

COMPARISON BETWEEN SULFATES AND CHELATED COMPOUNDS AS SOURCES OF ZINC AND IRON IN CALCAREOUS SOILS

COMPARACIÓN ENTRE SULFATOS Y COMPUESTOS QUELADOS COMO FUENTES DE ZINC Y HIERRO EN SUELOS CALCÁREOS

Rodrigo Ortega-Blu¹ and Mauricio Molina-Roco²

¹Universidad Técnica Federico Santa María. Departamento de Industrias. Casilla 110-V. Valparaíso Avenida Santa María. 6400, Santiago, Chile. (rodrigo.ortega@usm.cl). ²Pontificia Universidad Católica de Chile, Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal, Departamento de Ciencias Vegetales. Casilla 306, Santiago, Chile. (mamolina@puc.cl).

ABSTRACT

Pot experiments were performed in a greenhouse to compare zinc (Zn) and iron (Fe) sources: 1) corn plants were grown in a Zn-deficient soil and received a Zn fertilization (0, 1.9, 3.8, and 7.7 mg kg⁻¹; equivalent to 0, 5, 10, and 20 kg Zn ha⁻¹) as Zn-EDTA and ZnSO₄; 2) sorghum plants were grown in a soil where iron chlorosis symptoms had been observed and received a Fe fertilization (0, 1.5, 3, and 6 mg kg⁻¹; equivalent to 0, 3, 6, and 12 kg Fe ha⁻¹) as Fe-EDDHA and FeSO₄. Corn dry matter (DM), Zn concentration, and Zn uptake were higher with Zn-EDTA as compared to ZnSO₄. In the sorghum experiment the highest DM production was obtained with Fe-EDDHA, which increased Fe concentration and uptake in higher proportion as compared to FeSO₄. However, only highest Fe rates eliminated Fe chlorosis. Residual soil DTPA-extractable Zn and Fe levels were higher for chelates in comparison to sulfates; the largest differences between sources were found at the highest Zn and Fe rates. Although sulfates needed higher rates to achieve similar effects, their benefit/cost relationship was higher than chelated sources due to their lower cost. However, factors such as the residual effect of each source, crop sensitivity, and the value of the crop should be also considered when choosing a Zn or Fe fertilizer source for similar soils.

Key words: Chelates, Fe-EDDHA, FeSO₄, micronutrient availability, Zn and Fe uptake, Zn-EDTA, ZnSO₄, residual micronutrients.

INTRODUCTION

In some arid and semiarid cultivated zones of northern and central-northern Chile it is often possible to find Zn and Fe deficiencies derived from their low natural levels in the soil, or induced by high pH or high calcium carbonate (CaCO₃) contents. The improvements on irrigation technologies, and the continuous growth of exporting crops such as wine grapes and avocados towards marginal soils, within

RESUMEN

Se realizaron experimentos en maceta en invernadero para comparar fuentes de cinc (Zn) y hierro (Fe): 1) se sembraron plantas de maíz en suelos deficientes en Zn y se fertilizaron con Zn (0, 1.9, 3.8, y 7.7 mg kg⁻¹; equivalente a 0, 5, 10 y 20 kg Zn ha⁻¹) como Zn-EDTA y ZnSO₄; 2) Se sembraron plantas de sorgo en un suelo donde se habían observado síntomas de clorosis férrica y se fertilizaron con Fe (0, 1.5, 3, y 6 mg kg⁻¹; equivalente a 0, 3, 6 y 12 kg Fe ha⁻¹) como Fe EDDHA y FeSO₄. La materia seca (MS) del maíz, la concentración y la absorción de Zn fueron más altas con Zn-EDTA en comparación con ZnSO₄. En el experimento con sorgo la producción más alta de MS se obtuvo con Fe-EDDHA, que aumentó la concentración y absorción de Fe en una proporción mayor en comparación con FeSO₄. Sin embargo, sólo las dosis más altas de Fe eliminaron la clorosis férrica. Los niveles residuales de Zn y Fe, extractables con DTPA, en el suelo fueron más altos para los quelatos que para los sulfatos; las diferencias más grandes entre las fuentes se encontraron en las dosis más altas de Zn y Fe. Aunque los sulfatos necesitaron dosis más altas para alcanzar efectos similares, su relación beneficio/costo fue más alta que las fuentes queladas debido a su menor costo. Sin embargo, factores tales como el efecto residual de cada fuente, la sensibilidad del cultivo y su valor también deberían considerarse cuando se seleccione una fuente de fertilización de Zn o Fe para suelos similares.

Palabras clave: Quelatos, Fe-EDDHA, FeSO₄, disponibilidad de micronutrientes, absorción de Zn y Fe, Zn-EDTA, ZnSO₄, micronutrientes residuales.

INTRODUCTION

En algunas zonas cultivadas áridas y semiáridas del norte y centro-norte de Chile frecuentemente es posible encontrar deficiencias de Zn y Fe derivadas de los bajos niveles naturales de estos elementos en el suelo, o inducidos por pH alto o contenidos altos de carbonato de calcio (CaCO₃). El mejoramiento de las tecnologías para la irrigación y el continuo crecimiento de cultivos de exportación, como uva

Recibido: Junio, 2006. Aprobado: Mayo, 2007.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 41: 491-502. 2007.

adequate climatic zones, have increased the incidence of micronutrient deficiencies in Chile and in several places in the world (Fageria *et al.*, 2002).

When Zn or Fe are applied to the soil, plants take up only a small proportion while a considerable fraction remains fixed. The fertilizer source is one of the main factors affecting the proportion of the nutrient fixed, unavailable for plants (Obrador *et al.*, 2002). Chelates are considered the most effective fertilizers under the conditions described, compared to the inorganic forms, such as sulfates, which can react with CaCO_3 forming low-solubility compounds (Loeppert, 1986; Vempati and Loeppert, 1988). Zn and Fe activity in the soil solution decreases as soils become more alkaline (Goos and Germain, 2001). Thus, sulfates are frequently considered to have very low or no effectiveness in high-pH calcareous soils. However, there is a large difference between the cost of chelated sources of Zn and Fe and that of simple salts of these micronutrients. Besides, taking into account the immediate effect of the micronutrient source on the applied crop, it is necessary to consider its residual effect in the soil. The extraction of soil with DTPA (diethylenetriamine-pentaacetic acid) solution (Lindsay and Norvell, 1978) has been used to assess micronutrient availability for plants. This test has been useful for monitoring residual effects of micronutrients in soils following the application of fertilizers (Follet and Lindsay, 1971).

The objective of this work was to compare chelate and sulfate Zn and Fe sources in calcareous soils: 1) dry matter production, plant nutrient content and uptake; 2) residual soil DTPA-extractable Zn and Fe levels; 3) benefit/cost relationship.

