evolución de la CE (dS m^{-1}) del agua de las capas freáticas colgadas observadas en las calicatas (indicadas con prefijo c en la Fig. 1), el pozo y el arroyo que atraviesa por el extremo norte la finca entre el 22 de junio de 2014 y el 13 de julio de 2015.

La CEa medida en 2013 mostraba también una clara relación con las propiedades indicativas de la salinidad del suelo superficial. La aplicación del efluente fue especialmente notable bajo los goteros donde se observaron valores medios de PSI y de pH significativamente superiores que en las calles (22.5 y 8.2%, y 8.9 y 8.2, respectivamente). Para la $\text{CE}_{1:5}$ no se observó una diferencia significativa en las medias, dado que, como se puede apreciar en la Fig. 6a, los valores son solamente superiores en aquellos puntos con CEa baja o intermedia.

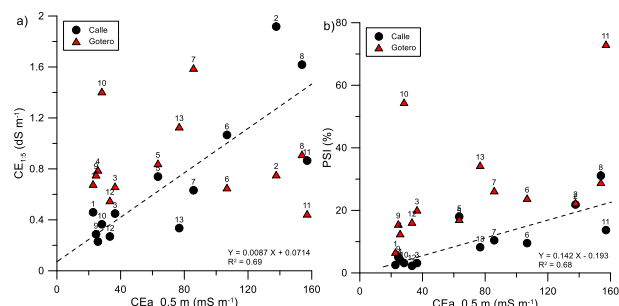


Fig. 6. Relación de a) la $\text{CE}_{1:5}$ y b) el PSI, medida en calle y bajo gotero (0-0.2 m), con la CEa (0-0.5 m) medida en las calles. La línea discontinua representa la regresión para los datos correspondientes a la calle.

Tanto para la $\text{CE}_{1:5}$ como para el PSI se aprecia una relación lineal con la CEa medida en las calles (Figs. 6a y 6b, respectivamente, con $R^2 = 0.69$ y 0.68), lo que indica en principio el potencial del sensor de inducción electromagnética para evaluar espacialmente ambos parámetros en la finca. Estas relaciones se pierden sin embargo cuando se consideran los datos correspondientes a los goteros, al haberse realizado las medidas de CEa en las calles y no en la línea de goteros.

La Fig. 7 muestra la clasificación de las muestras de suelo tomadas en 2017 (Fig. 1) según el PSI, la CEe y el pH. La proporción de muestras “no salinas” y “no sódicos” varía entre 36% (0.3-0.6 m) y 56% (0-0.3 m), mostrando en general valores de pH superiores a 8.5. Las muestras

clasificadas como “salinas” ($CE_e > 4 \text{ dS m}^{-1}$ y $PSI < 15\%$) representaban entre 14 (0-0.3 m) y 30% (0.6-0.9 m) del total, mientras que las “sódicas”, con $pH < 8.5$, y las “alcalinas”, con $pH > 8.5$, ($CE_e \leq 4 \text{ dS m}^{-1}$ y $PSI \geq 15\%$) representaban entre 8 (0.6-0.9 m) y 22% (0-0.3 m). Estas últimas dos categorías suponen una presencia excesiva de Na^+ en la solución del suelo con respecto a la concentración de otros cationes que acarrea potencialmente problemas de deterioro de la estructura y de limitación de la retención y transmisión de agua en el suelo, particularmente en combinación con la baja CE_e y el elevado pH (en torno a 10 en algunos puntos). Esta clasificación no se mantiene para las distintas profundidades analizadas, ni evidencia claros patrones espaciales. La ocurrencia, aparentemente aleatoria, de las distintas categorías de afectación por Na^+ en la finca podría ser consecuencia del deterioro del sistema de riego, con frecuentes roturas de las tuberías en distintos puntos de la finca y la progresiva obstrucción de los goteros como consecuencia del riego con las aguas regeneradas, tal como se pudo observar durante las visitas de campo. Esto resultaría en una distribución heterogénea del agua de riego en la finca y permitiría explicar los resultados mostrados en la Fig. 7.

