

Corrección de la clorosis férrica con quelato EDDHA en cultivos sembrados en suelo alcalino y calcáreo

Correction of iron chlorosis with chelate EDDHA in crops grown in alkaline and calcareous soil

Arturo Díaz Franco¹, Martín Espinosa Ramírez¹ y Flor Elena Ortiz Cháirez^{1‡}

¹ Campo Experimental Río Bravo, INIFAP. Carretera Matamoros-Reynosa km 61. 88900 Río Bravo, Tamaulipas, México.

[‡] Autora responsable (ortiz.flor@inifap.gob.mx)

RESUMEN

La deficiencia de hierro (Fe) en los cultivos se manifiesta principalmente en regiones con suelos alcalinos y calcáreos. En el presente estudio se evaluó la efectividad del Fe³⁺ quelatado con EDDHA [ac. etilendiamino di-(o-hidroxifenilacetato)] y la aspersión foliar de FeSO₄ solos y combinados, en los cultivos de sorgo, soya, okra y frijol. El EDDHA-Fe (Ultraferro[®]) se aplicó a dosis de 1% en la siembra sobre las semillas y para el FeSO₄ se hicieron dos aplicaciones foliares al 1.5%. En los cuatro experimentos se determinó el índice de clorofila (SPAD) en tres fechas (15 y 28 de marzo, 6 de abril), y a los 48-50 días después de la siembra se cuantificó la biomasa foliar y radical. Entre los cultivos, las plantas de soya y okra manifestaron la mayor intensidad de clorosis férrica, la cual fue visible entre los tratamientos. En ambos cultivos los mayores valores SPAD y de biomasa foliar y radical se obtuvieron con la aplicación de EDDHA-Fe solo o combinado con FeSO₄. En frijol y sorgo, la clorosis fue menos visible, para las plantas de frijol el mayor índice de clorofila se registró con EDDHA-Fe y FeSO₄ en las dos últimas fechas de evaluación (28 de marzo y 6 de abril) y los tres tratamientos químicos superaron de forma similar al testigo, en la biomasa foliar y radical. Las plantas de sorgo registraron los mayores índices SPAD en la última fecha (6 de abril), mientras que no fueron significativas las diferencias en la biomasa foliar y radical. No se observó efecto aditivo en las variables con la combinación EDDHA-Fe y FeSO₄. En general, los resultados indican que la aplicación de EDDHA-Fe solo o combinado con FeSO₄ foliar en soya, okra y frijol, mostraron corrección de la clorosis férrica de manera efectiva.

Palabras clave: FeSO₄, deficiencia de hierro, soya, sorgo, frijol, okra.

SUMMARY

Iron deficiency in crops occurs mainly in regions with alkaline and calcareous soils. In the present study the effectiveness of Fe³⁺ chelated EDDHA [ethylenediamine di-(o-hydroxyphenylacetic acid)] is assessed alone or combined with foliar spray of FeSO₄, in crops of sorghum, soybean, okra and beans. EDDHA-Fe (Ultraferro[®]) was applied at a dose of 1% on the seed at sowing and FeSO₄ was applied on foliage twice at 1.5%. In the four experiments, we determined the variables index of chlorophyll (SPAD) in three readings (March 15 and 28, April 6), and 47-50 days after sowing and leaf and root biomass. Between crops, soybeans and okra expressed greater intensity of chlorosis, which was visible among treatments. In both crops, higher SPAD and leaf and root biomass values were obtained with applications of EDDHA-Fe alone or combined with FeSO₄. In okra, the SPAD index was higher with the combination EDDHA-Fe + FeSO₄, although root and leaf biomass was greater with EDDHA-Fe alone or in combination with FeSO₄. In beans and sorghum, chlorosis was less visible. For beans, the highest SPAD rate was recorded with EDDHA-Fe and/or FeSO₄ in the two latest readings (March 28 and April 6) and in leaf and root biomass. Similarly, the three chemical treatments exceeded the control. However, in sorghum, the highest SPAD was recorded on the last reading (Apr-6), while there were no significant differences in leaf and root biomass. There were no observed additive effects on the variables with

Cita recomendada:

Díaz Franco, A., M. Espinosa Ramírez y F. E. Ortiz Cháirez. 2017. Corrección de la clorosis férrica con quelato EDDHA en cultivos sembrados en suelo alcalino y calcáreo. *Terra Latinoamericana* 36: 23-30.
DOI: <https://doi.org/10.28940/terra.v36i1.254>

Recibido: abril de 2017. Aceptado: noviembre de 2017.
Publicado en *Terra Latinoamericana* 36: 23-30.

the combination EDDHA-Fe and FeSO_4 . In general, the results indicate that application of EDDHA-Fe alone or combined with foliar FeSO_4 in soybean, okra and bean, effectively corrected chlorosis ferric.

Index words: FeSO_4 , iron deficiency, soybean, sorghum, beans, okra.