MATERIALS AND METHODS

Experiment 1

Two zinc fertilizer sources were compared using corn (*Zea mays* L.) in a pot experiment. An Aridisol soil was collected at an uncultivated location of the Copiapó Valley in northern Chile (27° 18' S). This soil was chosen because it was known to have a low native Zn content ($< 0.5 \text{ mg kg}^{-1}$). The soil was taken from the surface layer (0-20 cm), passed through a 4-mm sieve and mixed homogeneously. Plastic pots (5 L) were filled with soil up to their volume. Soil subsamples were taken from each pot to make a composite sample to perform physicochemical analyses: 2N KCl extractable N ($\text{N-NO}_3 + \text{N-NH}_4$) (Mulvaney, 1996); NaHCO_3 extractable P (Olsen *et al.*, 1954); ammonium acetate extractable K (Thomas, 1982); pH in water (Mc Lean, 1982); organic matter (OM) by the Walkley-Black method (Nelson and Sommers, 1996); DTPA-TEA extractable micronutrients (Lindsay and Norvell, 1978); CaCO_3 equivalent by a gravimetric method (Self and Rodriguez, 1998); soluble bicarbonate from saturated paste extract (Rhoades, 1982);

vinífera y aguacate, hacia suelos marginales, dentro de zonas climáticas adecuadas, han aumentado la incidencia de deficiencias de micronutrientes en Chile y en varios lugares del mundo (Fageria *et al.*, 2002).

Cuando el Zn y el Fe se aplican al suelo, las plantas sólo absorben una pequeña proporción mientras una fracción considerable permanece fija. La fuente de fertilizante es uno de los principales factores que afectan la proporción del nutriente fijado, no disponible para las plantas (Obrador *et al.*, 2002). Los quelatos se consideran los fertilizantes más efectivos en las condiciones descritas, comparados con las formas inorgánicas, como los sulfatos, que pueden reaccionar con CaCO_3 formando compuestos de baja solubilidad (Loeppert, 1986; Vempati y Loeppert, 1988). La actividad del Zn y el Fe en la solución de suelo disminuye a medida que los suelos se vuelven más alcalinos (Goos y Germain, 2001). Por tanto, frecuentemente se considera que los sulfatos tienen muy baja o ninguna efectividad en suelos calcáreos de pH alto. Sin embargo, hay una gran diferencia entre el costo de las fuentes queladas de Zn y Fe y aquel de sales simples de estos micronutrientes. Además, junto con el efecto inmediato de la fuente de micronutrientes sobre el cultivo utilizado, es necesario considerar su efecto residual en el suelo. La extracción del suelo con una solución de DTPA (ácido dietilenotriamine-pentaacético) (Lindsay y Norvell, 1978) se ha usado para evaluar la disponibilidad de micronutrientes para las plantas. Este análisis ha sido útil para monitorear el efecto residual de micronutrientes en el suelo luego de la aplicación de fertilizantes (Follet y Lindsay, 1971).

El objetivo de este estudio fue comparar fuentes de quelatos y sulfatos de Zn y Fe en suelos calcáreos: 1) producción de materia seca, contenido y absorción de nutrientes de la planta; 2) niveles residuales de Zn y Fe en el suelo, extraíbles con DTPA; 3) relación beneficio/costo

MATERIALES Y MÉTODOS

Experimento 1

Se compararon dos fuentes de fertilizantes de Zn usando maíz (*Zea mays* L.) en un experimento en macetas. Se recolectó un suelo Aridisol de un lugar no cultivado del valle de Copiapó en el norte de Chile (27°18' S). Se seleccionó este suelo por tener un bajo contenido de Zn disponible ($< 0.5 \text{ mg kg}^{-1}$). Se tomó suelo de la capa superficial (0-20 cm), se tamizó a través de una malla de 4-mm y se mezcló homogéneamente. Se llenaron macetas de plástico (5 L) con suelo hasta completar su volumen. Se tomaron submuestras de suelo de cada maceta para formar una muestra compuesta y hacer un análisis físico-químico: N extractable ($\text{N-NO}_3 + \text{N-NH}_4$) con 2N KCl (Mulvaney, 1996); P extractable con NaHCO_3 (Olsen *et al.*, 1954);

and soil texture (Gee y Bauder, 1986). Procedures are summarized in Sadzawka *et al.* (2004). Selected soil chemical and physical properties are presented in Table 1.

Zn sources compared were: 1) ZnSO_4 (35% Zn, 99.9% water-soluble Zn); 2) Zn-EDTA, ethylenediaminetetraacetic acid (12% Zn, 100% water-soluble Zn). Both sources were applied at rates of 1.9, 3.8, and 7.7 mg Zn kg^{-1} (equivalent to 5, 10, and 20 kg Zn ha^{-1} , assuming a weight of 2.6×10^6 kg soil ha^{-1}). A control treatment without Zn was used. The Zn fertilizers were placed at the center of each pot and 2.5 cm below the seed. Before Zn application, a base fertilization was applied: 40 mg N kg^{-1} as urea (46% N), 60 mg P_2O_5 kg^{-1} as triple superphosphate (46% P_2O_5) and 60 mg K_2O kg^{-1} as potassium chloride (60% K_2O); these fertilizers were homogeneously mixed with the soil of each pot. Two additional N applications (40 mg N kg^{-1} each) as urea solution, were applied to the soil surface at 20 and 40 d after seeding (das).

After the initial fertilization, sufficient deionized water was added to bring the soils near field capacity (FC), and 10 corn seeds were planted at each pot. At 10 das, plants were thinned to three plants per pot, trying to maintain the plants concentric to the fertilizer placement. Plants were grown in a greenhouse, pots were randomized across the experimental area and re-randomized weekly. Plants were watered regularly with deionized water to keep the soil moisture near FC.

The corn forage was harvested 60 das, washed with distilled water, and dried in a forced-air oven at 65 °C until constant weight.

Table 1. Selected physical and chemical characteristics of soils used in the two experiments.

Cuadro 1. Características físicas y químicas seleccionadas de suelos usados en los dos experimentos.

	Experiment 1 (Copiapó soil)	Experiment 2 (Ovalle soil)
Chemical analyses		
N- NO_3 + N- NH_4 (mg kg^{-1})	25	45
NaHCO ₃ Olsen-P (mg kg^{-1})	6	23
Extractable K (mg kg^{-1})	288	369
DTPA-Fe (mg kg^{-1})	4.5	6.0
DTPA-Zn (mg kg^{-1})	0.3	20.0
DTPA-Mn (mg kg^{-1})	4.1	11.4
DTPA-Cu (mg kg^{-1})	0.48 (1.2) [†]	2.88
OM (%)	0.35	1.96
pH in water (1:2 ratio)	7.94	7.78
CaCO ₃ equivalent (%)	9.8	17.5
Soluble bicarbonate (meq L^{-1})	3.0	6.0
Physical analysis		
Sand (%)	68.0	51.3
Clay (%)	26.5	38.3
Silt (%)	5.5	10.4
Texture	Sandy clay loam	Sandy clay

[†] Cu content was raised to reach a final value of 1.2 mg kg^{-1} by adding Cu-EDTA before sowing ♦ El contenido de Cu se elevó para alcanzar un valor final de 1.2 mg kg^{-1} agregando Cu-EDTA antes de sembrar.