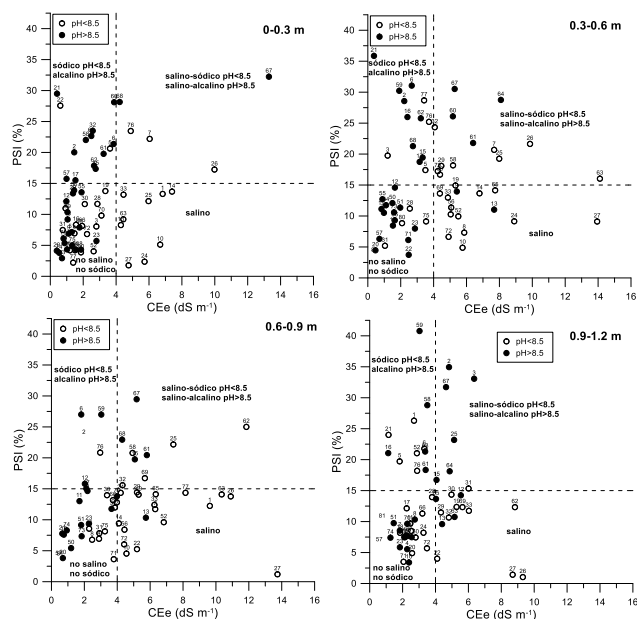


Fig. 7. Clasificación de las muestras tomadas en 2017 (Fig. 1) según el porcentaje de sodio intercambiable (PSI), la conductividad eléctrica medida en el extracto de pasta saturada (CE_e) y el pH para las cuatro profundidades analizadas.

3.3. – Inversión

Los resultados de la inversión tridimensional proporcionan mayor detalle de la distribución vertical de la conductividad que las mediciones brutas de CE_a . En la Fig. 8 se representa la conductividad real del suelo, σ , para distintas profundidades en la parcela occidental de la finca y estimada a partir de las mediciones de CE_a de 2017. Se puede apreciar cómo en las zonas de elevada CE_a (Fig. 1) la σ incrementa con la profundidad para alcanzar valores máximos a 0.8-1.0

m de profundidad. A partir de 1.2 m de profundidad la σ disminuye hasta alcanzar valores mínimos a 2.5 m. Esto indica la presencia de material conductivo en torno a 1 m de profundidad, posiblemente correspondiente con las capas freáticas salinas colgadas que se caracterizaron en la Fig. 5. A partir de 3 m de profundidad se observa de nuevo un incremento de la σ , alcanzando valores muy elevadas en toda la parcela en torno a 4 m de profundidad, lo que corresponde con la capa freática subyacente que también muestra una elevada salinidad según los resultados analíticos del agua del pozo (Fig. 5).

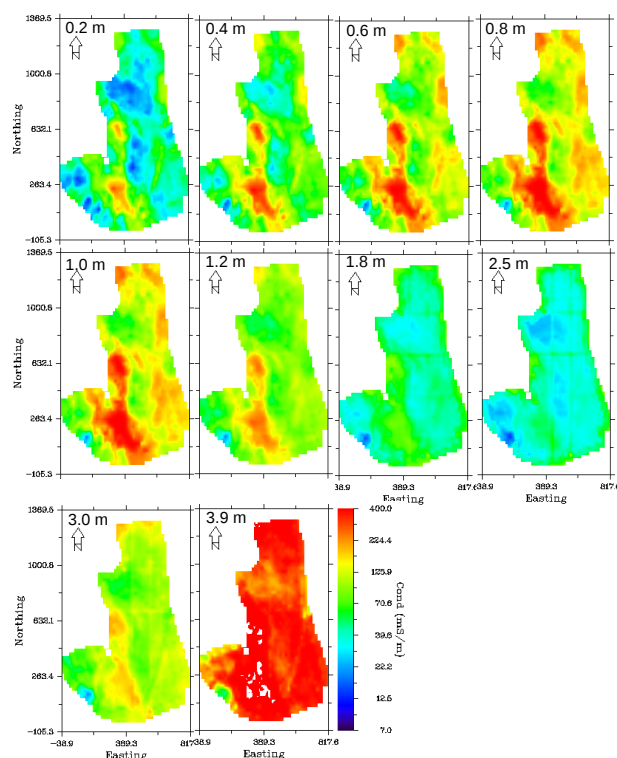


Fig. 8. Distribución de la conductividad real de suelo, σ (mS m^{-1}), estimada mediante inversión tridimensional de los datos de CE_a medidas en febrero 2017. Las imágenes corresponden con profundidades entre 0.2 y 3.9 m.

