

CORRELACIÓN DE MEDIDAS OBTENIDAS A PARTIR DE SONDAS DE SUCCIÓN Y EXTRACTO DE SATURACIÓN DEL SUELO REGADO CON AGUAS SALINAS

A. J. Zapata¹, D. Cano¹ y J. Rojo²

Resumen:

En este trabajo se ha estudiado la correlación entre diferentes parámetros (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , NO_3^- (meq/l), CE (dS/m)) de la solución del suelo, obtenidos mediante sondas de succión y a partir del extracto de saturación del suelo. Se pretende determinar la influencia de la aplicación de aguas salinas en las medidas obtenidas a partir de sondas de succión.

Se ha observado la influencia de la humedad del suelo, de la conductividad eléctrica y en algunos casos de la temperatura y pH de la solución del suelo en las correlaciones obtenidas por lo que se propone utilizar ecuaciones de regresión múltiple. Estas ecuaciones reflejan el equilibrio alcanzado entre la solución del suelo y el extracto de saturación, para las distintas concentraciones de sales aportadas en el agua de riego.

No se ha observado, en ningún caso, la incorporación de constituyentes de la cerámica porosa, de la sonda de succión a la solución del suelo, a pesar de haberse utilizado diferentes concentraciones de aguas salinas en el agua de riego.

Palabras clave: Sonda de succión, agua salina, CE.

INTRODUCCIÓN

La extracción de la solución del suelo permite caracterizar la composición iónica de la misma. Un método muy extendido consiste en tomar muestras del suelo y analizar el extracto de saturación del mismo. Este procedimiento altera la estructura del suelo y favorece los procesos fitopatológicos aunque cuenta con numerosas referencias técnicas y recomendaciones agronómicas.

La extracción mediante sondas de succión es un método no destructivo tanto para la estructura del suelo como para el sistema radicular de las plantas (Van der Ploeg y Beese, 1977), y permite la obtención de muestras en condiciones de sub-saturación.

El uso de la sonda de succión no es un método reciente. Briggs y McCall (1904) fueron los primeros en proponer su uso para succionar el agua del suelo que realmente pudieran disponer las plantas.

Ha sido utilizada en investigación para los estudios de salinidad del suelo (Aragüés R., 1986). Algunos autores la han utilizado como herramienta para conocer la acidificación provocada por la deposición de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ en suelos forestales (Novak *et al.*, 1995; Carnol *et al.*, 1997), o la acumulación de Al^{3+} en este mismo tipo de suelos (Matzner *et al.*, 1998). Ha sido utilizada como método para conocer el contenido hídrico del suelo (Wu *et al.*, 1995; Holland *et al.*, 2000), y el drenaje del agua y lixiviación de solutos según el método de riego (Jaynes *et al.*, 1993). En 1997 se estudió su eficacia para la determinar la interacción de pesticidas en el suelo (Perringanier *et al.*, 1997) así como su concentración a distintas profundidades (Weaver *et al.*, 1990; Lanwrence *et al.*, 1995). Ha sido empleada en la horticultura almeriense (Cadahía, 1998), y en la actualidad, el uso de la sonda de succión en horticultura tienen una gran importancia dentro del campo de la nutrición como alternativa a otros métodos de extracción de la solución nutritiva (Lao *et al.*, 1996).

¹ U. de Almería. Politécnica Superior. Dpto. Ingeniería Rural. La Cañada de San Urbano. 04120. Almería. ajzapata@ual.es, dcanog@hotmail.com

² CIFA de Almería. Ctra. de la Playa s/n, La Cañada de San Urbano. 04120. Almería.

Artículo recibido el 18 de septiembre de 2002, recibido en forma revisada el 4 de marzo de 2003 y el 7 de junio de 2004 y aceptado para su publicación el 24 de junio de 2004. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo siguiendo lo indicado en las "Instrucciones para autores". En el caso de ser aceptadas, éstas serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores.

A partir de una calidad concreta de agua de riego aportamos los nutrientes necesarios para obtener una solución ideal, sin embargo, es preciso tener en cuenta posibles interacciones con el suelo, que modifican la solución nutritiva inicial. Dada la composición de la cápsula se observaron incrementos en las concentraciones de calcio, potasio y sodio y fijación de fósforo a partir de la solución nutritiva original (Lao *et al.*, 1996).

González *et al.*, (1999) pusieron de manifiesto la influencia de la temperatura, CE y pH en las concentraciones de algunos iones obtenidos mediante sondas de succión. Respecto a las concentraciones obtenidas a partir del extracto de saturación, aparecían en mayor proporción los iones Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , $\text{SO}_4^{=}$, $\text{CO}_3^{=}$, HCO_3^- y en menor proporción Cl^- , $\text{SO}_4^{=}$, NO_3^- y NH_4^+ . Aunque la sonda puede utilizarse sin restricción para Cl^- y NO_3^- , se aconsejaba precaución para los demás iones.

Perringanier *et al.* (1997) y Haberhauer (1997) manifestaron la falta de validez de las sondas de succión para determinar la interacción de los pesticidas con el suelo debido a las reacciones de adsorción y retención de moléculas por las paredes de la sonda debido al carácter iónico de los pesticidas.

Las características de un suelo quedan definidas por factores tales como el grado de infiltración, la permeabilidad, la densidad aparente, la distribución de tamaños de los poros (Brusseau, 1991; Maciejewski, 1993; Panday *et al.*, 1993; Gomis *et al.*, 1995; Hoag *et al.*, 1997), la agregación (Gavande, 1982; Häfele *et al.*, 1999). La velocidad de infiltración del agua en un suelo depende de los factores anteriores, grado de saturación del suelo (Hillel *et al.*, 1980), además de la temperatura del agua y del suelo (Rodríguez, 1982; Wierenga *et al.*, 1982). La temperatura del suelo cambia según la época del año, hora del día y profundidad (Hillel *et al.*, 1980; Wierenga *et al.*, 1982). Fenn *et al.* en 1985, manifestaron que un incremento de temperatura aumenta la lixiviación de los nitratos.

El crecimiento radicular también aumenta con la temperatura (Gavande, 1982). Además es un factor que influye sobre la formación de la estructura del suelo, generalmente, de forma indirecta, ya que induce el movimiento del vapor de agua, afecta la velocidad de las reacciones, descomposición de la materia orgánica y meteorización de los materiales (Thompson, 1988; Navarro, 2000).

