

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA**

**LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO**

**MAESTRÍA EN SUELOS**



**“APLICACIÓN DE HIERRO EN MAÍZ AMARILLO DURO (*Zea mays* L.) CULTIVADO EN SUELOS CALCÁREOS DEL VALLE DEL CHIRA”**

**Presentada por:**

**MIGUEL ANGEL ROMÁN QUEZADA**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE  
MAGISTER SCIENTIAE EN SUELOS**

**Lima - Perú**

**2018**

## **DEDICATORIA**

A mis hijas:

**ANDREA THAYS y GABRIELA**

**VALENTINA** que son mi adoración y motivación.

A mis padres:

**CATALINA Y ANGEL**, por su ejemplo de toda una vida de sacrificio para conseguir mi meta.

A mis hermanos:

**JUAN MANUEL, CLEO, ANGEL,**

**LUZ MARÍA, NANCY Y ANGEL**

**ALBERTO**, por su apoyo constante y por hacerme sentir querido siempre.

A mi amada:

**KARINA**, por su amor, compañía y por hacerme mejor persona cada día.

## **AGRADECIMIENTOS**

Quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas y entidades que, directa o indirectamente, han hecho posible la realización de esta tesis: A Laboratorio e Invernadero de Fertilidad Nacional Agraria La Molina, que me ha permitido usar sus instalaciones para realizar este trabajo, al laboratorio de suelos, a la unidad de riegos y de forma muy especial quiero dejar constancia de mi agradecimiento a mis asesores y comité consejero, Dr. Orcar Loli Figueroa, Dr. Sady García Bendezú, al Ms Sc Ruben Bazan Tapia y al Ms Sc Lorenzo Hurtado Leo, a los que no podré corresponder como se merecen por tantos años de conocimiento y sabiduría empleados en mi formación en la especialidad de suelos. Cada día me han honrado con su trato personal, afecto y dedicación plena, compartiendo además el trabajo de campo, de laboratorio y de la vida misma. Gracias, de corazón, por ser mis verdaderos maestros.

También quiero dar las gracias a mis compañeros de estudios de maestría, a mis amigos y profesores que durante mi estancia en la Universidad me ofrecieron soporte profesional y logístico para alcanzar los objetivos perseguidos, gracias a todos por compartir tan buenos momentos.

Una mención muy especial a mis hijas Andrea y Gabriela, que son la base de mi vida.

# ÍNDICE GENERAL

I.	INTRODUCCIÓN	1
II.	REVISIÓN DE LITERATURA	3
	2.1. El hierro en el suelo	3
	2.2. Factores que afectan la disponibilidad de hierro	5
	2.2.1. Disponibilidad de hierro en el suelo	5
	2.2.2. Concentración del ión bicarbonato	6
	2.2.3. Temperaturas extremas	6
	2.2.4. Factores nutricionales	6
	2.2.5. Aumento de la concentración de CO <sub>2</sub> en los suelos	7
	2.2.6. Factor planta	8
	2.3. El hierro en la planta	8
	2.3.1. Transporte de hierro en la planta	9
	2.3.2. Funciones del hierro en la planta	10
	2.4. Situación de los quelatos de hierro en la agricultura	13
III.	MATERIALES Y MÉTODOS	15
	3.1. Suelo	15
	3.2. Ubicación	15
	3.3. Fuentes experimentales	15
	3.4. Fase de laboratorio	15
	3.4.1. Análisis de caracterización	15

3.4.2. Análisis de disponibilidad de hierro	17
3.4.3. Factores de estudio de la prueba de disponibilidad del hierro	17
3.4.4. Método de extracción de Hierro disponible por Bicarbonato de sodio Modificado.	18
3.5. Fase de invernadero	20
3.6. Procedimiento de análisis de datos	20
3.6.1. Determinación de producción de materia seca	20
3.6.2. Análisis químico de la materia seca	20
3.7 Tratamiento estadístico	21
3.7.1. Modelo aditivo lineal	21
3.7.2. Análisis de varianza	22
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	23
4.1. Efectos de fuentes y dosis de hierro en la disponibilidad de hierro a nivel de laboratorio	23
4.2. Resultados del experimento de invernadero	25
4.2.1. Efecto de la fuente y nivel de Fe en el rendimiento de materia seca en la parte aérea del maíz ( <i>Zea mays</i> L.) de los suelos en estudio.	25
4.2.2. Efecto de la fuente y nivel de Fe en la concentración y absorción de Fe en la materia seca del maíz ( <i>Zea mays</i> L.) de los suelos en estudio.	28
V. CONCLUSIONES	32
VI. BIBLIOGRAFÍA	33
VII. ANEXOS	44

## ÍNDICE DE CUADROS

	Pág
Cuadro 1: Características físicas y químicas de los suelos estudiados (0 – 30 cm)	16
Cuadro 2: Esquema del análisis de varianza.	22
Cuadro 3: Valores medios de producción de materia seca (g/maceta) de la parte aérea del maíz ( <i>Zea mays</i> L.) en función de las fuentes de Fe y sus niveles.	26
Cuadro 4: Valores medios de la concentración de Fe (mg/kg) en la materia seca de la parte aérea del maíz ( <i>Zea mays</i> L.) en función de las fuentes de Fe y sus niveles.	30
Cuadro 5: Valores medios de la absorción de Fe (g/maceta) en la materia seca de la parte aérea del maíz ( <i>Zea mays</i> L.) en función de las fuentes de Fe y sus niveles.	31

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág
Figura 1: Relación entre Fe adicionado (ppm) y Fe disponible en el suelo Conchero.	24
Figura 2: Relación entre Fe adicionado (ppm) y Fe disponible en el suelo Calichero.	24
Figura 3: Efecto de la fuente y nivel de Fe en el rendimiento de materia seca en maíz ( <i>Zea mays</i> L.) en el suelo Conchero.	27
Figura 4: Efecto de la fuente y nivel de Fe en el rendimiento de materia seca en maíz ( <i>Zea mays</i> L.) en el suelo Calichero.	28
Figura 5: Crecimiento del maíz ( <i>Zea mays</i> L.) en ambos suelos en estudio.	29
Figura 6: Presencia de clorosis en una planta de maíz ( <i>Zea mays</i> L.).	29

## ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág
Anexo 1: Fichas técnicas de las fuentes de hierro usadas en el experimento	45
Anexo 2: Resumen del análisis de variancia para el rendimiento de materia seca, concentración y absorción de Fe en maíz ( <i>Zea mays</i> L) en el suelo Conchero.	56
Anexo 3: Resumen del análisis de variancia para los efectos simples de las fuentes de Fe y sus niveles, sobre el rendimiento de materia seca, concentración y absorción de Fe en maíz ( <i>Zea mays</i> L) en el suelo Conchero.	57
Anexo 4: Resumen del análisis de variancia para el rendimiento de materia seca, concentración y absorción de Fe en maíz ( <i>Zea mays</i> L) en el suelo Calichero.	57
Anexo 5: Resumen del análisis de variancia para los efectos simples de las fuentes de Fe y sus niveles, sobre el rendimiento de materia seca, concentración y absorción de Fe en maíz ( <i>Zea mays</i> L.) en el suelo Calichero.	58
Anexo 6: Crecimiento del maíz ( <i>Zea mays</i> L.) de tratamientos en ambos suelos en estudio.	59
Anexo 7: Plantas de maíz ( <i>Zea mays</i> L.) al inicio del experimento.	59
Anexo 8 Resultados del ensayo en el laboratorio de adsorción de hierro en suelos calcáreos por el método del bicarbonato de sodio modificado	60
Anexo 9:: Correlación entre hierro disponible (ppm) por el método del bicarbonato de sodio modificado y concentración de la solución aplicada (ppm).	60



Anexo 10:	Altura de planta (m) del ensayo de fuentes y dosis de hierro en dos suelos calcáreos.	61
Anexo 11:	Peso fresco de planta (g) del ensayo de fuentes y dosis de hierro en dos suelos calcáreos.	61
Anexo 12:	Peso fresco en raíces (g) del ensayo de fuentes y dosis de hierro en dos suelos calcáreos.	62
Anexo 13:	Peso seco de planta (g) del ensayo de fuentes y dosis de hierro en dos suelos calcáreos.	62
Anexo 14:	Peso seco en raíces (g) del ensayo de fuentes y dosis de hierro en dos suelos calcáreos.	63
Anexo 15:	Concentración de hierro foliar (ppm) del ensayo de fuentes y dosis de hierro en dos suelos calcáreos.	63
Anexo 16:	Concentración de hierro en raíces (ppm) del ensayo de fuentes y dosis de hierro en dos suelos calcáreos.	64
Anexo 17:	Hierro disponible residual (mg/kg de suelo) del ensayo de fuentes y dosis de hierro en dos suelos calcáreos.	64
Anexo 18:	Hierro soluble en agua residual (mg/kg de suelo) del ensayo de fuentes y dosis de hierro en dos suelos calcáreos.	74

## RESUMEN

En el departamento de Piura, provincia de Paita, valle del Río Chira, se siembran un poco más de quince mil hectáreas de caña de azúcar, siendo este el cultivo más importante entre otros como el maíz amarillo duro, banano, uva de mesa, mango, limón, entre otros. En estas zonas de expansión agrícola del valle se encuentran suelos con abundante presencia de minerales calcáreos, los cuales afectan el normal desarrollo de las plantas por deficiencia de nutrientes como el hierro. Considerando que la aplicación de hierro podría abastecer de este nutriente a las plantas cultivadas, se estableció un trabajo de experimentación con dos tipos de suelos, en los cuales el desarrollo de la caña de azúcar se ve significativamente afectado, mostrando una clorosis aparentemente férrica. Para este efecto fueron trasladadas muestras de suelos tomadas de los primeros 30 cm superficiales de dos suelos identificados como Conchero (C.E.=7.4 dSm<sup>-1</sup>) y Calichero (C.E.=1.84 dSm<sup>-1</sup>), con la finalidad de instalar el trabajo experimental a nivel de invernadero en el laboratorio de Fertilidad del Suelo “Sven Villagarcía Hermosa”, de la Facultad de Agronomía de la UNALM. Los objetivos planteados fueron determinar la factibilidad de la aplicación de fuentes y niveles de hierro en suelos calcáreos, para la provisión de hierro al cultivo de maíz amarillo duro (*Zea mays L.*) en dos suelos calcáreos del valle del Chira bajo condiciones de invernadero. Los suelos recibieron (como factores en estudio) tres fuentes de hierro (Fe EDDHA + ácidos carboxílicos (Carboxy Fe®), Fe EDDHA (Ultraferro®) y FeSO<sub>4</sub> · 7H<sub>2</sub>O), dos dosis de hierro (0.8 y 1.9 mg kg<sup>-1</sup>) más un testigo. Se establecieron un total de 18 tratamientos, en macetas con 3.0 kg de suelo, empleando maíz (*Zea mays L.*) como planta indicadora. El experimento duró cinco meses (septiembre 2013 a enero del 2014). Se utilizó el diseño completo al azar, y se empleó la prueba de Duncan para comparación de medias. Los resultados obtenidos indican que a nivel de laboratorio a mayor dosis de hierro aplicado al suelo, resulta una mayor disponibilidad de hierro, siendo más alto cuando se usa Ultraferro®. El suelo Calichero presenta mayores rendimientos en producción de materia seca, en comparación del suelo Conchero debido, posiblemente al contenido de sales y sodio en concentraciones altas que impidió un mejor efecto de las fuentes aplicadas de hierro y sus niveles. El efecto salino en el suelo Conchero aparentemente redujo la capacidad de la planta para reaccionar con las dosis crecientes de hierro y las fuentes probadas. En el suelo Calichero con bajo contenido salino se observó una relación directa con las dosis de hierro en prueba, siendo el Ultraferro® y el Carboxy Fe® las fuentes que mayor rendimiento en materia seca presentaron, mientras que la mejor fuente en la concentración a nivel foliar y absorción a

nivel de macetas fue el Carboxy Fe®. En el suelo Conchero, se observó una mayor concentración de Fe en los tejidos de aquellas plantas que presentaron un menor rendimiento en materia seca. Caso contrario ocurrió en el suelo Calichero, donde se observó una mayor concentración de Fe a medida que se incrementaba el rendimiento de materia seca con el aumento de los niveles de Fe, siendo la fuente proveniente con Fe-EDDHA la que mejor efecto presentó a dosis más altas. Sin embargo, se observó la presencia de clorosis en todos los tratamientos a pesar de la aplicación de niveles de Fe. En relación a la absorción de Fe para los suelos en estudio para el suelo Conchero, la menor producción de materia seca determina que exista una mayor concentración de este elemento en sus tejidos y aparentemente una mayor absorción de hierro. Para el suelo Calichero, la aplicación de los diferentes productos de hierro y sus niveles, facilitó la absorción de este elemento.

***Palabras claves:*** Quelatos, Fe-EDDHA, FeSO<sub>4</sub>, suelos calcáreos, Zea mays L.

## ABSTRACT

In the department of Piura, province of Paita, Chira River valley, a little more than fifteen thousand hectares of sugarcane are planted, which is the most important crop among others, such as hard yellow corn, bananas, table grapes, mangoes, lemon, among others. In these areas of agricultural expansion of the valley find soils with abundant presence of calcareous minerals, which affect the normal development of plants due to deficiency of nutrients such as iron. Considering that the application of iron could supply this nutrient to the cultivated plants, an experimentation work was established with two types of soils, in which the development of sugarcane is significantly affected, showing an apparently iron chlorosis. For this purpose, samples of soils taken from the first 30 cm of surface were taken from two soils identified as Conchero (E.C.=7.4 dSm<sup>-1</sup>) and Calichero (E.C.= 1.84dSm<sup>-1</sup>), in order to install the experimental work at the greenhouse level in the soil fertility laboratory "Sven Villagarcía Hermosa", of the Faculty of Agronomy of the National Agrarian University. The objectives were to determine the feasibility of the application of sources and levels of iron in calcareous soils, for the supply of iron for the cultivation in hard yellow corn (*Zea mays* L.) in two calcareous soils in Valle del Chira, under greenhouse conditions. The soils received three iron sources (Fe EDDHA + carboxylic acids (Carboxy Fe®), Fe EDDHA (Ultraferro®) and FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O), two doses of iron (0.8 and 1.9 mg kg<sup>-1</sup>) plus a control. A total of 18 treatments were established, in pots with 3.0 kg of soil, considering that one pot is the experimental unit. Maize (*Zea mays* L.) was used as an indicator plant. The experiment lasted five months (September 2013 to January 2014). A randomized complete design with 4 replications and the Duncan test were used to compare means. The results obtained show that at a laboratory level, the larger iron dose applied to the soil results in a greater availability of iron, being higher when it is used Ultraferro®. The soil Calichero presents higher yields in dry matter production, in comparison to the Conchero soil, possibly due to the content of salts and sodium in high concentrations, which prevented a better effect of the applied sources of iron and their levels. The saline effect in the soil Conchero apparently reduced the capacity of the plant to react with increasing doses of iron and the sources tested. In the Calichero soil with a low saline content a direct relationship with the iron doses tested was observed, being the Ultraferro® and the Carboxy Fe® the sources that greater performance in dry matter presented, while the best source in the concentration at leaf level and absorption at the pot level was the Carboxy Fe®. In the Conchero soil, a higher concentration of Fe was observed in the tissues of those plants that showed a lower yield in

dry matter. The opposite was true in the Calichero soil, where a higher concentration of Fe was observed as the yield increased of dry matter with the increase of the levels of Fe, being the source coming with Fe-EDDHA that best effect presented at higher doses. However, the presence of chlorosis was observed in all the treatments despite the application of Fe levels. In relation to the absorption of Fe for the soil under study for the Conchero soil, the lower production of dry matter determines that there is a The highest concentration of this element is its tissues and apparently a greater absorption of iron. For the Calichero soil, the application of the different iron products and their levels, facilitated the absorption of this element.

Keywords: Chelates, Fe-EDDHA, FeSO<sub>4</sub>, calcareous soils, *Zea mays L.*

## I. INTRODUCCION

La mayor parte de los suelos productivos, en las zonas áridas y semiáridas del mundo, contienen carbonato de calcio en el perfil de suelos, bajo estas condiciones existe evidencia de una probable deficiencia en la absorción de hierro, que hace dificultoso la producción de cultivos. El hierro es el cuarto elemento más abundante en la corteza terrestre después del silicio, oxígeno y aluminio, representando el 5 % de su peso total. Mientras que su contenido en suelo se estima en un 3.8 % (Lindsay, 1979). La deficiencia de hierro es un problema común en la agricultura moderna, generalmente, una deficiencia de hierro en la planta se debe, más que a una carencia en el suelo, a otros factores, entre los que destaca un pH elevado y por el contenido de carbonato de calcio.

El Fe es absorbido por las raíces de las plantas como  $\text{Fe}^{+2}$  (ferrosa) en mayor concentración, y  $\text{Fe}^{+3}$  (férrica) en menos concentración (Havlin *et al.*, 1999, Barker y Pilbeam, 2007). Está aceptado que la planta toma preferentemente el  $\text{Fe}^{+2}$ , pero, aunque la mayoría del hierro en la corteza terrestre está en forma férrica, la forma ferrosa es fisiológicamente más importante para las plantas, esta forma es relativamente soluble, pero se oxida fácilmente al  $\text{Fe}^{+3}$ , que tiende a precipitarse. El  $\text{Fe}^{+3}$  es insoluble en un pH neutral y en un pH alto, y por lo tanto no es disponible para las plantas en los suelos alcalinos y en los suelos calcáreos.

Para corregir la clorosis por hierro, el productor de medianos y altos recursos económicos, tradicionalmente aplica quelatos y sulfato de hierro. Para el productor de recursos económicos limitados, el método más eficiente, barato y de fácil adopción es el uso de variedades tolerantes o resistentes. En el Perú existe una amplia gama de variedades resistentes y susceptibles a la deficiencia y que requieren evaluarse en los suelos calcáreos, para medir su potencial de rendimiento.

Este trabajo plantea la hipótesis, que la aplicación de hierro podría abastecer de este nutriente a las plantas cultivadas, para esto se estableció un trabajo experimental con dos tipos de suelos, usando tres fuentes y dos dosis de hierro más un tratamiento testigo.

Este trabajo de investigación tiene una estrecha relación con los problemas de la presencia de carbonatos observados en las zonas de desarrollo agrícola, y tiene su especial importancia, pues permitirá saber las mejores formas de nutrición con hierro, para una mayor explotación y mejora de los rendimientos de los cultivos establecidos en estas condiciones, que son de interés de grandes inversionistas.

