

FERTIRRIGACIÓN ÁCIDA DE HIERRO EN CÍTRICOS ESTABLECIDOS EN SUELOS CALCÁREOS

Acid-Iron Fertigation of Citrus Established in Calcareous Soils

Patricio Rivera O.^{1‡}, Jorge D. Etchevers B.², Claudia Hidalgo M.², Blanca Castro M.¹,
Francisco de la Garza R.¹, Jorge Rodríguez A.² y Ángel Martínez G. (†)²

RESUMEN

En la mayoría de los suelos calcáreos la solubilidad del hierro es baja, por lo que los cultivos establecidos en ellos frecuentemente presentan deficiencia de este elemento. Se determinó la influencia de la acidificación del agua de riego en el movimiento descendente del Fe y en la disponibilidad del elemento para árboles de cítricos. Bajo condiciones controladas, se aplicaron sobre la superficie de columnas de suelo soluciones que contenían 100 mg L⁻¹ de Fe disueltos en agua y en H₂SO₄ al 1 y 3%; además, macetas con 1.5 kg de suelo en la que se habían establecido plántulas de mandarina 'Cleopatra' (*Citrus reticulata*) se trataron con 0, 100, 200 y 300 mg L⁻¹ de Fe (como FeSO₄) disuelto en H₂SO₄ al 3%. Finalmente, por un lapso de 3 años, el suelo alrededor de árboles adultos de naranjo 'Valencia' (*Citrus sinensis*) de 12 años de edad, se trató cada año con 120 kg ha⁻¹ de FeSO₄ disuelto en agua sin acidificar y acompañado de 450 y 900 kg ha⁻¹ de H₂SO₄, aplicados en el riego de microaspersión. El Fe que se aplicó en solución sin acidificar en la superficie de las columnas de suelo no presentó movimiento descendente, pero al añadirlo en solución acidificada se movió en los primeros 2 cm de profundidad. Las soluciones ácidas de Fe aplicadas en macetas y en condiciones de campo, aunque abatieron el pH del suelo, no corrigieron la clorosis férrica de los árboles; tampoco incrementaron la concentración foliar de Fe ni el rendimiento de fruta. La nula respuesta de los cítricos a la fertirrigación ácida de Fe se debió al elevado contenido de carbonato de calcio del suelo, que neutralizó el ácido de la solución de

aplicación y provocó la precipitación del elemento. Por lo anterior esta práctica no resultó recomendable.

Palabras clave: carbonato de calcio, ácido sulfúrico, acidificación, clorosis férrica.

SUMMARY

In most calcareous soils, iron solubility is low. For this reason, crops growing in these soils often exhibit iron deficiency. The objective of this research study was to determine the influence of acidification of irrigation water on the downward movement of Fe and its availability for citrus trees. The test was conducted in three phases. During the first phase, under controlled conditions, 1 and 3% solutions of 100 mg L⁻¹ Fe dissolved in water and H₂SO₄ were dripped onto the surface of 4 cm thick and 6 cm diameter columns of soil for 14 h. In the second phase, pots containing 1.5 kg soil, planted with 'Cleopatra' mandarin (*Citrus reticulata*) seedlings, were treated with 0, 100, 200 and 300 mg L⁻¹ Fe (as FeSO₄) dissolved in 3% H₂SO₄ applied at a soil depth of 3 cm. In the third phase, over a period of three years the soil surrounding 12-year old adult 'Valencia' orange trees (*Citrus sinensis*) was treated each year with 120 kg ha⁻¹ FeSO₄, together with 450 and 900 kg ha⁻¹ H₂SO₄, dissolved in irrigation water applied by micro-spraying. Fe applied in a nonacid solution on the surface of the soil columns did not descend, but when applied in acid solution its movement was significant in the first 2 cm. Beyond this depth, movement of the element was not observed. The Fe acid solutions applied in pots and in the field, although they lowered soil pH, did not correct iron chlorosis in citrus trees nor did they increase leaf Fe concentration or fruit yield. The null response of the citrus trees to acid Fe fertigation was due to the high soil calcium carbonate content that neutralized acidity of the solution applied, causing the element to precipitate. For these reasons, the practice cannot be recommended.

¹ UAM, Agronomía y Ciencias, Universidad Autónoma de Tamaulipas. Centro Universitario Adolfo López Mateos, Apartado Postal 337, 87149 Cd. Victoria, Tam., México.

[‡] Autor responsable (riverapatricio48@gmail.com).

² Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. 56230 Montecillo, Estado de México.

Recibido: marzo de 2006. Aceptado: febrero de 2008.

Publicado como nota de investigación en
Terra Latinoamericana 26: 119-125.