Hartch *et al.* (1997) estudiaron la correlación entre los contenidos iónicos, obtenidos en sondas de succión y los obtenidos al analizar el extracto de saturación en suelos arcillosos. El contenido de nitratos fue de 11,3 mg/l en sonda mientras que en extracto de saturación fue hasta diez veces inferior. Por otra parte Ranger *et al.* (2001), compararon las concentraciones y otros parámetros del suelo, obtenidos a partir de extracto de saturación del suelo y de sonda de succión, estableciendo que ambas técnicas son válidas aunque las medidas procedentes de sondas de succión podían sufrir alguna modificación por las extracciones de la planta.

En un estudio previo, Bajracharya y Barry (1993, 1995), propusieron un modelo para la infiltración y el transporte de solutos en el suelo. El equilibrio alcanzado por los solutos entre la solución del suelo y el extracto saturado es explicado mediante un modelo no lineal múltiple.

Por otro lado está muy poco documentada la influencia de la concentración salina, temperatura, y contenido de humedad del suelo en la comparación que pudiera establecerse entre las medidas obtenidas para cada parámetro de estudio determinadas a partir del extracto de saturación del suelo y sonda de succión.

El objetivo de este trabajo es determinar, bajo condiciones de cultivo, la relación existente entre los valores medidos mediante sondas de succión y extracto de saturación, así como la influencia de la concentración salina, de la temperatura y del contenido de humedad.

Tabla 1 Análisis inicial del extracto de saturación del suelo

profundidad Z(Cm)	K^+ meq/l	Ca^{2+} meq/l	Mg^{2+} Meq/l	Na^+ meq/l	NO_3^- meq/l	$\text{SO}_4^{=}$ meq/l	Cl^- meq/l	HCO_3^- meq/l	$\text{CO}_3^{=}$ meq/l	
0-30	0.66	3.64	1.97	2.65	0.95	3.25	1.6	2.3	0.20	
30-60	0.66	22.00	5.50	5.83	1.00	28.70	2.50	0.80	0.20	
profundidad Z(Cm)	pH	CE dS/m	MO Total %	MO Oxidable %	Caliza Total %	Caliza Activa %	Arena USDA %	Limo USDA %	Arcilla USDA %	CIC (meq/ 100g)
0-30	8.39	0.83	1.0	0.77	5.14	3.19	24	56	16	6.43
30-60	8.08	3.32	0.7	0.54	5.69	3.16	24	56	16	8.26

MATERIAL Y MÉTODOS

La parte principal del trabajo se ha desarrollado en el C.I.F.A. de Almería, en una parcela de 6000 m². y suelo franco-limoso, de origen aluvial, muy homogéneo y de profundidad superior a 1m. Los análisis previos (Tabla 1) demostraron que se trata de un suelo no salino (Richards *et al.*, 1990). El porcentaje de saturación de bases que viene dado por la expresión $V = (Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^{+} + K^{+})/CIC * 100$, indica que nos encontramos ante un suelo calizo, ya que $V = 100 \%$. Sin embargo, Los niveles de caliza total y caliza activa son bajos a ambas profundidades.

Para la elaboración de este trabajo se ha dispuesto de los datos recogidos por la estación meteorológica que se ubica en el propio C.I.F.A, cuyos datos diarios están disponibles en Internet (<http://www.juntadeandalucia.es/agriculturaypesca/publico/>).

El agua de riego procede de una desaladora por ósmosis inversa, sita en la parte más elevada de la finca y que está proporcionando aguas con una conductividad eléctrica de 1.2 dS/m.

El sistema de riego es localizado y el suministro de las diferentes aportaciones de agua se hace empleando goteros autocompensantes y antidrenaje, de caudal $q=4l/h$.

Se utilizó un cultivo de olivo en crecimiento al que se aplicaron seis tratamientos con concentraciones objetivo, medidas en sonda de succión, de 3, 6, 9, 12, 16 y 20 dSm⁻¹. Estos valores se conseguían mediante la adición de ClNa y Cl₂Ca al agua de riego. Con carácter previo al inicio del ensayo se ajustaron de forma experimental las fracciones de lavado de cada tratamiento, que variaban entre el 30 y el 50 %, para conseguir los valores de conductividad eléctrica objetivo, medida en las sondas de succión.

Se tomaron mensualmente, de cada tratamiento, muestras de suelo extraídas a 30 y 60 cm de profundidad y a 30 cm de un gotero. Las sondas de succión se colocaron también a 30 cm del gotero, y permanecieron fijas durante el tiempo de duración del ensayo.

Se analizaron las muestras según la metodología al uso y se determinó pH, Conductividad eléctrica (dSm⁻¹) y las concentraciones (meq.l⁻¹) de Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Cl⁻, SO₄⁼, HCO₃⁻, y NO₃⁻, para cada muestra.

El seguimiento de la tensión en suelo se efectuó mediante sensores de humedad *Watermark* colocados a 30 y 60 cm de profundidad, situados a 30 cm de un gotero y equidistantes del tronco del árbol central de cada parcela elemental.

Las sondas de succión constan de un cilindro de PVC perfectamente unido a una cápsula porosa de forma cilíndrica con terminal semiesférica, a través de la cual penetra la solución del suelo al aplicar una diferencia de presión mediante vacío. El cilindro de PVC está a su vez sellado por un tapón de goma, al que atraviesa un tubo de pequeño diámetro y paredes semirrígidas que se conectan al sistema de vacío. La muestra se recoge sobre una botella. El vacuómetro insertado sobre cono de reducción roscado sobre la botella, permite medir el nivel de vacío aplicado al cargar la sonda (Figura 1).

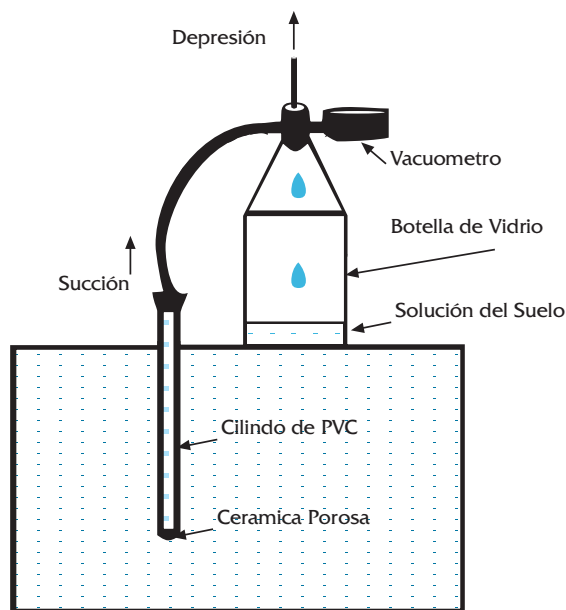


Figura 1 Sonda de Succión (Casa Himarcán).