INTRODUCCIÓN

La clorosis férrica en las plantas es originada por deficiencia de hierro (Fe) que afecta el desarrollo de los cultivos en suelos de elevada alcalinidad y calcáreos, pues existe un antagonismo entre los carbonatos y el Fe en los suelos. Los bajos niveles de materia orgánica también participan en el incremento de tal insuficiencia. La presencia de los síntomas en los cultivos es variable entre años o ciclos de siembra; además, depende de otros factores del suelo y condiciones climáticas (Mengel y Kirkby, 2001; Ozores-Hampton, 2013). Dado que las plantas cloróticas muestran una alta concentración de Fe en sus raíces, la clorosis podría estar relacionada con un problema de movilización y translocación del Fe a la parte aérea de las plantas; sin embargo, aún el problema de la clorosis férrica en los cultivos no está todavía completamente entendido (Álvarez *et al.*, 2005). El Fe es el micronutriente más afectado por el pH del suelo ya que por cada unidad de aumento del pH (entre 4-9) su disponibilidad se reduce en 1000 veces, mientras que la disponibilidad de Mn, Zn y Cu disminuye en 100 veces por cada unidad de incremento en el pH (Ferreira *et al.*, 2008). Otro aspecto importante a considerar es la necesidad de aumentar la concentración de Fe en los alimentos derivados de cultivos ya que representa un desafío global debido a la alta incidencia de la deficiencia del micronutriente en las poblaciones humanas (Aciksoz *et al.*, 2011).

En general los síntomas por deficiencia de Fe son fáciles de reconocer en las hojas. La clorosis ocurre debido a que el Fe es necesario, entre otros procesos, para la síntesis de clorofila, la cual es esencial en la actividad fotosintética. Los síntomas son más evidentes y críticos en estado de plántula (Lucena, 2009), de aquí la importancia de corregir la deficiencia en ese estado. Al inicio se observa en las hojas jóvenes clorosis intervenal, mientras que en estados más severos la clorosis se generaliza en toda la lámina y solamente

las nervaduras verdes. Cabe mencionar que esta deficiencia no afecta el tamaño de las hojas y es intensa en brotes nuevos. En casos más severos la clorosis continua con manchas necróticas, que afecta tanto a las hojas nuevas como a las viejas, puede generar la caída de hojas e incluso la muerte de la planta (Álvarez *et al.*, 2005; Arizmendi-Galicia *et al.*, 2011). Además, la deficiencia de Fe también causa cambios morfológicos en las raíces mediante inhibición de la elongación radical (Schenkeveld y Temminghoff, 2011). Díaz y Ortigón (2000) señalaron que cuando la clorosis férrica no se corrige en el estado de plántula, las pérdidas en el rendimiento son proporcionales a la severidad observada. El nivel de clorofila puede monitorearse directamente en campo a través del índice SPAD (Soil Plant Analytical Development) (Schenkeveld *et al.*, 2008; Xiong *et al.*, 2015). Otra opción de monitoreo es el análisis del tejido vegetal en el laboratorio. Es importante anotar que el análisis de suelo no es un método confiable para prever la deficiencia de Fe (Ferreira *et al.*, 2008; Ozores-Hampton, 2013).

En particular, en el noreste de México, la deficiencia de hierro es común en los suelos de origen calcáreo, alcalinos y con bajos niveles de materia orgánica (Arizmendi-Galicia *et al.*, 2011; Salinas *et al.*, 2006; Ortiz *et al.*, 2007). Se han hecho recomendaciones de diversos productos para la corrección de la clorosis, aunque no son siempre exitosas. El tratamiento de las semillas con sales de Fe o con quelatos de Fe han tenido resultados erráticos (Cantera *et al.*, 2002; Farooq *et al.*, 2012). Las aplicaciones al suelo de quelatos como EDTA (ac. etilendiaminotetracético) y DTPA (ac. dietilentriaminopentaacético) son ineficientes debido a que su efectividad se limita a suelos con $\text{pH} < 7.4$ (Lucena, 2009; Schenkeveld y Temminghoff, 2011; Whiting *et al.*, 2015). La práctica que es utilizada para la corrección de clorosis en los cultivos consiste en aspersiones foliares de sulfato ferroso (FeSO_4) (Fernández y Elbert, 2005; Ozores-Hampton, 2013). No obstante, esta práctica en muchos casos es infructuosa o inoperante ya que depende del grado de severidad de clorosis presente en el cultivo, de la oportunidad y de la frecuencia de las aspersiones (Kabir *et al.*, 2016; Lucena, 2009). Las aspersiones de FeSO_4 deben iniciarse al presentarse los primeros síntomas en estado de plántula ya que en plantas adultas pueden resultar ineficaces (Magallanes *et al.*, 2014; Schenkeveld *et al.*, 2008). En 2003 la Unión Europea inició la regulación

para la producción comercial del quelato sintético tipo EDDHA [ac. etilendiamino-di-(o-hidroxifenilacético)], el cual muestra efectividad en suelos calcáreos con $\text{pH} > 8.5$ (Álvarez *et al.*, 2005; García-Marco *et al.*, 2006). Este quelato se ha utilizado para la corrección de clorosis férrica principalmente en frutales y cultivos hortícolas (Ozores-Hampton, 2013; Whiting *et al.*, 2015); con escasa información de su aplicación en granos o cultivos extensivos. Por lo anterior, el presente trabajo evaluó la efectividad del quelato EDDHA-Fe, para prevenir o corregir químicamente la clorosis férrica en cuatro cultivos de interés agrícola, crecidos en suelos calcáreos y alcalinos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localidad