Index words: *calcium carbonate, sulfuric acid, acidification, iron chlorosis.*

INTRODUCCIÓN

En los suelos calcáreos la solubilidad del Fe es baja. Por esta razón los cítricos que se establecen en ellos pueden presentar síntomas de deficiencia del elemento en las hojas. Cuando los síntomas son severos se dice que el cultivo tiene clorosis férrica.

En estas circunstancias, el rendimiento de fruta se reduce significativamente (Anderson, 1982). La causa de la baja disponibilidad de Fe en los suelos calcáreos es la presencia de carbonatos alcalinotérreos (Chen y Barak, 1982) y el efecto negativo del ion bicarbonato en la absorción y transporte del Fe dentro de la planta (Zribi, 2002; Chouliaras *et al.*, 2004). La solubilidad del Fe en el suelo y su absorción por árboles de cítricos aumentan al bajar artificialmente el pH del suelo (Miyamoto *et al.*, 1975; Obreza *et al.*, 1993), por lo que en terrenos con características calcáreas se ha recurrido a la aplicación de Fe y otros nutrimentos en medio ácido, junto con el agua de riego (fertilización ácida). Sin embargo, el uso de esta práctica no garantiza que el Fe pueda moverse desde el punto de aplicación hasta la profundidad donde ocurre la mayor actividad radical de los cítricos y permanecer soluble el tiempo necesario para ser absorbidos por los árboles. Por lo anterior, es necesario evaluar dicha práctica a fin de determinar si la fertilización ácida con Fe y otros elementos produce resultados satisfactorios en la nutrición férrica de los cítricos establecidos en suelos calcáreos.

La clorosis férrica raras veces es causada por una deficiencia absoluta de Fe en el suelo, ya que el contenido total del elemento supera con mucho las necesidades de los árboles (Vempati y Loeppert, 1986). El problema está relacionado con la baja solubilidad del Fe en los suelos calcáreos. La clorosis también se produce por un deterioro en la absorción y el transporte de Fe dentro de la planta (Römheld, 2000), lo cual, a su vez, es provocado por la presencia del ion bicarbonato en el apoplasto (Zribi, 2002) que incrementa el pH e induce la precipitación del Fe en ese espacio. Otra de las causas que ocasionan la clorosis férrica es la baja cantidad de óxidos de Fe amorfos en el suelo, como la ferrihidrita, la cual tiene una extensa área superficial y puede disolverse con mayor facilidad, en comparación con las formas cristalinas (Uren, 1984; Loeppert y Hallmark, 1985). Según Lindsay (1974),

una concentración de Fe soluble de sólo 10^{-6} M es satisfactoria para que se suministre suficiente Fe a las raíces de las plantas por flujo de masas. En suelos calcáreos, el CaCO_3 controla el pH en el intervalo de 7.5 a 8.5 (Loeppert, 1988). Para estos valores de pH la concentración de Fe en solución en equilibrio con los óxidos de este elemento es aproximadamente 10^{-10} M y, por lo tanto, mucho menor que la concentración requerida para un crecimiento normal de las plantas. De acuerdo con la termodinámica de las reacciones y con las constantes del producto de solubilidad (Kps) de los óxidos de hierro, el Fe disuelto en una solución con pH entre 7.0 y 8.0 puede alcanzar valores del orden de 10^{-18} M o menos (Mozafar y Ortli, 1986), lo que explica la baja efectividad del FeSO_4 aplicado a suelos calcáreos en los cuales este Fe se oxida y precipita como óxido hidratado de muy baja solubilidad (Lindsay, 1983).

Para bajar temporalmente el pH de los suelos alcalinos, se ha utilizado la incorporación de abonos orgánicos y sustancias inorgánicas; en este último grupo sobresale el H_2SO_4 comercial (Ryan *et al.*, 1975). El uso de esta práctica se ha señalado como una alternativa para aprovechar los excedentes de esta sustancia para bajar temporalmente el pH en el área de las raíces de los cultivos en suelos calcáreos y, en consecuencia, favorecer la solubilidad del Fe (Miyamoto *et al.*, 1975; Ryan *et al.*, 1975; Yahia *et al.*, 1975). De acuerdo con Loeppert (1986), se ha intentado remediar la clorosis férrica con la aplicación al suelo de H_2SO_4 y otros productos acidificantes, como el azufre elemental. En general, estos productos han resultado eficaces para corregir la clorosis férrica, sin embargo, su uso en la agricultura ha sido muy limitado, debido a dificultades para su manejo y aplicación, ya que el H_2SO_4 es muy corrosivo y las cantidades por aplicar son altas, por lo que su uso no resulta práctico (Hagstrom, 1984).