También se realizó una inversión pseudo bidimensional a lo largo de transectos entre los puntos 12 y 27 (transecto 1, T1) y 59-69 (transecto 2, T2) que muestran importantes gradientes topográficos y que pasan por zonas de elevada CE_a , por lo que las tendencias que se observan en dichos transectos se pueden considerar representativas para toda la finca (Fig. 9). Tanto la CE_a como la σ alcanzaron para las distintas profundidades consideradas valores máximos en el punto 6, que es junto con el punto 5 el de menor cota del T1. Salvo el elevado contenido en arcilla que caracteriza el perfil del suelo en estos dos puntos, ninguna de las demás variables representadas en la Fig. 9 puede explicar la evolución de la CE_a y la σ a lo largo del transecto. La elevada CE_a y σ , coincidente con la depresión, puede explicarse por la mayor humedad del suelo en esta zona en el momento de realizar la medición de la CE_a , como evidencian los signos de encharcamiento que aparecen en

la fotografía de la Fig. 10. Aunque la CEe es elevada en todo el transecto, y en particular su extremo sur, la CEa (y la σ) no sigue esta tendencia, posiblemente como consecuencia de la variación de la humedad del suelo. Al ser la humedad del suelo menor en la zona más elevada del transecto (la mitad sur), parte de las sales presentes en el suelo de esta zona se encuentran precipitadas y no son detectadas por el sensor de inducción electromagnética al no estar disueltas en la solución del suelo, por lo que los valores de CEa y σ son relativamente bajos en esta zona, aunque muestran la misma tendencia que la CEe.

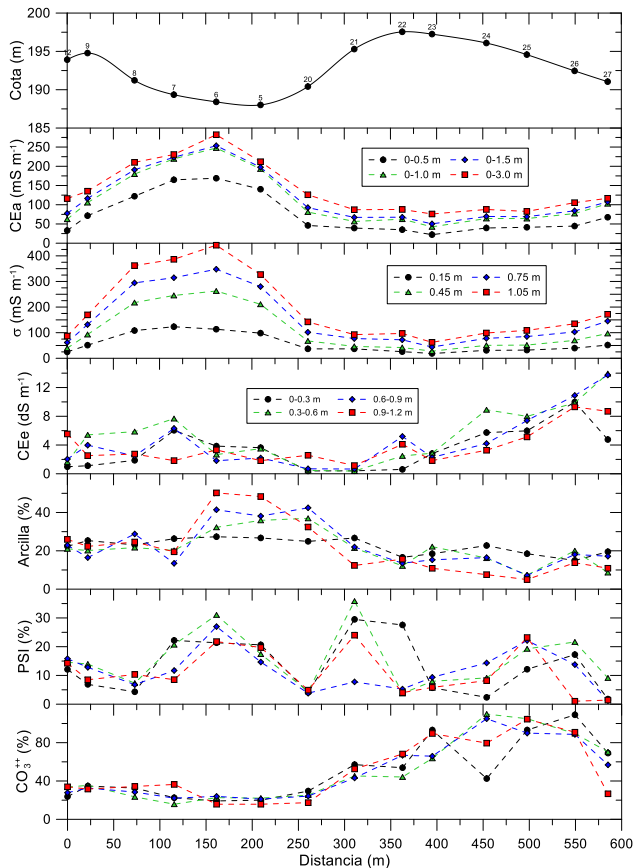


Fig. 9. Cota y distintas propiedades del suelo medidas en 2017 a lo largo del transecto T1 entre los puntos 13 y 27 (Fig. 1)



Fig. 10. Encharcamiento en la zona baja del transecto T1 (Fig. 9)

En la Fig. 11 se aprecian tendencias similares para el transecto T2. En este caso los valores de CEa y σ son aún más elevados (p. ej. el punto 52) que en el transecto T1. La similitud de los valores de σ para las profundidades de 0.75 y 1.05 m pueden indicar la presencia de capas freáticas salinas colgadas (Fig. 5) a estas profundidades en esta zona de la finca que se sitúa al pie de una ladera.