Una serie de experimentos se establecieron en los terrenos del Campo Experimental Río Bravo (CERIB), INIFAP, Río Bravo, Tamaulipas ($25^{\circ} 57' 16.9''$ N, $98^{\circ} 01' 05.7''$ O; altitud 25 m). Se tomaron cuatro muestras aleatorias de suelo de tipo Vertisol en presiembra de los primeros 30 cm de profundidad, para analizar sus propiedades físicas y químicas (SEMARNAT, 2002) en el Laboratorio de Suelo, Planta y Agua del CERIB. El pH fue 8.0, la conductividad eléctrica (C.E.) 1.14 dS m^{-1} , materia orgánica (M.O.) 1.7%, de textura arcillosa, y los macro-microelementos (mg kg^{-1}) 20.6 N- NO_3 , 27.1 P, 1864 K, 0.622 Fe, 0.691 Cu, 0.853 Zn y 0.599 Mg.

Manejo Experimental

Para el estudio se utilizaron cuatro cultivos sembrados a mediados de febrero 2016. Sorgo (*Sorghum bicolor*, '83G19') sembrado el día 15, soya (*Glycine max*, 'Vernal') el 16, frijol (*Phaseolus vulgaris*, 'Pinto Americano') y okra (*Abelmoschus*

esculentus, 'Clemson Spineless 80') sembrados el 17. Para la corrección de la clorosis férrica se manejaron los tratamientos indicados en el Cuadro 1.

La siembra se realizó manualmente y las aplicaciones de los tratamientos se efectuaron con una mochila con bomba de aspersión. En los tratamientos que llevaron FeSO_4 foliar, se hicieron dos aplicaciones el 16 (30 dds) y 22 (36 dds) de marzo, respectivamente. Para cada cultivo, las parcelas consistieron de tres surcos de 5 m de longitud y los tratamientos se distribuyeron bajo un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones.

Variables Medidas y Análisis de Datos

Para evaluar el efecto de los tratamientos, los ensayos se condujeron hasta los 48-50 días después de la siembra. En el desarrollo de los cultivos se tomaron tres lecturas de índice de clorofila SPAD ($n = 30$) con el medidor digital Minolta SPAD 502[®], el primero el 15 de marzo (29 dds), con la presencia de los síntomas y antes de la primera aplicación foliar de FeSO_4 , los restantes fueron el 28 de marzo (40 dds) y 6 de abril (50 dds). Con los datos SPAD se realizó un análisis factorial, tratamiento \times fecha de lectura. Al terminar los 48-50 días, de cada cultivo se tomaron al azar ocho plantas por parcela, de las cuales se determinó la biomasa seca aérea, foliar y radical. La biomasa seca se obtuvo después del secado en estufa a 60°C durante tres días. Los datos se sometieron a análisis de varianza y la separación de las medias de los tratamientos fue a través de la prueba DMS ($P \leq 0.05$) con el programa SAS (SAS Institute, 2014).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las condiciones del estudio, los cultivos manifestaron diferente reacción a la deficiencia de Fe, de los cuatro, las plantas de soya y okra, en

Cuadro 1. Tratamientos utilizados en los cuatro cultivos para evaluar la respuesta a la corrección de clorosis férrica.

Tratamiento	Descripción
1	Quelato de Fe^{3+} (6%) EDDHA [ac. etilendiamino-di-(o-hidroxifenilacético)] (Ultraferro [®] , Trade Corporation International, S.A.U., Madrid, España), aplicado al 1% sobre las semillas de cada especie, al momento de la siembra.
2	El quelato de Fe Ultraferro [®] más aplicación foliar de sulfato ferroso agrícola (FeSO_4) al 1.5%.
3	Aplicación foliar de FeSO_4 al 1.5%.
4	Testigo.

los suelos del tratamiento testigo, mostraron la mayor sensibilidad, presentaron mayor severidad o intensidad de clorosis, hasta alcanzar necrosis en el follaje. En los suelos calcáreos del noreste de México es común observar daños severos por clorosis férrica tanto en frijol como en sorgo que causan pérdidas totales (Lara *et al.*, 2004; Cortinas, 2006; Adame y Silva, 1994). Es indudable la variación de susceptibilidad que presentan los cultivos a la deficiencia de Fe (Ozores-Hampton, 2013), inclusive entre genotipos de la misma especie (Lara *et al.*, 2004; Díaz y Ortigón, 2000). Por otro lado, las dos aplicaciones foliares de FeSO_4 , si resultaron uniformes en todos los cultivos (16 y 22 de marzo). Díaz y Ortigón (2000) indicaron que para corregir la clorosis férrica de frijol y chícharo de vaca (*Vigna unguiculata*) hasta los 50 días después de la siembra, requirieron de cinco aspersiones foliares de FeSO_4 debido a la severidad de la deficiencia.