### **Objetivo General**

- Determinar la factibilidad de la aplicación de fuentes y niveles de hierro en suelos calcáreos, para la provisión de hierro al cultivo de maíz amarillo duro (*Zea mays* L) en dos suelos calcáreos del valle del Chira, bajo condiciones de invernadero.

### **Objetivos específicos**

- Evaluar el efecto de fuentes y dosis de hierro sobre la extractabilidad del hierro, determinado mediante la solución de bicarbonato de sodio modificado, a nivel de laboratorio.
- Determinar el efecto de tres fuentes comerciales de hierro en el rendimiento de materia seca, concentración foliar y absorción de hierro a nivel de planta.
- Determinar el efecto de dos dosis de hierro en el rendimiento de materia seca, concentración foliar y absorción de hierro a nivel de planta.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1 El hierro en el suelo

Aproximadamente, del 4 al 5 % de los minerales del suelo corresponden a compuestos de Fe (Mengel y Kirkby, 2001) siendo el cuarto elemento más abundante en la litósfera (Havlin *et al.*, 1999), detrás del O, Si y Al (Chen y Barak, 1982), encontrándose fundamentalmente en formas de óxidos e hidróxidos (Chen y Barak, 1982). Los más importantes ordenados de acuerdo a su abundancia son: Ferrihidrita ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$  amorfo) > ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$  suelo) > Maghemita ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) > Lepidocrocita ( $\gamma\text{-FeOOH}$ ) > Magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) > Hematita ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) > Goethita ( $\alpha\text{-FeOOH}$ ) (Lindsay, 1979; Ker *et al.*, 2012).

La solubilidad de los minerales de Fe comunes en el suelo es bajo, solo  $10^{-6}$  a  $10^{-24}$  M  $\text{Fe}^{+3}$  en solución, dependiendo del pH (Havlin *et al.*, 1999). Es raro que una deficiencia de Fe se deba a los escasos del elemento en el suelo, reduciéndose estos casos a suelos arenosos degradados y a los suelos turbosos (Wood y Kenny, 1968). Comparado con otros cationes en los suelos, la concentración de  $\text{Fe}^{+3}$  en la solución es muy baja (Havlin *et al.*, 1999). En ambientes anaeróbicos permanentes puede haber ausencia completa de óxidos de  $\text{Fe}^{+3}$  o de algunas segregaciones localizadas de formas oxidadas, en estas condiciones la goethita y la hematita son los óxidos de Fe dominantes por su alta estabilidad termodinámica. En ambientes aeróbicos, la formación se inicia con la liberación de  $\text{Fe}^{+2}$  de los minerales primarios, por la intemperización y su inmediata oxidación (abiótica o biótica) a  $\text{Fe}^{+3}$  o entonces, por cualquier otra fuente de  $\text{Fe}^{+3}$  como, por ejemplo, la disolución de óxidos de Fe ya existentes, aquí los óxidos de Fe típicos son la goethita, lepidocrocita y ferrihidrita (Ker *et al.*, 2012).

A pesar de su baja concentración en suelos, los óxidos de Fe tienen un alto poder pigmentante y determinan el color de muchos suelos, por encontrarse recubriendo muchas de las partículas de estos (Allen y Hajek, 1989). Aspectos particularmente detallados sobre ese asunto fueron revisados por Schwertmann (1993) y Cornell & Schwertmann (1996).



Básicamente, colores rojizos (matices 5YR y más rojizos) se deben a la presencia de hematita y maghemita, en algunos suelos, mascarando la presencia de goethita. De esta manera, el contenido de hematita determina el matiz y el croma rojizo de un suelo (Torrent *et al.*, 1983; Kampf y Schwertmann, 1983b). Así, el color del suelo, debido al tipo y distribución de los óxidos de Fe en el perfil, es una valiosa ayuda en la génesis y clasificación de los mismos. Estos compuestos son muy eficaces en la retención de aniones como fosfato, molibdato y silicato, y elementos traza como Cu, Pb, V, Zn, Co, Cr y Ni (Schwertmann y Taylor, 1989). También poseen, los óxidos de hierro, poder cementante que les permite influir en la estructura de los suelos (Schwertmann y Taylor, 1989; Schwertmann, 1991; Allen y Hajek, 1989).

La goethita es el óxido de Fe más frecuente en los suelos, debido a que es el que mayor estabilidad presenta, bajo condiciones de este medio, por lo que se encuentra en muchos tipos de suelos y regiones climáticas, y es responsable del color amarillento de muchos de ellos (Schwertmann y Taylor, 1989). La mayor resistencia de la goethita a la disolución es explicada por la mayor sustitución isomorfa del Fe por Al, con base en disolución experimental (Torrent *et al.*, 1991; Macedo & Bryant, 1989). Le sigue en frecuencia la hematita, con quien aparece asociada en muchas ocasiones; pero mientras la primera parece no estar restringida a una región climática dada, la hematita se da en áreas tropicales donde las condiciones de temperatura y pH favorecen su formación. Es de color ojo y posee un gran poder de pigmentación (Schwertmann y Taylor, 1989). De acuerdo con Chen y Barak (1982) la solubilidad de los óxidos e hidróxidos de Fe disminuyen en el orden siguiente:  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  amorfo >  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  del suelo >  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  maghemita >  $\gamma\text{-FeOOH}$  lepidocrocita >  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  hematita > goethita.

De otro lado, la presencia de hematita en suelos redoximorficos se da en concentraciones localizadas, en la forma de mosqueados, nódulos y concreciones (plintita y petroplintita) (Ker *et al.*, 2012). La distribución de los óxidos de Fe en suelos redoximórficos ha sido usado para distinguir los suelos en que la reducción es inducida por la elevación de la napa freática (gley) y los suelos en que la reducción resulta de una napa freática superficial, suspenso sobre una capa menos permeable (Pseudogley) (Blume, 1998).

## 2.2 Factores que afectan la disponibilidad de hierro

### 2.2.1. Disponibilidad de hierro en el suelo

La deficiencia de hierro, normalmente, no se produce porque la concentración total de Fe en el suelo se baja, ya que es el cuarto elemento más abundante en la corteza terrestre después del oxígeno, silicio y aluminio (Lindsay, 1979), sino porque existen varios factores tales como: pH, potencial redox, tipo de material al que está asociado al hierro, que hacen que la cantidad que permanece en disolución sea muy baja.

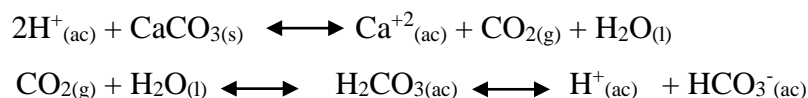
Los estudios realizados por Lindsay (1979), en relación a la distinta solubilidad de los diferentes óxidos e hidróxidos de hierro en el suelo, ponen de manifiesto que: i) el óxido de Fe amorfo sería el más soluble mientras la goethita sería la de menor solubilidad. ii) la solubilidad de los óxidos e hidróxidos de  $\text{Fe}^{+3}$  presentes en el medio están muy relacionada con el pH del suelo, de este modo la solubilidad desciende 1000 veces por cada unidad que aumenta el pH, reduciendo la concentración de Fe soluble a valores inferiores de  $10^{-20}$  M para un valor de pH en torno a 7.5. iii) la región de mínima solubilidad del hierro corresponde al rango de pH entre 7.5 a 8.5 que coincide con el de los suelos calizos. La concentración de Fe para este intervalo de pH es de  $10^{-10.4}$  M aproximadamente, cantidad insuficiente para el óptimo crecimiento de las plantas, que requieren un intervalo de Fe soluble entre  $10^{-9}$  y  $10^{-4}$  M en el medio (Guerinot y Yi, 1994).

La solubilidad del Fe en un suelo también depende del contenido en materia orgánica del mismo. Así, la asociación del hierro con los agentes quelantes de la materia orgánica da lugar a la formación de complejos que incrementan considerablemente la concentración y la movilidad de este nutriente en la disolución del suelo (Cesco *et al.*, 2000).

Puesto que el hierro puede presentar dos estados de oxidación, el potencial redox del suelo es otro de los factores que influye en el contenido de este nutriente en disolución. En suelos bien aireados, condiciones en las que se encuentran normalmente los suelos de cultivo, el  $\text{Fe}^{+3}$  no se ve alterado por el potencial redox, siendo las especies hidrolizadas y la fase sólida las que controlan la solubilidad (Lindsay y Schwab, 1982).

### 2.2.2. Concentración de ion bicarbonato en suelos básicos y alcalinos

En los suelos calizos el pH de la disolución del suelo y la concentración de ion bicarbonato están controlados por las reacciones:



Esto hace que la mayoría de los suelos calizos tengan un valor de pH que oscila entre 7.5 y 8.5; pudiendo llegar incluso a valores superiores a 9.0 cuando en los suelos existen contenidos apreciables de  $\text{NaHCO}_3$  disuelto. A estos valores el pH de la concentración de Fe soluble es bastante baja (Lindsay, 1979) y por lo tanto se dificulta la nutrición férrica del vegetal. Además, se ven perjudicados los principales mecanismos de respuesta de la planta a la deficiencia de hierro: se neutralizan los protones liberados por el vegetal, la alcalinización reduce la secreción de compuestos fenólicos y dificulta la reducción de  $\text{Fe}^{+3}$  en la membrana plasmática (Romheld y Marschner, 1986).

El bicarbonato afecta negativamente la solubilidad del Fe en el suelo, debido a que mantiene un pH básico, favoreciendo así la oxidación del  $\text{Fe}^{+2}$  y su paso a compuestos de baja solubilidad (Lindsay, 1984; Loeppert, 1986). En todo caso, la concentración de bicarbonato en el suelo está considerada por diferentes investigaciones como un factor clave en la inducción de la clorosis férrica en suelos calcáreos y alcalinos (Lucena *et al.*, 2007).

### 2.2.3. Temperaturas extremas

Las bajas temperaturas disminuyen el desarrollo radicular y, por tanto, provocan una reducción en la capacidad de absorción del Fe por la planta (Chaney, 1984). Lahav y Turner (1984) estudiaron el efecto de la temperatura en el proceso de absorción del Fe en plataneras. Estos autores encontraron que los máximos de absorción se producían por encima de los 37/30 °C (temperatura día/noche) y que cuando las temperaturas descendían hasta 17/10 °C, la absorción era dos o tres veces menor que en el óptimo de temperatura.

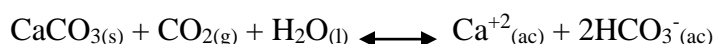
### 2.2.4. Factores nutricionales

En relación a los macronutrientes, Loeppert *et al.* (1994) observaron que altos niveles de Na y K provocaban un incremento de la clorosis en el vegetal debido al deterioro que genera en

la estructura del suelo, en las relaciones suelo-agua y en la aireación bajo condiciones de humedad. Respecto al metabolismo del Fe en la planta, se debe llevar en cuenta que este presenta baja movilidad en los tejidos vegetales. Esa movilidad es afectada, negativamente, por varios factores, como el elevado contenido de P, deficiencia de K, cantidad elevada de Mn. También ha sido observada la deficiencia de Fe en función de la acción de otros elementos metálicos, como el Cu, que puede substituir el Fe en los quelatos del suelo, originando su inmovilización, bien como Zinc o Co, que presentan efectos similares, pero de menos importancia.

### 2.2.5. Aumento de la concentración de CO<sub>2</sub> en los suelos

En suelos calizos el CaCO<sub>3</sub> se encuentra en equilibrio según la siguiente reacción:



La hidrólisis del CaCO<sub>3</sub> se ve favorecida en condiciones de alta humedad y presión de CO<sub>2</sub>, por lo que los factores que favorecen un aumento de ésta causan aumento de la concentración de HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> y, en consecuencia, del riesgo de clorosis férrica, según Chaney (1984) y Loeppert (1986) entre estos factores esta un elevado contenido de agua en el suelo, un deficiente drenaje, la compactación, una elevada tasa de respiración de las plantas o de los microorganismos existentes en el suelo o un aumento de la población microbiana al aplicar enmiendas orgánicas.

Aunque en los suelos saturados se acentúa la reducción de Fe<sup>+3</sup> a Fe<sup>+2</sup>, ello no se corresponde necesariamente con una mejora en la asimilación del Fe por la planta. Según Zuo *et al.* (2007) el exceso de humedad en un suelo calcáreo agravo la clorosis férrica del cacahuate plantando en él como consecuencia del aumento de la concentración de bicarbonato.

Un alto grado de compactación del suelo dificulta el intercambio gaseoso de la atmósfera del suelo con el exterior, produciendo un aumento de CO<sub>2</sub> y consecuentemente de HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Igualmente, bajas temperaturas también pueden incrementar la concentración de HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> en el suelo, ya que al disminuir la temperatura aumenta la solubilidad del CO<sub>2</sub> en agua. (Sánchez, 2012).

### 2.2.6. Factor planta

Según Havlin *et al.* (1999), a través de la difusión de  $\text{Fe}^{+3}$  y  $\text{Fe}^{+2}$  a las raíces, el  $\text{Fe}^{+3}$  es reducido a  $\text{Fe}^{+2}$  antes de ser absorbido. El genotipo de las plantas difiere en su habilidad de tomar el Fe. Las plantas tienden a mostrar cierta tolerancia a bajos niveles de Fe. La habilidad de las plantas para absorber y traslocar el Fe parece ser genéticamente controlado por los procesos adaptivos que responden a la deficiencia o al estrés de Fe. Algunas de las reacciones bioquímicas y cambios permiten la eficiencia del Fe en plantas a tolerar y adaptar al estrés del Fe es como sigue: a) excreción del ion  $\text{H}^+$  de las raíces, b) excreción de varios reductores o componentes quelatantes de las raíces, c) tasa de reducción ( $\text{Fe}^{+3}$  a  $\text{Fe}^{+2}$ ) incrementa en las raíces, d) incremento en ácidos orgánicos, particularmente citrato, e) transporte adecuado del Fe de las raíces, f) menor acumulación de P en las raíces y hojas.

### 2.3 El hierro en la planta

El Fe es absorbido por las raíces de las plantas como  $\text{Fe}^{+2}$  en mayor concentración, y  $\text{Fe}^{+3}$  en menos concentración (Havlin *et al.*, 1999, Barker y Pilbeam, 2007). Está aceptado que la planta toma preferentemente el  $\text{Fe}^{+2}$ , para ello se ve obligada a reducir la forma predominante de Fe en los suelos aerobios ( $\text{Fe}^{+3}$ ). Este proceso lo realiza una enzima reductasa, situada en la membrana plasmática de la raíz (Bienfait, 1985; Romheld, 1987).

En la absorción de Fe son desarrollados por lo menos dos procesos: el primero, que es una característica de las cotiledóneas y de las gramíneas no cotiledóneas, los protones son liberados del interior de las raíces, el que provoca acidificación de la rizósfera (Taiz y Zeiger, 2013). La capacidad de las raíces en reducir  $\text{Fe}^{+3}$  para  $\text{Fe}^{+2}$  es fundamental en la absorción de este catión por muchas plantas, ya que este necesita ser reducido antes de ser absorbido (Chaney *et al.*, 1972). El segundo proceso, que ocurre en gramíneas como cebada, maíz y avena, desarrolla la extrusión de sideróforos por las raíces. Después de ser liberados los sideróforos, ellos forman complejos con el  $\text{Fe}^{+3}$  (Taiz y Zeiger, 2013), los cuales son transportados para el interior de las células de las raíces (Epstein y Bloom, 2005).

La transferencia de electrones entre las moléculas orgánicas y el Fe provee el potencial de mucho de las transformaciones enzimáticas. Muchas de estas enzimas son desarrolladas en la síntesis de clorofila (Havlin *et al.*, 1999).

### 2.3.1. Transporte de hierro en la planta

El ion ferroso se transporta a través del córtex radicular vía simplasto por medio de los plasmodesmos, al parecer en forma de  $\text{Fe}^{+2}$  nicotinamida (Pich *et al.*, 1997; Stephan, 2002). A continuación, y todavía en el simplasto del sistema radicular, el  $\text{Fe}^{+2}$  sufre una oxidación a  $\text{Fe}^{+3}$ . Una vez en forma de  $\text{Fe}^{+3}$  se transporta a las partes superiores de la planta vía xilema, en forma de un complejo soluble de dicitrato (Tiffin, 1970; Cambell y Redinbaugh, 1984; López-Millán *et al.*, 2000a; Mengel y Kirkby, 2001; Stephan, 2002). Una vez que el Fe llega a las hojas, debe atravesar de nuevo la membrana plasmática de las células foliares. Este paso requiere de nuevo la reducción de  $\text{Fe}^{+3}$  a  $\text{Fe}^{+2}$  proceso que es llevado a cabo por una enzima reductasa similar al de la raíz (Bruggemann *et al.*, 1993; de la Guardia y Alcantara, 1996; González-Vallejo *et al.*, 1998; Rombolá *et al.*, 2000). Aunque el transporte se realiza vía xilema, también se ha encontrado Fe en el floema.

La capacidad para transportar este ion está relacionada con la respuesta de las plantas ante carencias de Fe. El transporte de  $\text{Fe}^{+3}$  en el floema se realiza como  $\text{Fe}^{+3}$  - nicotinamina (Becker *et al.*, 1992; Stephan y Scholz, 1993). Se ha de tener en cuenta que la existencia de altas concentraciones de  $\text{Fe}^{+2}$  en el citoplasma celular tienen efectos tóxicos (Mengel y Kirkby, 2001). Por este motivo, el Fe debe ser rápidamente oxidado a  $\text{Fe}^{+3}$ . Para ellos el ion ferroso es transportado hasta los cloroplastos donde es oxidado a  $\text{FeOOH}$  y acumulado en forma de una fosfoproteína denominada fitoferritina, proteína multimérica que actúa secuestrando átomos de Fe en forma mineral estable dentro de un recubrimiento proteínico (Theil, 1987; Andrews *et al.*, 1992; Laulhere y Briat, 1993), constituyendo una reserva de Fe no tóxica en la célula. La fitoferritina se encuentra principalmente en los cloroplastos, pero no está confinada únicamente en este orgánulo, ya que también se ha encontrado en el xilema y en el floema (Smith, 1984). Este compuesto es muy abundante en las semillas y se va degradando tras la germinación, probablemente catalizada por la liberación de  $\text{Fe}^{+2}$ , y la generación de radicales hidroxilos que destruyen el recubrimiento proteico (Bienfait, 1989; Lobreaux y Briat, 1991), también puede actuar como almacén de Fe, el ion férrico es reducido de nuevo a ion ferroso, que en forma de Fe-nicotinamina podría ser transportado a través de las células (Laulhere y Briat, 1993).