Cuando se tienen elevadas cantidades de CaCO_3 en la capa arable y altas concentraciones de bicarbonato en el agua de riego, se requieren de dosis elevadas y aplicaciones repetidas de ácido y además de un tiempo prolongado para observar resultados (Obreza *et al.*, 1993). En un suelo con más de 42% de CaCO_3 , Rivera-Ortiz *et al.* (2003) encontraron que la aplicación de soluciones de H_2SO_4 al suelo, en dosis equivalentes a 3, 6 y 12% de su alcalinidad, disminuyeron el pH, pero éste retornó paulatinamente a su nivel original; cuanto más elevada fue la dosis de ácido, mayor fue el tiempo que demoraba en retornar a ese punto. Para mantener el pH cercano a la neutralidad, por lo menos durante

dos semanas, se necesitó una dosis de H_2SO_4 equivalente a 12% de la alcalinidad del suelo. Esta cifra representa una cantidad muy grande de ácido, por lo que la acidificación de suelos muy calcáreos ($> 20\% CaCO_3$) no resulta recomendable. En el mismo estudio se observó que la mayor parte del Fe aplicado en solución ácida fue retenida por el suelo durante las primeras 3 h de incubación. Pese a que las soluciones férricas aplicadas neutralizaron hasta 12% de la alcalinidad del suelo, la retención del Fe adicionado fue cercana a 80%, lo que revela una baja efectividad de la acidificación del suelo para mantener la solubilidad del Fe aplicado a suelos muy calcáreos. Obreza *et al.* (1993) señalan que debido a que no es común la respuesta de la planta a la aplicación de ácido en suelos muy calcáreos, esta práctica no se recomienda, pero que en suelos con pequeñas cantidades de $CaCO_3$ se requieren dosis bajas y la respuesta de la planta es rápida, por lo que en este caso la acidificación podría ser factible. Con base en lo anterior, el objetivo del presente trabajo fue determinar la influencia de la acidificación del agua de riego en el movimiento descendente del Fe aplicado sobre la superficie del suelo y en la disponibilidad del elemento para plántulas de mandarina 'Cleopatra' (*Citrus reticulata*) y árboles adultos de naranjo 'Valencia' (*Citrus sinensis*).

MATERIALES Y MÉTODOS

En esta investigación se utilizó un suelo calcáreo del municipio de Padilla, Tamaulipas, México, el cual tenía textura arcillosa en la capa arable (0-35 cm), contenido elevado de carbonatos totales (Allison y Moodie, 1965) 42% $CaCO_3$ y de caliza activa (Duchafour, 1987) 343 $mg\ kg^{-1}$ de $CaCO_3$. La reacción del suelo era alcalina (pH en agua 8.0, suelo:solución 1:2) y la concentración de Fe extraíble con DTPA baja, 2.7 $mg\ kg^{-1}$ de Fe (Lindsay y Norvell, 1978). El nivel de óxidos de Fe, cristalinos y no cristalinos, extraídos con citrato bicarbonato ditionito (Mehra y Jackson, 1960) fue 7.01%, mientras que la concentración de Fe presente como óxidos amorfos, extraíbles con oxalato de amonio, fue de 1286 $mg\ kg^{-1}$ (Schwertmann, 1973).

Acidificación del Suelo y Movimiento Descendente del Fe

Esta parte del experimento se llevó a cabo en condiciones controladas de laboratorio. Tuvo como

finalidad determinar la profundidad de descenso del Fe, al aplicarse por goteo en soluciones ácidas sobre la superficie del suelo en columnas de 2, 4 y 6 cm de espesor. Las columnas de suelo se empacaron en vasos de poliestireno de 7 cm de diámetro y 8 cm de altura, con el fondo perforado. Se ensayó la aplicación de 100 $mg\ L^{-1}$ de Fe, disueltos en tres concentraciones de H_2SO_4 (0, 1 y 3% p/v). La fuente de Fe fue $FeSO_4 \cdot 7H_2O$. Las soluciones de Fe, preparadas con diferentes concentraciones de H_2SO_4 , se pasaron a través de las columnas de suelo, aplicándolas por goteo sobre la superficie durante un lapso de 14 h. El suelo se saturó con la solución respectiva y luego se igualó la frecuencia del goteo sobre la columna con la frecuencia de goteo de drenaje bajo la columna, a fin de evitar la acumulación de líquido sobre la superficie de ésta. Antes de realizar el seccionamiento de la columna, la misma se puso en reposo durante cuatro días, al término de los cuales se dividió en capas de 1 cm de grosor con el propósito de medir la profundidad afectada por la acidez de las soluciones aplicadas. En el suelo correspondiente a cada incremento de profundidad se determinó el pH, mediante un electrodo combinado de vidrio conectado a un potenciómetro, y la concentración de Fe, por el método de extracción con ácido di etilen triamino penta acético (DTPA) (Lindsay y Norvell, 1978). La cuantificación del Fe en el extracto se llevó a cabo por espectrofotometría de absorción atómica.