P extractable con acetato de amonio (Thomas, 1982); pH en agua (Mc Lean, 1982); materia orgánica (MO) por el método Walkley-Black (Nelson y Sommers, 1996); micronutrientes extractables con DTPA-TEA (Lindsay y Norvell, 1978); CaCO₃ equivalente por un método gravimétrico (Self y Rodríguez, 1988); bicarbonato soluble en extracto de pasta saturada (Rhoades, 1982); y textura de suelo (Gee y Bauder, 1986). Los procedimientos se resumen en Sadzawka *et al.* (2004). En el Cuadro 1 se presentan las propiedades físicas y químicas de los suelos seleccionados.

Las fuentes de Zn comparadas fueron: 1) ZnSO_4 (Zn 35%, Zn 99.9% soluble en agua); 2) Zn-EDTA, ácido etilendiamino-tetraacético (12% Zn, Zn 100% soluble en agua). Se aplicaron ambas fuentes en dosis de 1.9, 3.8 y 7.7 mg Zn kg^{-1} (equivalente a 5, 10, y 20 kg Zn ha^{-1} , suponiendo un peso de 2.6×10^6 kg suelo ha^{-1}). Se usó un tratamiento testigo sin Zn. Los fertilizantes de Zn se colocaron en el centro de cada maceta y 2.5 cm debajo de la semilla. Antes de aplicar Zn, se aplicó una fertilización base: 40 mg N kg^{-1} como urea (46% N), 60 mg P_2O_5 kg^{-1} como superfosfato triple (46% P_2O_5) y 60 mg K_2O kg^{-1} como cloruro de potasio (60% K_2O); estos fertilizantes se mezclaron homogéneamente con el suelo de cada maceta. Se realizaron dos aplicaciones adicionales de N (40 mg N kg^{-1} cada una), como solución de urea, en la superficie del suelo, a los 20 y 40 d después de la siembra (dds).

Después de la fertilización inicial se agregó suficiente agua desionizada para llevar a los suelos cerca de su capacidad de campo (CC), y se plantaron 10 semillas de maíz en cada maceta. A los 10 dds se ralearon las plantas hasta dejar tres por maceta, tratando de mantener las plantas concéntricas a la ubicación del fertilizante. Las plantas se cultivaron en de invernadero; las macetas se colocaron al azar dentro del área experimental y fueron realeatorizadas cada semana. Las plantas se regaron regularmente con agua desionizada para mantener la humedad del suelo cerca de la CC.

Se cosechó el forraje de maíz 60 dds, se lavó con agua destilada, se secó en un horno de aire forzado a 65 °C hasta un peso constante. Se pesó el material seco de la planta y se molió para pasarlo a través de un tamiz de 0.5 mm antes del análisis de Zn. En este momento, se tomaron las muestras de suelo para realizar el análisis de Zn residual con DTPA.

Experimento 2

Como planta de prueba se usó sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) para comparar dos fuentes de fertilizante de Fe. Se recolectó un suelo Inceptisol en un lugar cerca de la ciudad de Ovalle en el centro-norte de Chile (30° 36' S). El suelo se obtuvo desde un viñedo (*Vitis vinifera* L.) en el cual se habían observado síntomas de clorosis férrica cada año y donde el CaCO₃ era visible sobre la superficie del suelo. La preparación del suelo así como el llenado y muestreo de las macetas fueron idénticos a los descritos en el experimento 1.

Las fuentes de Fe comparadas fueron: 1) FeSO_4 (35% Fe, 99.9% Fe soluble en agua); 2) Fe-EDDHA, ácido etildiamino di(0-hidroxifenilacético) (12% Fe, Fe soluble 100%). Se aplicaron ambas fuentes en dosis de 1.5, 3.0 y 6.0 mg Fe kg^{-1} (equivalente a 3,

The dried plant material was weighted and ground to pass through a 0.5 mm sieve before Zn analysis. At this time, soil samples were taken to perform residual DTPA-Zn analysis.

Experiment 2

Sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) was used as test plant to compare two Fe fertilizer sources. An Inceptisol soil was collected at a location near the city of Ovalle in central-northern Chile (30° 36' S). The soil was obtained from a vineyard (*Vitis vinifera* L.) field in which iron chlorosis symptoms had been observed every year and where CaCO_3 was visible over the soil surface. Soil preparation as well as pot filling and sampling were identical to the ones described for experiment 1.

Fe sources compared were: 1) FeSO_4 (35% Fe, 99.9% water-soluble Fe); 2) Fe-EDDHA, ethylenediamine di(0-hydroxyphenylacetic acid) (12% Fe, 100% soluble Fe). Both sources were applied at rates of 1.5, 3.0, and 6.0 mg Fe kg^{-1} (equivalent to 3, 6, and 12 kg Fe ha^{-1} , assuming a weight of 2×10^6 kg soil ha^{-1}). A control treatment without Fe was used. Ten sorghum seeds were planted at each pot; 12 das plants were thinned to three plants per pot trying to maintain plants concentric to the fertilizer placement. The handling of the fertilizers, fertilization with N, P and K, water management and rotation of the pots were identical to those described for experiment 1.

The sorghum forage was harvested 60 das, washed with distilled water, and dried in a forced-air oven at 65 °C until constant weight; samples were analyzed for Fe content. Soil samples were taken to perform residual DTPA-Fe analysis.

Analytical procedures

Plant tissues (1 g) were ashed at 500 °C and digested with a 2N HCl solution. The ash suspension was diluted to 25 mL and filtered (Sadzawka *et al.*, 2004b). The Fe and Zn concentrations were determined through atomic emission spectrometry in inductively coupled plasma equipment (ICP-OES, Varian Liberty series II).

Soil samples were extracted with DTPA solution adjusted to pH 7.3 for 2 h and then filtered (Lindsay and Norvell, 1978). The Fe and Zn concentrations were also determined in the ICP-OES equipment.