### 2.3.2. Funciones del hierro en la planta

La facilidad del Fe para cambiar de estado de oxidación y forma quelatos estables y solubles hace que esté implicado en un gran número de funciones fisiológicas. Este elemento se presenta en los vegetales formando parte de numerosos sistemas enzimáticos (Marschner *et al.*, 1986; Terry Zayed, 1995; Mengel y Kirkby, 2001), que se pueden dividir en hemídicos y no hemídicos. Dentro de los sistemas enzimáticos hemídicos se encuentra en: citocromos, complejos proteicos hierro-porfirínicos, que son constituyentes de los sistemas redox de los cloroplastos, las mitocondrias y en la cadena redox de la nitrato reductasa (Clarkson y Hanson, 1980; Marschner, 1995).

Las catalasas que intervienen en la fotorespiración y en el ciclo de Calvin que facilitan la dismutación del  $H_2O_2$  en el  $H_2O$  y  $O_2$  en los cloroplastos (Bar-Akiva *et al.*, 1978; Romheld y Marschner, 1991) peroxidasas son abundantes en plantas y al igual que las catalasas catalizan varios procesos. Por un lado, favorecen la eliminación de  $H_2O_2$  en los cloroplastos y por otro catalizan la polimerización de fenoles a lignina en la rizodermis y endodermis de las raíces. También intervienen en la biosíntesis de lignina y suberina (Marschner, 1995). El Fe juega un papel muy importante en la fotosíntesis, no solo por su acción en la síntesis de clorofilas (Millet *et al.*, 1994) también, por su influencia en la morfología de los cloroplastos (Terry y Abadía, 1986; Marschner, 1995).

Los sistemas enzimáticos no hemídicos se caracterizan porque el Fe está coordinado con un grupo tiol de cisteína o con S inorgánico formando enlaces Fe-S o con ambos (Romheld y Marschner, 1991). El más conocido de los componentes de los sistemas no hemídicos es la ferredoxina, proteína férrica que actúa como aceptor final de electrones en un gran número de procesos metabólicos como la fotosíntesis, la reducción de nitrato y de sulfato (Mengel y Kirkby, 2001; Marschner, 1995). Su alto potencial redox le permite reducir sustancias como  $ANDP^+$ , nitrato, oxígeno, sulfato. La acotinasas es una enzima con hierro no hemídico que cataliza la isomerización de citrato a isocitrato en el ciclo de los ácidos tricarbónicos (Hsu y Miller, 1968; Beinert y Kennedy, 1989; Marschner, 1995). Otras enzimas con Fe no hemídico son las riboflavinas, se acumulan en las plantas deficientes de Fe unas 200 veces más que en plantas que crecen en medios con suficiencia de este elemento (Welkie y Miller, 1989). Esta acumulación de riboflavina se produce porque la deficiencia de Fe da lugar a alteraciones en el metabolismo de las purinas, ya que el enzima xantina oxidasa se ve

fuertemente dañado (Schlee *et al.*, 1968). Otros sistemas de Fe no hemídicos son las isoenzimas superóxido dismutasa, que eliminan los radicales libres aniónicos superóxido, se trata de isoenzimas comunes en cloroplastos, pero también pueden encontrarse en mitocondrias, peroxisomas y citoplasma (Droillard y Paulin 1990), o la xantina oxidasa que tienen funciones en procesos metabólicos tales como la fotosíntesis, la respiración mitocondrial, la fijación de N<sub>2</sub>, la reducción de SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> a SO<sub>3</sub><sup>-2</sup>, etc. El Fe también activa una serie de enzimas tales como ácido aminolevulinico sintetasa, coproporfirinógeno oxidasa, y juega un papel importante en las síntesis de RNA (Romheld y Marschner, 1991).

Hay una serie de enzimas menos conocidas en las que el Fe actúa bien como un componente metálico en reacciones redox o como un elemento de unión entre enzima y sustrato (Marschner, 1995). Entre ellas las lipoxigenasas que regulan la peroxidación de lípidos, por lo que están implicadas en la senescencia celular y tejidos en las combinaciones incompatibles huésped – patógeno y, por tanto, en la resistencia a las enfermedades (Nagarathana *et al.*, 1992).

En raíces de plantas deficientes en Fe se han encontrado distintos cambios metabólicos que incluyen: a) acumulación de ácidos orgánicos, principalmente citrato y malato (Rombola *et al.*, 2002; Abadía *et al.*, 2002; Ollat *et al.*, 2003); b) cambio en el estado de oxidación del citoplasma (Schmidt y Schuck, 1996). Zaharieva y Abadía (2003) y Zaharieva *et al.* (2004) han encontrado, en raíces de remolacha azucarera deficientes en hierro, aumento de la concentración de ácido ascórbico y glutatión reducido (GSH), y cambios en la actividad de los enzimas ascorbato reductasa de radicales libres (AFR-R), ascorbato peroxidasa (APX), y glutatión reductasa (GR), que como componentes del ciclo ascórbico-glutatión participan en la defensa antioxidante de las células; c) aumento en la actividad de las fosfoenolpiruvato carboxilasa (PEPC) y de varios enzimas del ciclo de los ácidos tricarboxílicos (Agnolon *et al.*, 2002; Ollat *et al.*, 2003). Debido a que la acumulación de ácidos orgánicos en las raíces inducida por deficiencia de Fe coincide con el aumento de la liberación de protones y la actividad reductasa de quelatos férricos en diferentes especies (Brancodoro *et al.*, 1995), se ha propuesto que la alcalinización del citoplasma asociada con la liberación de protones podría activar la PEPC (Yang *et al.*, 1994; Rabotti *et al.*, 1995) lo que puede alimentar el ciclo de los ácidos tricarboxílicos conduciendo a la acumulación de ácidos orgánicos (Miller *et al.*, 1990). El enzima PEPC cataliza la incorporación de bicarbonato en un ácido orgánico C<sub>3</sub>, fosfoenol piruvato, generando oxalacetato, que es transformado a malato por malato



deshidrogenasa (Lance y Rustin, 1984; Rombola *et al.*, 2005). Estos ácidos orgánicos podrían mantener el equilibrio iónico y de pH en el citoplasma de las células radiculares. Todos estos hechos parecen conducir en las raíces de plantas deficientes en Fe, a una mayor disponibilidad de aminoácidos libres, en particular aspartato y glutamato, que daría lugar a un aumento en la síntesis tanto de proteínas como RNA (Pontiggia *et al.*, 2003).

El principal efecto de la deficiencia de Fe en las hojas se produce en los cloroplastos que ven alterada su estructura y funciones. Se reduce el número de tilacoides y granas y se altera la estructura del tilacoide (Soldatini *et al.*, 2000). La reducción en la membrana del tilacoide va acompañada de una disminución en todos los pigmentos que recogen la luz: clorofilas a y b y carotenos, si bien los carotenos disminuyen en menor proporción que las clorofilas (Donnini *et al.*, 2003). El característico color amarillo de las hojas cloróticas es una consecuencia del desequilibrio entre los contenidos de clorofila y carotenos (Abadía, 1992; Terry y Zayed, 1995). También se ve reducido el transporte fotosintético de electrones; el Fe es uno de los constituyentes de muchos transportadores de electrones (Solsatini *et al.*, 2000; Donnini *et al.*, 2003). Estos hechos conducen a una reducción en la capacidad fotosintética de la planta que se traduce en una disminución de azúcares, almidón, algunos aminoácidos y acumulación de otros, con la consiguiente alteración en la síntesis de proteínas (Terry y Zayed, 1995), y enriquecimiento de los lípidos en ácidos grasos insaturados (Terry y Abadía, 1986).

Al igual que las raíces, en hojas y savia del xilema se acumulan ácidos orgánicos, principalmente citrato y malato (Palmer *et al.*, 1963; Thoiron *et al.*, 1997), y se incrementa la actividad de PEPC y de distintas enzimas del ciclo de los ácidos tricarbóxicos como malato deshidrogenasa (MDH), acotinasas, fumarasa, citrato sintetasa, isocitrato deshidrogenasa (López-Milla *et al.*, 2001b).

El incremento en ácidos orgánicos en las hojas deficientes en Fe no es probable que se deba a un aumento en la fijación foliar de carbono, tienen lugar en hojas con una maquinaria fotosintética muy alterada (Winder y Nishio, 1995), que da lugar a una marcada disminución en la concentración de clorofila, una muy baja tasa fotosintética (López – Millán *et al.*, 2001b), y un bajo contenido en azúcares (Arulananthan *et al.*, 1990). Es muy probable que los aniones orgánicos jueguen un importante papel en el transporte de Fe desde las raíces a las hojas (Cataldo *et al.*, 1988; López – Millán *et al.*, 2000a).

Cuando las plantas se desarrollan en hidroponía, se encuentra que, tras el análisis foliar, existe una correlación entre el contenido de clorofilas y de Fe en las hojas, dando lugar a contenidos de Fe total bajos en las hojas cloróticas. Es decir, a medida que aumenta la concentración de Fe se incrementa el contenido en clorofilas y viceversa (Terry, 1980; Abadía, 1992). Sin embargo, cuando las plantas se desarrollan en el campo, no se encuentra una relación entre estos dos parámetros ya que las hojas cloróticas suelen contener una concentración de Fe igual o superior a las de las hojas verdes (Chen y Barak, 1982; Hamze y Nimah, 1982; Morales *et al.*, 1998).

El hecho de que las hojas cloróticas deficientes en Fe, con frecuencia tengan una concentración de Fe mayor que las verdes se denomina paradoja de la clorosis férrica (Chlorosis paradox) (Romheld, 2000). Esto sugiere que, en deficiencia de Fe, parte del Fe tomado desde el suelo por la reductasa de Fe quelado se inmoviliza y acumula como formas inactivas de Fe en alguna parte de la hoja (Morales *et al.*, 1998).

### **2.3 Situación de los quelatos de hierro en la agricultura**

El término “quelato” se refiere a una configuración en anillo que resulta de la combinación de un ion metálico con dos o más grupos donadores de electrones de una misma molécula, mediante enlaces de coordinación que cierran el anillo. Los metales ligados en esta forma pierden sus características catiónicas, por lo que son más estables y permanecen más tiempo en forma aprovechable para las plantas (Resnik, 1980).

El primer agente quelante usado para la obtención de quelatos de Fe fue EDTA (*ácido etilendiaminotetraacético*), sin embargo, su aplicación en suelos y aguas calizas resulta ineficaz, ya que no es estable a valores de pH alcalinos, además la presencia de  $\text{Ca}^{2+}$  desplaza al  $\text{Fe}^{3+}$  del quelato y éste precipita como óxidos e hidróxidos de Fe insolubles (Lucena *et al.*, 1988). De manera que, ha sido necesario diseñar nuevos quelatos de Fe con agentes quelantes capaces de permitir su aplicación en condiciones neutras o alcalinas.

Las aplicaciones al follaje son las más utilizadas para corregir clorosis en diversos cultivos, asimismo, las aplicaciones al suelo de quelatos sintéticos podrían ser efectivos para algunas otras especies, dependiendo de las condiciones del suelo. Para este propósito, el quelato más efectivo es el Fe-EDDHA (*di ácido o-hidrioxifenilacético*). La molécula del agente quelante

EDDHA posee dos carbonos quirales que dan lugar a la formación de dos isómeros geométricos cuando se unen con el Fe: la forma meso y la mezcla racémica (Lucena *et al.*, 1996; Lucena, 2003). Los quelatos comerciales normalmente contienen el mismo porcentaje de ambos isómeros geométricos, pero su estabilidad, reactividad en el suelo (Hernandez-Apaloaza y Lucena, 2001) y la respuesta de las plantas es diferente.

Anteriormente, las aplicaciones de quelatos de hierro al suelo se recomendaban en aquellos suelos con pH por debajo de la neutralidad; en suelos alcalinos se recomendaba aplicarlos en aspersiones foliares, sin embargo, en la actualidad el FeDDHA es un quelato que en este tipo de suelos presenta ventaja respecto a otros como Fe-EDTA, Fe-DTPA y Fe-HEDTA, al ser más estable a pH alto (Hagstrom, 1984). Inclusive, se empieza a utilizar el Fe-EDDHMA (*ácido etilendiamino dihidroximetilfenilacético*), un derivado del EDDHA, que es aún más estable que éste en pH alto (Hjelte, 1989).

Una desventaja de los micronutrientes quelatados, en relación al sulfato ferroso, es su mayor costo tomando como base kilogramo a kilogramo, sin embargo, se requieren cantidades pequeñas para corregir la clorosis. Un ejemplo lo muestran los resultados de un trabajo con árboles de cítricos en Florida, en donde 1.13 kg de hierro como sulfato ferroso por árbol mostró una disminución en la condición clorótica, pero se obtuvieron resultados similares aplicando solo de 10 a 50 g de Fe por árbol en forma compuesta de hierro quelatado (Tisdale y Nelson, 1977).

Las aspersiones foliares de quelatos, resultan talvez, más económicas que aplicarlos al suelo, debido a que se elimina todas las reacciones adversas del suelo para la asimilación del fierro, además se aplica el elemento justo en los puntos donde se requiere para normalizar el metabolismo de la planta (Bowen, 1981).

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 Suelo

Los suelos usados en este experimento fueron colectados de 0 – 30 cm de profundidad, provenientes del departamento de Piura, provincia de Paita, distrito de Colán. Se distribuye en forma localizada en la zona de vida Desierto superárido – tropical, la temperatura media anual es de 24 °C, la precipitación anual promedio de 20 mm, con una altitud de 50 m.s.n.m.

#### 3.2 Ubicación

El experimento fue ejecutado en el laboratorio de Fertilidad del Suelo “Sven Villagarcía Hermosa”, de la facultad de Agronomía de la UNALM.

#### 3.3 Fuentes experimentales

Las fuentes de hierro usadas en el experimento fueron:

Fuente	Tipo de fertilizante	Concentración de Fe (%)
Ultraferro®	Quelato EDDHA	6
Carboxy Fe®	Quelato EDDHA + Ácidos carboxílicos	9
FeSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O	Sulfato ferroso	20

#### 3.4 Fase de laboratorio

##### 3.4.1 Análisis de caracterización

Las características físicas y químicas de los suelos fueron determinadas según los métodos y técnicas descritos por el Laboratorio de Análisis de Suelos y Plantas de la UNALM. Los resultados de dichos análisis se presentan en el Cuadro 1.

El suelo Conchero es de clase textural franco arcilloso, con un contenido de arcilla de 27%; pH moderadamente básico (7.73); fuertemente salino (7.40); contenido muy alto en carbonatos (37.10%); bajo en materia orgánica (0.35%); bajo en fósforo disponible (1.0 ppm); medio en potasio disponible (119 ppm); CIC alto (16.00 cmol kg<sup>-1</sup>) y saturación de bases de 100 %. El suelo Calichero es de clase textural franco arenoso, con un contenido de arcilla de 9 %; pH moderadamente básico (7.73); muy ligeramente salino (1.84); contenido muy alto en carbonatos (43.80%); bajo en materia orgánica (0.26%); bajo en fósforo disponible (4.4 ppm); medio en potasio disponible (101 ppm); CIC muy bajo (2.88 cmol kg<sup>-1</sup>) y saturación de bases de 100 %.

**Cuadro 1.** Características físicas - químicas de los suelos estudiados (0 – 30 cm)

	Conchero	Calichero
Análisis granulométrico		
Arena (%)	37	69
Limo (%)	36	22
Arcilla (%)	27	9
Clase textural	Franco arcilloso	Franco arenoso
pH H <sub>2</sub> O 1:1	7.74	7.73
CE (1:1) dS m <sup>-1</sup>	7.40	1.84
CaCO <sub>3</sub> (%)	37.10	43.80
Materia orgánica (%)	0.35	0.26
P (ppm)	1.0	4.4
K (ppm)	119	101
CIC (cmol kg <sup>-1</sup> )	16.00	2.88
Ca <sup>+2</sup> (cmol kg <sup>-1</sup> )	11.31	1.86
Mg <sup>+2</sup> (cmol kg <sup>-1</sup> )	1.30	0.52
K <sup>+</sup> (cmol kg <sup>-1</sup> )	0.25	0.26
Na <sup>+</sup> (cmol kg <sup>-1</sup> )	3.14	0.24
PSI (%)	19.6	8.3
Al <sup>+3</sup> + H <sup>+</sup> (cmol kg <sup>-1</sup> )	0.00	0.00
% SB (%)	100	100
% AC (%)	0.00	0.00

### 3.4.2. Análisis de disponibilidad de hierro

La disponibilidad de Fe de los suelos calcáreos del experimento, se cuantificó por la aplicación al suelo con soluciones de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , Fe-EDDHA (Ultraferro®) y Fe-EDDHA+ácidos carboxílicos (Carboxy Fe®), de concentraciones conocidas; el cual se aplicó sobre 2.5 g de suelo, cantidades equivalentes a  $2.5 \text{ cm}^3$  de soluciones de 5, 10, 20, 40 y 80 ppm de Fe.

Para efectos de la prueba de laboratorio a fin de observar el efecto de las fuentes y dosis de Hierro en la disponibilidad del hierro en cada suelo se empleó el siguiente método: Se colocaron las muestras tratadas en un lugar libre de polvo para permitir que el suelo se seque al aire. Este procedimiento se realizó en dos repeticiones, luego de que el suelo se secó al aire, se analizó el hierro disponible extraída con 25 ml de la solución extractante del  $\text{NaHCO}_3$  modificado y fue cuantificado por absorción atómica. Se realizó la representación de los resultados de adsorción sobre un gráfico, el trazado del grafico será la cantidad de elemento extraído sobre la cantidad del elemento añadido.

### 3.4.3. Factores de estudio de la prueba de disponibilidad de hierro.

Fuente de hierro:	$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
	Fe-EDDHA (Ultraferro®)
	Fe-EDDHA + ácidos carboxílicos (Carboxy Fe®)

Dosis de hierro (concentraciones)	5 ppm
	10 ppm
	20 ppm
	40 ppm
	80 ppm

### **3.4.4. Método de extracción de Hierro disponible por Bicarbonato de sodio Modificado.**

#### **3.4.4.1 Objetivo**

Establecer un método de ensayo para la determinación de microelementos disponibles tales como el hierro en muestras de suelos agrícolas.

#### **3.4.4.2 Principio del método**

Método es adecuado para suelos que contienen carbonatos de calcio, de tal manera que la concentración de calcio de la solución se reduce al precipitarse con como  $\text{CaCO}_3$ . El EDTA es un quelato que “atrapa” los elementos metálicos, los cuales quedan en el filtrado para su posterior cuantificación

#### **3.4.4.3 Equipos e instrumentos**

- Agitador Mecánico rotatorio
- Balanza analítica, precisión 0,1 mg
- Espectrofotómetro de absorción atómica (AA)
- Probeta de 100 ml

#### **3.4.4.4 Materiales**

- Tubos de plástico de centrifuga 50 ml
- Pipetas de 10 ml.