Los resultados se sometieron a un análisis de varianza y prueba de Tukey bajo el diseño completamente al azar (Martínez, 1988). Los resultados de estos análisis permitieron comparar las profundidades del suelo, los tiempos de goteo y los niveles de ácido de las soluciones aplicadas.

Respuesta de Plántulas de Mandarino a la Aplicación de Fe en Solución Ácida

Este experimento se llevó a cabo en macetas de polietileno con 1.5 kg de suelo, en las que se colocó una planta de mandarino de seis meses de edad. Después de ocho meses desde el momento del trasplante, se aplicaron los siguientes tratamientos: agua destilada (testigo), H_2SO_4 3%, y tres soluciones 3% de H_2SO_4 con 100, 200 y 300 $mg\ L^{-1}$ de Fe, respectivamente. La aplicación de las soluciones duró 10 h, durante las cuales se vertieron intermitentemente (cada hora) volúmenes de 100 mL de solución, hasta completar 1 L maceta⁻¹. Cada tratamiento se repitió tres veces. Antes de

adicionar las soluciones, se extrajo suelo de la maceta y se formó un canalillo alrededor de la planta de 3 cm de profundidad y de 3 cm de ancho, a fin de colocar la solución lo más cerca posible de las raíces y mejorar la absorción de Fe. Las raíces no fueron afectadas al extraer el suelo, ya que sólo se removió la capa de suelo libre de éstas y no se alteró la tierra en un radio de 8 cm alrededor del tallo. Dos días después se reincorporó el suelo extraído y se aplicó un riego con agua solamente. A lo largo del periodo experimental, a las plantas se les proporcionaron los riegos requeridos, utilizando agua de baja salinidad ($30 \mu\text{S cm}^{-1}$), y desde los tres meses de edad se adicionó la solución nutritiva de Waugh y Fitts (1966) sin Fe, cada dos semanas, a fin de cubrir las necesidades nutrimentales y lograr un crecimiento apropiado.

El experimento tuvo una duración de 12 meses a partir del momento del trasplante. Después de los primeros ocho meses se llevó a cabo una evaluación de la clorosis y el crecimiento de las plántulas mediante la cuantificación del número de hojas y brotes cloróticos por maceta, así como la altura de las plantas. Las hojas y los brotes se definieron como cloróticas de acuerdo con la escala de Cianzio *et al.* (1979), la cual utiliza los números del 1 al 5 para designar hojas sin amarillez, con amarillez ligera, con amarillez moderada, con amarillez intensa y con amarillez severa y necrosis, respectivamente. Se consideraron como hojas y brotes cloróticos los calificados como 2, 3, 4 y 5. Estas mediciones se hicieron en el momento de la aplicación de los tratamientos, así como cuatro meses después, a fin de evaluar los cambios ocurridos.

Al final del periodo experimental se llevó a cabo el muestreo de las 10 hojas más cercanas a los puntos de crecimiento que mostraban la mayor incidencia de clorosis. Así, se obtuvo una muestra foliar por cada maceta. Las hojas muestreadas se lavaron, se secaron en un horno con aire forzado a 65°C y se molieron hasta pasar por un tamiz malla 60. Posteriormente, se pesó 0.5 g de cada muestra y se colocó en un matraz de digestión de 30 mL, se adicionó 4 mL de ácido nítrico concentrado, se dejó en reposo por una noche, luego se agregó 2 mL de ácido perclórico y, finalmente, los matraces se colocaron en una parrilla caliente, a fin de digerir la muestra (Chapman y Pratt, 1961). El contenido de Fe en el digerido se midió con un espectrofotómetro de absorción atómica provisto de flama aire-acetileno. Los resultados obtenidos en las diferentes variables de respuesta al final del periodo experimental, se sometieron

a análisis de varianza y prueba de Tukey (Martínez, 1988), a fin de comparar los diferentes tratamientos y evaluar la respuesta de las plántulas a la aplicación de Fe en medio ácido.