Economical analysis

The economical analysis was done as follows: 1) quadratic models were adjusted to response curves for the chelate and sulfate; 2) models were derived and equaled to zero to obtain fertilizer rates for maximum DM yields, and rates were replaced into the models to obtain actual maximum DM yields; 3) gross income was obtained by multiplying the maximum DM yields for each fertilizer source times the price of DM (price of perennial ryegrass (*Lolium perenne*) hay bales was used for this calculation); DM yield was extrapolated from g pot^{-1} to kg ha^{-1} , to obtain more understandable figures, using a linear relationship between soil volume of the pot (5 L) and

6 y 12 kg Fe ha^{-1} , suponiendo un peso de 2×10^6 kg suelo ha^{-1}). Se usó un tratamiento testigo sin Fe. Se plantaron 10 semillas de sorgo en cada maceta; 12 dds se entresacaron plantas hasta dejar tres por maceta tratando de mantener las plantas concéntricas a la ubicación del fertilizante. El manejo de los fertilizantes, la fertilización con N, P y K, el manejo del agua y rotación de las macetas fueron idénticos a los descritos en el experimento 1.

Se cosechó el forraje de sorgo 60 dds, se lavó con agua destilada y se secó en un horno de aire forzado a 65 °C hasta el peso constante; se analizaron las muestras para ver el contenido de Fe. Se tomaron muestras de suelo para realizar un análisis de Fe residual con DTPA.

Procedimientos analíticos

Los tejidos de la planta (1 g) se incineraron a 500 °C y digirieron con una solución de HCl 2N. La suspensión de ceniza se diluyó en 25 mL y se filtró (Sadzawka *et al.*, 2004b). Las concentraciones de Fe y Zn se determinaron con espectrometría de emisión atómica en un equipo de plasma inductivamente acoplado (ICP-OES, Varian Liberty series II).

Las muestras de suelo se extrajeron con una solución de DTPA ajustada a pH 7.3 por 2 h y se filtró (Lindsay y Norvell, 1978). Las concentraciones de Fe y Zn también se determinaron en el equipo ICP-OES.

Análisis económico

El análisis económico se realizó así: 1) se ajustaron modelos cuadráticos para las curvas de respuesta para los quelatos y sulfatos; 2) se derivaron los modelos y se igualó a cero para obtener las dosis de fertilizante para rendimientos máximos de MS y las dosis se substituyeron en los modelos para obtener los rendimientos máximos de MS; 3) el ingreso bruto se obtuvo multiplicando los rendimientos máximos de MS por cada fuente de fertilizante por el precio de la MS, para este cálculo se usó el precio del fardo de forraje de ballica perenne (*Lolium perenne* L.); la MS se extrapoló de g maceta^{-1} a kg ha^{-1} para obtener cifras más comprensibles, usando una relación lineal entre el volumen del suelo de la maceta (5 L) y aquel en 1 ha (2.6×10^6 ó 2×10^6 L para los experimentos de Zn y Fe); 4) el costo de la fertilización total se obtuvo multiplicando la dosis para rendimiento máximo por el precio de 1 kg de Zn o Fe; 5) la relación beneficio/costo se calculó dividiendo el beneficio bruto por el costo total de la fertilización.

Diseño experimental y análisis de datos

Cada experimento correspondió a un diseño completamente al azar con tres repeticiones. Hubo un arreglo factorial de dos factores (fuente y dosis de fertilizante) en ambos experimentos. Se compararon las medias de tratamiento usando la diferencia mínima significativa (LSD; $p \leq 0.05$). Para los análisis de varianza y los ajustes del modelo cuadrático se usaron PROC GLM y PROC REG (SAS Institute Inc., 1999).

that in 1 ha (2.6×10^6 or 2×10^6 L for the Zn and Fe experiments); 4) total fertilization cost was obtained by multiplying the rate for maximum yield times the price of 1 kg of Zn or Fe; 5) benefit/cost relationship was calculated by dividing gross benefit by total fertilization cost.

Experimental design and data analysis

Each experiment corresponded to a completely randomized design with three replications. There was a factorial arrangement of two factors (fertilizer source and rate) in both experiments. Treatment means were compared using least significant difference (LSD; $p \leq 0.05$). Analyses of variance and quadratic model fittings were performed using PROC GLM and PROC REG (SAS Institute, Inc., 1999).

RESULTS AND DISCUSSION

Experiment 1

The original soil extractable DTPA-Zn level (0.3 mg kg^{-1}) do not meet the needs of most crops (Lindsay, 1991; Sims and Johnson, 1991). The soil had a high pH and a large CaCO_3 content (Table 1); both properties strongly affecting the availability of soil Zn for plants (Martens and Lindsay, 1990; Xiang *et al.*, 1995). During the experiment, only the plants fertilized with 10 or 20 kg Zn ha^{-1} as Zn-EDTA and 20 kg Zn ha^{-1} as ZnSO_4 did not show any symptoms of Zn deficiency. The other treatments, including the control, showed symptoms which varied with the Zn rate. Control plants and those of the sulfate treatment with 5 kg Zn ha^{-1} presented clear deficiency symptoms, characterized by a severe stunting, caused by shortening of internodes, and chlorotic bands on newer leaves.

There was a significant effect of the Zn source and rate on DM production and Zn-EDTA produced 4% more DM than Zn sulfate. When comparing rates, no differences were observed among Zn rates over 5 kg Zn ha^{-1} . Zinc application increased DM production by 36%, with respect to the control treatment. Although the interaction source $\times$ rate was not significant, it was possible to reach the same DM yield by reducing the 20 kg Zn ha^{-1} applied as Zn sulfate to 10 kg ha^{-1} applied as Zn-EDTA (Figure 1).

Tissue Zn concentration and uptake were significantly affected by the Zn source and rate and the interaction between them. Both sources increased plant Zn concentration; however plants of Zn-EDTA treatments presented Zn concentrations between 117 and 136% higher than those fertilized with ZnSO_4 , at the same rate. This clearly affected Zn extraction, which was 137% superior with Zn-EDTA as compared to ZnSO_4 . Plants fertilized with 20 kg Zn ha^{-1} as Zn-DTPA

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Experimento 1

El nivel de Zn-DTPA original del suelo (0.3 mg kg^{-1}) no satisface las necesidades de la mayoría de los cultivos (Lindsay, 1991; Sims y Johnson, 1991). El suelo tenía un pH alto y un contenido elevado de CaCO_3 (Cuadro 1); ambas propiedades afectan fuertemente la disponibilidad de Zn del suelo para las plantas (Martens y Lindsay, 1990; Xiang *et al.*, 1995). Durante el experimento, sólo las plantas fertilizadas con 10 ó 20 kg Zn ha^{-1} como Zn-EDTA y 20 kg Zn ha^{-1} como ZnSO_4 no mostraron síntomas de deficiencia de Zn. Los otros tratamientos, incluyendo el testigo, mostraron síntomas que variaban con la dosis de Zn. Las plantas del testigo y aquellas del tratamiento de sulfato con 5 kg Zn ha^{-1} presentaron claros síntomas de deficiencia, caracterizados por un severo enanismo, causado por acortamiento de los internodos, y bandas cloróticas en las hojas más nuevas.