#### **3.4.4.5 Reactivos**

- Agua desionizada
- Solución extractora de Bicarbonato de sodio 0.5 M pH: 8.5 y EDTA\* sal disódica

(Disolver 42.0 g de bicarbonato de sodio en agua purificada, disolver por separado 3.72 g de EDTA, sal disódica en agua purificada y mezclar las 2 soluciones y llevar a 1 L. Ajustar el pH a 8.5 con NaOH 10 N).

- Ácido Clorhídrico (HCl, 37.5 % + 0.5 % p.a).

#### **3.4.4.6 Procedimiento**

- Pesar 2,5g de suelo en un tubo de plástico de 50 ml. Adicionar 25 ml de solución extractora.
- Agitar por 10 min en el agitador rotatorio mecánico. Centrifugar.
- Realizar una dilución 2x con medio de lectura 25% de HCl y enviar a lectura a absorción atómica.

#### **3.4.4.7 Cálculo**

$$X = LX \times (V/W) \times F$$

Donde:

LX = Lectura del elemento, ppm (AA)

V = Volumen de aforo 25 ml.

W = Peso de la muestra, 2.5 g

F = Factor de dilución 2

#### **3.4.4.8 Salud, seguridad y medio ambiente**

El Analista / Auxiliar- Analista al realizar la actividad debe de utilizar los siguientes EPPs:

- a) Lentes de seguridad.
- b) Respirador con filtros para vapores (Solo cuando va a dispensar ácido a las campanas).
- c) Careta de protección facial (Solo cuando va a dispensar ácido a las campanas).
- d) Pantalón antiácido.
- e) Botines con punta reforzada
- f) Guantes de nitrilo antiácido



### **3.5. Fase de invernadero**

Para la fase de invernadero se colocó 3 kg de muestra de cada suelo en estudio en una maceta de plástico de 4 kg de capacidad. Todos los tratamientos recibieron dosis de mantenimiento de N, P y K en una dosis de 200, 200 y 200 ppm, respectivamente para los suelos Conchero y Calichero. Aplicándose todo el fósforo a la siembra, todo el hierro de los tratamientos antes de la siembra y el nitrógeno y potasio en dos dosis luego del establecimiento de las plántulas.

La siembra se realizó a las 24 horas de aplicación de los niveles P y Fe, se sembró en 54 macetas seis semillas de maíz híbrido a 1 cm de profundidad y se desahijó a la semana de germinación y cuando las plántulas tenían de 10 a 15 cm, dejando cuatro plantas por maceta. Los riegos se efectuaron siempre con agua destilada y se mantuvo a capacidad de campo. Después de 35 días de la siembra se efectuó la cosecha.

### **3.6. Procedimiento de análisis de datos**

#### **3.6.1. Determinación de producción de materia seca**

Una vez cortadas las plantas en el invernadero, se procedió a lavar inicialmente con agua de caño todas las muestras obtenidas tanto de la parte aérea y radicular de la planta.

Luego se lavaron con agua desionizada y después se colocaron en bolsas de papel para secarlas a estufa a temperaturas menor de 70 °C, hasta que el peso se mantuvo constante.

#### **3.6.2. Análisis químico de la materia seca**

Las muestras de tejido vegetal secas y pesadas fueron molidas en un molino Wiley, usando una malla N° 40.

Los extractos para los análisis se obtuvieron por digestión vía seca, pesando un gramo de muestra de tejido foliar, colocándolo sobre crisoles de porcelana que fue puesta en una mufla a 500 °C por seis horas, luego la ceniza es hidratada con una solución de ácido nítrico perclórico en proporción 1:1 y enrasado a 50 ml con agua pura, para ser cuantificado la concentración por absorción atómica, de acuerdo al procedimiento utilizado por el laboratorio de suelos y plantas del Departamento de Suelos de la UNALM.

### 3.7. Tratamiento estadístico

El ensayo constituyó de un diseño completo al azar (DCA) con arreglo factorial (3 x 2 + 1 con tres repeticiones) correspondiendo a tres fuentes de Fe y dos niveles de Fe más un testigo control.

A nivel de laboratorio se usó el análisis de correlación lineal simple para ver la relación entre el nivel de hierro añadido y la disponibilidad de hierro en el suelo.

Se usó en análisis de varianza (ANVA) para determinar significación estadística y las características evaluadas de las interacciones de cada uno de los componentes fueron sometidos a la prueba de Duncan con un nivel de significancia de 0.05 de probabilidad, se usó el programa estadístico SAS (*Statistical Analysis System*) versión 9.2 (SAS Institute, 2008).

#### 3.7.1. Modelo aditivo lineal

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \epsilon_{ijk}$$

**Donde:**

$Y_{ijk}$  = Es la variable respuesta de la k-ésima observación bajo el j-ésimo nivel del factor M, sujeto al i-ésimo nivel del factor A.

$\mu$  = Constante, media de la población a la cual pertenecen las observaciones.

$\alpha_i$  = Efecto del i-ésimo nivel del factor M.

$\beta_j$  = Efecto del j-ésimo nivel del factor A.

$(\alpha\beta)_{ij}$  = Efecto de la interacción entre el i-ésimo nivel del factor M, en el j-ésimo nivel del factor A.

$\epsilon_{ijk}$  = Es el efecto aleatorio del error experimental obtenido en la observación  $Y_{ijk}$

**Para:**

i= 1, 2,3 niveles del factor M.

j= 1, 2 niveles del factor A.

k= 1, 2, 3 repeticiones

**3.7.2. Análisis de variancia**

**Cuadro 2:** Esquema del análisis de variancia

Fuente de variabilidad	GL
Fuentes de Fe (M)	2
Niveles de Fe (A)	1
Interacción (MxA)	2
Fac. x testigo	1
Error experimental	14
Total	20

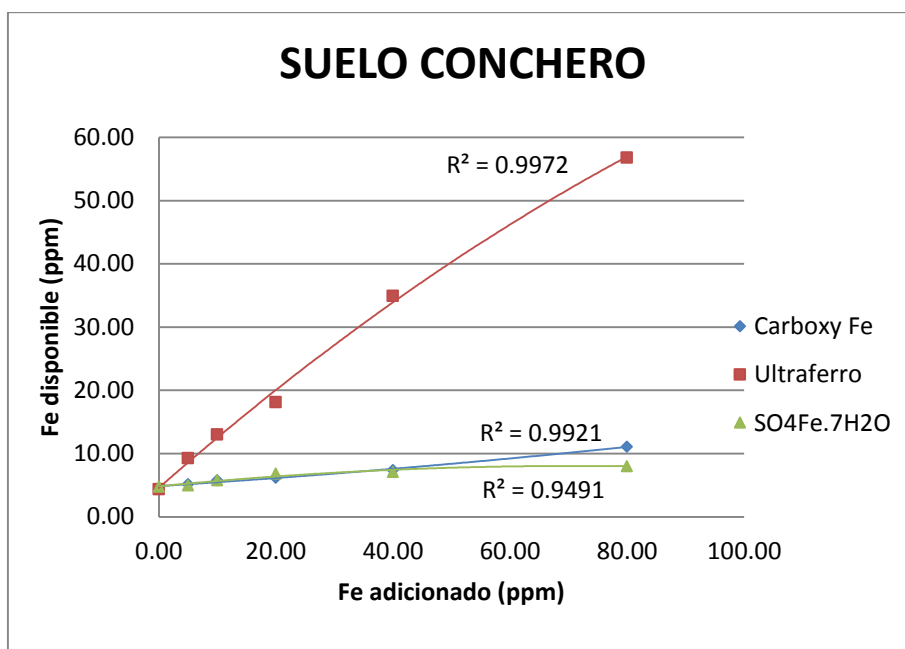
## IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

### 4.1. Efecto de fuentes y dosis de hierro en la disponibilidad de hierro a nivel de laboratorio.

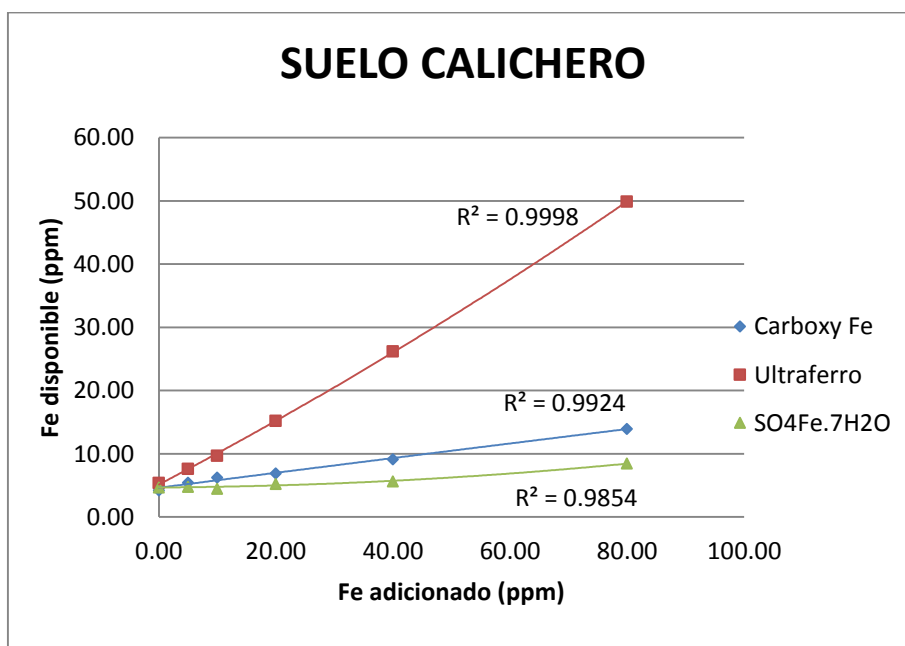
De los valores encontrados, se calcularon las cantidades de Fe disponibles para cada fuente y niveles de Fe aplicado al suelo. Estos datos permitieron determinar la relación entre la cantidad de Fe adicionado y la concentración disponible. Los resultados obtenidos nos indican que, para ambos suelos, se observa que a medida que se aumenta la concentración de Fe aplicados, sus disponibilidades en el suelo tienden a aumentar.

En la figura 1 y 2 se observan las respuestas de los suelos Conchero y Calichero a la aplicación de fuentes y dosis de hierro. Los resultados nos indican que a mayor dosis de hierro hay una mayor disponibilidad, siendo este más marcado cuando se aplica el Fe-EDDHA (Ultraferro®) a diferencia de fuentes como el Carboxy Fe® y el sulfato ferroso. Aparentemente el Carboxy Fe® y el  $\text{SO}_4\text{Fe}\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , forman posiblemente compuestos que el bicarbonato no lo puede extraer.

Según Havlin *et al.* (1999), el Fe-EDDHA es el quelato más estable y preferido como fuente de fertilizante, debido a que el EDDHA está fuertemente complejoado al Fe y es estable en un amplio rango de pH del suelo. Esta estabilidad del quelato impide la disociación de la molécula y el desplazamiento del Fe existente en el suelo (Wallace, 1966).



**Figura 1.** Relación entre Fe adicionado (ppm) y Fe disponible en el suelo Conchero



**Figura 2.** Relación entre Fe adicionado (ppm) y Fe disponible en el suelo Calichero

Asimismo, se observa una mayor disponibilidad de Fe en el suelo Conchero en comparación con el suelo Calichero para la fuente de Fe-EDDHA (Ultraferro®), esto podría ser explicado por el hecho de responder a las características asociadas al fenómeno tales como el contenido de carbonato de calcio, materia orgánica, el cual está incrementando así la deficiencia de Fe

y su baja solubilidad. A pesar de que algunos trabajos han demostrado que cuando el contenido de arcilla de un suelo es elevado, los iones férricos ( $\text{Fe}^{+3}$ ) puede quedar adsorbidos por éstas y permanecer fuertemente fijados a ellas, dificultándose su disponibilidad (Kolesch *et al.*, 1987a, b), en el presente trabajo se verificó que el suelo con mayor porcentaje de arcilla, no es el que presenta una menor disponibilidad de Fe. Esto probablemente se deba a que el suelo Conchero presenta un menor contenido de carbonato de calcio y mayor contenido de materia orgánica en comparación que el suelo Calichero, observándose así una mayor disponibilidad de Fe en el suelo. Este comportamiento se corrobora con diversos trabajos (Loeppert *et al.*, 1994; Havlin *et al.*, 1999) quienes demuestran que los suelos calizos son una de las principales causas de la deficiencia de Fe, como consecuencia de la presencia del ion bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) producido por la disolución del  $\text{CO}_2$ . El aumento de la disponibilidad de Fe a medida que aumenta el contenido de materia orgánica en el suelo fue también verificado por (Sadana y Nayyar, 1997), quien menciona que la adición de la materia orgánica mejora la estructura del suelo lo que facilita el intercambio de gases que reducen la acumulación de  $\text{CO}_2$  y, por consiguiente, la producción de bicarbonato, facilitando la solubilización del Fe.

## **4.2. Resultados del experimento de invernadero**

### **4.2.1. Efecto de la fuente y nivel de Fe en el rendimiento de materia seca en la parte aérea del maíz (*Zea mays* L.) de los suelos en estudio**

Del Cuadro 3, para los suelos Conchero y Calichero, se puede observar en forma general un incremento en el rendimiento de materia seca a medida que se incrementa los niveles de Fe para los diferentes productos aplicados. Asimismo, se puede observar que los tratamientos testigos presentaron menor materia seca, el cual se podría correlacionar a la poca disponibilidad de Fe, debido a valores de carbonatos y pH relativamente altos que tienden a inmovilizar este elemento. Morris *et al.* (1990), encontró que el peso seco de la planta de soya cultivada en suelos calcáreos, correlacionó con el Fe total en la misma ( $r=0,83^{**}$ ), señalando que la planta simplemente produce más materia seca con mayor cantidad de Fe. El aumento de la producción de materia seca podría sustentarse en una mejora de la eficiencia fotosintética, al aumentar el contenido de clorofila en las hojas a medida que se aumenta los niveles de Fe aplicado (Pastor *et al.*, 2000).

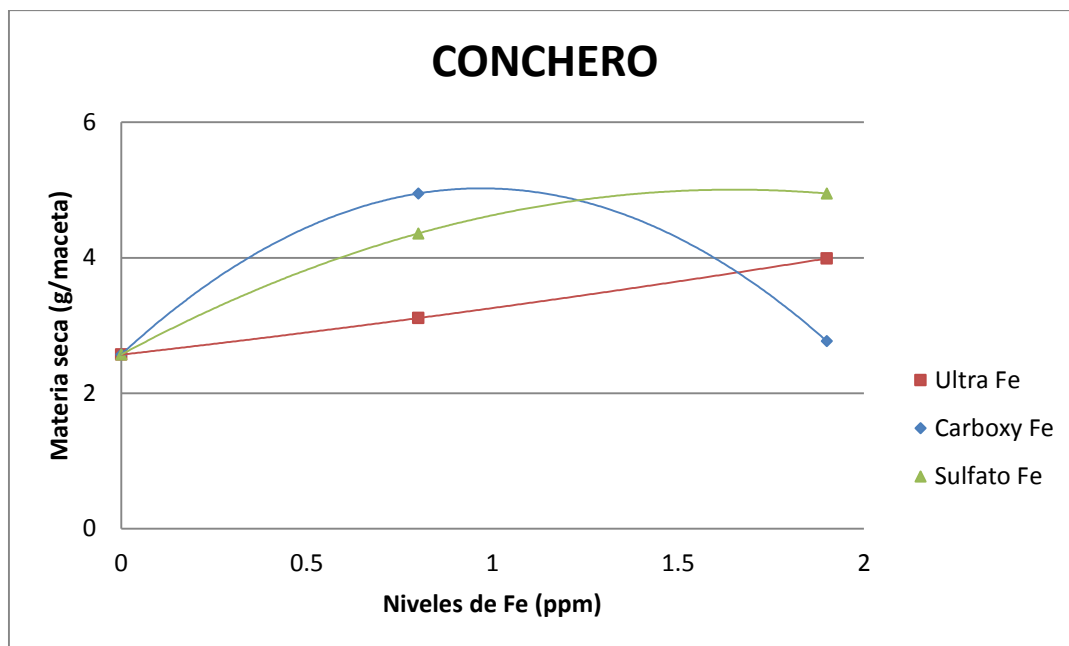
**Cuadro 3.** Valores medios de producción de materia seca (g/maceta) de la parte aérea del maíz (*Zea mays* L.) en función de las fuentes de Fe y sus niveles.

Niveles de Fe (ppm)	Conchero			Calichero		
	Carboxy Fe	Ultraferro®	Sulfato Fe®	Carboxy Fe®	Ultraferro®	Sulfato Fe
0,8	4.95 <sup>a</sup>	3.11 <sup>c</sup>	4.36 <sup>b</sup>	67.97 <sup>b</sup>	72.79 <sup>a</sup>	74.32 <sup>a</sup>
1,9	2.77 <sup>c</sup>	3.99 <sup>b</sup>	4.95 <sup>a</sup>	73.36 <sup>a</sup>	72.84 <sup>a</sup>	56.54 <sup>b</sup>
Testigo	2.57			67.57		

Medias seguidas de la misma letra en la fila no difieren entre sí por la prueba de Duncan ( $\alpha=0.05$ )

De la figura 3 para el suelo Conchero a pesar de presentar una mayor disponibilidad de Fe disponible, se observa una menor respuesta en rendimiento de materia seca en todos sus tratamientos en comparación con el suelo Calichero, lo cual se debió probablemente al mayor contenido de sales en el suelo y sodio intercambiable presente. Las sales en exceso perjudican el crecimiento de las plantas no solo por efectos directos sobre el potencial osmótico del agua del suelo (Brady y Weil, 2013) y por los iones potencialmente tóxicos presentes en elevadas concentraciones, mas también por la degradación de algunas propiedades físicas del mismo, reduciendo la infiltración del agua, intercambio gaseoso, crecimiento de las raíces y, con eso dificultando el crecimiento de las plantas (Novais *et al.*, 2007, Brady y Weil, 2013).