Respuesta de Árboles de Naranja a la Aplicación de Fe por Fertirrigación Ácida

El presente experimento se llevó a cabo en campo con la finalidad de evaluar la respuesta de árboles cloróticos de naranja 'Valencia' de 12 años de edad a la aplicación de Fe al suelo. El Fe se adicionó en agua acidificada a través del riego por microaspersión, utilizando como fuentes de Fe al FeSO_4 grado fertilizante y de ácido al H_2SO_4 grado industrial. Se ensayaron tres dosis anuales de H_2SO_4 (0, 450 y $900 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) y dos de FeSO_4 (0 y $120 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$). La duración de este experimento fue de tres años y cada una de las dosis de H_2SO_4 y FeSO_4 se aplicó dividida en tres partes iguales cada año. Las soluciones se aplicaron sobre la superficie del suelo, en el área sombreada de los árboles, utilizando un dispositivo dosificador conectado al sistema de riego de microaspersión.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Acidificación del Suelo y Movimiento Descendente del Fe

La aplicación por goteo de soluciones de H_2SO_4 al 1 y 3%, durante más de 14 h a las columnas de 4 cm de altura, afectó significativamente la reacción del primer centímetro del suelo. En esta capa el pH disminuyó de 8.0 a 6.5, mientras que en la segunda capa, del mismo grosor, el decremento sólo fue de 0.3 unidades (Figura 1). A mayor profundidad (2 a 4 cm) prácticamente no se modificó el pH. La acidificación del suelo tenía como propósito aumentar la solubilidad del Fe (Miyamoto *et al.*, 1975; Ryan *et al.*, 1975), pero el ácido sólo afectó el primer centímetro de la columna. Estos resultados indican que en suelos con alto contenido de carbonato de calcio (más de 20%) es poco probable que la adición superficial de soluciones férricas ácidas pueda aumentar la solubilidad del Fe (Rivera-Ortiz *et al.*, 2003) y, por ende, su absorción por los árboles de naranja 'Valencia' pues las raíces más cercanas a la superficie se encontraban a una profundidad mayor de 2 cm. La escasa penetración del ácido en el suelo se debió a que fue neutralizado en los primeros 2 cm superficiales por

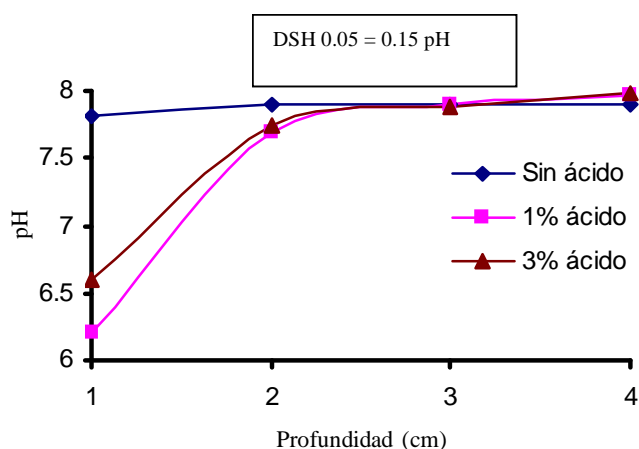


Figura 1. Variación vertical del pH del suelo, después de la aplicación de soluciones acidificantes.

los carbonatos (más de 40% en el sitio experimental), los cuales evitaron que el ácido se desplazara a mayor profundidad.

La aplicación de Fe en la superficie de columnas de suelo de 4 cm de altura, a través de una solución de 100 mg L^{-1} de Fe sin acidificar, durante más de 14 h, no provocó descenso del elemento (Figura 2), ya que se encontraron cantidades similares a la concentración natural del suelo, 2.7 mg kg^{-1} de Fe, en todas las capas de 1 cm de grosor. La adición de Fe en solución de H_2SO_4 al 3% incrementó la concentración del metal en la primera y segunda capa de suelo (41 y 7 mg kg^{-1} de Fe, respectivamente) en comparación con la adición del Fe en agua solamente. Esto indica que la acidez de la solución aumentó la movilidad del elemento pues éste se desplazó verticalmente casi 2 cm, pero no más abajo. Debido a que fue también en el espesor de 0 a 2 cm donde el pH del suelo disminuyó por la adición de ácido, se asume que la acidez incrementó el movimiento descendente del metal en los primeros 2 cm de profundidad. El efecto del ácido sobre la movilidad descendente del Fe en los primeros 2 cm de profundidad, se explica por la neutralización de la alcalinidad del suelo, lo cual condujo a una mayor solubilidad del este elemento (Miyamoto *et al.*, 1975; Ryan *et al.*, 1975; Yahia *et al.*, 1975). El ácido aplicado en la solución férrica sobre la superficie del suelo no afectó el pH del mismo más allá de 2 cm de profundidad y, por lo tanto, tampoco afectó el movimiento descendente del Fe después de esa profundidad.