En el cultivo de soya se obtuvo una interacción significativa ($P = 0.001$) entre tratamiento y fecha de lectura para el índice de clorofila SPAD. En general, la mejor corrección de la clorosis en el cultivo se observó en las parcelas con EDDHA-Fe, los cuales registraron los mayores niveles de clorofila y fueron estadísticamente semejantes. En segundo término, el FeSO_4 foliar superó al testigo en las dos últimas lecturas, debido a que mostró un ascenso gradual de SPAD en comparación a las fechas anteriores (Figura 1).

Resultados semejantes a los de clorofila se registraron con la biomasa de la soya. Los mayores valores de biomasa de follaje ($P = 0.005$) y radical ($P = 0.01$), se observaron estadísticamente similares con los dos tratamientos donde se aplicó EDDHA-Fe,

seguido de la aplicación foliar de FeSO_4 (Cuadro 2).

En okra el índice SPAD, mostró también una interacción ($P = 0.001$) entre el tratamiento químico y fechas de lecturas. En las dos primeras fechas, los tratamientos que llevaron EDDHA-Fe registraron los valores más altos; en la fecha del 6 de abril, todos los tratamientos superaron de forma similar a las parcelas testigo. En contraste con los demás cultivos, se observó que al parecer la okra es más demandante de nutrientes y requiere de un manejo nutricional diferente, esto es debido a que en general en el último muestreo los índices SPAD decrecieron (Figura 2). La okra es un cultivo hortícola para el mercado de exportación, y en particular, tiene relevancia la intensidad de clorosis manifestada, dado a que la clorofila del fruto está estrechamente asociada con la clorofila foliar ($r^2 = 0.77$) y el fruto de baja intensidad de verdor, es causa de castigos en su comercialización (Díaz *et al.*, 2007).

Semejante a la respuesta de la soya, los mayores pesos en biomasa foliar en las plantas de okra ($P = 0.001$) se registraron con los tratamientos que llevaron el quelato, seguido de la aplicación de FeSO_4 foliar. Para la biomasa radical todos los tratamientos químicos superaron ($P = 0.002$) al testigo (Cuadro 3).

En el frijol se observó interacción ($P = 0.01$) entre el tratamiento químico y fecha de lectura para el índice SPAD. En la primera lectura de clorofila (15 de marzo), se observó, al igual que en soya y okra, una marcada clorosis exhibida en las parcelas testigo y el FeSO_4 previo a la primera aplicación. Mientras que los valores SPAD con EDDHA-Fe se mantuvieron altos en los mismos cultivos, por lo que estas plantas no reflejaron

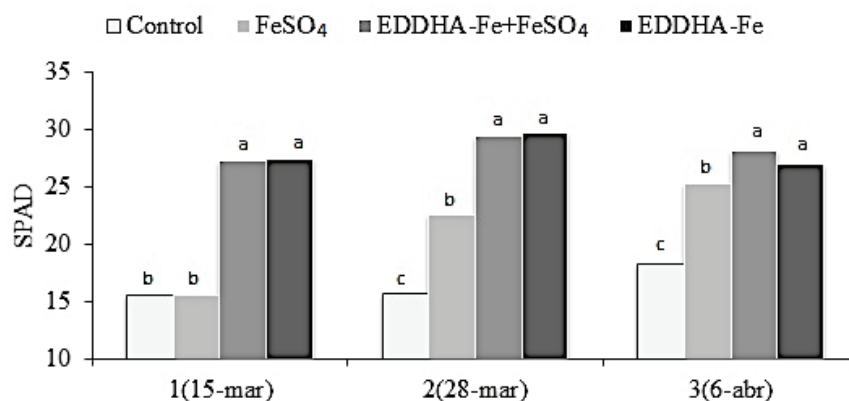


Figura 1. Índice SPAD ($n = 30$) en soya en tres lecturas (fechas) para cada tratamiento químico de clorosis férrica. Barras con la misma letra no difieren (DMS, $P \leq 0.05$).

Cuadro 2. Respuesta de la soya ‘Vernal’ al control químico de clorosis férrica en función de biomasa foliar y radical.

Tratamiento	Biomasa	
	Foliar	Radical
	- - - - - g - - - - -	
EDDHA-Fe	37.2 a [†]	3.5 a
EDDHA-Fe + FeSO ₄	35.9 a	3.0 a
FeSO ₄	22.0 c	2.5 b
Testigo	16.0 d	1.8 c
Significancia F	0.005	0.01

[†] Valores unidos con la misma letra no son diferentes, DMS $P \leq 0.05$.

estrés clorótico. En la fecha del 28 de marzo el efecto de los tratamientos químicos fue semejante entre ellos, pero con valores superiores al testigo. Posteriormente, para la tercera fecha de lectura el cultivo no manifestó clorosis visible y se corroboró con los valores SPAD que fueron semejantes entre los tres tratamientos y el testigo. El genotipo de frijol mostró en las parcelas testigo un incremento escalonado natural en la corrección de la clorosis férrica (Figura 3), respuesta que puede estar vinculada a una tolerancia varietal (Díaz y Ortigón, 2000; Lara *et al.*, 2004).