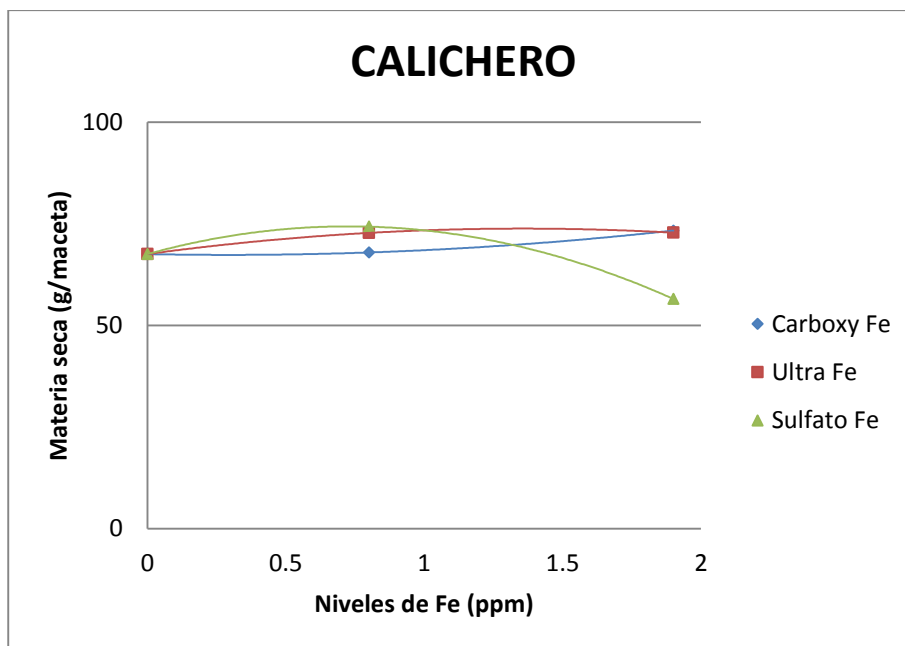
Asimismo, se puede observar en el suelo conchero, que la fuente de sulfato de Fe presentó mayor rendimiento de materia seca a medida que se incrementaba los niveles adicionados, estadísticamente superior a los otros productos a nivel de 1.9 ppm. Esto probablemente se debió a la combinación del sulfato con el carbonato de calcio presente en el suelo, originando sulfato de calcio, que actuó sobre el Na<sup>+</sup> del suelo (Novais *et al.*, 2007).



**Figura 3.** Efecto de la fuente y nivel de Fe en el rendimiento de materia seca en maíz (*Zea mays* L.) en el suelo Conchero.

De la figura 4, para el caso del suelo Calichero, se observa un incremento en el rendimiento de materia seca con la aplicación de las fuentes de Carboxy Fe®, Ultraferro® y sus niveles no observándose diferencias significativas a nivel de 1.9 ppm de Fe aplicado, esto tal vez por el mejor aprovechamiento del Fe proveniente de Fe-EDDHA que podría explicar su mejor estabilidad que presenta el complejo quelato con el ion Hierro en suelos calcáreos. Esta estabilidad del quelato impide la disociación de la molécula y el desplazamiento del hierro desde el quelato por otros cationes existentes en el suelo (Wallace, 1966). Así el Fe-EDDHA se ha revelado como un quelato extraordinariamente eficaz (Hellín *et al.*, 1987) en suplir Fe a corto plazo (Lucena, 2009). Trabajos realizados por Chen y Barak, 1982; Wallace, 1966, evidenciaron que la aplicación al suelo de Fe- EDDHA ha sido el tratamiento más eficaz y comúnmente usado contra la clorosis férrica en suelos calcáreos.

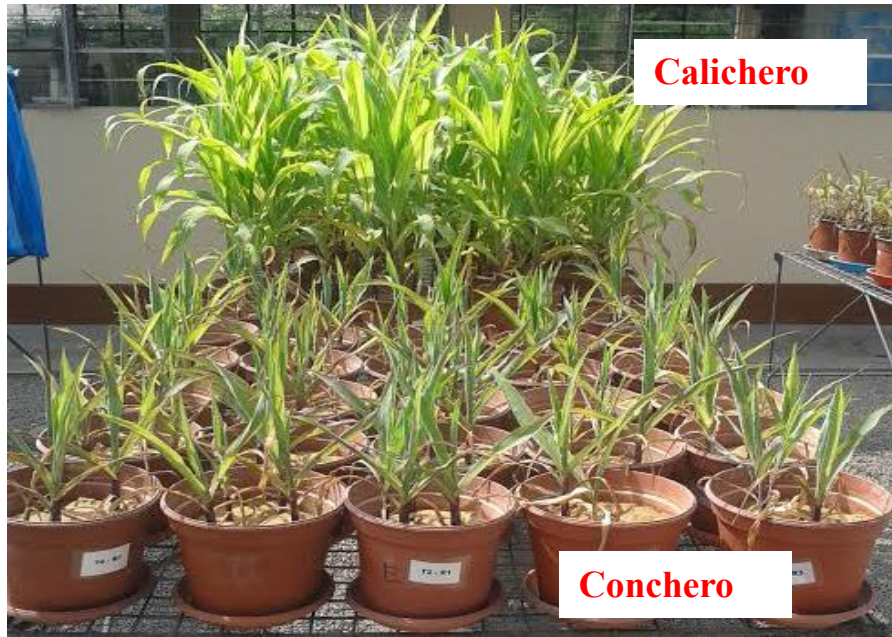




**Figura 4.** Efecto de la fuente y nivel de Fe en el rendimiento de materia seca en maíz (*Zea mays* L.) en el suelo Calichero.

#### 4.2.2. Efecto de la fuente y nivel de Fe en la concentración y absorción de Fe en la materia seca del maíz (*Zea mays* L.) de los suelos en estudio.

Del cuadro 4, para el suelo Conchero, se observa que el tratamiento testigo presenta mayor concentración de Fe en sus tejidos con respecto a los productos aplicados y niveles de Fe. Lo que aparentemente podría indicar una mayor capacidad de absorber Fe. Sin embargo, lo más probable sea que esto no es lo que ha ocurrido. La mayor concentración relativa de Fe obtenida podría deberse al menor crecimiento producido, por acción de la presencia de sales (Ver Cuadro 1), y da por resultado una acumulación relativa de Fe en los tejidos. Esto contradice los resultados de concentración de Fe encontrados en el suelo Calichero, en donde se observa un incremento de la concentración de Fe a medida que se aumenta los niveles de Fe para las fuentes de Carboxy Fe y Ultra Fe.



**Figura 5.** Crecimiento del maíz (*Zea mays* L.) en ambos suelos en estudio.



**Figura 6.** Presencia de clorosis en una planta de maíz (*Zea mays* L.).

**Cuadro 4.** Valores medios de la concentración de Fe (mg/kg) en la materia seca de la parte aérea del maíz (*Zea mays* L) en función de la fuente y nivel de Fe.

Niveles de Fe (ppm)	Conchero			Calichero		
	Foliar					
	Carboxy Fe®	Ultraferro®	Sulfato Fe	Carboxy Fe®	Ultraferro®	Sulfato Fe
0,8	56 <sup>c</sup>	1 319 <sup>a</sup>	1 052 <sup>b</sup>	357 <sup>a</sup>	163 <sup>b</sup>	17 <sup>c</sup>
1,9	80 <sup>c</sup>	734 <sup>a</sup>	430 <sup>b</sup>	373 <sup>a</sup>	174 <sup>c</sup>	213 <sup>b</sup>
Testigo	1 446			162		

Medias seguidas de la misma letra en la fila no difieren entre sí por la prueba de Duncan ( $\alpha=0,05$ )

De otro lado, se puede observar hojas con presencia de clorosis en todos los tratamientos a pesar de la aplicación de niveles de Fe. La baja respuesta de la planta en reverdecimiento, a pesar del incremento en la concentración foliar de Fe, se debió a una baja movilidad del Fe, provocada por las características del suelo que inducen una alta concentración del ion bicarbonato en el apoplasto (Zribi, 2002), el cual incrementa el pH y provoca la precipitación del Fe en ese espacio (Rivera-Ortiz *et al.*, 2009). La existencia de Fe inactivo en las hojas ha sido demostrada por varios autores (Kosegarten y English, 1994; Mengel, 1995; Tagliavini *et al.*, 1995), ya que en suelos calcáreos una parte del hierro absorbido no pasa a la membrana plásmica de la hoja, sino que queda depositado en el apoplasto (Tagliavini *et al.*, 2000).

En relación a los niveles de Fe, absorción de Fe para los suelos en estudio, los valores son tomados del cuadro 5. Para el caso del suelo Conchero, la menor producción de materia seca obtenido, determina que exista, relativamente una mayor concentración de este elemento en los tejidos y aparentemente una menor absorción de Fe. Consecuentemente, las hojas pueden tener un nivel aparentemente adecuado de hierro total, pero estar fisiológicamente deficientes en este elemento (Romheld, 2000).

En el caso del suelo Calichero, considerando que las plantas absorben el Fe<sup>+2</sup>, la aplicación de las fuentes y sus distintos niveles facilita la absorción de Fe, la cual es mucho mayor conforme los niveles de Fe se hacen más altos. Cuando más Fe disponible en el suelo, mayor será la gradiente de concentración de este elemento ocasionando, por lo tanto, un aumento en el contenido de Fe. Por lo tanto, la aplicación de los diferentes productos de Fe y sus niveles, facilitó la absorción de Fe, de ahí que se observe una mayor concentración de Fe a niveles altos de aplicación de este elemento

**Cuadro 5.** Valores medios de la absorción de Fe (g/maceta) en la materia seca de la parte aérea del maíz (*Zea mays* L.) en función de la fuente y nivel de Fe.

Niveles de Fe (ppm)	Conchero			Calichero		
	Foliar					
	Carboxy Fe®	Ultraferro®	Sulfato Fe	Carboxy Fe®	Ultraferro®	Sulfato Fe
0,8	0.28 <sup>c</sup>	4.10 <sup>b</sup>	4.58 <sup>a</sup>	24.10 <sup>a</sup>	11.83 <sup>b</sup>	1.22 <sup>c</sup>
1,9	0.22 <sup>c</sup>	2.93 <sup>a</sup>	2.13 <sup>b</sup>	27.37 <sup>a</sup>	12.70 <sup>b</sup>	11.84 <sup>c</sup>
Testigo	3.72			10.99		

Medias seguidas de la misma letra en la fila no difieren entre sí por la prueba de Duncan ( $\alpha=0,05$ )

## V. CONCLUSIONES

Los resultados experimentales obtenidos permiten extraer algunas conclusiones que a continuación se menciona:

1. A nivel de laboratorio, los resultados nos indican que a mayor dosis de hierro hay una mayor extractabilidad de hierro con bicarbonato de sodio modificado, siendo más alto cuando se aplica el Fe-EDDHA (Ultraferro®) a diferencia de fuentes como el Carboxy Fe® y el sulfato ferroso.
2. Para el suelo Conchero, se observó una menor producción de materia seca con respecto al suelo Calichero.
3. Para el suelo Calichero, la mejor fuente en la concentración a nivel foliar y absorción a nivel de macetas fue el Carboxy Fe®. Mientras que para la producción de materia seca el Ultraferro® fue la fuente que dio mejores resultados.
4. Para el suelo Calichero, se apreció un aumento en los rendimientos de materia seca a medida que se incrementó los niveles de Fe aplicado de las fuentes provenientes de EDDHA (Carboxy Fe® y Ultraferro®), mientras que con el sulfato ferroso fue más bajo rendimientos de materia seca a dosis más alta. Mientras que para la concentración a nivel foliar y absorción a nivel de macetas los mejores valores fueron con las dosis más altas en todas las fuentes.

## VI. BIBLIOGRAFÍA

Abadía, J. 1992. Leaf responses to Fe deficiency: a review. *J. of Plant Nutrition*. 15:1699-1992.

Abadía, J.; López-Millán, A.F.; Rombóla, A.; Abadía, A. 2002. Organic acids and iron deficiency: a review. *Plant and Soil*. 241:75-86.

Agnolon, F.; Santi, S.; Varanini, Z.; Pinton, R. 2002. Enzymatic responses of cucumber roots to different levels of Fe supply. *Plant and Soil*. 241:35-41.

Allen, B.L.; Hajek, B.F. 1989. Mineral occurrence in soil environments. In mineral in soil environments (2<sup>da</sup> Edition) (Dixon, J.B. Weed, S.B. eds). Soil Science Society of America. 677 South Segoe Road. Madison. WI 53711. USA. SSA Book Series. N° 1:199-278

Andrews, M.; Morton, J.D.; Lieffering, M.; Bisset, L. 1992. The partitioning of nitrate assimilation between root and shoot of a range of temperate cereals and pasture grasses. *Annals of Botany* 70:271-276.

Arulanantham, A.R.; Rao, I.M.; Terry, N. 1990. Limiting factors in photosynthesis. IV Regeneration of ribulose 1, 5-bisphosphate limits photosynthesis at low photochemical capacity. *Plant of Botany* 70:271-276.

Bar-Akiva, A.; Maynard, D.N.; English, J.E. 1978. A rapid tissue test for diagnosing iron deficiencies in vegetable crops. *HortScience*. 13:284-285.

Becker, R.; Grun, M.; Scholz, G. 1992. Nicotinamine and the distribution of iron in the apoplast and symplast of tomato (*Lycopersicon sculetum* Mill). *Planta*. 187:48-52.

Beinert, H.; Kenedy, M.C. 1989. Engineering of protein bound iron-sulfur clusters. A tool for the study of protein and cluster chemistry and mechanisms of iron-sulfur enzymes. *Eur. J. Biochem*. 186: 5-15.

- Bienfait, H.F. 1985. Regulated redox processes at the plasmalemma of plant root cells and their function iron uptake. *J. Bioenerg. Biomember.* 17:73-83.
- Bienfait, H.F. 1989. Presentation of stress in iron metabolism of plants. *Acta Bot. Neerl* 38:105-129.
- Blume, H.P. 1988. The fate of iron during soil formation in humid temperate environments. In: Stucki, J.W.; Goodman, B.A.; Schwertmann, U., eds. *Iron in Soils and clay minerals.* Dordrecht, D. Reidel. p. 749-777.
- Bowen, J.E. 1981. Hierro, elemento vital para plantas y animales. *Agricultura de las Américas* 30 (2). Intertec Publishing Corp. Kansas, USA. pp. 14, 16.
- Brancodoro, L.; Rabotti, G.; Scienza, A.; Zocchi, G. 1995. Mechanisms of Fe-deficiency in roots of vitis spp. In response to iron-deficiency stress. *Plant and Soil.* 171:229-234.
- Brady, N.C. and Weil, R.R. 2013. *Elementos da natureza e propriedades dos solos.* Tradução técnica: Igo Fernando Lepsch. 3 edição. Porto Alegre: Bookman. 686. p
- Bruggemann, W.; Mass-Kantel, K.; Moog, P.R. 1993. Iron uptake by leaf mesophyll cells: The role of the plasma membrane bound ferric chelate reductase. *Planta.* 190:151-155.
- Cambell, W.H.; Redinbaugh, M.G. 1984. Ferric citrate reductase activity of nitrate reductase and its role in iron assimilation by plants. *J. Plant Nutr.* 7:799-806.
- Cataldo, D.A.; Mcfadden, K.; Barland, T.R.; Wildung, R.E. 1988. Organic constituents and complexation of nickel (II), iron (III), cadmium (II) and plutonium (IV) in soybean xylem exudates. *Plant Physiol* 50: 208-213.
- Cesco, S.; Romheld, V.; Varanini, Z.; Pinton, R. 2000. Solubilization of iron water extractable humic substances. *J. Plant. Nutr. Soil Sci.* 163:285-290.
- Chaney, R.L.; Brown, J.C.; Tifin, L.O. 1972. Obligatory reduction of ferric chelates in iron uptake by soybeans. *Plant Physiology.* 50: 208-213.

- Chaney, R.L. 1984 Diagnostic practices to identify iron deficiency in higher plants. *J. Plant Nutr.* 7: 47-67.
- Chen, Y. and Barak, P. 1982. Iron nutrition of plants in calcareous soils. *Adv. Agron.* 35: 217-240.
- Clarkson, D.T.; Hanson, J.B. 1980. The mineral nutrition of higher plants. *Annu. Rev. Plant Physiol.* 31:239-298.
- Cornell, R.M. and Schwertmann, U. 1996. *The iron oxides.* Weinheim, VCH. 573p.
- De la Guardia, M.D.; Alcántara, E. 1996. Ferric chelate reduction by sunflower (*Helianthus annuus* L.) leaves: influence of light, oxygen, iron-deficiency and leaf age. *J. Exp. Bot.* 47 (298): 669-675.
- Donnini, S.; Castagna, A.; Guidi, L.; Zocchi, G.; Ranieri, A. 2003. Leaf responses to reduced iron availability in two tomatoes genotypes: T3238FER (iron efficient) and T3238fer (iron inefficient). *J. of Plant Nutrition.* 26: 2137-2148.
- Droillard, M.J.; Paulin, A. 1990. Isoenzymes of superoxide dismutase in mitochondria and superoxide isolated from petals of carnation (*Dianthus caryophyllus*) during senescence. *Plant Physiol.* 94: 1187-1192.
- Epstein, E., Bloom, A.J. 2005. *Mineral Nutrition of Plants: Principles and perspectives,* second ed. Sinauer, Sunderland, MA.
- González-Vallejo, E.B.; Susin, S.; Abadía, J. 1998. Changes in sugar beet leaf plasma membrane Fe (III) chelate reductase activities mediated by Fe deficiency, assay buffer composition, anaerobiosis and the presence of flavins. *Protoplasma.* 205: 163-168.
- Guerinot, M.L.; Yi, Y. 1994. Iron: nutritious, noxious, and not readily available. *Plant Physiol.* 104: 815-820.
- Hagstrom, G.R. 1984. Current management practices for correcting iron deficiency in plants with emphasis on soil management. *J. Plant. Nutr.* 7: 23-46.



Hamze, M.; Nimah, M. 1982. Iron content during lime induced chlorosis with two citrus root stocks. *J. Plant Nutr.* 5:797-804.

Havlin, J.L., Beaton, J.D., Tisdale, S.L., Nelson, W.L. 1999. *Soil Fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management*. 6<sup>th</sup> edition. New Jersey. 499 p.

Hernandez-Apaolaza, L.; Lucena, J.J. 2001. Fe (III)-EDDHA and EDDHMA sorption on Ca montmorillonite, ferrihydrite, and peat. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 49: 5258-5264.

Hellín, E., Ureña, R., Sevilla, F., Alcaraz, C.F. 1987. Comparative study on the effectiveness of several iron compounds in the iron chlorosis correction in Citrus plants. *J. Plants Nutr.* 10: 411-421.

Hjelte, N. 1989. The relative stability of the Fe-EDDHMA and FE-EDDHA in a pH range of 4 to 9. In Abstracts "5 th. International Symposium on iron Nutrition and interactions in Plants". Jerusalem, Israel. p 82.