Hubo un efecto significativo de la fuente y la dosis de Zn sobre la producción de MS y el Zn-EDTA produjo 4% más de MS que el sulfato de Zn. Al comparar las dosis, no se observó diferencia entre aquellas de más de 5 kg Zn ha^{-1} . La aplicación de cinc aumentó la producción de MS en 36% con respecto al tratamiento testigo. Aunque la interacción fuente $\times$ dosis no fue significativa, fue posible lograr el mismo rendimiento de MS reduciendo los 20 kg Zn ha^{-1} aplicados como sulfato de Zn a 10 kg ha^{-1} aplicados como Zn-EDTA (Figura 1).

La concentración y la absorción de Zn en los tejidos se afectaron significativamente por la fuente y la dosis de Zn y la interacción entre ellas. Ambas fuentes aumentaron la concentración de Zn en la planta; sin embargo, las plantas de los tratamientos con Zn-EDTA presentaron concentraciones de Zn entre 117 y 136% más altas que aquellas fertilizadas con ZnSO_4 , a la misma dosis. Esto claramente afectó la extracción de Zn, que fue 137% superior con Zn-EDTA en comparación con ZnSO_4 . Las plantas fertilizadas con 20 kg Zn ha^{-1} como Zn-EDTA mostraron un consumo de lujo. Tuvieron una concentración de Zn más alta que aquellas que recibieron 10 kg Zn ha^{-1} , pero produjeron el mismo rendimiento de MS. En la dosis más alta de Zn con ZnSO_4 , la concentración de Zn fue 3.2 veces más alta en comparación con las plantas testigo (Figura 1). Este aumento fue superior al reportado por Amrani *et al.* (1999) quienes, en un estudio similar, encontraron un aumento de dos veces, aun con una dosis de Zn ligeramente más alta, pero en un suelo con un pH más bajo y un contenido de Zn más alto. El mejoramiento en la concentración y la absorción de Zn

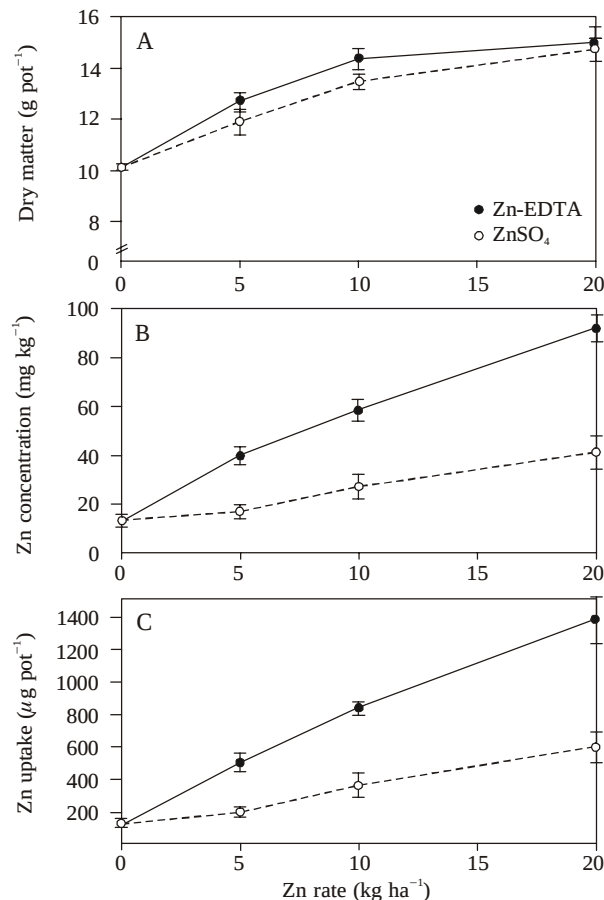


Figure 1. Effect of Zn source and rate on dry matter production (A), Zn concentration (B) and Zn uptake (C) of corn plants. Values are mean of three replicates. Bars show standard deviation.

Figura 1. Efecto de la fuente y dosis de Zn sobre la producción de materia seca (A), concentración de Zn (B) y absorción de Zn (C) de plantas de maíz. Los valores son medias de tres repeticiones. Las barras muestran la desviación estándar.

showed a luxury consumption. They had higher Zn concentration than those receiving 10 kg Zn ha⁻¹, but produced the same DM yield. At the highest Zn rate with ZnSO₄, Zn concentration was 3.2 times higher compared to the control plants (Figure 1). This increase was superior to that reported by Amrani *et al.* (1999) who, in a similar study, found a 2-fold increase, even with a slightly higher Zn rate, but in a soil with lower pH and higher Zn content. The improvement in the Zn concentration and uptake observed in this experiment comparing ZnSO₄ and Zn-EDTA, is similar to that reported by Gangloff *et al.* (2002).

When adjusting quadratic models to the response curves to applied Zn, it was possible to obtain the Zn rates for maximum DM yields and calculate the benefit/cost relationship for each evaluated Zn source (Table

observado en este experimento comparando ZnSO₄ y Zn-EDTA, es similar al reportado por Gangloff *et al.* (2002).

Cuando se ajustaron modelos cuadráticos a las curvas de respuesta al Zn aplicado, fue posible obtener las dosis de Zn para los máximos rendimientos de MS y calcular la relación beneficio/costo de cada fuente de Zn evaluada (Cuadro 2). Los rendimientos máximos de MS se obtuvieron con la aplicación de 6.5 y 8 mg kg⁻¹ Zn como Zn-EDTA y ZnSO₄. Sin embargo, los rendimientos de MS fueron muy similares (4% de diferencia) para ambas fuentes, alcanzando aproximadamente 15 g maceta⁻¹. Puesto que el costo de la unidad de Zn para la fuente quelada fue once veces más alta que el sulfato, la relación beneficio/costo fue aproximadamente ocho veces más alta para esta última fuente de Zn. Esto significa que, bajo las condiciones del experimento, sería más económico usar sulfato de Zn en dosis más altas de Zn en comparación con Zn-EDTA. Sin embargo, otros importantes aspectos como la sensibilidad de las especies de cultivo a la deficiencia de Zn, el valor del cultivo, el efecto residual y la duración del cultivo deben también considerarse antes de seleccionar la fuente de Zn para cultivos sembrados en suelos similares.