Para la biomasa foliar y radical de las plantas de frijol, los pesos de las variables fueron estadísticamente semejantes ($P = 0.04$ y 0.007 , respectivamente) con los tratamientos de control químico, los cuales fueron superiores a los obtenidos en las parcelas testigo (Cuadro 4).

En sorgo se obtuvo una respuesta diferente, comparada con los demás cultivos; la clorosis férrica

Cuadro 3. Respuesta de okra ‘Clemson Spineless 80’ al control químico de clorosis férrica en función biomasa foliar y radical.

Tratamiento	Biomasa	
	Foliar	Radical
	- - - - - g - - - - -	
EDDHA-Fe	95.3 a [†]	9.8 a
EDDHA-Fe + FeSO ₄	105.3 a	7.6 a
FeSO ₄	40.6 b	6.7 a
Testigo	26.0 c	3.1 b
Significancia F	0.001	0.002

[†] Valores unidos con la misma letra no son diferentes, DMS $P \leq 0.05$.

no fue visiblemente evidente entre los tratamientos y se expresó en los índices SPAD no significativas ($P = 0.71$). Aunque por fecha de lectura, las dos primeras tuvieron valores inferiores ($P = 0.043$) en relación a la del 6 de abril (Cuadro 5). Los tratamientos químicos para la clorosis férrica tampoco tuvieron impacto en las variables de biomasa ya que no se observaron diferencias significativas para biomasa foliar y radical ($P = 0.088$ y 0.434 , respectivamente) (Cuadro 5), debido a la ausente o leve clorosis manifestada.

Los mecanismos metabólicos que tiene el Fe en las plantas son diversos, está involucrado como un metal redox-activo en la fotosíntesis, en la respiración mitocondrial, en la asimilación de nitrógeno, en la biosíntesis hormonal, en la osmo-regulación, en la defensa de patógenos y como un factor limitante para la producción de biomasa (Briat, 2011). Los resultados del estudio demostraron que en general la aplicación del quelato EDDHA-Fe sobre las semillas solo o

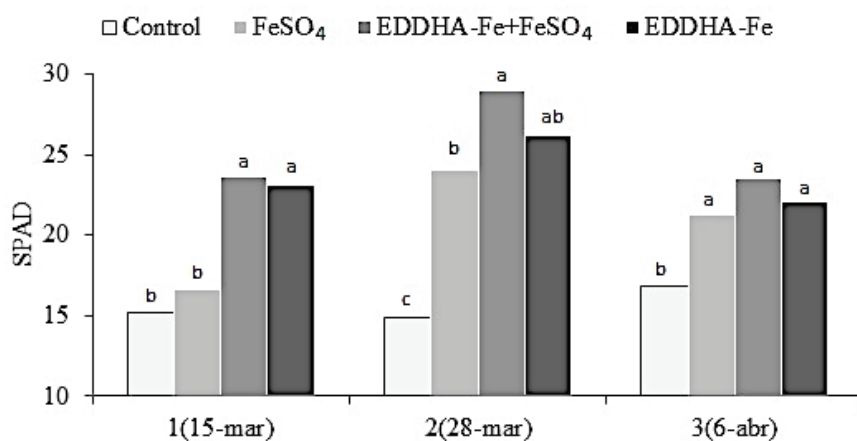


Figura 2. Índice SPAD (n = 30) en okra en tres lecturas (fechas) para cada tratamiento químico de clorosis férrica. Barras con la misma letra no difieren (DMS, $P \leq 0.05$).

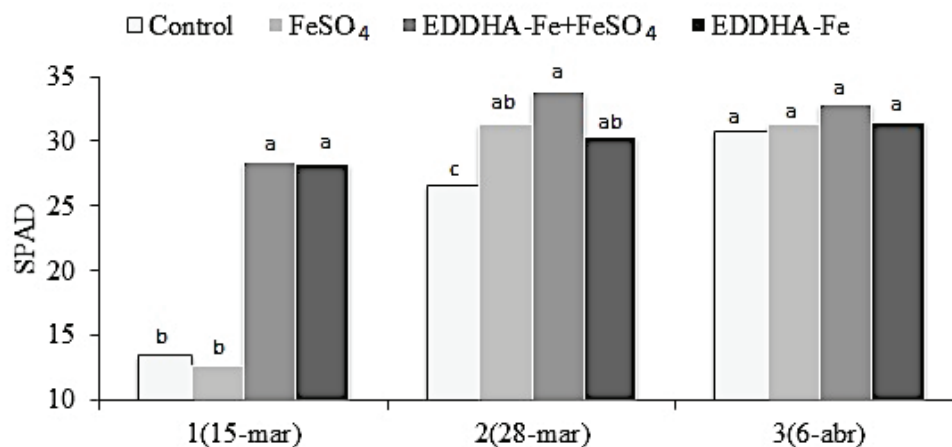


Figura 3. Índice SPAD (n = 30) en frijol en tres lecturas (fechas) para cada tratamiento químico de clorosis férrica. Barras con la misma letra no difieren (DMS, $P \leq 0.05$).