Hsu, W.; Miller, G.W. 1968. Iron in relation to aconitase hydratase activity in *Glycine max*. *Merr. Biochim. Biophys. Acta*. 151:711-713.

Kampf, N. & Schwertmann, U. 1983b. Relações entre óxidos de ferro e a cor em solos cauliniticos do Ríó Grande do Sul. *R. bras. Ci. Solo*, 7:27-31.

Ker, J.C.; Curi, N.; Shaefer, C.E.G.R.; Torrado, P.V. 2012. *Pedologia. Fundamentos*. 1<sup>ra</sup> Ed. Viçosa, MG: SBCS. 343 p. ISBN 978-85-86504-09-9.

Kolesch, H., W. Höfer, and K. Schaller. 1987a. Effect of bicarbonate and phosphate on iron chlorosis of grape-vines with special regard to the susceptibility of the rootstocks. I. Field experiments. *J. Plant Nutr.* 10:207–230.

Kolesch, H., W. Höfer, and K. Schaller. 1987b. Effect of bicarbonate and phosphate on iron chlorosis of grape-vines with special regard to the susceptibility of the rootstocks. II. Pot experiments. *J. Plant Nutr.* 10:231–249.

- Kosegarten, H. and G. English. 1994. Effect of various nitrogen forms on the pH in leaf apoplast and iron chlorosis of *Glycine Max* L. Z. Planzenernaehr. Bodenk. 157: 401-405.
- Lahav, E.; Turner, D.W. 1984. The effect to temperature on the iron content of banana suckers. J. Plant Nutr (1-5): 725-732.
- Lance, C.; Rustin, P. 1984. The central role of malate in plant metabolism. Physiol. Veg. 22: 265-641.
- Laulhere, J.P.; Briat, J.F. 1993. Iron release and uptake by plant ferritin: effects of pH, reduction and chelation. Biochem. J. 290:693-699.
- Lindsay, W.L. 1979. Chemical equilibria in soils. Ed. John Wiley and Sons. N.Y. ISBN: 0-471-02704-9.
- Lindsay, W.L. 1984. Soil and plant relationships associated with iron deficiency with emphasis on nutrient interactions. J. Plant Nutr. 7:489-500.
- Lindsay, W.L., Schwab, A.P. 1982. The chemistry of iron in soils and its availability to Science Society of America. Madison.
- Lobreaux, S.; Briat, J.F. 1991. Ferritin accumulation and degradation in different organs of pea (*Pisum sativum*) during development. Biochem. J. 274: 601-606.
- Loeppert, R.H.; Wei, L.C.; Ocuwpaugh, R. 1994. Soil factors influencing the mobilization in calcareous soils. In: Biochemistry of metal micronutrients in the rhizosphere. J. a Maethey, D.E. Crowley y D.g. Luster (Eds). Lewis Publishers. Florida, USA: 343-360.
- Loeppert, R.H. 1986. Reactions of iron carbonates in calcareous soil. J. Plant Nutr. 9: 195-215.
- López-Millán, A.F.; Morales, F.; Abadía, A.; Abadía, J. 2000a. Effects of iron deficiency on the composition of the leaf apoplastic fluid and xylem sap in sugar beet. Implications for iron and carbon transport. Plant Physiol. 124:873-884.

López-Millán, A.F.; Morales, F.; Abadía, A.; Abadía, J. 2001b. Changes induced by Fe deficiency and Fe resupply in the organic acid metabolism of sugar beet (*Beta vulgaris*) leaves. *Physiologia Plantarum*. 112:31-38.

Lucena C, Romera FJ, Rojas CL, García MJ, Alcántara E y Pérez-Vicente R. 2007. Bicarbonate blocks the expression of several genes involved in the physiological responses to Fe deficiency of Strategy I plants. *Funct. Plant Biol.*34:1002-1009.

Lucena, J.J.; Garate, A.; Caperna, O. 1988. *Lotium multiflorum* uptake of iron supplied as different synthetic chelates. *Plant and Soil*, 112: 23-28.

Lucena, J.J. 2009. El empleo de complejantes y quelatos en la fertilización de micronutrientes. *Rev. Ceres*, 56 (4). pp. 527-535.

Macedo, J. and Bryant, R.B. 1989. Preferential microbial reduction of hematite over goethite in Brazilian Oxisol. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 53:1114-1118.

Marschner, H. 1995. Mineral nutrition in higher plants. Academic Press. ISBN 0-12-473542-8 (HB). ISBN 0-12-473543-6 (PB).

Marschner, H.; Roemheld, V.; Kissel, M. 1986. Different strategies in higher plants in mobilization and uptake of iron. *J. Plant Nutr.* 9:695-713.

Mengel, K.; Kirkby, A.E. 2001. Principles of plant nutrition. Kluwer academic Publisher. ISBN 0-7923-7150-K (HB). ISBN 1-4020-0008-1 (PB).

Mengel, K. 1995. Iron availability in plant tissues-iron chlorosis in calcareous soils. pp. 389-391. *In*: J. Abadía (ed.). Iron nutrition in soils and plants. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, The Netherlands.

Miller, G. W.; Shigematsu, A.; Welkie, G.W.; Motoji, N.; Szlek, M. 1990. Potassium effect on iron stress in tomato. II. The effects on root CO<sub>2</sub> fixation and organic acid formation. *Journal of Plant Nutrition*. 13: 1355-1370.

Morales, F.; Grasa, R.; Abadía, A.; Abadía, J. 1998. Iron chlorosis paradox in fruit trees. *J. Plant Nutr.* 21:815-825.

- Morris, D.R.; Loeppert, R.H.; Moore, T.J. 1990. Indigenous soil factors influencing iron chlorosis of soybean in calcareous. *Soil Sci. Soc Am J.* 54: 1329-1336.
- Nagarathana, K.C.; Shetty, A.; Bhar, S.G.; Shetty, H.S. 1992. The possible involvement of lipoxygenase in downy mildew resistance in pearl millet. *J. Exp. Bot.* 43: 1283-1287.
- Nikolic, M.; Kastori, R. 2000. Effect of bicarbonate and Fe supply on Fe nutrition of grapevine. *J. Plant Nutr.* 23: 1619-1627.
- Novais, R.F.; Alvarez, V.H.; De Barros, N.F.; Fontes, R.L.; Cantaruti, R.B.; Neves, J.C. 2007. Fertilidade do solo. 1<sup>ra</sup> edição. SBCS. Minas Gerais. 1017 p.
- Ollat, N.; Laborde, B.; Neveux, M.; Diakou-Verdini, P.; Renaud, C.; Moing, A. 2003. Organic acid metabolism in roots of various grapevine (*Vitis*) rootstocks submitted to iron deficiency and bicarbonate nutrition. *J. of Plant Nutrition.* 26: 2165-2176.
- Palmer, M.J.; Kock, P.C.; Bacon, J.S.D. 1963. Changes in concentration of malic acid, citric acid, Ca and K in the leaves during the growth of normal and iron deficient mustard plants. *J. Biochem* 86: 484-493.
- Pastor, M.; Castro, J.; Hidalgo, J.; Camacho, L.; Del Campillo, C. 2000. Corrección de clorosis férrica en olivar mediante la utilización de quelatos Fe-EDDHA en fertirrigación. *Boletín de la sociedad española de la Ciencia del Suelo.* 7-2: 197-204.
- Pich, A.; Hillmer, S.; Manteuffel, R.; Scholz, G. 1997. First immunohistochemical localization of the endogenous Fe<sup>+2</sup> chelator nicotianamine. *Luornal of Experimental Botany.* 48: 759-767.
- Pontiggia, A.; de Nisi, P.; Zocchi, G. 2003. Effect of iron deficiency on RNA and protein synthesis in cucumber roots. *J. of Plant Nutrition.* 26: 2177-2186.
- Rabotti, G.; de Nisi, P.; Zocchi, G. 1995. Metabolic implications in the biochemical responses to iron deficiency in cucumber (*Cucumis sativus* L.) roots. *Plant Physiology.* 107: 1195-1199.

Resnik, M.E. 1980. Nutrición mineral. In: Sivori, E.M.; Montaldi, E.R.; Caso, O.H. 1980. Fisiología vegetal. 1<sup>ra</sup> Ed. hemisferio sur. Argentina.

Rivera-Ortiz, P.; Castro-Meza, B.I.; de la Garza-Requena, F.R. 2009. Clorosis férrica en cítricos y fertilización foliar. Soc. Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. Terra latinoamericana, 27(1): 11-16.

Romheld, V., Marschner, H. 1991. Functions of micronutrients in plants. In micronutrients in agriculture (J.J. Mordvedt; F.R. Cox; L.M. Snuman; R.M. Welch, eds). SSA Book Series. Madison, WI. USA. 297-328.

Rombola, A.D.; Bruggemann, W.; López-Millán, A.F.; Tagliavni, M.; Abadía, J.; Marangoni, B.; Moog, P.R. 2002. Biochemical responses to iron deficiency in kiwifruit (*Actinia deliciosa*). Tree Physiology. 22:869-875.

Rombola, A.D.; Gogorcena, Y.; Larbi, A.; Morales, F.; Baldu, E.; Marangoni, B.; Tagliavni, M.; Abadía, J. 2005. Iron deficiency-induced changes in carbon fixation and leaf elemental composition of sugar beet (*Beta vulgaris*) plants. Plant and Soil. 271:38-45.

Romheld, V. 1987. Existence of two difference strategies for the acquisition of iron in higher plant. Pp 353-374. In iron transports in microbes, plant and animals. G. Winkelmann, D. van der Helm, J.B. Neiland VCH-Verlag. Weinheim.

Romheld, V. 2000. The chlorosis paradox: Fe inactivation in leaves as a secondary event in Fe deficiency chlorosis. J. Plant Nutr. 23:1629-1643.

Romheld, V., Marschner, H. 1986. Mobilization of iron in the rhizosphere of different plant species. pp. 155-204. In advances in plant nutrition. Vol 2.B Tinker, A. Lauchli (Eds). Praeger Scientific. NY.

Sadana, S.K. y Nayvar, V.K. 1997. Iron deficiency in rice: causes, amelioration and transformation in coarse textured soils of Punjab, India. In: Abstract of 9th International Symposium on Iron Nutrition and Interactions in Plants. Hohenheim, Stuttgart. Alemania. pp:1119.

SAS: SAS Institute Inc. 2008. SAS/STAT User's Guide. Ver. 9.2. Cary, NC: SAS Institute.

Schlee, D.; Reinbothe, D.; Fritsche, W. 1968. Der Einfluss von Eisen auf den Purinstoffwechsel und die Riboflavinbildung von *Candida guilliermondii* (Cast). Lang et G. All. Mikrobiol 8: 127-138.

Schmidt, W.; Schuck, C. 1996. Pyridine nucleotide pool size changes in iron-deficient *Plantago lanceolata* roots during reduction of external oxidants. *Physiology Plantarum*. 98: 215-221.

Schwertmann, U. & Taylor, R.M. 1989. Iron oxides. In: Dixon, J.B. & Weed, S.B., eds. *Minerals in soil environments*. 2. Ed. Madison, Soil Science Society of America. p. 379-438.

Schwertmann, U. 1993. Relation between iron oxides, soil color, and soil formation. In: Bigham, J.M. & Ciolkosz, E.J., eds. *Soil color*. Madison, Soil Science Society of America.

Schwertmann, U. 1991. Solubility and dissolution of iron oxides. *Plant Soil*, 130: 1-5.

Smith, B.N. 1984. Iron in higher plants: storage and metabolic rate. *J. Plant Nutr.* 7: 759-766.

Soltadini, G.F.; Tognini, M.; Castagna, A.; Baldan, B.; Ranieri, A. 2000. Alterations in thylakoid membrane composition induced by iron starvation in sunflower plants. *J. of Plant Nutrition*. 23:1717-1732.

Stephan, U.W. 2002. Intra and intercellular iron trafficking and subcellular compartmentation with roots. *Plant and Soil* 241: 19-25.

Stephan, U.W.; Scholz, G. 1993. Nicotinamine: mediator of transport of iron and heavy metals in the phloem? *Physiol. Plant*. 88:522-529.

Tagliavini M., D. Scudellari, B. Marangoni, and M. Toselli. 1995. Acid spray greening of kiwi fruit leaves affected by lime-induced iron chlorosis. pp. 191-195. In: J. Abadía (ed.), *Iron nutrition in soils and plants*. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, The Netherlands.

Tagliavini, M., J. Abadía, A. D. Rombolá, A. Abadía, C. Tsipouridis, and B. Marangoni 2000. Agronomic means for the control of iron deficiency chlorosis in deciduous fruit trees. *J. Plant Nutri.* 23 2007-2022.

- Taiz, L.; Zeiger, E. 2013. Fisiología vegetal. 5 ed. Porto Alegre: Art Med. 954 p.
- Terry, N. 1980. Limiting factors in photosynthesis I. Use of iron stress to control photochemical capacity in vivo. *Plant Physiol.* 65:114-120.
- Terry, N.; Abadía, J. 1986. Functions of iron in chloroplasts. *J. of Plant Nutrition.* 9: 609-646.
- Terry, N.; Zayed, A.M. 1995. Physiology and biochemistry of leaves under iron deficiency. In iron nutrition in soils and plants. (J. abadía ed). Kluwer Academic Publishers. Dordrecht. ISBN: 0-7923-2900-7: 283-294.
- Theil, E.C. 1987. Ferritin: structure, gene regulation and cellular in animals, plants and microorganisms. *Annu. Rev. Biochem.* 56:289-315.
- Thoiron, S.; Pascal, N.; Briat, J.F. 1997. Impact of iron deficiency and iron re-supply during the early stages of vegetative development in maize (*Zea mays* L.) *Plant Cell Environ.* 20: 1051-1060.
- Tiffin, L.O. 1970. Translocation of iron citrate and phosphorus in xylem exudate of soybeans. *Plant Physiol.* 45: 280-283.
- Tisdale, L.S. y Nelson, L.W. 1977. Fertilidad de suelos. pp. 614-621. Montaner y Simón, S.A. Barcelona.
- Torrent, J.; Schertmann, U.; Fechter, H.; Alferez, F. Quantitative relationships between soil color and hematite content. *Clay Miner.*, 136: 354-358.
- Wallace, A. 1966. Ten years of iron EDDHA use in correcting iron chlorosis in plants. *Current Topics in Plant Nutrition.* U. of Carolina, Los Angeles. p. 1-2.
- Welkie, G.W.; Miller, G.W. 1989. Sugar beet responses to iron nutrition and stress. *J. Plant Nutr.* 12: 1041-1054.
- Winder, T.; Nishio, J. 1995. Early iron deficiency stress response in leaves of sugar beet. *Plant Physiol* 108:1487-1494.

Wood, M.J. and Kenny, T. 1968. Nutritional and cultural aspects of peat as a growing medium for tomatoes. Proc. Of 6<sup>th</sup> Colloq. Int. Pot. Inst. pp. 342-351.

Yang, X.; Romheld, V.; Marschner, H. 1994. Effect of bicarbonate on root growth and accumulation of organic acids in Zn-inefficient and Zn-Efficient rice cultivar *Oryza sativa* L. Plant and Soil. 164: 1-7.

Zaharieva, T.B.; Abadía, J. 2003. Iron deficiency enhances the levels of ascorbate, glutathione, and related enzymes in sugar beet roots. Protoplasma. 221: 269-275.

Zaharieva, T.B.; Gogorcena, Y.; Abadía, J. 2004. Dynamics of metabolic responses to iron deficiency in sugar beet roots. Plant Science. 166: 1045-1050.

Zribi, K. 2002. Effect of bicarbonate on growth and iron nutrition of pea. J. Plant Nutr. 25: 2143-2149.

Zuo Y, Ren L, Zhang F y Jiang RF. 2007. Bicarbonate concentration as affected by soil water content controls iron nutrition of peanut plants in calcareous soil. Plant Physio.Biochem. 45:357-364.



## **VII. ANEXOS**

## **ANEXO 1.** Fichas técnicas de las fuentes de hierro usadas en el experimento.

### **a. Ultraferro.**

#### **1. SECCIÓN 1: Identificación del producto y de la sociedad o la empresa**

##### 2.4. Identificador del producto Nombre comercial: Ultraferro

Nombre químico: Ácido acético, oxo-, sal de sodio, productos de reacción con etilendiamina y fenol, sales sódicas de hierro

Nº EC: 283-044-5

Nº CAS: 84539-55-9

Número de Registro REACH: 01-2119487279-21-0004

##### 2.5. Usos pertinentes identificados del producto y usos desaconsejados

Usos identificados: Fertilizante (Agricultura).

Usos desaconsejados No se han identificado.

##### 2.6. Datos del proveedor del documento de seguridad de producto TRADE CORPORATION INTERNATIONAL, S.A.U. c/ Alcalá, 498 - 2ª planta 28027 – Madrid (España)

Teléfono: +34 91 327 32 00 Fax: +34 91 304 71 72, e-mail: sds@tradecorp.sapec.pt

1.4. Teléfono de emergencia Tel.: +34 91 327 32 00 (9:00 - 17:00h, CET - Hora de Europa Central).

#### **2. SECCIÓN 2: Identificación de los peligros**

##### 2.1. Clasificación del producto

Clasificación de acuerdo al Reglamento Europeo (CE) No. 1272/2008: El producto no es peligroso.

Clasificación de acuerdo a la Directiva Europea 67/548/EEC o 1999/45/EC: El producto no es peligroso.

2.2. Elementos de la etiqueta El producto no está clasificado como peligroso, por tanto, no se requieren elementos específicos de la etiqueta.

2.3. Otros peligros El producto no se considera persistente, bioacumulable ni tóxico (PBT)

### 3. SECCIÓN 3: Composición/información sobre los componentes

Identificador del producto: Ultraferro

Nombre químico	Nº CAS	Nº EC
Ácido acético, oxo-, sal de sodio, productos de reacción con etilendiamina y fenol, sales sódicas de hierro	84539-55-9	283-044-5

### 4. SECCIÓN 4: Primeros auxilios

#### 4.1. Descripción de los primeros auxilios

En caso de inhalación: Mantener al paciente en reposo y conservar su temperatura corporal. Sacar al afectado de la zona contaminada y trasladarlo al aire libre. Obtener atención médica.

En caso de contacto con la piel: Quitar la ropa contaminada y lavar inmediatamente las zonas afectadas con abundante agua y jabón. Si la irritación persiste, consultar al médico.

En caso de contacto con los ojos: Lavar inmediatamente los ojos, también por debajo de los párpados, con abundante agua limpia durante al menos 15 minutos. Solicitar de inmediato asistencia médica especializada.

En caso de ingestión: Enjuagar la boca con agua abundante. No inducir el vómito. Consultar al médico.