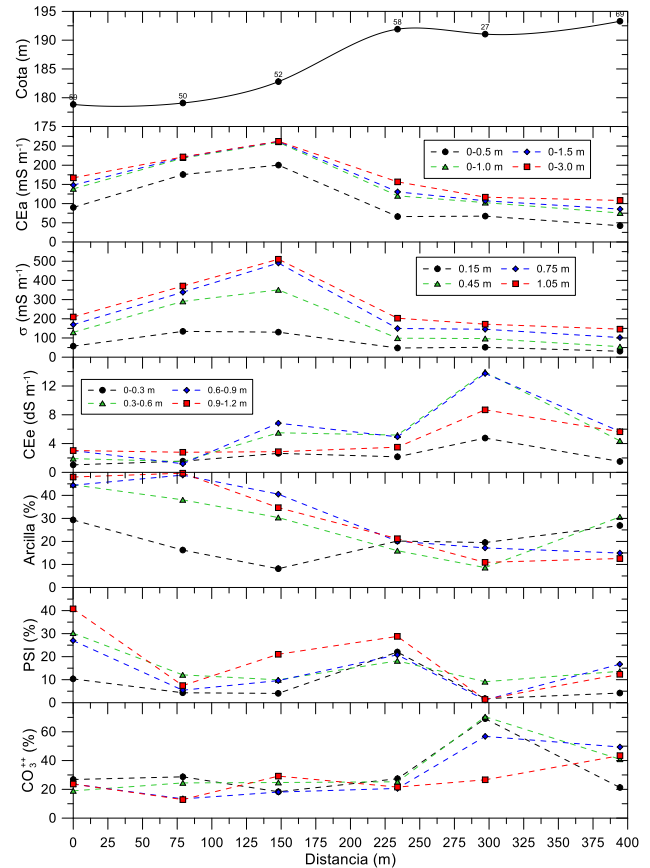


Fig. 11. La cota y distintas propiedades del suelo medidas en 2017 a lo largo del transecto T2 entre los puntos 59 y 69 (Fig. 1).

También en este transecto se observan valores máximos de la CEe en la zona de mayor elevación, especialmente para profundidades entre 0.3 y 0.9 m. Esto ocurre particularmente en el punto 27, que coincide con el extremo sur del transecto T1 (Fig. 9). La menor humedad del perfil del suelo en este punto situado a mayor elevación explica de nuevo que la elevada CEe no quede reflejada en la CEa o la σ . No obstante, a pesar de mostrar este punto la mayor CEe, el PSI es bajo, indicando un equilibrio entre la concentración de Na⁺ y los demás cationes de la solución del suelo, tal como indica la elevada concentración de carbonatos.

La falta de correspondencia entre la CEa medida en 2017 y las propiedades del suelo mostradas en las Figs. 9 y 11 tiene posiblemente su origen en variaciones verticales y laterales de la humedad del suelo en la finca, como consecuencia de su particular topografía, de la variación en la composición del perfil del suelo (el contenido de arcilla varía entre 10 y 50% en ciertas zonas), y del incorrecto

funcionamiento del sistema de riego. El muestreo de suelo se realizó en función de las posibilidades de acceso a la finca durante el periodo julio-diciembre 2017. Es posible que las condiciones del suelo cambiaran con respecto a la situación en el momento de la medición de la CEa en febrero 2017.

4.- Conclusiones

La medición inicial de 2013 detectó valores elevados de la CEa en las zonas al pie de las laderas en la finca de estudio, indicativos de la acumulación de sales en estas zonas. Se observó que la CEa aumentó con la profundidad de exploración, duplicándose para la señal más profunda los valores de CEa correspondientes a la señal más somera. La segunda medición de la CEa, realizada en 2017 tras la adopción de una estrategia de riego más conservadora, mostró un patrón espacial similar. En amplias zonas (~50%) de la finca se observó una ligera disminución de la CEa, particularmente para las señales más superficiales, pero en las zonas de mayor CEa se observaron incrementos de CEa para las señales más profundas superiores a 60 mS m^{-1} . En términos generales se midieron incrementos superiores a 25 mS m^{-1} en el 15% de la superficie de la finca.

El seguimiento de la calidad del suelo y del agua realizado entre 2014 y 2015 muestra la existencia de capas freáticas salinas colgadas, aparentemente independientes, en distintos puntos de la finca que coinciden con las zonas de elevada CEa, identificadas en las mediciones de 2013 y 2017. La $CE_{1.5}$ y el PSI medidas en 2014 en el horizonte superficial en las calles mostraron una relación lineal con la CEa medida en 2013, resaltando el potencial de la inducción electromagnética para estimar estos parámetros en esta finca.