Antes de su instalación definitiva se coloca la sonda en un recipiente con agua y, después de provocar vacío hasta 70-80 cbar., se dejan transcurrir doce horas. Tras este período, se abrirá la llave y se comprobará que la sonda ha mantenido vacío. La toma de muestras consistirá en cargar la sonda, creando una depresión de 70 cbar 24 h antes del siguiente riego y recogiendo la muestra un momento antes del mismo (Lao *et al.*, 1996). El modo en que la solución de suelo pasa a la cápsula, parecido al mecanismo de absorción pasiva de los vegetales, hace que se pueda considerar como método de referencia cuando interviene un cultivo.

RESULTADOS

En primer lugar se ha realizado un análisis descriptivo de las muestras evaluadas donde se ha obtenido los valores de la media y desviación típica de las medidas registradas mediante ambos métodos de extracción, a las profundidades de 30 y 60 cm. Se consideró necesario realizar una nueva comprobación sobre la posible influencia de la profundidad en las medidas obtenidas y por ello se ha tenido en cuenta este factor en los análisis realizados.

El análisis de la media (Tabla 2) indica que la concentración de cada parámetro aumenta, en general, al incrementar la dosis de sales aplicadas en cada tratamiento, excepto para los bicarbonatos y sulfatos que sufren un descenso. La desviación típica, determinada para cada parámetro y tratamiento, arroja una mayor variabilidad o dispersión de los valores, en las concentraciones obtenidas en sondas de succión respecto a las obtenidas a partir del extracto de saturación.

El análisis de la varianza ($p < 0.05$) indica la presencia de diferencias significativas entre los diferentes tratamientos, para los parámetros estudiados excepto para el magnesio y sulfatos al analizar las muestras extraídas a 30 cm, y para los bicarbonatos y nitratos al analizar las muestras extraídas a 60 cm.

Para comparar las medias de los distintos tratamientos se ha realizado un test de mínimas diferencias significativas (Tabla 2). De esta manera se han obtenido distintos grupos al analizar las muestras en sonda y extracto de saturación para cada parámetro y destaca la presencia de hasta 4 grupos para iones tales como el calcio y sodio y de un único grupo para los nitratos, lo que confirma el análisis de la varianza anteriormente planteado.

Se puede observar la presencia de distintos grupos cuando se analizan las muestras extraídas en sondas y las obtenidas a partir del extracto saturado. Las diferentes letras indican para cada parámetro y profundidad, la presencia de diferencias significativas para $p = 0.05$ (LSD).

Tabla 2. Valores medios para cada tratamiento y profundidad de medida.(30 y 60 cm)

Trat.	Ca ²⁺ (meq/l)	Na ⁺ (meq/l)	Cl ⁻ (meq/l)	K ⁺ (meq/l)	Mg ⁺ (meq/l)	SO ₄ ⁼ (meq/l)	HCO ₃ ⁻ (meq/l)	NO ₃ ⁻ (meq/l)	CE dS/m	PH
T1 _{ss} 30	20.03c	53.47c	42.00c	1.85a	11.70b	10.13a	6.01a	13.74a	6.42b	7.96a
T2 _{ss} 30	39.85bc	53.35c	78.66c	1.14ab	15.70ab	12.81bc	4.13b	14.55a	9.57b	7.93a
T3 _{ss} 30	71.83ab	110.58ab	154.33b	1.50ab	18.13ab	16.71b	3.97b	15.44a	16.20 ^a	7.98a
T4 _{ss} 30	111.3a	91.92bc	199.22ab	0.99b	20.00a	22.82b	4.16b	9.80a	17.23 ^a	7.88a
T5 _{ss} 30	89.16a	113.42ab	192.33ab	1.34ab	17.09ab	14.66bc	3.10b	10.37a	18.61 ^a	7.83a
T6 _{ss} 30	101.6a	132.73a	224.22a	1.34ab	17.09ab	9.41c	3.32b	11.14a	20.50 ^a	7.85a
T1 _{es} 30	18.65d	24.37c	28.00c	0.74b	8.14ab	15.42a	2.40a	3.93a	4.39c	8.05a
T2 _{es} 30	20.1cd	24.34c	34.33c	0.92ab	10.30a	14.721ab	2.25a	4.30a	4.75c	7.90a
T3 _{es} 30	31.52bc	40.54b	62.77b	0.96ab	10.33a	12.28ab	1.84ab	5.96a	7.27b	7.95a
T4 _{es} 30	32.60b	47.83ab	68.88ab	0.85ab	6.47c	9.49ab	1.83ab	5.30a	7.66ab	7.91a
T5 _{es} 30	37.52ab	48.70ab	76.66ab	0.82a	7.36ab	8.51ab	1.95ab	10.47a	8.21ab	7.91ab
T6 _{es} 30	47.04a	58.88a	85.88a	0.82ab	4.86c	10.77ab	1.26b	10.47a	9.65b	7.67b
T1 _{ss} 60	57.86bc	73.36cd	74.55c	0.42b	36.88abc	69.47b	5.07a	4.09a	13.32d	8.05ab
T2 _{ss} 60	42.03c	47.85d	84.77c	0.46b	29.20c	30.05b	3.56ab	7.14a	11.48cd	8.09a
T3 _{ss} 60	57.04bc	132.00ab	164.22a	0.74b	20.08ab	41.55ab	3.81ab	7.83a	14.72bcd	8.00ab
T4 _{ss} 60	88.92ab	98.64bc	177.56b	0.58b	32.96bc	34.19a	4.39ab	7.93a	15.81bc	7.86bc
T5 _{ss} 60	101.5a	129.89ab	254.78b	1.78a	25.12bc	31.44b	3.07b	12.53a	17.96 ^{ab}	7.79c
T6 _{ss} 60	111.7a	157.22a	278.89a	1.62a	23.88a	21.33b	3.15b	10.11a	22.52 ^a	7.87abc
T1 _{es} 60	29.07bc	26.67c	28.44d	0.54a	12.71a	33.02a	2.00b	7.64a	5.81c	8.00ab
T2 _{es} 60	25.69c	30.99c	46.66cd	0.72a	10.30a	17.47b	2.05a	5.15a	5.69c	7.82abc
T3 _{es} 60	32.74bc	39.74bc	55.22bc	0.76a	9.28ab	14.15b	1.80ab	9.08a	7.30bc	7.86abc
T4 _{es} 60	38.68ab	98.67ab	73.22ab	0.69a	8.54ab	12.70b	2.00a	3.99a	8.28ab	8.01a
T5 _{es} 60	33.79bc	45.58ab	66.66abc	0.67a	5.10b	11.50b	1.60ab	5.56a	8.21ab	7.77bc
T6 _{es} 60	45.56a	157.22a	86.13a	0.73a	5.66b	11.22b	1.27b	8.63a	9.65 ^a	7.73c

SS: Sonda de Succión; ES: Extracto saturado

CORRELACIÓN DE MEDIDAS OBTENIDAS A PARTIR DE SONDAS DE SUCCIÓN Y EXTRACTO DE SATURACIÓN DEL SUELO REGADO CON AGUAS SALINAS

Por ejemplo, en el caso del calcio se han obtenido 3 grupos al analizar las muestras extraídas mediante sonda de succión y 4 grupos al analizar las muestras de suelo obtenidas a 30 cm lo que pronostica una baja correlación entre ambos métodos de estudio para este ion.