Experimento 2

El suelo presentó un pH alto y un contenido alto de CaCO₃ (Cuadro 1), propiedades que afectan fuertemente la disponibilidad de Fe (Loeppert, 1986; Martens y Lindsay, 1990). Hubo una respuesta significativa a la aplicación de Fe a pesar de que el contenido de Fe-DTPA (6 mg k⁻¹) era superior al umbral crítico para el sorgo (4.5-4.8 mg Fe kg⁻¹) (Lindsay, 1991; Sims y Jonson, 1991). Sin embargo, en algunos estudios de invernadero y campo, se ha determinado niveles críticos de 5 y 6 mg kg⁻¹ Fe-DTPA (Boer y Reisenauer, 1973). Además, este suelo presentaba una concentración alta de HCO₃⁻ en extracto de pasta saturada (6 meq L⁻¹). La presencia de este anión es uno de los principales factores que determinan la clorosis de hierro en las plantas (Lucena, 2000). En sorgo, Loeppert y Hallmark (1985) no encontraron relación entre la deficiencia de hierro y algunas propiedades amortiguadoras del suelo (reactividad CaCO₃ y contenido de HCO₃⁻) lo cual, como lo señalan Morris *et al.* (1990), apoya el hecho de que la respuesta de estrés de Fe del sorgo no involucra la acidificación de la rizósfera (Marschner *et al.*, 1986). Sin embargo, Alhendawi *et al.* (1997) mostraron que la presencia de HCO₃⁻ empeoró los mecanismos de absorción de Fe y la translocación de Fe del sorgo reduciendo el crecimiento normal de la raíz, lo que disminuye la superficie donde los mecanismos de

2). Maximum DM yields were obtained with the application of 6.5 and 8 mg kg⁻¹ Zn as Zn-EDTA and ZnSO₄. However, DM yields were very similar (4% difference) for both sources, reaching approximately 15 g pot⁻¹. Since the cost of the Zn unit for the chelated source was eleven times higher than the sulfate one, the benefit/cost relationship was approximately eight times higher for the latter Zn source. This means that, under the conditions of this experiment, it would be more economical to use Zn sulfate at higher Zn rates as compared to Zn-EDTA. However, other important aspects such as crop species sensitivity to Zn deficiency, crop value, residual effect and length of the crop must also be considered before choosing the Zn source for crops grown under similar soils.

Experiment 2

The soil presented a high pH and a high CaCO₃ content (Table 1), both properties strongly affecting Fe availability (Loeppert, 1986; Martens and Lindsay, 1990). A significant response to the Fe application was observed in spite of the fact that the soil Fe-DTPA content (6 mg kg⁻¹) was over the threshold critical for sorghum (4.5-4.8 mg Fe kg⁻¹) (Lindsay, 1991; Sims and Johnson, 1991). However, in some greenhouse and field studies 5 and 6 mg kg⁻¹ DTPA-Fe have been determined as critical (Boer and Reisenauer, 1973). Besides, this soil presented a high concentration of HCO₃⁻ in saturated paste extract (6 meq L⁻¹). The presence of this anion is one of the main factors determining iron chlorosis in plants (Lucena, 2000). In sorghum, Loeppert and Hallmark (1985) did not find relationship between iron deficiency and some buffer properties of soil (CaCO₃ reactivity and HCO₃⁻ content) which, as pointed out by Morris *et al.* (1990), supports the fact that the Fe-stress response of sorghum does not involve the acidification of the rhizosphere (Marschner *et al.*, 1986). However, Alhendawi *et al.* (1997) showed that the presence of HCO₃⁻ impaired the Fe uptake mechanism and Fe translocation of

respuesta de Fe están localizados. En este estudio, una solución de HCO₃ 5mM disminuyó significativamente la absorción y concentración de Fe en sorgo, maíz y cebada (*Hordeum vulgare* L.). En nuestro experimento, la clorosis por deficiencia de Fe probablemente se relacionó con la incapacidad del suelo para suministrar el Fe existente o problemas de absorción y transporte de Fe en las plantas de sorgo.

Durante el periodo de crecimiento, sólo las plantas fertilizadas con 12 kg Fe ha⁻¹ como Fe-EDDHA y FeSO₄ no mostraron síntomas de deficiencia de Fe. Todos los otros tratamientos causaron síntomas de acuerdo a la dosis de Fe, pero fueron menos marcados en los tratamientos con Fe-EDDHA. Los síntomas de deficiencia se caracterizaron principalmente por clorosis intervenal de todas las hojas, ocurriendo primero en las más nuevas. Las plantas extremadamente afectadas mostraron una producción de MS más baja y presentaron una clorosis completa.

Hubo un efecto significativo de la fuente y la dosis de Fe sobre la producción de MS, la concentración de Fe y la absorción de Fe de las plantas; se obtuvo una producción más alta de MS cuando el Fe se aplicó como Fe-EDDHA. La adición de hierro (3, 6, y 12 kg ha⁻¹), incrementó la producción de MS en 23, 34 y 40%, en comparación con el testigo. Se obtuvieron rendimientos similares de MS con la aplicación de 6 kg Fe ha⁻¹ como Fe-EDDHA y 12 kg Fe ha⁻¹ como sulfato de Fe, aunque la interacción fuente × dosis no fue significativa (Figura 2).

En promedio, la concentración y absorción más alta de Fe se obtuvo con Fe-EDDHA. La dosis de hierro aumentó la concentración y absorción de Fe de la planta; sin embargo, hubo diferencias significativas sólo para las dos dosis de Fe más bajas. El aumento en el contenido de Fe de las plantas cuando se comparó Fe-EDDHA con FeSO₄ no fue tan pronunciado como aquel observado con la forma quelada en el experimento de Zn con maíz. En nuestro experimento, el Fe-EDDHA incrementó la concentración de Fe en las plantas 18 y 17%, comparado con el FeSO₄, para las dosis 3 y 6 kg

Table 2. Economical comparison between Zn and Fe chelates and sulfates sources.
Cuadro 2. Comparación económica entre fuentes de sulfatos y quelatos de Fe y Zn.

Item	Zn-EDTA	ZnSO ₄	Chelate-sulfate sulfate (%)	Fe-EDDHA	FeSO ₄	Chelate-sulfate sulfate(%)
Micronutrient rate for maximum yield (mg kg ⁻¹)	176.5	218.0	-18	94,6	126,0	-22
Maximum DM yield (g pot ⁻¹)	15.2	14.6	4	16.1	15.3	5
Micronutrient price (US \$ kg ⁻¹)	61	6	965	96	6	1577
DM price (US \$ kg ⁻¹) ^f	0.074	0.074	0	0.074	0.074	0
Gross benefit (US \$ ha ⁻¹) ^g	449	432	4	476	452	5
Cost (US \$ ha ⁻¹)	1029	118	770	890	68	1206
Benefit/cost	0.4	3.7	-88	0.5	6.6	-92

sorghum by reducing the normal root growth, which diminishes the surface where the Fe response mechanisms are placed. In their work, a 5 mM HCO_3^- solution significantly decreased the Fe uptake and Fe concentration in sorghum, maize and barley (*Hordeum vulgare* L.). In our experiment, Fe deficiency chlorosis was probably related to the failure of the soil to supply the existent Fe or problems in the Fe uptake and transport by sorghum plants.