combinado con dos aspersiones foliares de FeSO_4 , fueron los más efectivos para la corrección de clorosis férrica en soya, okra y frijol. Fue visible la clorosis en las plantas testigo de esos cultivos y la efectividad del quelato se manifestó desde la aparición de los primeros síntomas en las hojas verdaderas. En contraste, en la última fecha de lectura (6 de abril) las plantas de las parcelas testigo de soya y okra, presentaron pobre desarrollo y manchas necróticas en las hojas, lo cual bajo estas condiciones no alcanzarían el estado reproductivo. De la misma forma, Álvarez *et al.* (2005) concluyeron que con una aplicación de los quelatos tipo EDDHA, EDDHMA [ac. etilendiamino di(2-hidroxi-4-metilfenilacético)] y EDDHSA [ac. etilendiamino di(2-hidroxi-5-sulfofenilacético)], fue suficiente para causar una corrección de deficiencia de hierro en los cultivos de girasol (*Helianthus annuus*), pera (*Pyrus communis*) y durazno (*Prunus persica*).

Cuadro 4. Respuesta de frijol 'Pinto Americano' al control químico de clorosis férrica en función a las biomasa foliar y radical.

Tratamiento	Biomasa	
	Foliar	Radical
	----- g -----	
EDDHA-Fe	66.0 a [†]	1.13 a
EDDHA-Fe + FeSO_4	54.6 ab	1.16 a
FeSO_4	52.5 ab	1.06 a
Testigo	35.0 b	0.46 b
Significancia F	0.04	0.007

[†] Valores unidos con la misma letra no son diferentes, DMS $P \leq 0.05$.

Los tratamientos químicos tuvieron impacto en la promoción de la biomasa foliar y radical en soya, okra y frijol. Ante la severidad de clorosis férrica manifestada en las plantas de soya y okra, el EDDHA-Fe solo o en combinación con FeSO_4 foliar, incrementaron 20.5 y 74.3 g (en promedio), respectivamente, el peso de biomasa foliar sobre el testigo. La aplicación de FeSO_4 foliar en soya y okra, mantuvo incrementos en la biomasa superiores a los del testigo; mientras que en frijol los incrementos fueron similares al tratamiento quelante. Estos resultados coinciden con los reportados por García-Marco *et al.* (2006) quienes demostraron

Cuadro 5. Unidades SPAD y biomasa de sorgo '83G19' en función al control químico de clorosis férrica.

Tratamiento (T)	Unidades SPAD	Biomasa	
		Foliar	Radical
		----- g -----	
EDDHA-Fe	31.1	41.1	6.4
EDDHA-Fe + FeSO_4	28.9	40.8	6.0
FeSO_4	30.7	47.9	6.8
Testigo	28.7	39.7	4.5
Significancia F	0.711	0.088	0.434
		----- g -----	
Fecha de lectura (F)			
15 de marzo	28.7 b [†]		
28 de marzo	29.1 b		
6 de abril	33.4 a		
Significancia F	0.043		
T × F	0.406		

[†] Valores unidos con la misma letra no son diferentes, DMS $P \leq 0.05$.

la efectividad del quelato EDDHA para la corrección de clorosis férrica, asociada a la mayor promoción de la biomasa aérea en plántulas de soya. De igual forma, Kabir *et al.* (2016) registraron en chícharo (*Pisum sativum*), corrección de clorosis férrica con aspersiones de FeSO_4 e incrementos en la biomasa foliar. La respuesta de la planta al agente quelante como el EDDHA radica en que es una molécula orgánica (anión) de alta estabilidad, capaz de mantener los iones metálicos rodeados de modo que queden protegidos del entorno, de lo contrario, favorecería su precipitación en forma de hidróxido insoluble y no disponible para la planta (Lucena, 2009).