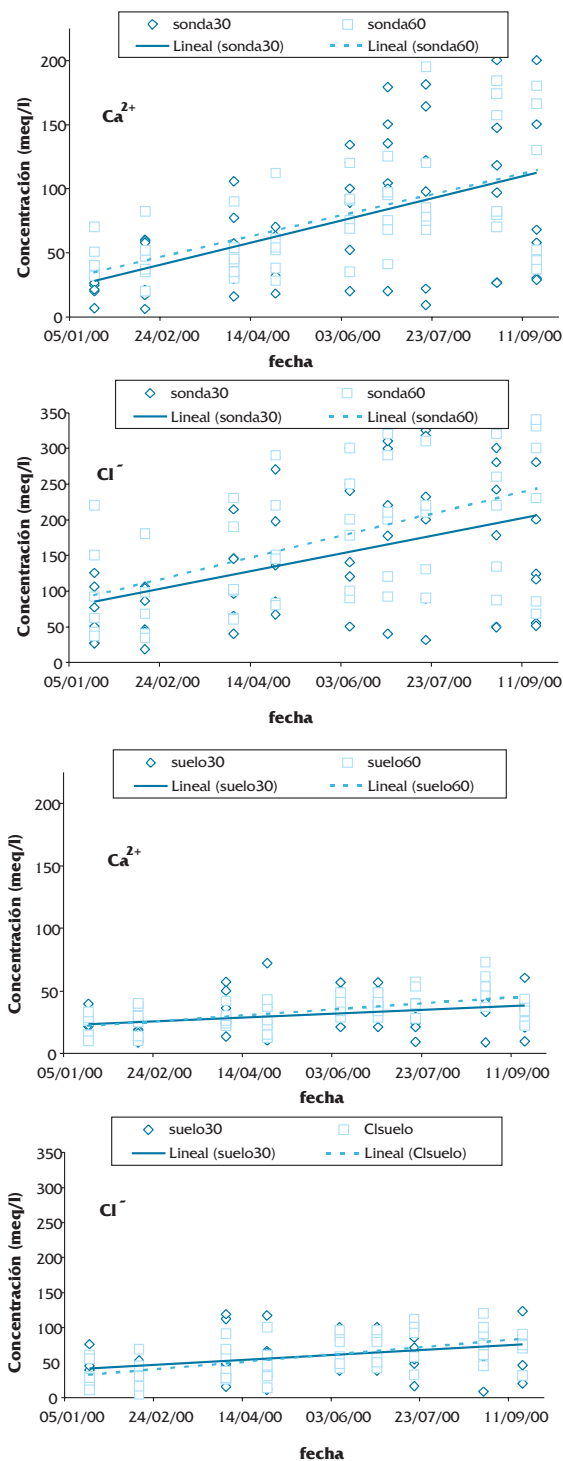


Figura 2 Concentraciones de Calcio y Cloro (meq/l) obtenidas a 30 y 60 cm de profundidad en función del tiempo, sin diferenciar tratamientos.

Con la finalidad de conocer la relación existente entre los diferentes parámetros estudiados, se ha realizado un análisis de regresión lineal simple entre los datos procedentes de Sonda de succión y los de extracto saturado, para cada tratamiento y para ambas profundidades. El análisis realizado ha puesto de manifiesto la existencia de bajos coeficientes de correlación entre los dos métodos de análisis en todos los casos. Los mejores coeficientes de correlación se han obtenido para la conductividad eléctrica, a pesar de esto, se puede observar la escasa o nula influencia de la profundidad de medida ($z = 30$ cm y tratamientos T1, T2, T3, T4, T5 y T6 se obtienen respectivamente $r^2 = 0.1391$, $r^2 = 0.4020$, $r^2 = 0.9229$, $r^2 = 0.1024$, $r^2 = 0.4633$, $r^2 = 0.2249$; para $z = 60$ cm se obtienen respectivamente $r^2 = 0,0611$, $r^2 = 0,7386$, $r^2 = 0,1484$, $r^2 = 0,0049$, $r^2 = 0,0222$, $r^2 = 0,0677$). Se ha encontrado que el ajuste no es válido, al 95% de significación, para ninguno de los parámetros de estudio.

Se ha seguido la evolución a lo largo del tiempo de las concentraciones registradas en sonda y en extracto saturado a las profundidades de 30 y 60 cm. Se pudo observar la similitud de los datos hallados en ambas profundidades. Un ejemplo claro es el caso del calcio, Figura 2, que expresa para cada método de extracción similares concentraciones a 30 y 60 cm.

Por esta razón, se considera apropiado realizar un análisis de los parámetros estudiados que permita comparar las medidas obtenidas en sonda y a partir del extracto de saturación sin tener en cuenta la profundidad. En la Figura 3 se observa la relación de las concentraciones (meq/l) obtenidas para los distintos parámetros de estudio, mediante ambas técnicas de estudio, (sin diferenciar tratamientos y como respuesta a la CE (dS/m) medida en sonda).

En la Figura 4, para el ión calcio, se pone de manifiesto la baja influencia del tratamiento, al comparar ambas técnicas de medida, para los valores obtenidos.

A tenor de los resultados obtenidos hasta el momento, se ha decidido analizar los datos obtenidos a 30 y 60 cm de forma conjunta, y por otra parte, realizar una descripción más amplia, que proporcione una representación más completa. De esta forma, los datos han sido analizados mediante una regresión múltiple. Para esta operación se ha considerado la posible incidencia de la humedad del suelo, temperatura (°C), conductividad eléctrica (dS/m) de la solución del suelo (medida en sonda) y la concentración (meq/l) del ion analizado.