During the growing period, only plants fertilized with 12 kg Fe ha^{-1} as Fe-EDDHA and FeSO_4 did not show symptoms of Fe deficiency. All the other treatments caused symptoms according to Fe rate, but they were less pronounced in the Fe-EDDHA treatments. Deficiency symptoms were mainly characterized by interveinal chlorosis of the entire leaves, occurring first on newer ones. Extremely affected plants showed lower DM production, and presented a complete chlorosis.

There was a significant effect of the Fe source and rate on DM production, Fe concentration and Fe uptake of plants; a higher DM production was obtained when Fe was applied as Fe-EDDHA. Iron addition (3, 6, and 12 kg ha^{-1}), increased DM production by 23, 34, and 40%, compared to the control. Similar DM yields were obtained with the application of 6 kg Fe ha^{-1} as Fe-EDDHA and 12 kg Fe ha^{-1} as Fe sulfate, although the interaction source $\times$ rate was not significant (Figure 2).

On average, higher Fe concentration and uptake were obtained with Fe-EDDHA. Iron rate increased plant Fe concentration and uptake; however, there were significant differences only for the two lower Fe rates. The increment in Fe content of plants when comparing Fe-EDDHA with FeSO_4 was not as pronounced as that observed with the chelated form in the Zn experiment with corn. In our experiment, Fe-EDDHA increased Fe concentration in plants by 18 and 17% as compared to the FeSO_4 , for the 3 and 6 kg Fe ha^{-1} rates. Consequently, Fe uptake with the chelated source was not improved as much as in the Zn experiment, when compared to the sulfate form. The increments reached with Fe-EDDHA over FeSO_4 were 27 and 22%, for the 3 and 6 kg Fe ha^{-1} rates. Both Fe sources (12 kg Fe ha^{-1}) improved Fe concentration and uptake by 181 and 255%, as compared to the control plants (Figure 2). When FeSO_4 is placed near the seed, as in our experiment, the results are improved because the contact of fertilizers with soil is decreased (Godsey *et al.*, 2003). It is possible that the initial Fe-DTPA (6 mg kg^{-1}) content of the soil might have prevented a greater difference between both Fe sources. The use of deionized water could have also contributed to diminish the differences between sources, which would not

Fe ha^{-1} . En consecuencia, la absorción de Fe con la fuente quelada no se mejoró tanto como en el experimento de Zn, cuando se comparó con la forma de sulfato. Los aumentos logrados con Fe-EDDHA sobre FeSO_4 fueron 27 y 22% para las dosis 3 y 6 kg Fe ha^{-1} . Ambas fuentes de Fe (12 kg Fe ha^{-1}) mejoraron la concentración y absorción en 181 y 255%, comparado con las plantas testigo (Figura 2). Cuando el FeSO_4 se coloca cerca de la semilla, como en nuestro experimento, se mejoran los resultados porque se disminuye el contacto de los fertilizantes con el suelo (Godsey *et al.*, 2003). Es posible que el contenido inicial de Fe-DTPA (6 mg kg^{-1}) del suelo pudiera haber evitado una diferencia mayor entre ambas fuentes de Fe. El uso de agua desionizada también pudo haber contribuido a disminuir las diferencias entre las fuentes, lo que no sucedería cuando se riega con agua de un alto contenido de bicarbonato en condiciones de campo.

El ajuste de modelos cuadráticos para las curvas de respuesta al Fe aplicado, mostró que se lograron los rendimientos máximos de MS cuando se aplicó 4.6 y 6 mg kg^{-1} Fe como Fe-EDDHA y FeSO_4 (Cuadro 2). Los rendimientos máximos de MS fueron ligeramente más altos (4%) para la fuente quelada, comparada con el sulfato. Puesto que el costo de la unidad de Fe como Fe-EDDHA es casi 17 veces la del FeSO_4 , la relación beneficio/costo para este último fue más de 12 veces la de la fuente quelada. Bajo las condiciones de nuestro experimento, sería más económico usar la forma sulfato de hierro para corregir la deficiencia de Fe. Sin embargo, aspectos tales como el efecto residual de cada fuente, tipo de cultivo, sensibilidad y el valor del cultivo deben considerarse cuando se seleccione la fuente de Fe.

Zn-DTPA y Fe-DTPA residual en el suelo

Después de la cosecha, en el suelo Copiapó, el promedio de Zn-DTPA residual fue más alto con la fuente quelada. Ambas fuentes evaluadas elevaron linealmente el contenido de Zn-DTPA en el suelo (Figura 3A). Hubo una interacción de dos vías entre la fuente y dosis de Zn sobre el Zn-DTPA residual, que indicaron cambios en la proporción de recuperación de Zn con la fuente de fertilizante y la dosis de Zn aplicados. Hubo diferencias significativas en el contenido de Zn extractable entre las dos fuentes sólo en las dosis más altas de Zn, donde el Zn-EDTA sobrepasó 1.9 veces el valor mantenido por ZnSO_4 . Al considerar por separado las fuentes de Zn en los tratamientos con Zn-EDTA, la proporción de Zn recuperado fue 36, 43 y 70% para las dosis 5, 10 y 20 kg Zn ha^{-1} . Para los tratamientos con ZnSO_4 , la proporción recuperada fue 33, 32 y 37% para las dosis 5, 10, y 20 kg Zn ha^{-1} . La diferencia entre las fuentes de Zn en la proporción

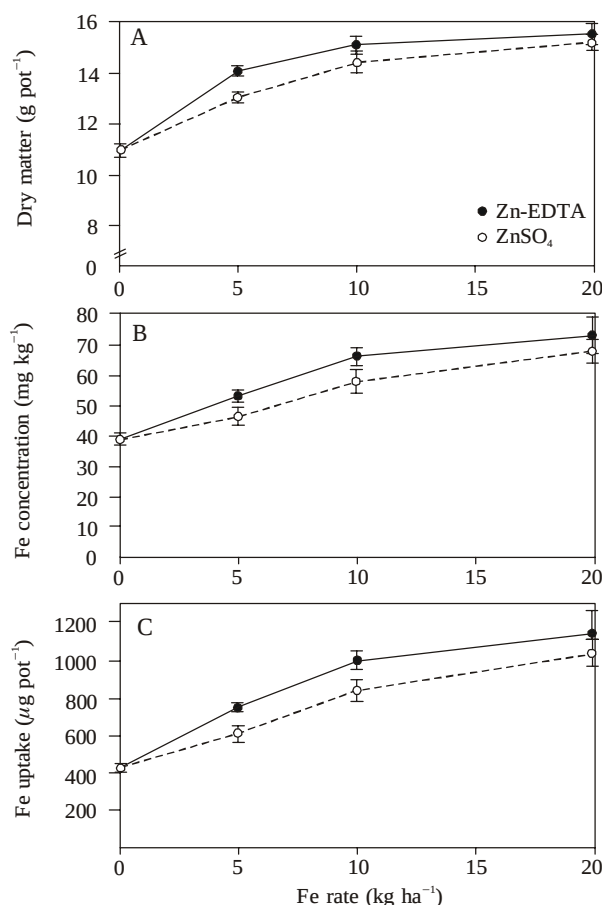


Figure 2. Effect of Fe source and rate on dry matter production (A), Fe concentration (B) and Fe uptake (C) of sorghum plants. Values are mean of three replicates. Bars show standard deviation.