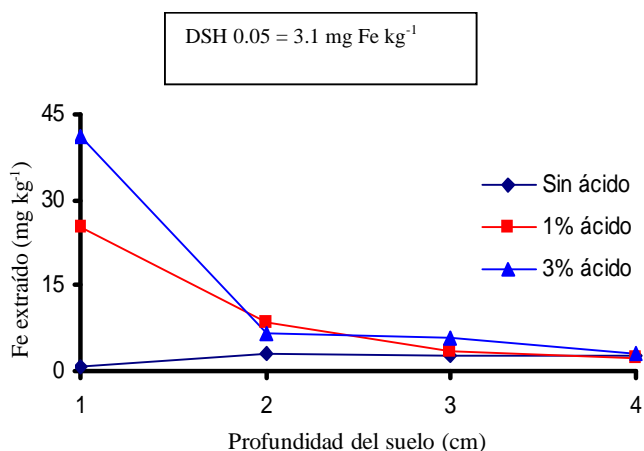


Figura 2. Hierro extraído con ácido di etilen triamino penta acético (DTPA) después de aplicar por goteo soluciones de 100 mg L^{-1} de Fe a 0, 1 y 3% de ácido sulfúrico durante 14 h, sobre la superficie de columnas de suelo de 4 cm de altura.

Respuesta de Plántulas de Mandarino a la Aplicación de Fe en Solución Ácida

Los tratamientos con Fe al suelo no corrigieron la clorosis de las plántulas de mandarino, según lo evidenció la escala de Cianzio *et al.* (1979). En adición, tanto las plántulas tratadas con Fe como las no tratadas produjeron igual número de hojas cloróticas. Incluso los árboles, que antes del trasplante mostraban pocas hojas cloróticas, desarrollaron el problema pese a la aplicación de la solución ácida ferrosa. En el presente caso, la aplicación de Fe en una solución acidificada no corrigió la clorosis de las hojas, ni previno la aparición de nuevo follaje clorótico. El contenido foliar de Fe, cuatro meses después de la aplicación de Fe al suelo, en soluciones al 3% de H_2SO_4 , se presenta en la Figura 3. La aplicación del Fe no aumentó significativamente el contenido de este elemento en las hojas, ya que la concentración foliar de Fe permaneció por abajo de los 60 mg kg^{-1} , la cual Emblenton *et al.* (1973) consideran como baja para árboles desarrollados en campo. Esto explica por qué las plántulas tratadas y no tratadas mostraron síntomas de deficiencia del elemento. Estos resultados sugieren que los síntomas de deficiencias de Fe de los cítricos, comunes en los huertos establecidos en suelos calcáreos, no son corregibles con los tratamientos ensayados.

Respuesta de Árboles de Naranja a la Aplicación de Fe por Fertirrigación Ácida

La aplicación de Fe junto con el agua de riego acidulada que se asperjó sobre la superficie del suelo

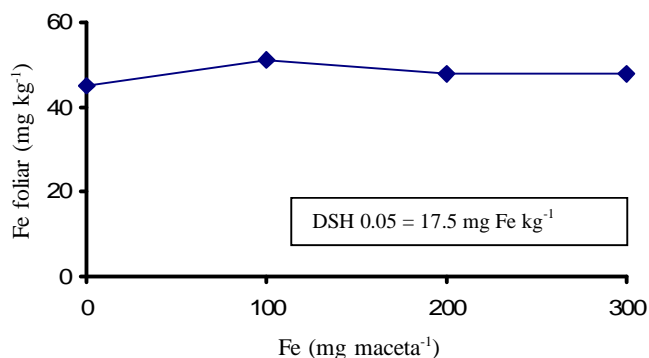


Figura 3. Hierro foliar en plántulas de mandarina 'Cleopatra' establecidas en macetas, en relación con la aplicación de hierro en solución ácida al suelo.

tampoco fue capaz de corregir la clorosis férrica de los árboles adultos de naranjo 'Valencia', pese a que se incorporaron dosis elevadas de Fe y ácido (hasta 120 kg ha⁻¹ de FeSO₄ y 900 kg ha⁻¹ de H₂SO₄) cada año durante tres años consecutivos. El tratamiento tampoco tuvo efecto en el contenido foliar de Fe, ni en la producción de fruta. Los árboles tratados mostraron rendimientos y concentraciones foliares de Fe estadísticamente iguales al testigo al término de los tres años (Cuadro 1).

Estos resultados coinciden con los encontrados en la prueba de aplicación de Fe en solución ácida al suelo calcáreo, en macetas con plántulas de mandarina 'Cleopatra' (Figura 3), así como con los resultados del ensayo de goteo de soluciones férricas ácidas en columnas, en el cual se vio que el Fe sólo se movía hasta 2 cm de profundidad. Por estas razones se dedujo que el alto contenido de CaCO₃ del suelo experimental (42% CaCO₃) neutralizó rápidamente el ácido (Figura 1) y redujo la solubilidad del Fe (Fried y Broeshart, 1967; Lindsay, 1983; Loeppert, 1988), y, por lo tanto, la movilidad del mismo hasta la profundidad donde se encontraban las raíces. Observaciones visuales hechas en el área experimental mostraron que la profundidad del suelo donde había suficientes raíces era mayor de 2 cm. Lo anterior explica la nula respuesta de los árboles al Fe aplicado en la superficie del suelo, aun cuando estuvo acompañado de cantidades elevadas de H₂SO₄.