No se observó efecto aditivo en los valores SPAD ni en la biomasa de las plantas, al combinar el EDDHA-Fe con el FeSO_4 foliar, lo que indica que con la actividad del quelato solo es suficiente para lograr un óptimo abatimiento de la clorosis. Para el caso particular de las plantas de okra, al observarse un decremento en los índices SPAD en la última lectura (6 de abril), esto refleja que el cultivo manifestó necesidades nutrimentales en ese estado, por lo que requiere de investigación adicional para determinar un manejo de fertilización integral. La opción de utilizar el quelato representa un manejo práctico y eficiente en suelos calcáreos y alcalinos ya que solo requiere su aplicación en la siembra (Álvarez *et al.*, 2005), tal como fue demostrado en el presente estudio. Este quelato se ha utilizado para la corrección de clorosis férrica en árboles frutales y cultivos hortícolas, a través de riego por goteo (Arizmendi-Galicia *et al.*, 2011; Ozores-Hampton, 2013; Whiting *et al.*, 2015). Por otro lado, el FeSO_4 foliar podría representar un control de clorosis férrica con algunas desventajas; por ejemplo, las aplicaciones deberán ser oportunas ya que de lo contrario el cultivo estaría bajo estrés clorótico. En condiciones climatológicas adversas no es posible realizar las aspersiones, en otros casos resulta inoperante debido al número de aplicaciones requeridas (Fernández y Elbert, 2005). Por lo anterior, Whiting *et al.* (2015) señalaron que el manejo de las aplicaciones foliares de FeSO_4 y la frecuencia de éstas, no se pueden generalizar ya que dependerán del cultivo, así como la severidad o intensidad de la clorosis. No obstante, la práctica comercial común para el control de clorosis férrica en diferentes regiones con suelos calcáreos y alcalinos es mediante el empleo de FeSO_4 foliar (Fernández y Elbert, 2005; Ozores-Hampton, 2013; Kabir *et al.*, 2016). Por contrario, Schenkeveld

y Temminghoff (2011), señalan que en Europa últimamente el mayor mercado lo ocupa el quelato Fe-EDDHA con una venta anual de 60 millones de euros.

Finalmente, los resultados aquí presentados tienen implicaciones trascendentes no solo desde el punto de vista agronómico, sino también en la nutrición humana. La deficiencia de Fe es un problema creciente de salud pública en las poblaciones humanas que se asocia con menor ingesta de Fe; de aquí la necesidad de mejorar las concentraciones de Fe en los cultivos (Márquez-Quiroz *et al.*, 2015; Aciksoz *et al.*, 2011).

CONCLUSIONES

De los cuatro cultivos experimentados, las plantas de soya y okra presentaron la mayor severidad a la deficiencia de hierro (Fe). Aunque los efectos de los tratamientos químicos en el índice de clorofila y biomasa fueron variables entre los cultivos, en general, los resultados demuestran que la aplicación de EDDHA-Fe solo o combinado con FeSO_4 foliar, ofrecen una efectiva corrección de la clorosis férrica.

AGRADECIMIENTOS

Al Patronato para la Investigación, Fomento y Sanidad Vegetal de Tamaulipas por el apoyo a través del proyecto No.18365633858. Al Sr. Juan Olvera por la asistencia en las labores de campo.

LITERATURA CITADA

- Aciksoz, S. B., A. Yazici, L. Ozturk, and I. Cakmak. 2011. Biofortification of wheat with iron through soil and foliar application of nitrogen and iron fertilizers. *Plant Soil* 349: 215-225.
- Adame, B. E. y M. Silva. 1994. Control del amarillamiento o clorosis férrica en sorgo. *Campo Experimental Río Bravo*, INIFAP. Desplegable No. 20. Río Bravo, Tamaulipas, México.
- Álvarez F., A., S. García M., and J. J. Lucena. 2005. Evaluation of synthetic iron(III)-chelates (EDDHA/ Fe^{3+} , EDDHMA/ Fe^{3+} and the novel EDDHSA/ Fe^{3+}) to correct iron chlorosis. *Eur. J. Agron.* 22: 119-130.
- Arizmendi-Galicia, N., P. Ortiz-Rivera, F. Cruz-Salazar, B. Castro-Meza y F. De la Garza-Requena. 2011. Lixiviación de hierro quelatado en suelos calcáreos. *Terra Latinoamericana* 29: 231-237.
- Briat, J. F. 2011. Iron nutrition and implications for biomass production and the nutritional quality of plant products. pp. 311-334. *In:* M. J. Hawkesford and P. Barraclough (eds.). *The molecular and physiological basis of nutrient use efficiency in crops.* Wiley-Blackwell. Hoboken, NJ, USA.