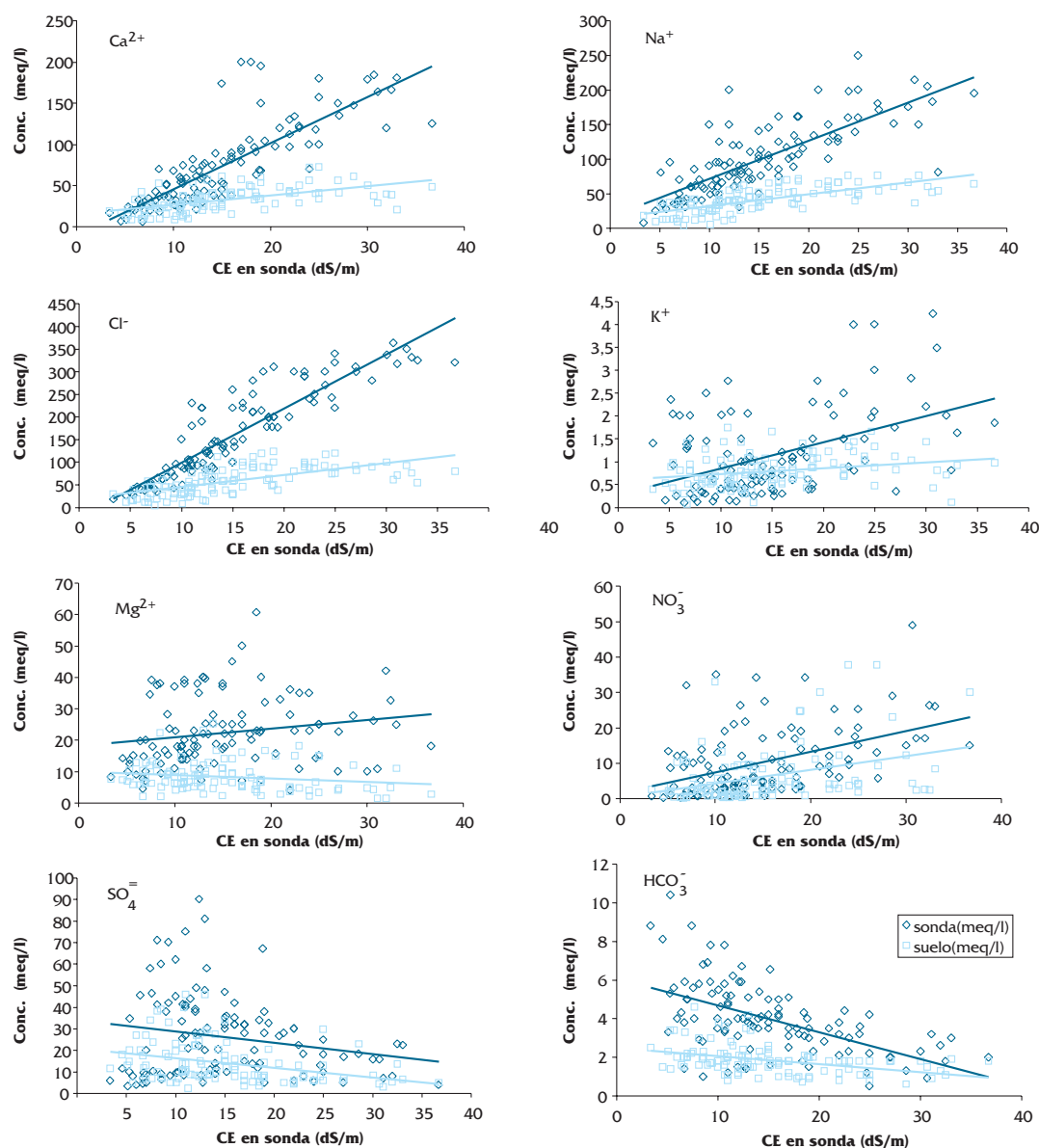


Figura 3 Concentraciones de los diferentes parámetros de estudio (meq/l) en función de la CE medida en sonda de succión. En la figura se compara la concentración de cada parámetro en la solución del suelo, medido en sonda (◊) y a partir del extracto saturado del suelo (◻).

Para determinar la humedad se ha utilizado la curva de retención del suelo propuesta por Brooks y Corey (1964) y calculada en función de la humedad θ , humedad residual θ_r , porosidad ρ , índice de distribución de poros λ , potencial de entrada de aire en los poros $\psi_b(m)$ obtenidos todos estos coeficientes (Rawls *et al.*, 1983) a partir de los datos de textura (Tabla 1) y el potencial mátrico $\psi_m(m)$ obtenido a partir de los sensores de humedad instalados.

En el ensayo se ha medido el potencial matricial del suelo en los distintos tratamientos

mediante diferentes sensores de humedad (*Watermark*, de la casa *Irrrometer*). Como cabría esperar, teniendo en cuenta el manejo del riego durante el ensayo, no se aprecian diferencias en las medidas de potencial matricial registrado en función de la profundidad. Así se pudo observar al realizar un análisis descriptivo de los datos obtenidos para el tratamiento T5 (Tabla 3). El análisis de la varianza ($p < 0.05$) indica la ausencia de diferencias significativas entre los datos obtenidos para ambas profundidades, como indica la misma letra obtenida al analizar las medias de los datos hallados en los dos perfiles del suelo para $\alpha = 0.05$ (LSD).

CORRELACIÓN DE MEDIDAS OBTENIDAS A PARTIR DE SONDAS DE SUCCIÓN Y EXTRACTO DE SATURACIÓN DEL SUELO REGADO CON AGUAS SALINAS

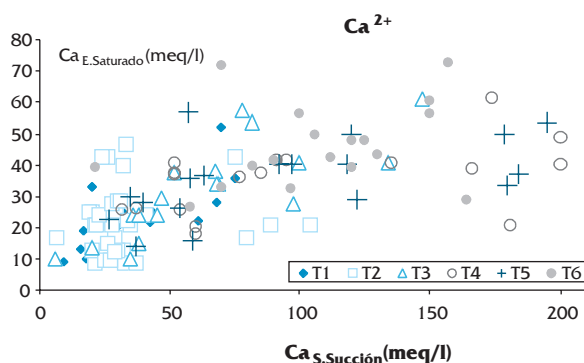


Figura 4 Relación $Ca_{\text{Sonda Succión}} - Ca_{\text{Extracto Saturado}}$ por tratamientos para el perfil del suelo $z=0-60$ cm.

	Media	Desviación típica
$z=0-30$ cm	15.115a	3.3279
$z=30-60$ cm.	14.984a	3.5763

Tabla 3. Valores medios, desviación típica de los valores de Ψ_m medido en sensor de humedad en el tratamiento T5 (CE=16 dS/m) y profundidad $z=0-30$ cm y $z=30-60$ cm.

En ese sentido puede examinarse la Figura 5 donde se muestra la evolución del potencial matricial a lo largo del período de ensayo, para el tratamiento T5 (CE= 16 dS/m).