Con base en lo anterior se puede decir que la acidificación del suelo, más que un beneficio para la producción de cítricos u otros cultivos, podría provocar problemas al suelo y al ambiente, como la destrucción y transformación del carbonato de calcio en sulfato de calcio y bióxido de carbono (Richards, 1973; Lindsay,

Cuadro 1. Concentración foliar de hierro y rendimiento de fruta en árboles de naranjo 'Valencia' de 15 años de edad, tratados con este elemento en mezcla con ácido sulfúrico, a través del riego por microaspersión.

Tratamiento	H ₂ SO ₄ †	FeSO ₄ †	Contenido Fe foliar	Rendimiento de fruta
	- - - kg ha ⁻¹	- - -	mg kg ⁻¹	Mg ha ⁻¹
1	0	0	47.2 a	16.873 a
2	0	120	42.6 a	15.063 a
3	450	0	37.0 a	16.482 a
4	450	120	47.2 a	17.647 a
5	900	120	44.2 a	20.835 a

† Dosis anuales aplicadas en tres partes iguales.

1979) incrementando de paso la cantidad de este gas en la atmósfera, hecho que se relaciona con el calentamiento global (Duxbury *et al.*, 1993). Por tales motivos, la aplicación de ácido para disminuir el pH del suelo y aumentar la disponibilidad del Fe no resultó recomendable en suelos con elevados contenidos de carbonato de calcio.

CONCLUSIONES

- El hierro aplicado en forma de sulfato ferroso sobre la superficie de un suelo calcáreo en solución sin acidular no tuvo movimiento descendente. Cuando este elemento se incorporó junto con soluciones ácidas se tuvo una disminución del pH en los primeros 2 cm de profundidad y se favoreció el movimiento descendente del hierro aplicado, en particular en el primer centímetro. Más allá de 2 cm la movilidad del hierro no fue significativa.
- El suministro de hierro junto con el agua de riego acidificada (fertirrigación ácida) en la superficie del suelo no corrigió la clorosis férrica de plántulas de mandarina "Cleopatra" (*Citrus reticulata*), así como tampoco lo hizo en árboles adultos de un huerto de naranjo "Valencia" (*Citrus sinensis*). En este último caso, la práctica no afectó el rendimiento de fruta de los árboles.
- La aplicación de ácido sulfúrico no mejoró la disponibilidad de hierro para los cítricos debido al elevado contenido de carbonato de calcio en el suelo que neutralizó al ácido, por lo que esta práctica no resultó recomendable.

LITERATURA CITADA

- Allison, L. E. and C. D. Moodie. 1965. Carbonates. pp. 1379-1400. In: C. A. Black (ed.). Methods of soil analysis. Part 2. American Society of Agronomy. Madison, WI, USA.