4.2. Principales síntomas y efectos, agudos y retardados No hay datos disponibles.

4.3. Indicación de toda atención médica y de los tratamientos especiales que deban dispensarse inmediatamente Todos los tratamientos deben basarse en los signos y síntomas observados.

### 5. SECCIÓN 5: Medidas de lucha contra incendios

5.1. Medios de extinción Medios de extinción apropiados: Utilizar polvo químico seco, CO<sub>2</sub>, agua pulverizada o espuma resistente al alcohol. Medios de extinción no apropiados: Chorro de agua directo.

5.2. Peligros específicos derivados del producto En caso de combustión o degradación térmica se pueden generar los siguientes productos: - Óxidos de carbono - Óxidos de nitrógeno

Los restos del incendio y el agua de extinción contaminada deben eliminarse de acuerdo con las regulaciones locales.

5.3. Recomendaciones para el personal de lucha contra incendios Equipo de protección especial para los bomberos: En caso de incendio, emplear equipo de respiración autónomo y equipo de protección personal.

## **6. SECCIÓN 6: Medidas en caso de vertido accidental**

6.1. Precauciones personales, equipo de protección y procedimientos de emergencia Aislar y delimitar el área afectada. Eliminar los focos de ignición. Utilizar equipo de protección personal y protección respiratoria. Evitar el contacto con la piel y los ojos. Evacuar al personal a una zona segura. Asegurar una adecuada ventilación.

6.2. Precauciones relativas al medio ambiente Evitar que el producto llegue al agua superficial o a la red de alcantarillado sanitario. Evitar la contaminación del suelo.

6.3. Métodos y material de contención y de limpieza Recoger barriendo, y sin levantar polvo, limpiar el resto con material absorbente inerte (por ejemplo, tierra, arena, tierra de diatomeas o algún absorbente no combustible). Almacenar el material recogido en contenedores apropiados para su eliminación. Etiquetar dichos contenedores y gestionar de conformidad con las regulaciones locales. No mezclar con otros materiales de desecho. Si se producen derrames o vertidos incontrolados sobre cursos de agua (o aguas de uso público), informar inmediatamente a las autoridades locales.

6.4. Referencia a otras secciones Ver Sección 8 y Sección 13. 7.

## **SECCIÓN 7: Manipulación y almacenamiento**

7.1. Precauciones para una manipulación segura

Ver también Sección 8. Utilizar equipo de protección personal, evitando el contacto con la piel, los ojos y la ropa. Asegurar una adecuada ventilación. No maneje el producto cerca de una fuente de chispas o cerca de una llama. No fumar, beber o comer durante la manipulación del producto. Lavarse bien las manos usando jabón neutro después de manipular el producto y antes de comer, beber, fumar o usar el baño. Quitarse inmediatamente la ropa si el producto llega al interior. Lavar la piel cuidadosamente con un jabón no abrasivo y ponerse ropa limpia.

7.2. Condiciones de almacenamiento seguro, incluidas posibles incompatibilidades No almacenar cerca de, o con cualquiera de los materiales incompatibles enumerados en la Sección 10. No almacenar junto a alimentos, bebidas, piensos y suministros de agua. No almacenar cerca de llamas, fuentes de calor ni cerca de agentes oxidantes fuertes. Evitar

temperaturas extremas. Conservar en su envase original. Mantener los recipientes bien cerrados en un lugar seco, fresco y bien ventilado protegido del sol. Mantener fuera del alcance de personas no autorizadas.

7.3. Usos específicos finales Ver sección 1.2.

## **8. SECCIÓN 8: Controles de exposición/protección individual**

### 8.1. Parámetros de control

DNELs:

DNEL para los trabajadores: 0,8 mg/kg de peso corporal / día (exposición cutánea) 1,8 mg/m<sup>3</sup> (inhalación)

DNEL para la población general: 0,417 mg/kg de peso corporal / día (exposición cutánea) 0,435 mg/m<sup>3</sup> (inhalación) 0,125 mg/kg de peso corporal / día (exposición oral)

Concentración prevista sin efecto (PNEC):

PNEC agua (agua dulce): 2,4 mg/L

PNEC agua (agua marina): 0,24 mg/L

PNEC agua (emisiones intermitentes): 1,2 mg/L

PNEC sedimento (agua dulce): 1,9 mg/kg

PNEC sedimento (agua marina): 0,19 mg/kg PNEC suelo: 1,6 mg/kg PNEC en planta de tratamiento de aguas residuales: 45 mg/L.

PNEC oral: 1,1 mg/kg de alimento

### 8.2. Controles de la exposición

8.2.1 Controles técnicos apropiados Ver también Sección 7.

Asegurar una ventilación adecuada.

8.2.2 Medidas de protección individual Protección respiratoria: Usar máscara respiratoria con filtro adecuado. Protección de las manos: Usar guantes de protección. Protección de los ojos: Utilizar gafas protectoras con protección lateral (gafas EN 166) o pantalla de protección facial.

Protección de la piel y el cuerpo: Se recomienda utilizar trajes de trabajo, delantal y botas.

Medidas de higiene: Manipular el producto de acuerdo con las buenas prácticas de higiene y seguridad industrial. Disponer de frasco lavador de ojos con agua destilada. Quitarse y lavar la ropa contaminada antes de volverla a utilizar. Lavarse las manos antes de los descansos e inmediatamente después de manipular el producto.

8.2.3 Controles de exposición medioambiental No verter el producto al agua corriente o al sistema de alcantarillado sanitario.

## **9. SECCIÓN 9: Propiedades físicas y químicas**

### 9.1. Información sobre propiedades físicas y químicas básicas

Aspecto: Sólido

Color: Rojo-negro

Olor: Característico Umbral olfativo: No disponible

pH: 8,5

Punto de fusión: > 500 °C

Punto de ebullición: No aplica

Tasa de evaporación: No disponible

Punto de inflamación: No aplica

Temperatura de descomposición: No disponible

Temperatura de ignición espontánea: 331 °C a 1013.25 hPa

Inflamabilidad: No inflamable

Propiedades explosivas: No explosivo

Propiedades oxidantes: No oxidante

Presión de vapor: < 1E-6 hPa a 25 °C

Densidad de vapor: No disponible

Viscosidad: No aplica

Densidad: 0,5 g/cc

Solubilidad: 60 g/L

Coefficiente de reparto n-octanol/agua (log Pow): < -4,2 a 23 °C

### 9.2. Información adicional

No hay datos disponibles.

## **10. SECCIÓN 10: Estabilidad y reactividad**

10.1. Reactividad El producto no es reactivo en condiciones normales.

10.2. Estabilidad química El producto es estable en condiciones ambientales normales y en condiciones previsibles de temperatura y presión durante su almacenamiento y manipulación.

10.3. Posibilidad de reacciones peligrosas Bajo condiciones normales de manipulación del producto no se esperan reacciones peligrosas.

10.4. Condiciones que deben evitarse Mantener alejado de llamas, superficies calientes y fuentes de ignición.

10.5. Materiales incompatibles Agentes oxidantes fuertes.

10.6. Productos de descomposición peligrosos Ver sección 5.2.

## **11. SECCIÓN 11: Información toxicológica**

### 11.1. Información sobre los efectos toxicológicos

(a) Toxicidad aguda: El producto no tiene efectos tóxicos agudos según los datos presentados a continuación: DL50 (oral, rata) > 2000 mg/kg de peso corporal (de acuerdo a la Guía OECD 401) CL50 (inhalación, rata) > 4200 mg/m<sup>3</sup> aire (de acuerdo a la Guía OECD 403) DL50 (dermal, rata) > 2000 mg/kg de peso corporal (de acuerdo a la Guía OECD 402)

(b) Corrosión / irritación cutánea: No irritante (test en conejo realizado de acuerdo a la Guía OECD 404).

(c) Lesiones oculares graves / irritación: No irritante (test en conejo realizado de acuerdo a la Guía OECD 405).

(d) Sensibilización respiratoria o cutánea: No sensibilizante (Ensayo del Nódulo Linfático Local (LLNA) realizado en ratón de acuerdo a la Guía OECD 429).

(e) CMR – Carcinogenicidad, Mutagenicidad y Toxicidad para la reproducción: En experimentos con animales no se han detectado efectos carcinogénicos, mutagénicos ni teratogénicos.

(f) STOT – exposición única y repetida: No hay datos disponibles.

(g) Peligro de aspiración: No hay datos disponibles.

## **12. SECCIÓN 12: Información ecológica**

### 12.1. Toxicidad

(a) Toxicidad acuática:

- El producto no es tóxico para los peces (según los estudios realizados de acuerdo a la Guía OECD 203 y el método EU C.1): CL50 > 120 mg/L NOEC > 120 mg/L - El producto no es tóxico para los invertebrados acuáticos (según los estudios realizados de acuerdo a la Guía OECD 202 y el método EU C.2): CL50 > 120 mg/L

- El producto no es tóxico para las algas acuáticas (según los estudios realizados de acuerdo a la Guía OECD 201 y el método EU C.3): CL50 > 294 mg/L NOEC = 8.2 mg/L

- El producto no es tóxico para los microorganismos acuáticos (según los estudios realizados de acuerdo a la Guía OECD 209 y al método EU C.11): CL50 > 1000 mg/L  
NOEC = 450 mg/L.

(b) Toxicidad en sedimento: No hay datos disponibles.

(c) Toxicidad terrestre: - El producto no es tóxico para los pájaros: CL50 > 6000 mg/kg de peso corporal

12.2. Persistencia y degradabilidad El producto es biodegradable.

12.3. Potencial de bioacumulación El producto no es bioacumulable (Log Pow < -4,2).

12.4. Movilidad en el suelo No hay datos disponibles.

12.5. Resultados de la valoración PBT y mPmB El producto no se considera persistente, bioacumulable ni tóxico (PBT).

12.6. Otros efectos adversos No hay datos disponibles.

### **13. SECCIÓN 13: Consideraciones relativas a la eliminación**

13.1. Métodos para el tratamiento de residuos Eliminar el producto y/o residuos a través de una entidad autorizada de residuos. Enjuagar energicamente tres veces los envases vacíos y verter las aguas al tanque de aplicación. No quemar los envases, incluso después de su uso. Inutilizar los envases usados y eliminarlos de acuerdo con las regulaciones aplicables.

### **14. SECCIÓN 14: Información relativa al transporte**

ADR/RID: No clasificado como peligroso para el transporte dentro de las regulaciones de transporte.

IMDG: No clasificado como peligroso para el transporte dentro de las regulaciones de transporte. ICAO/IATA: No clasificado como peligroso para el transporte dentro de las regulaciones de transporte.

### **15. SECCIÓN 15: Información reglamentaria**

15.1. Reglamentación y legislación en materia de seguridad, salud y medio ambiente específicas para el producto

- Directiva 67/548/CEE, relativa a la aproximación de las disposiciones legales, reglamentarias y administrativas en materia de clasificación, embalaje y etiquetado de las sustancias peligrosas.



- Directiva 1999/45/CE, sobre la aproximación de las disposiciones legales, reglamentarias y administrativas de los Estados miembros relativas a la clasificación, el envasado y el etiquetado de preparados peligrosos.

- Reglamento (CE) No 1272/2008 sobre clasificación, etiquetado y envasado de sustancias y mezclas.

- Reglamento (CE) No. 1907/2006, relativo al registro, la evaluación, la autorización y la restricción de las sustancias y preparados químicos (REACH).

- Reglamento (UE) No. 453/2010, por el que se modifica el Reglamento (CE) No. 1907/2006, relativo al registro, la evaluación, la autorización y la restricción de las sustancias y preparados químicos (REACH).

15.2. Evaluación de la seguridad química Se ha llevado a cabo la evaluación de la seguridad química para este producto.

## **16. SECCIÓN 16: Otra información Revisión de este documento:**

Número de revisión: 3.0

Reemplaza a: 2.0

Información añadida, eliminada o revisada: Cambio de diseño.

Abreviaturas y acrónimos:

- ADR: Acuerdo Europeo sobre Transporte Internacional de Mercancías Peligrosas por Carretera.
- DL50: Dosis letal media
- DNEL: Nivel sin efecto obtenido
- IATA: Asociación Internacional del Transporte Aéreo.
- ICAO: Organización Internacional Aeronáutica Civil.
- IMDG: Código Marítimo Internacional de Mercancías Peligrosas.
- LC50: Concentración letal media
- mPmB: Muy Persistente y muy Bioacumulativo.
- NOEC: Concentración sin efecto observado
- PBT: Persistente, Bioacumulativo and Tóxico.
- PNEC: Concentración prevista sin efecto
- RID: Regulación sobre el Transporte Internacional de Mercancías Peligrosas por Ferrocarril.
- STOT: Toxicidad específica en determinados órganos. Referencias bibliográficas y fuentes de datos:

- ESIS: Sistema de Información Europeo de Sustancias Químicas.
- ECHA: European Chemicals Agency <http://echa.europa.eu/> Base de datos del inventario de clasificación y etiquetado.  
<http://echa.europa.eu/web/guest/information-onchemicals/cl-inventory-database>
- Institute for Health and Consumer Protection (European Commission):  
<http://ihcp.jrc.ec.europa.eu/>
- Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el trabajo <http://www.insht.es>
- Riskquim <http://riskquim.insht.es:86/riskquim/clp/>
- Informe sobre la seguridad química - TRADE CORPORATION INTERNATIONAL, S.A.U.

## **b. Carboxy Fe®**

### **1. Generalidades:**

¿Qué es?

Hierro de alta asimilación para el uso en fertirrigación.

¿Qué hace?

Previene y corrige desórdenes nutricionales ocasionados por deficiencia de Fe bajo cualquier

condición de pH de agua de riego y suelo.

¿Cómo lo hace?

Los Ácidos ECCA Carboxy® de tipo alifáticos de Carboxy Fe®, permiten mantener en solución al Fe de su formulación bajo condiciones adversas (alto pH, presencia de carbonatos, fosfatos y calcio en el agua de riego y del suelo), y facilitan su eficaz translocación dentro de las plantas, previniendo y corrigiendo desórdenes nutricionales causados por deficiencias de este microelemento

### **2. Beneficios:**

- Previene y corrige deficiencias de hierro en los cultivos, aún en suelos alcalinos y calcáreos.
- Respuesta rápida y prolongada en cualquier etapa fenológica del cultivo.
- Facilidad de manejo y aplicación.
- Elimina riesgos de taponamiento en sistemas de riego por precipitaciones de sales insolubles.
- Asegura su inversión.

### 3. Características físicas:

Físicas	
Olor	Característico
Forma	Polvo
Color	Gris
Inflamable	No
Corrosividad	No
Químicas	
pH	4.0 – 5.0 a 25°C
Densidad	900-1000 Kg/m <sup>3</sup> a 20 °C
Punto de Ebullición	No aplica
Solubilidad en agua	400 g/L
Incompatibilidad	No mezclar con agentes oxidantes fuertes.
Generales	
Almacenamiento	No exponer a temperaturas mayores a 60°C
Ambientales	No residual, de muy bajo impacto
Certificado Orgánico	No
Toxicidad	Ligeramente Tóxico

### 4. Recomendaciones de uso:

Carboxy Fe® es un quelato que cumple con las especificaciones de solubilidad y estabilidad necesarias para usarse en riegos presurizados.

Carboxy Fe® está diseñado para aplicarse en fertirrigación, también puede aplicarse en banda ó voleo. Se recomienda su aplicación preventiva ó cuando se manifiesten los primeros síntomas de deficiencia de Fe bajo la siguiente dosificación:

Cultivo		Dosis/Aplicación	Aplicaciones (según ciclo vegetativo)
Frutales	Nogal, Palto, Olivo, Vid, Mango, Manzano, Peral,	Plantaciones jóvenes 0.5 a 1 Kg/ha	Desde brotación ó inicio de campaña.
	Durazno, Cítricos, Fresa, Banano, Café.	Árboles en producción 1-1 Kg Ha	Realizar aplicaciones a intervalo de 15 a 30 días.
Hortalizas	Espárrago, Ají, Páprika, Pimiento, Alcachofa, Cebolla, Ajo, Papa Apio, Acelga, Lechuga, Tomate, Melón, Pepino, Sandía, Zapallo.	Preventivo 0.5 a 1 Kg/ha	Desde trasplante o inicio de campaña a intervalo de 15 días
		Deficiencia leve 1 a 1.5 Kg/ha	Cada semana hasta corrección de síntomas
		Deficiencia Severa 1.5 a 3 Kg/ha	

### 5. Compatibilidad:

No debe mezclarse con productos que contengan calcio; siempre realice una prueba de compatibilidad antes de mezclarlo.

### 6. Composición

Análisis Garantizado	% p/p
Hierro (Fe)	9.0

Completamente quelatado Ácidos ECCA Carboxy® y EDDHA

#### c. Sulfato Ferroso.

##### 1. Descripción del producto

El sulfato Ferroso o Sulfato de hierro (II) es un compuesto químico iónico de fórmula (FeSO<sub>4</sub>), se encuentra casi siempre en forma de sal heptahidratada de color azul verdoso.

Número de CAS 7782 – 63 - 0

##### 2. Característica del producto

NOMBRE COMERCIAL:	SULFATO FERROSO HEPTAHIDRATADO
PESO MOLECULAR:	278.05 g/mol
FORMULA QUIMICA:	FeSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O
APARIENCIA:	CRISTALES VERDES A BLANCOS

### 3. Requerimientos

Parámetros	Especificación
Pureza, FeSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O	98.0 min.
Hierro, Fe, %	20.0 min.
Oxido de Titanio, TiO <sub>2</sub> %	0.5 máx.

### 4. Aplicaciones

El sulfato ferroso se usa en la purificación de agua por floculación y en la eliminación de fosfatos de las plantas de tratamiento de aguas municipales e industriales. Otro uso se da en la fabricación de tintas, también se usa en la coloración de la lana como mordiente. También se emplea como acondicionador del césped y para eliminar los musgos.

### 5. Presentación y despacho

El producto se presenta en bolsas de polipropileno de 25 kg, para garantizar la calidad del producto.

### 6. Condiciones de almacenaje

Almacenar sobre parihuelas bajo techo, en lugar seco, protegido contra el sol y la lluvia para evitar que el producto se endurezca formando bloques compactos por ganancia o pérdida de agua. Para información adicional consultar la hoja de seguridad del producto

Anexo 2. Resumen del análisis de variancia para el rendimiento de materia seca, concentración y absorción de Fe en maíz (*Zea mays*) en el suelo Conchero.