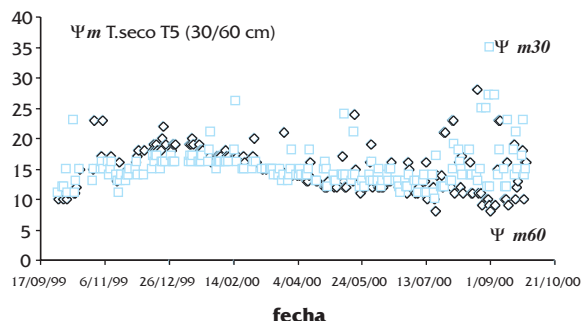


Figura 5 Representación gráfica del potencial matricio Ψ_m medido en sensor de humedad en el tratamiento T5 (CE=16 dS/m) en los perfiles del suelo $z=0-30$ cm y $z=30-60$ cm

Para determinar la temperatura del suelo se consideró como estimador la temperatura promedio del aire para los quince días anteriores a la toma de la muestra.

Para tener una mayor información, y no despreciar la posible influencia de iones y del valor del pH en las ecuaciones propuestas, se ha estudiado la matriz de Pearson para determinar los coeficientes de correlación entre todas las variables de estudio.

Se ha observado una baja influencia de la temperatura en las regresiones obtenidas, excepto en el caso de los nitratos. Por esta razón, no se ha considerado como variable limitante en el valor final del resto de los parámetros en el extracto saturado del suelo. Así para el caso del calcio, se consideraron como variables independientes la concentración de este ión en sonda, humedad, CE (dS/m) y temperatura ($^{\circ}C$.) y, se obtuvo un coeficiente de correlación $r^2= 0.9877$, mientras que despreciando la influencia de la temperatura, el valor de este coeficiente se mantiene prácticamente invariable ($r^2= 0.9866$). Para los nitratos, el coeficiente de correlación obtenido al considerar la temperatura es de $r^2=0.6313$; no obstante, el coeficiente reflejado cuando se descarta esta variable, se reduce a $r^2=0.5635$.

Una medida común para evaluar la colinealidad de parejas o de múltiples variables es el valor del factor de inflación de la varianza (VIF). Por tanto, valores altos de VIF denotan una elevada colinealidad. Se ha puesto un umbral de tolerancia de 0.10 que corresponde a valores VIF por encima de 10 (Hair, 1999). Ante esta situación se ha realizado una evaluación de la multicolinealidad ya que en las matrices de correlación se ha observado la presencia de una elevada correlación en algunos casos (de 0.90 en adelante), y en otras ocasiones, la presencia de bajos coeficientes de correlación entre las variables independientes que no asegura la ausencia de colinealidad. En este caso, sólo se ha identificado en la regresión obtenida para el bicarbonato, que ha sido posteriormente corregida.

Ión	r^2	gl	F
Ca^{2+}	0.9866	3	2574.81
Na^+	0.9856	3	2397.51
Cl^-	0.9879	3	2851.53
Mg^{2+}	0.9238	3	424.30
K^+	0.3863	3	22.03
$SO_4^{=}$	0.9500	4	664.97
HCO_3^-	0.8879	4	206.00
NO_3^-	0.6313	3	44.51
CE	0.9741	3	1977.10

Tabla 4. Análisis de varianza del modelo de Regresión Múltiple entre valores del extracto de saturación y sonda de succión.

El análisis de la varianza, de las correlaciones halladas a partir de las muestras obtenidas en los perfiles de estudio indica que el ajuste obtenido es válido en todos los casos, como muestra el valor del estadístico F (Tabla 4). Por otra parte el valor del estadístico P es menor de 10^{-4} para todos los iones estudiados y para un nivel de significación del 95 %.

Las ecuaciones finalmente obtenidas son:

$$Ca_{ES} = Ca_{SS}^{0.0864} + CE_{SS}^{0.52913} + \theta^{28.8975} \quad (1)$$

$$Na_{ES} = Na_{SS}^{0.3037} + CE_{SS}^{0.4985} + \theta^{16.1349} \quad (2)$$

$$Cl_{ES} = Cl_{SS}^{0.9303} + CE_{SS}^{-0.34876} + \theta^{5.1619} \quad (3)$$

$$Mg_{ES} = M_{SS}^{0.2009} + CE_{SS}^{-0.3308} + \theta^{38.6248} \quad (4)$$

$$K_{ES} = K_{SS}^{0.1707} + CE_{SS}^{0.1835} + \theta^{-13.7391} \quad (5)$$

$$SO_{4ES} = SO_{4SS}^{0.2848} + CE_{SS}^{-0.4668} + \theta^{49.0447} \quad (6)$$

$$NO_{3ES} = NO_{3SS}^{-0.1596} + CE_{SS}^{0.5849} + T^{1.9589} + \theta^{-104.402} \quad (7)$$

$$HCO_{3ES} = HCO_{3SS}^{0.0646} + CE_{SS}^{-0.5291} + pH^{0.9032} + \theta^{84.5038} \quad (8)$$

$$CE_{ES} = CE_{SS}^{0.5826} + \theta^{6.7039} \quad (9)$$

Como se puede observar en las ecuaciones obtenidas, las variables independientes propuestas en cada ecuación son las que resultan de considerar las interacciones más frecuentes que se suelen describir para la solución del suelo. Hay que tener en cuenta que las correlaciones para algunos parámetros están influidas por reacciones y transformaciones de biodegradación, volatilización y precipitación (Mailhol J. *et al.*, 2001; Polo *et al.*, 1996).

A pesar de que cabría esperar una relación directa entre las concentraciones en sonda y las obtenidas a partir del extracto de saturación, los resultados obtenidos ponen de manifiesto la influencia de la CE (dS/m) y de la humedad en la concentración final en suelo de cada parámetro de estudio, y de la temperatura y del pH en algunos casos.

Las interacciones que se producen en el suelo y que afectan al equilibrio extracto saturado-solución del suelo, afectan a todos los iones presentes en el suelo. No obstante, el calcio, sodio y cloruro se aportan en el agua de riego, y, a pesar de las pérdidas por lixiviación, sus concentraciones estarán relacionadas directamente con las del agua de riego, por lo que cabe esperar una alta correlación.

Por otra parte el calcio es adsorbido por el complejo de cambio y, a pesar de esto, su concentración se ha visto incrementada en cada tratamiento tanto en sonda como en el extracto saturado. De igual manera ha sucedido con el sodio.

Ambos iones están influidos de forma similar por su propia concentración en sonda, y por la CE (dS/m) y por la humedad como se puede apreciar en las correlaciones obtenidas (ecuaciones 1, 2).

El Cl⁻ es muy soluble, y no tiende a formar parte del complejo de cambio a diferencia del calcio y sodio, aunque tiene un incremento proporcional a estos iones tanto en sonda como en extracto saturado. Como se puede apreciar en la ecuación 3, las concentraciones en sonda y en suelo son muy similares, con una pequeña influencia de la CE del suelo y de la humedad.