- Anderson, W. B. 1982. Diagnosis and correction of iron deficiency in field crops. An overview. *J. Plant Nutr.* 5: 785-795.
- Chapman, H. D. and P. R. Pratt. 1961. Plant analysis. pp. 56-64. *In: H. D. Chapman (ed.). Methods of analysis for soils, plants and waters.* Div. Agr. Sci. University of California. Riverside, CA, USA.
- Chen, Y. and P. Barak. 1982. Iron nutrition in calcareous soils. *Adv. Agron.* 35: 217-240.
- Chouliaras, V., I. Therios, A. Molassiotis, A. Patakas, and G. Diamantidis. 2004. Effect of iron deficiency on gas exchange and catalase and peroxidase activity in citrus. *J. Plant Nutr.* 27: 2085-2099.
- Cianzio, S. R., W. R. Fehr, and L. C. Anderson. 1979. Genotypic evaluation for iron deficiency chlorosis in soybean by visual scores and chlorophyll concentration. *Crop Sci.* 19: 644-646.
- Duchafour, P. 1987. Manual de edafología. Masson. Barcelona, España.
- Duxbury, J. M., L. A. Harper, and A. R. Moiser. 1993. Contributions of agro systems to global climate change. pp. 1-18. *In: G. A. Peterson (ed.). Agricultural ecosystems effects on trace gases and global climate change.* Special publication 55. American Society of Agronomy. Madison, WI, USA.
- Emblenton, T. W., W. W. Jones, C. K. Labanauskas, and W. Reuther. 1973. Leaf analysis as a diagnostic tool and guide to fertilization. pp. 183-210. *In: W. Reuther (ed.). The citrus industry.* Vol. III. University of California. Berkeley, CA, USA.
- Fried, M. and H. Broeshart. 1967. The soil plant system in relation to inorganic nutrition. Academic Press. New York, NY, USA.
- Hagstrom, G. R. 1984. Current management practices for correction of iron deficiency in plants with emphasis on soil management. *J. Plant Nutr.* 7: 23-46.
- Lindsay, W. L. 1974. Role of chelation in micronutrient availability. pp. 507-524. *In: E. W. Carson (ed.). The plant root and its environment.* University Press of Virginia. Charlottesville, VA, USA.
- Lindsay, W. L. 1979. Chemical equilibria in soils. John Wiley. New York, NY, USA.
- Lindsay, W. L. 1983. Equilibrio de la fase inorgánica de los micronutrientes en suelos. pp. 45-63. *In: J. J. Mortvedt, P. M. Giordano y W. L. Lindsay (eds.). Micronutrientes en la agricultura.* AGT Editor. México, D. F.
- Lindsay, W. L. and W. A. Norvell. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42: 421-428.
- Loeppert, R. H. 1986. Reactions of iron and carbonates in calcareous soils. *J. Plant Nutr.* 9: 195-214.
- Loeppert, R. H. 1988. Chemistry of iron in calcareous systems. pp. 689-714. *In: J. W. Sturki, B. A. Godman, and U. Schwertmann (eds.). Iron in soils and clay minerals.* NATO ASI Series. Dordrecht, The Netherlands.
- Loeppert, R. H. and C. T. Hallmark. 1985. Indigenous soil properties influencing the availability of iron in calcareous soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49: 597-603.
- Martínez G., A. 1988. Diseños experimentales. Trillas. México, D. F.
- Mehra, O. P. and M. L. Jackson. 1960. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite citrate system buffered with sodium bicarbonate. *In: A. Swineford (ed.). Clays and clay minerals.* Proc. 7th Natl. Conf. Washington, D. C. 1958. Pergamon Press. New York, NY, USA.
- Miyamoto, S., J. Ryan, and J. L. Stroehlein. 1975. Potentially beneficial uses of sulfuric acid in Southwestern agriculture. *J. Environ. Qual.* 4: 431-437.
- Mozafar, A. and J. J. Ortli. 1986. A critical evaluation of iron mobilization mechanisms with special reference to the contact effect phenomenon. *J. Plant Nutr.* 9: 759-780.
- Obreza, A. T., A. K. Alva, and D. U. Calvert. 1993. Citrus fertilizer management on calcareous soils. Circular 1127, Series of the Soil and Water Science Department, University of Florida. Gainesville, FL, USA.
- Richards, L. A. (ed.). 1973. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. US Department of Agriculture. Limusa. México, D. F.
- Rivera-Ortiz, O. P., J. D. Etchevers-Barra, C. Hidalgo-Moreno, B. I. Castro-Meza, A. J. Rodríguez-Alcázar y A. Martínez-Garza. 2003. Dinámica de Fe y Zn aplicados en soluciones ácidas a suelos calcáreos. *Terra* 21: 341-350.
- Römheld, V. 2000. The chlorosis paradox: Fe inactivation as a secondary event in chlorotic leaves of grape vine. *J. Plant Nutr.* 13: 1629-1643.
- Ryan, J., J. L. Stroehlein, and S. Miyamoto. 1975. Sulfuric acid application to calcareous soils. Effects on growth and chlorophyll content of common Bermuda grass in the greenhouse. *Agron. J.* 67: 633-637.
- Schwertmann, U. 1973. Use of oxalate for iron extraction from soils. *Can. J. Soil Sci.* 53: 244-246.
- Uren, N. C. 1984. Forms, reactions and availability of iron in soils. *J. Plant Nutr.* 7: 165-176.
- Vempati, R. K. and R. H. Loeppert. 1986. Synthetic ferrihydrite as a potential iron amendment in calcareous soils. *J. Plant Nutr.* 9: 1039-1052.
- Waugh, D. L. y J. W. Fitts. 1966. Estudios de interpretación de análisis de suelos: laboratorio y macetas. Boletín técnico 3. International Soil Testing. Raleigh, NC, USA.
- Yahia, T. A., S. Miyamoto, and J. L. Stroehlein. 1975. Effect of surface applied sulfuric acid on water penetration into dry calcareous soils. *Soil Sci. Am. Proc.* 39: 1201-1204.
- Zribi, K. 2002. Effect of bicarbonate on growth and iron nutrition of pea. *J. Plant Nutr.* 25: 2143-2149.