- Cantera, R. G., A. M. Zamarreño, and J. M. García. 2002. Characterization of commercial iron chelates and their behavior in alkaline and calcareous soil. *J. Agric. Food Chem.* 50: 7609-7615.
- Cortinas, E. H. 2006. Leguminosas comestibles. pp. 75-87. *In*: L. A. Rodríguez del Bosque (ed.). *Campo Experimental Río Bravo: 50 años de investigación agropecuaria en el norte de Tamaulipas, historia, logros y retos.* Campo Experimental Río Bravo, INIFAP. Libro Técnico No. 1. Río Bravo, Tamaulipas, México. ISBN 968-800-664-5.
- Díaz F., A. y A. S. Ortegón. 2000. Producción comparativa de chícharo de vaca (*Vigna unguiculata*) y frijol (*Phaseolus vulgaris*) en riego y en sequía. *Agron. Mesoam.* 11: 25-30.
- Díaz F., A., A. S. Ortegón y J. A. Ramírez. 2007. Competitividad productiva de cuatro híbridos de okra en fechas de siembra en el norte de Tamaulipas. *Agr. Téc. Méx.* 33: 25-32.
- Farooq, M., A. Wahid, and K. H. M. Siddique. 2012. Micronutrient application through seed treatments: A review. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 12: 125-142.
- Fernández, V. and G. Elbert. 2005. Foliar iron fertilization: A critical review. *J. Plant Nutr.* 28: 2113-2124.
- Ferreyra, R., G. Selles V., R. Ruiz S., P. Gil M. y C. Barrera M. 2008. Manejo de la clorosis férrica en palto. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Boletín INIA no. 181. La Cruz, Chile.
- García-Marco, S., N. Martínez, F. Yunta, L. Hernández-Apaolaza, and J. J. Lucena. 2006. Effectiveness of ethylenediamine-N-(o-hydroxyphenylacetic)-N²-(p-hydroxyphenylacetic) acid (o,p-EDDHA) to supply iron to plants. *Plant Soil* 279: 31-40.
- Kabir, H. A., N. Paltridge, and J. Stangoulis. 2016. Chlorosis correction and agronomic biofortification in field peas through foliar application of iron fertilizers under Fe deficiency. *J. Plant Inter.* 11: 1-4.
- Lara M., J. L., R. Vázquez A., E. Olivares S. y J. F. Pissani Z. 2004. Tolerancia a clorosis férrica de diferentes cultivares de frijol en suelos calcáreos. *Rev. Fitotec. Mex.* 27: 43-47.
- Lucena, J. J. 2009. El empleo de complejantes y quelatos en la fertilización de micronutrientes. *Rev. Ceres* 56: 527-535.
- Magallanes E., A., A. Díaz F., M. A. Reyes R., E. Rosales R., M. Alvarado C., M. M. Silva S., A. J. Bustamante D. y H. M. Cortinas E. 2014. Tecnología de producción en soya (*Glycine max*) para el norte de Tamaulipas. Campo Experimental Río Bravo, INIFAP. Folleto Técnico No. 58. Río Bravo, Tamaulipas, México. ISBN 978-607-37-0247-8
- Márquez-Quiroz, C., E. De-la-Cruz-Lázaro, R. Osorio-Osorio, and E. Sánchez-Chávez. 2015. Biofortification of cowpea beans with iron: Iron's influence on mineral content and yield. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 15: 839-847.
- Mengel, K. and E. A. Kirkby. 2001. Principles of plant nutrition. Kluwer Academic Publication. The Netherlands.
- Ortiz, P. R., B. I. Castro M., F. R. de la Garza R., G. M. Flores, and J. D. Etchevers B. 2007. Evaluation of different iron compounds in chlorotic Italian lemon trees (*Citrus lemon*). *Plant Physiol. Biochem.* 45: 330-334.
- Ozores-Hampton, M. 2013. Effective strategies to correct iron deficiency in Florida vegetable crops. *HortTechnology* 23: 548-552.
- Salinas, G. J., M. Alvarado y R. Sánchez-de-la-Cruz. 2006. Suelo y agua. pp. 147-162. *In*: L. A. Rodríguez del Bosque (ed.). *In*: L. A. Rodríguez del Bosque (ed.). *Campo Experimental Río Bravo: 50 años de investigación agropecuaria en el norte de Tamaulipas, historia, logros y retos.* Campo Experimental Río Bravo, INIFAP. Libro Técnico No. 1. Río Bravo, Tamaulipas, México. ISBN 968-800-664-5.
- SAS Institute. 2014. SAS-STAT® 9.3 user's guide. SAS Institute Inc. Cary, NC, USA.
- Schenkeveld, W. D. C. and E. J. M. Temminghoff. 2011. The effectiveness of FeEDDHA chelates in mending and preventing iron chlorosis in soil-grown soybean plants. pp. 83-108. *In*: H. A. El-Shemy (ed.). *Soybean physiology and biochemistry.* InTech. Rijeka, Croatia.
- Schenkeveld, W. D. C., R. Dijcker, A. M. Reichwein, E. J. M. Temminghoff, and W. H. Van Riemsdijk. 2008. The effectiveness of soil-applied FeEDDHA treatments in preventing iron chlorosis in soybean as a function of the o,o-FeEDDHA content. *Plant Soil* 303: 161-176.
- SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2002. Norma Oficial Mexicana, NOM-021-SEMARNAT, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudios, muestreo y análisis. Diario Oficial. Martes 31 de diciembre. 1-75 pp. México, D. F.
- Whiting, D., A. Card, C. Wilson, and J. Reeder. 2015. Iron chlorosis of woody plants. Colorado State University Extension. Publ. No. 223. Colorado Spring, CO, USA.
- Xiong, D., J. Chen, T. Yu, W. Gao, X. Ling, Y. Li, S. Peng, and J. Huang. 2015. SPAD-based leaf nitrogen estimation is impacted by environmental factors and crop leaf characteristics. *Sci. Rep.* 5: 13389. doi: 10.1038/srep13389.