Las estimaciones de la conductividad real en el perfil del suelo, realizadas con un código de inversión en modo pseudo tri- y bidimensional a partir de los datos de CEa, confirmaron la presencia de capas freáticas salinas colgadas y permitieron estimar con mayor precisión la profundidad a la que se encontraban en el perfil del suelo. No obstante, no se pudo relacionar la CEa medida en 2017 y la σ estimada con las propiedades del suelo que se midieron durante el verano y otoño de 2017, posiblemente como consecuencia de cambios en las condiciones de campo y una distribución heterogénea de la humedad del suelo que constituye un factor de distorsión en la relación entre la CEa y la CEE.

Los resultados de este trabajo indican que la aplicación agrícola de aguas salinas regeneradas, provenientes de la industria de aceituna de mesa puede realizarse en este suelo sin graves problemas. No obstante, la práctica requiere un seguimiento continuado de las propiedades del agua de riego y de la calidad del suelo para garantizar su sostenibilidad a medio y largo plazo. Los resultados confirman también el potencial de la IEM y la inversión de la señal para realizar este tipo de seguimiento a escala de finca, aunque la posibilidad de realizar estimaciones de

las propiedades del suelo indicativos de condiciones de salinidad o sodicidad dependerá en gran medida de las posibilidades de minimizar la influencia de efectos distorsionadores causadas por distribuciones heterogéneas de otras propiedades del suelo que influyen en la CEa, tales como la humedad, el contenido en arcilla o la temperatura del suelo.

Agradecimientos. Este trabajo ha sido desarrollado con financiación del Ministerio de Economía y Competitividad y del Fondo Europeo de Desarrollo Regional (AGL2015-65036-C3-3-R, MINECO/FEDER, UE). Asimismo, se agradece la contribución de IFAPA/FEADER a través de los proyectos AVA201601.13 y AVA2019.018.

5.- References

- Ayers, R.S. y D.W. Westcot, 1985. Water quality for agriculture. *FAO Irrigation and Drainage Paper* 29. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma, p 174.
- Corwin, D.L. y K. Yemoto, 2017. Salinity: Electrical Conductivity and Total Dissolved Solids. En: *Methods of Soil Analysis*, SSSA Book Ser. 5. SSSA, Madison, WI. doi:10.2136/ssa2015.0039.
- Doolittle, J.A. y E.C. Brevik, 2014. The use of electromagnetic induction techniques in soils studies. *Geoderma* 223-225, 33–45.
- Huang, J., G.B. Davies, D. Bowd, F.A. Monteiro Santos y J. Triantafyllis, 2014. Spatial prediction of the exchangeable sodium percentage at multiple depths using electromagnetic inversion modelling. *Soil Use Manage.* 30, 241-250.
- Ma, R., A. McBratney, B. Whelan, B. Minasny y M. Short, 2011. Comparing temperature correction models for soil electrical conductivity measurement. *Precision Agric.* 12, 55–66.
- Melgar, J.C., Y. Mohamed, N. Serrano, P.A. García-Galavís, C. Navarro, M.A. Parra, M. Benlloch y R. Fernández-Escobar, 2009. Long term responses of olive trees to salinity. *Agric. Water Manage.* 96, 1105–1113.
- Murillo, J.M., R. López, J.E. Fernández y F. Cabrera, 2000. Olive tree response to irrigation with wastewater from the table olive industry. *Irrigation Sci.* 19:175-180.
- Pedraza-Parrilla, A., E. Van De Vijver, M. Van Meirvenne, A.J. Espejo-Pérez, J.V. Giráldez y K. Vanderlinden, 2016. Apparent electrical conductivity measurements in an olive orchard under wet and dry soil conditions: significance for clay and soil water content mapping. *Precis. Agric.* 17, 531-545.
- Soil Survey Staff, 2014. Keys to Soil Taxonomy. 12ª ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC, 372 p.
- Santos Monteiro, F.A., 2004: 1-D laterally constrained inversion of EM34 profiling data. *J. Appl. Geophys.* 56, 123-134.
- Triantafyllis, J., M.F. Ahmed e I.O.A. Odeh, 2002. Application of a mobile electromagnetic sensing system (MESS) to assess cause and management of soil salinization in an irrigated cotton-growing field. *Soil Use Manage.* 18, 330-339.
- Triantafyllis, J. y F.A. Monteiro Santos, 2013. Electromagnetic conductivity imaging (EMCI) of soil using a DUALEM-421 and inversion modelling software (EM4Soil). *Geoderma* 211-212, 28-38.
- U.S. Salinity Laboratory Staff, 1954. Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils. Handbook N° 60, Washington, DC.