Fuente de variación	G. L	Cuadrado medio		
		Materia seca	Fe (g/kg)	Absorción de Fe (g/kg)
Fuentes de Fe (M)	2	1,9539**	1,4548**	20,3604**
Niveles de Fe (A)	1	0,2544**	0,6990**	6,7941**
Interacción (MxA)	2	4,2746**	0,1970**	2,1648**
Fact. x Testigo	1	5,4147**	1,7914**	4,6453**
Error experimental	14	0,0106	0,0002	0,0118
Total	20			
C.V (%)		2,71	1,83	4,24

\* Significativo al 5% de probabilidad

\*\* Altamente significativo al 1% de probabilidad

Anexo 3. Resumen del análisis de variancia para los efectos simples de las fuentes de Fe y niveles, sobre el rendimiento de materia seca, concentración y absorción de Fe en maíz (*Zea mays*) en el suelo Conchero.

Fuente de variación	G L	Cuadrado medio		
		Materia seca	Fe (g/kg)	Absorción de Fe (g/kg)
Efecto simple del factor Fuente de Fe (M)				
Entre Fuentes con nivel de 0,8 ppm Fe	2	2,6481**	1,3296**	16,7215**
Entre Fuentes con nivel de 1,9 ppm Fe	2	3,5803**	0,3221**	5,8037**
Efecto simple del factor niveles de Fe (A)				
Entre niveles de Fe del CarboxyFe	1	7,1286**	0,0009**	0,0046
Entre niveles de Fe del UltraFe	1	1,1528**	0,5128**	2,0699**
Entre niveles de Fe del Sulfato Ferroso	1	0,5221**	0,5795**	9,0496**
Error experimental	20	0,0106	0,0002	0,0118

\* Significativo al 5% de probabilidad

\*\* Altamente significativo al 1% de probabilidad

Anexo 4. Resumen del análisis de variancia para el rendimiento de materia seca, concentración y absorción de Fe en maíz (*Zea mays*) en el suelo Calichero.

Fuente de variación	G. L	Cuadrado medio		
		Materia seca	Fe (g/kg)	Absorción de Fe (g/kg)
Fuentes de Fe (M)	2	96,2418**	0,1041**	583,0320**
Niveles de Fe (A)	1	81,7068**	0,0252**	108,8306**
Interacción (MxA)	2	244,4130**	0,0166**	38,7165**
Fact. x Testigo	1	5,4272	0,0076**	38,2225**
Error experimental	14	2,2313	0,0001	0,5438
Total	20			
C.V (%)		2,16	4,02	7,37

\* Significativo al 5% de probabilidad

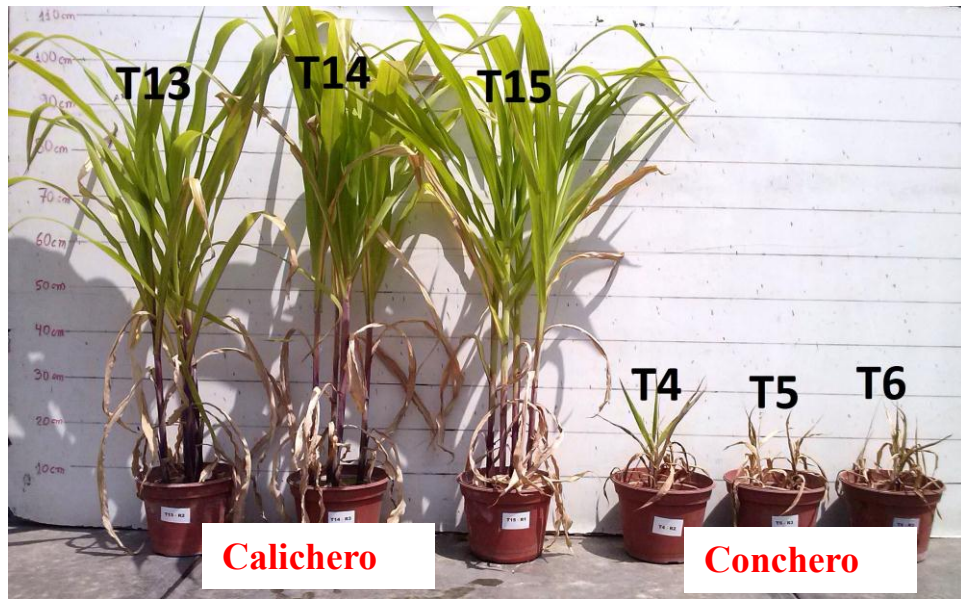
\*\* Altamente significativo al 1% de probabilidad

Anexo 5. Resumen del análisis de variancia para los efectos simples de las fuentes de Fe y sus niveles, sobre el rendimiento de materia seca, concentración y absorción de Fe en maíz (*Zea mays*) en el suelo Calichero.

Fuente de variación	G L	Cuadrado medio		
		Materia seca	Fe (g/kg)	Absorción de Fe (g/kg)
Efecto simple del factor Fuente de Fe (M)				
Entre Fuentes con nivel de 0,8 ppm Fe	2	37,5759**	0,0874**	393,2137**
Entre Fuentes con nivel de 1,9 ppm Fe	2	303,0788**	0,0333**	228,5348**
Efecto simple del factor niveles de Fe (A)				
Entre niveles de Fe del CarboxyFe	1	50,2861**	0,0004**	16,0195**
Entre niveles de Fe del UltraFe	1	0,0038	0,0002	1,1303**
Entre niveles de Fe del Sulfato Ferroso	1	520,2428**	0,0577**	169,133**
Error experimental	20	2,1313	0,0001	0,5438

\* Significativo al 5% de probabilidad

\*\* Altamente significativo al 1% de probabilidad



Anexo 6. Crecimiento del maíz (*Zea mays*) de tratamientos en ambos suelos en estudio.



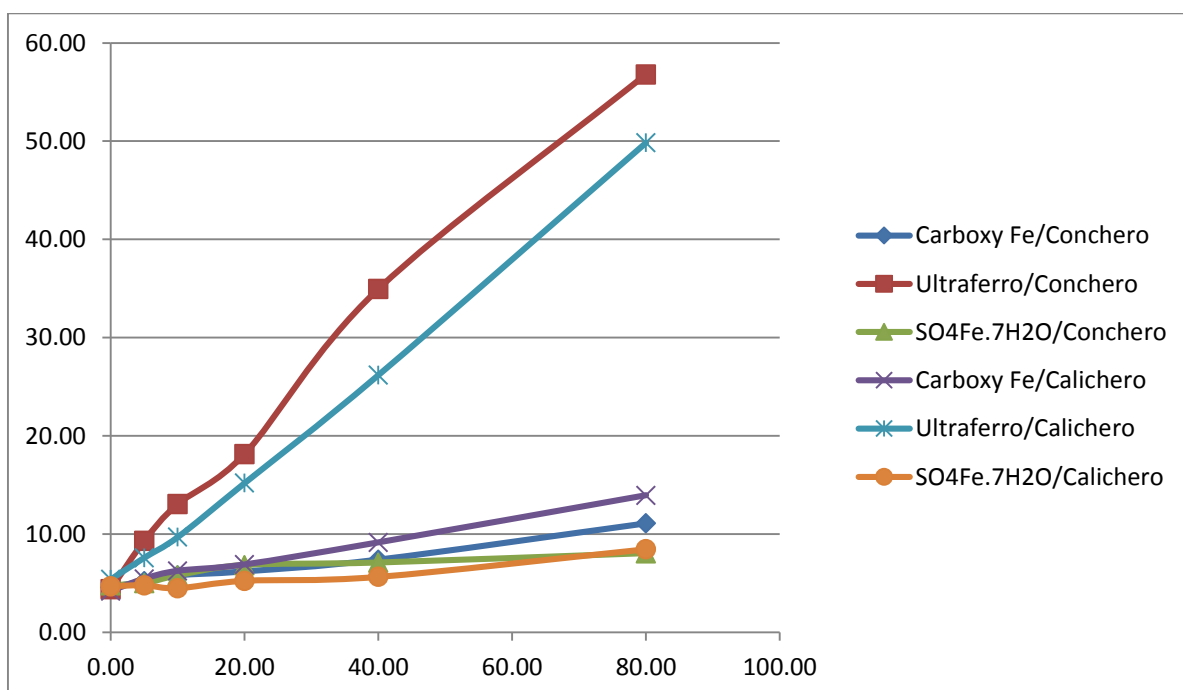
Anexo 7. Plantas de maíz (*Zea mays*) al inicio del experimento.



Anexo 8. Resultados del ensayo en el laboratorio de adsorción de hierro en suelos calcáreos (ppm) por el método del bicarbonato de sodio modificado.

Tratamiento		Cantidad agregada en 2.5 ml de la concentración (ppm) sobre 2.5 ml de suelo						R <sup>2</sup>
Suelo calcáreo	Fuente de Fe	0.00	5.00	10.00	20.00	40.00	80.00	
Suelo Conchero	Carboxy Fe/Conchero	4.60	5.20	5.80	6.20	7.40	11.10	0.99
	Ultraferro/Conchero	4.40	9.30	13.05	18.15	34.95	56.80	0.97
	SO <sub>4</sub> Fe.7H <sub>2</sub> O/Conchero	4.80	5.00	5.80	6.85	7.10	8.05	0.86
Suelo Calichero	Carboxy Fe/Calichero	4.20	5.45	6.25	6.90	9.15	13.96	0.84
	Ultraferro/Calichero	5.40	7.60	9.70	15.20	26.20	49.85	0.99
	SO <sub>4</sub> Fe.7H <sub>2</sub> O/Calichero	4.70	4.80	4.50	5.25	5.65	8.45	0.95

Anexo 9. Correlación entre hierro disponible (ppm) por el método del bicarbonato de sodio modificado y concentración de la solución aplicada (ppm).



Anexo 10. Altura de planta (m) del ensayo de fuentes y dosis de hierro en dos suelos calcáreos.

<b>CONCHERO</b>					
NIVELES DE Fe	CARBOXY Fe	ULTRAFERRO	SO4Fe.7H2O	PROMEDIO	VARIACION
N0 = 0.0	0.23	0.22	0.22	0.22	104.59
N1 = 0.9	0.24	0.18	0.23	0.22	101.88
N2 = 1.8	0.19	0.20	0.25	0.21	100.00
PROMEDIO	0.22	0.20	0.23	0.22	

<b>CALICHERO</b>					
NIVELES DE Fe	CARBOXY Fe	ULTRAFERRO	SO4Fe.7H2O	PROMEDIO	VARIACION
N0 = 0.0	1.18	1.12	1.18	1.16	105.36
N1 = 0.9	1.24	1.14	1.18	1.19	108.06
N2 = 1.8	1.08	1.14	1.08	1.10	100.00
PROMEDIO	1.16	1.13	1.15	1.15	

Anexo 11. Peso fresco de planta (g) del ensayo de fuentes y dosis de hierro en dos suelos calcáreos.

<b>CONCHERO</b>					
NIVELES DE Fe	CARBOXY Fe	ULTRAFERRO	SO4Fe.7H2O	PROMEDIO	VARIACION
N0 = 0.0	8.31	12.17	9.88	10.12	100.00
N1 = 0.9	14.08	5.25	12.63	10.65	94.98
N2 = 1.8	5.36	10.44	15.68	10.49	103.71
PROMEDIO	9.25	9.29	12.73	10.42	

<b>CALICHERO</b>					
NIVELES DE Fe	CARBOXY Fe	ULTRAFERRO	SO4Fe.7H2O	PROMEDIO	VARIACION
N0 = 0.0	282.72	293.43	301.63	292.60	100.00
N1 = 0.9	301.07	321.95	328.25	317.09	108.37
N2 = 1.8	314.71	325.03	250.16	296.63	101.38
PROMEDIO	299.50	313.47	293.35	302.11	

Anexo 12. Peso fresco en raíces (g) del ensayo de fuentes y dosis de hierro en dos suelos calcáreos.

**CONCHERO**

NIVELES DE Fe	CARBOXY Fe	ULTRAFERRO	SO <sub>4</sub> Fe.7H <sub>2</sub> O	PROMEDIO	VARIACION
N0 = 0.0	6.17	3.36	1.59	3.71	194.03
N1 = 0.9	7.77	1.09	2.09	3.65	191.06
N2 = 1.8	0.64	1.54	3.55	1.91	100.00
PROMEDIO	4.86	2.00	2.41	3.09	

**CALICHERO**

NIVELES DE Fe	CARBOXY Fe	ULTRAFERRO	SO <sub>4</sub> Fe.7H <sub>2</sub> O	PROMEDIO	VARIACION
N0 = 0.0	169.16	151.06	137.01	152.41	110.78
N1 = 0.9	174.90	170.10	141.52	162.17	117.88
N2 = 1.8	167.88	140.23	104.63	137.58	100.00
PROMEDIO	170.65	153.80	127.72	150.72	

Anexo 13. Peso seco de planta (g) del ensayo de fuentes y dosis de hierro en dos suelos calcáreos.

**CONCHERO**

NIVELES DE Fe	CARBOXY Fe	ULTRAFERRO	SO <sub>4</sub> Fe.7H <sub>2</sub> O	PROMEDIO	VARIACION
N0 = 0.0	3.81	4.22	3.93	3.99	101.17
N1 = 0.9	4.95	2.57	4.36	3.96	100.39
N2 = 1.8	2.77	3.92	4.95	3.88	98.44
PROMEDIO	3.84	3.57	4.41	3.94	

**CALICHERO**

NIVELES DE Fe	CARBOXY Fe	ULTRAFERRO	SO <sub>4</sub> Fe.7H <sub>2</sub> O	PROMEDIO	VARIACION
N0 = 0.0	68.24	67.47	68.22	67.97	98.46
N1 = 0.9	67.57	72.79	74.32	71.56	103.65
N2 = 1.8	73.36	72.84	56.54	67.58	97.89
PROMEDIO	69.72	71.03	66.36	69.04	

Anexo 14. Peso seco en raíces (g) del ensayo de fuentes y dosis de hierro en dos suelos calcáreos.

**CONCHERO**

NIVELES DE Fe	CARBOXY Fe	ULTRAFERRO	SO4Fe.7H2O	PROMEDIO	VARIACION
N0 = 0.0	1.52	0.62	0.50	0.88	116.13
N1 = 0.9	1.65	0.27	0.60	0.84	111.14
N2 = 1.8	0.27	0.45	0.93	0.55	72.72
PROMEDIO	1.15	0.45	0.68	0.76	

**CALICHERO**

NIVELES DE Fe	CARBOXY Fe	ULTRAFERRO	SO4Fe.7H2O	PROMEDIO	VARIACION
N0 = 0.0	19.24	18.71	18.09	18.68	100.13
N1 = 0.9	19.62	19.44	19.45	19.50	104.54
N2 = 1.8	19.35	18.38	15.62	17.78	95.33
PROMEDIO	19.40	18.84	17.72	18.65	

Anexo 15. Concentración de hierro foliar (ppm) del ensayo de fuentes y dosis de hierro en dos suelos calcáreos.

**CONCHERO**

NIVELES DE Fe	CARBOXY Fe	ULTRAFERRO	SO4Fe.7H2O	PROMEDIO	VARIACION
N0 = 0.0	1420.00	1480.00	652.00	1184.00	147.54
N1 = 0.9	57.00	1320.00	1056.00	811.00	101.06
N2 = 1.8	79.50	726.00	432.00	412.50	51.40
PROMEDIO	518.83	1175.33	713.33	802.50	

**CALICHERO**

NIVELES DE Fe	CARBOXY Fe	ULTRAFERRO	SO4Fe.7H2O	PROMEDIO	VARIACION
N0 = 0.0	234.00	163.00	160.00	185.67	90.03
N1 = 0.9	358.00	162.50	16.50	179.00	86.80
N2 = 1.8	373.00	174.00	215.00	254.00	123.17
PROMEDIO	321.67	166.50	130.50	206.22	

Anexo 16. Concentración de hierro en raíces (ppm) del ensayo de fuentes y dosis de hierro en dos suelos calcáreos.

**CONCHERO**

NIVELES DE Fe	CARBOXY Fe	ULTRAFERRO	SO4Fe.7H2O	PROMEDIO	VARIACION
N0 = 0.0	10100.00	205.50	2115.00	4140.17	121.25
N1 = 0.9	7400.00	75.50	2225.00	3233.50	94.70
N2 = 1.8	4035.00	130.50	4445.00	2870.17	84.06
PROMEDIO	7178.33	137.17	2928.33	3414.61	

**CALICHERO**

NIVELES DE Fe	CARBOXY Fe	ULTRAFERRO	SO4Fe.7H2O	PROMEDIO	VARIACION
N0 = 0.0	73.00	42.00	291.00	135.33	51.53
N1 = 0.9	457.50	515.50	456.00	476.33	181.38
N2 = 1.8	405.00	21.00	102.50	176.17	67.08
PROMEDIO	311.83	192.83	283.17	262.61	

Anexo 17. Hierro disponible residual (mg/kg de suelo) del ensayo de fuentes y dosis de hierro en dos suelos calcáreos.

**CONCHERO**

NIVELES DE Fe	CARBOXY Fe	ULTRAFERRO	SO4Fe.7H2O	PROMEDIO	VARIACION
N0 = 0.0	5.70	5.20	4.70	5.20	100.00
N1 = 0.9	5.50	5.20	5.00	5.23	100.64
N2 = 1.8	5.30	5.10	5.10	5.17	99.36
PROMEDIO	5.50	5.17	4.93	5.20	

**CALICHERO**

NIVELES DE Fe	CARBOXY Fe	ULTRAFERRO	SO4Fe.7H2O	PROMEDIO	VARIACION
N0 = 0.0	5.60	6.50	5.70	5.93	101.33
N1 = 0.9	5.90	5.90	5.60	5.80	99.05
N2 = 1.8	6.00	6.10	5.40	5.83	99.62
PROMEDIO	5.83	6.17	5.57	5.86	

Anexo 18. Hierro soluble en agua residual (mg/kg de suelo) del ensayo de fuentes y dosis de hierro en dos suelos calcáreos.

**CONCHERO**

NIVELES DE Fe	CARBOXY Fe	ULTRAFERRO	SO4Fe.7H2O	PROMEDIO	VARIACION
N0 = 0.0	2.40	2.00	2.60	2.33	88.61
N1 = 0.9	2.10	2.80	2.60	2.50	94.94
N2 = 1.8	2.20	5.30	1.70	3.07	116.46
PROMEDIO	2.23	3.37	2.30	2.63	

**CALICHERO**

NIVELES DE Fe	CARBOXY Fe	ULTRAFERRO	SO4Fe.7H2O	PROMEDIO	VARIACION
N0 = 0.0	1.80	2.00	2.40	2.07	87.32
N1 = 0.9	2.10	3.20	2.30	2.53	107.04
N2 = 1.8	2.50	3.20	1.80	2.50	105.63
PROMEDIO	2.13	2.80	2.17	2.37	