A tenor de los coeficientes de correlación obtenidos en la matriz de Pearson cabría esperar cierta influencia del ión potasio, así como de la CE y de la humedad en la concentración final de Mg²⁺ en el suelo. Sin embargo, el coeficiente del ión potasio es irrelevante, por lo que se descarta su posible influencia. En este caso, se observa una notable influencia de la humedad en la concentración de Mg²⁺ obtenido a partir del extracto saturado del suelo (ecuación 4).

En general, la concentración de potasio en suelo está influenciada por diversos factores como textura, humedad, temperatura y pH del suelo. Por esta razón, y a partir de los valores de los coeficientes de correlación obtenidos en la matriz de Pearson, se decidió incluir, en la ecuación propuesta, estos factores y la concentración de Mg⁺ (razonable debido al antagonismo K/Mg). No obstante, a pesar de que la correlación obtenida ha sido levemente superior cuando se han considerado como variables independientes la humedad, temperatura, CE y pH y Mg⁺ ($r^2=0.4127$), el coeficiente obtenido para la temperatura, pH y Mg⁺ ha sido irrelevante, y la correlación obtenida no ha podido considerarse válida ($p=0.05$). Por esta razón, se propone finalmente la ecuación 5, aunque el coeficiente de correlación obtenido es bajo.

La matriz de Pearson puso de manifiesto cierta influencia de la conductividad y humedad en la concentración final de sulfatos en el suelo y la ecuación propuesta final (ecuación 6), refleja una alta influencia de la humedad.

Normalmente, la concentración de nitratos del suelo está condicionada por diversos factores tales como la presencia de diversos elementos esenciales, aireación del suelo, humedad, temperatura y pH. Por esta razón y basándose en los coeficientes obtenidos a partir de la matriz de Pearson,

que mostraban las mejores correlaciones, se tuvo en cuenta la influencia de la CE, temperatura, humedad y pH. No obstante, el coeficiente arrojado por la variable independiente pH no fue significativo. Por esta razón, se propuso la ecuación 7, a pesar de que no refleja un coeficiente demasiado alto.

La presencia de bicarbonatos en el suelo puede provenir del CO₂ atmosférico, respiración radicular, respiración microbiana, agua de riego o arrastre de las lluvias. Estos bicarbonatos pueden formar complejos con el Ca²⁺ que luego tienden a lixiviar y precipitar. La matriz de Pearson manifiesta cierta influencia de la CE, pH, humedad y del calcio en sonda en la concentración de bicarbonatos en el suelo. No obstante, el coeficiente del calcio en la ecuación obtenida fue irrelevante, por lo que finalmente no se consideró este factor en la ecuación presentada (ecuación 8).

En el caso de la CE, la matriz de Pearson reflejó que su valor en suelo estaba principalmente influenciado por la concentración de sodio, calcio, y el valor de humedad y CE registrado en sonda. Sin embargo, la regresión obtenida no fue aceptable ($P=0.05$), y se propuso una nueva ecuación, a pesar de que el coeficiente de correlación obtenido fuera inferior (ecuación 9).

CONCLUSIONES

Existe una relación entre las concentraciones medidas en extracto de saturación del suelo y los valores correspondientes medidos mediante sonda de succión.

Los ajustes lineales simples no son adecuados para reflejar dicha relación y se propone la utilización de correlaciones múltiples. Se aconseja además el empleo de modelos no lineales que reflejan mejor el complejo equilibrio que se da en el suelo.

En las ecuaciones de correlación múltiple se ha comprobado la influencia de la humedad del suelo, y conductividad eléctrica para el calcio, sodio, cloro, magnesio, potasio y sulfatos. Para los nitratos, se observa además la influencia de la temperatura y en el caso de los bicarbonatos, se puede apreciar la influencia de la CE, pH y humedad. El valor de la conductividad eléctrica en suelo depende de su valor en sonda y de la humedad.

La composición de la cerámica porosa de la sonda de succión no ha alterado la concentración iónica de la solución del suelo a pesar de las distintas concentraciones salinas aportadas en el agua de riego. Por otra parte, se ha podido comprobar que dicha concentración no está afectada por el incremento de temperatura en la estación estival.

LISTA DE SÍMBOLOS

CE	conductividad eléctrica (dSm ⁻¹)
CE _{sl}	conductividad eléctrica en el extracto saturado (dS.m ⁻¹)
CE _{sd}	conductividad eléctrica en sonda (dS.m ⁻¹)
CIC	capacidad de intercambio catiónico (meq/100 g)
C _o	concentración en la solución del suelo (meq.l ⁻¹)
ES	Extracto saturado
SS	sonda de succión
V	porcentaje de saturación de bases
T	temperatura (°C)
z	profundidad (m)
λ	Índice de poros
ρ	porosidad
ψ	potencial (m)
ψ _m	potencial matricial (m)
ψ _b	potencial de entrada de aire en los poros (m)
θ	humedad
θ _r	humedad residual

REFERENCIAS

- Aragüés R.; Millán M. (1986). Métodos de medida de la salinidad del suelo. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Instituto de Investigaciones Agrarias. Madrid. 172 pp.
- Bajracharya, K. Barry D. (1993). Mixing cell models for nonlinear equilibrium single species adsorption and transport. *Journal of Contaminant Hydrology*, 12: 227-243.
- Barry D.; Bajracharya, K. (1995). Optimized Muskingum-Cunge solution method for solute transport with equilibrium Freundlich reactions, 18: 221-238.
- Briggs, L.; McCall A. (1904). An artificial root for inducing capillary movement of soil moisture. *Science*, 20:566-569.
- Brooks R. H., Corey A. T. Hydraulic properties of porous medium (1994). *Hydrology papers*, n° 3. Colorado State Univ. Fort Collins.
- Brusseau M. (1991). Nonequilibrium transport of organic chemicals: He impact of pore-water velocity. *Journal of Contaminant Hydrology*, 9: 353-368.
- Cadahía C., (1998) *Fertirrigación. Cultivos hortícolas y ornamentales*. Ediciones Mundi-prensa. Madrid, pp (65-79).
- Carnol M.; Ineson P.; Dickinson Al. (1997). Soil solution nitrogen and cations influenced by (NH₄)₂SO₄ deposition in a coniferous forest. *Environmental Pollution*. English, 50: 1-2, 1-10.
- Fenn L.; Hossner L. (1985). Volatilization from Ammonium-Forming Nitrogen Fertilizers. *Stewart et al. Advances in Soil Science*. Vol 1. Springer-Verlag. 145-160 pp.

- Gavande S. A. (1982). Física de suelos. Ed. Limusa. Mexico. 351 pp.
- Gomis V.; Boluda N.; Ruiz F. (1995). Application of a model for simulating transport of reactive multispecies components to the study of the hydrochemistry of salt water intrusions. *Journal of Contaminant Hydrology*, 22: 67-81 pp.
- González A.; Romero E.; Orihuela D.; Garrido R.; Carpena R. M.; Rodríguez A. R.; Rodríguez C. T. (1999). Evaluación de tomamuestras de agua de suelo en la parcela experimental de la Rábida, Palos de la Frontera, Huelva. *Estudios de la Zona no Saturada del Suelo IV Jornadas de Investigación en la Zona no Saturada, Valle Guerra, Tenerife*. 3-5 Nov 99, 19-24; 15 ref.
- Haberhauer G. (1997). Adsorption behavior of suction cup materials. *Bericht uber die 7. Lysimetertagung "Lysimeter und Nachhaltige Landnutzung"* 7, 8. Und 9. 27-31; 7 ref.
- Häfele S.; Wopereis M.; Boivin P.; N'Diaye A. (1999). Effect of puddling on soil desalinization and rice seedling survival in the Senegal River Delta. *Soil & Tillage Research* n° 51: 35-46.
- Hair F.; Anderson R.; Tothan R.; Black W. (1999). Análisis multivariante. Prentice Hall. Madrid. 799 pp.
- Hartch D.; Jarvis S.; Rook A.; Bristow A. (1997). Ionic contents of leachate from grassland soils: comparison between ceramic suction cup samples and drainage. *Soil use manage*. Oxford. 13(2) 68-74 pp.
- Hillel D.; Monteith J. L.; Miller R. D.; Miller E. E.; Warrick A. W.; Nielsen D. R.; Elrick D. E. (1980). Applications of soil physics. Academic press. Department of plant and soil Sciences University of Massachusetts. Academic Press. 385 pp.
- Hoag R.; Price J. (1997). The effects of matrix diffusion on solute transport and retardation in undisturbed peat in laboratory columns. *Journal of Contaminant Hydrology*, 28: 193-205 pp.
- Holland D. F.; Yitayew M.; Warrick A. W. (2000). Measurement of subsurface unsaturated hydraulic conductivity. *Journals of Irrigation and Drainage Engineering*. 126: 1, 21-27; 19 ref.
- Jaynes D.; Rice R. (1993). Transport of solutes as affected by irrigation method. *Soil Science Society of America*. Madison. 57(5)1348-1353 pp.
- Lao M. T.; Jiménez S.; Del Moral F.; (1996). Aplicación de las sondas de succión. *HortoInformación*. N° 73(4):39-42.
- Lanwrence J.; Hendry M.; Zanyk B.; Wolfaardt G. (1995). Transport and fate of the herbicide ciclofop-methyl in a large-scale physical model. *Journal of Contaminant Hydrology*. 19: 1, 69-83; 34 ref.
- Maciejewski S. (1993). Numerical and experimental study of solute transport in unsaturated soils. *Journal Contaminant Hydrology*, 14: 193-206.
- Mailhol J.; Ruelle P.; Nemeth I. (2001). Impact of fertilization practices on nitrogen leaching under irrigation. *Irrigation Science*, 20: 139-147.
- Matzner E.; Pijpers M.; Hollanda W.; Manderscheid B. (1998). Aluminum in soil solutions of forest soils: influence of water flow and soil aluminum pools. *Soil Science Society of America*. Madison. 62(2) 445-454 pp.
- Navarro G. (2000). Química Agrícola. El suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal. Ed. Mundi-Prensa (Madrid)
- Novak M.; Bottrell S.; Groscheova H.; Buzek F.; Cerny J. (1995). Sulphur isotope characteristics of two north Bohemian forest catchments. 5th International Conference on Acidic Deposition: Science and Policy, Goteborg, Sweden. *Water, Air and Soil Pollution*. 85: 3, 1641-1646; 10 ref.
- Panday S.; Huyakorn P.; Therrien R.; Nichols R. (1993). Improvised three-dimensional finite-element techniques for field simulation of variably saturated flow and transport. *Journal of Contaminant Hydrology*, 12: 3-33.
- Perrinangier C.; Schiavon M.; Portal J.; Breuzin C.; Babut M. (1997). Porous cups for pesticides monitoring in soil solution-laboratory tests. *Chemosphere*. 26(12):2231-2239.
- Polo M. J.; Ordóñez R.; Giráldez J. (1996). Deterioro de la calidad de las aguas de percolación por la aplicación de lodos de depuradora a un suelo agrícola. *Ingeniería del agua*. Vol. 3, n°4, 12: 77-88.
- Rangel, J., Marques, R., Jussy, J. (2001). Forest soil dynamics during stand development assessed by lysimeter and centrifuge solutions. *Forest Ecology and Management* 144; 129-145.
- Rawls W. T.; Brakensiek D. L.; Hiller N. (1983). Green-Ampt infiltration parameters from soils data. *Journal Hydrology Division*. American Society Civ. Eng., Vol 109, n° 1: pp 62-70.
- Richards L. A.; Allison L. E.; Brown J. W.; Hayward H. E.; Bernstein L.; Fireman M.; Pearson G. A.; Wilcox L. V.; Bower C. A.; Hatcher J. T.; Reeve R. C. (1990). Diagnóstico y Rehabilitación de Suelos Salinos y Sódicos. Editorial Limusa, S.A. 172 pp.
- Rodríguez F. (1982). Fertilizantes. Nutrición vegetal. AGT Editor S. A. Madrid. 157 pp.
- Thompson L. M., Troeh R. (1988). Los suelos y su fertilidad. Editorial Reverté, S. A. España.
- Van der Ploeg y Beese (1977). Model calculations for the extractions of soil water by ceramic cups and pates. *Sol Sciences Society American Journal*, 41: 466-470.
- Weaver J.; Hogmire H.; Brooks J.; Sencindiver J. (1990). Assessment of pesticide residues in surface and soil water from a commercial apple orchard. *App. Agric Res*. Springer. 5(1) 37-43 pp.
- Wierenga, P. J.; Nielsen D. R.; Horton R.; Kies B. (1982). Tillage effects on Soil Temperature and Thermal Conductivity. *Van Doren et al. Predicting Tillage Effects on Soil Physical Properties an Process*. ASA Special Publication n° 44: 69-71 pp.
- Wild A. (1992). Condiciones del Suelo y desarrollo de las Plantas según Russell. Ediciones Mundi-Prensa. 252-306 pp.
- Wu L.; Baker J.; Allmaras R. (1995). Numerical and field evaluation of soil water sampled by suction lysimeters. *Journal of Environmental Quality*. 24(1):147-152.