Figura 2. Efecto de la fuente y dosis de Fe sobre la producción de materia seca (A), concentración de Fe (B) y absorción de Fe (C) de plantas de sorgo. Los valores son medias de tres repeticiones. Las barras muestran la desviación estándar.

happen when irrigating with a high bicarbonate content water under field conditions.

Adjustment of quadratic models to the response curves to applied Fe, showed that maximum DM yields were reached when applying 4.6 and 6 mg kg⁻¹ Fe as Fe-EDDHA and FeSO₄ (Table 2). Maximum DM yields were slightly higher (4%) for the chelated source as compared to the sulfate one. Since the cost of the Fe unit as Fe-EDDHA is almost 17 times that of FeSO₄, the benefit/cost relationship for the latter was more than 12 times than the chelated source. Under the conditions of our experiment, it would be more economical to use the sulfate form of iron to correct Fe deficiency. However aspects such as the residual effect of each source, crop, sensitivity, and the value of the crop must be considered when choosing the Fe source.

de Zn recuperado se debió principalmente al efecto quelante del EDTA. La proporción de Zn disponible aumenta con la dosis aplicada, probablemente como consecuencia de la saturación de los sitios de sorción (Ma y Uren, 1997; Obrador *et al.*, 2002). Así, para el tratamiento Zn-EDTA a la dosis más alta de Zn, hubo un aumento en la pendiente de la curva más allá de la dosis 10 kg Zn ha⁻¹ (Figura 3.)

Para el suelo Ovalle, hubo un efecto significativo de la fuente y dosis de Fe sobre el Fe-DTPA residual (Figura 3); sin embargo, sólo las dos dosis más altas aumentaron el nivel de Fe-DTPA. Los tratamientos con Fe-EDDHA presentaron los valores más altos de Fe-DTPA en el suelo, el cual se incrementó con el aumento de la dosis de Fe. No hubo diferencias significativas entre las fuentes cuando se compararon a la misma dosis. Follet y Lindsay (1971) reportaron una gran diferencia en la recuperación de Fe-DTPA cuando el hierro se aplicó como FeSO₄ o Fe-EDDHA. El método de aplicación (al centro de la maceta) pudo haber impedido que el Fe del sulfato se convirtiera más rápido en formas menos solubles, no extractables por DTPA. Después de 60 d no hubo diferencias significativas en el Fe-DTPA extractable entre el nivel dosis Fe (kg ha⁻¹), inicial de Fe, el testigo y los tratamientos de Fe a la dosis más baja de Fe (Figura 3). Debido a las propiedades químicas del suelo Ovalle, el Fe agregado rápidamente experimentó procesos de sorción y se volvió inasequible para las plantas, especialmente a las dosis más bajas de Fe y FeSO₄. No hubo un efecto claro sobre la proporción de Fe recuperado que fue 0, 50 y 48% para las dosis 3, 6 y 12 kg Fe ha⁻¹. Gil-Ortiz y Bautista-Carrascosa (2000), en un experimento de incubación y en un suelo arcillo-arenoso calcáreo usando dosis más altas de Fe, encontraron que el porcentaje de recuperación de Fe de Fe-EDDHA aumentó duplicando la dosis de Fe. Los mismos autores observaron que la recuperación de Fe fue más alta en suelos de texturas más gruesas, lo cual también concuerda con los resultados de Follet y Lindsay (1971).

Estos resultados concuerdan con los reportes de que los fertilizantes de Zn podrían mantener buenos niveles residuales de Zn (Brown *et al.*, 1964; Singh y Abrol, 1986; Fageria *et al.*, 2002) especialmente en formas queladas. El nivel residual esperado de fertilizantes de Fe no es tan bueno, excepto cuando se usan dosis altas de Fe (Mortvedt y Giordano, 1971; Fageria *et al.*, 2002).

Después de la cosecha, los niveles de Zn y Fe extractables con DTPA para las dos dosis más altas de Zn y Fe parecerían suficientes para la siguiente cosecha (Figura 3); sin embargo, los síntomas de deficiencia solamente se evitaron con las dosis más altas de aplicación.

Soil residual DTPA-Zn and DTPA-Fe

After harvest, in the Copiapó soil, the mean soil residual Zn was higher with the chelated source. The two sources linearly raised the soil DTPA-Zn content (Figure 3). There was a two-way interaction between Zn source and rate on the residual Zn-DTPA, which indicated changes in the proportion of Zn recovery with the fertilizer source and the Zn rate applied. There were significant differences in the extractable Zn content only between the two sources at the highest Zn rate, where the Zn-EDTA surpassed by 1.9 fold the value maintained by ZnSO_4 . When considering the Zn sources separately in the Zn-EDTA treatments, the proportion of Zn recovered was 36, 43, and 70% for the 5, 10, and 20 kg Zn ha^{-1} . For the ZnSO_4 treatments, the proportion of recovery was 33, 32, and 37% for the 5, 10, and 20 kg Zn ha^{-1} . The difference between Zn sources in the proportion of recovered Zn was mainly due to the chelating effect of EDTA. The proportion of available Zn increases with the applied rate, probably as a consequence of the saturation of the sorption sites (Ma and Uren, 1997; Obrador *et al.*, 2002). Thus, for the Zn-EDTA treatment at the highest Zn rate, there was an increase in the curve slope beyond the 10 kg Zn ha^{-1} rate (Figure 3).

For the Ovalle soil, there was a significant effect of the Fe rate and source on the residual DTPA-Fe (Figure 3); however, only the two highest rates increased the DTPA-Fe. Treatments with Fe-EDDHA presented the higher values of soil DTPA-Fe, which was increased by increasing the Fe rate. There were not significant differences between sources when compared at the same rate. Follet and Lindsay (1971) reported a great difference on DTPA-Fe recovery when Fe was applied either as FeSO_4 or Fe-EDDHA. The application method (at center of the pot) could have prevented the Fe from sulfate to turn faster into less soluble forms, not extractable by DTPA. After 60 d there were not significant differences in the DTPA-extractable Fe among the initial Fe level, the control, and the Fe treatments at the lowest Fe rate (Figure 3). Because of the chemical properties of the Ovalle soil, the added Fe quickly underwent sorption processes and became unavailable for plants, especially at the lowest Fe rates and for FeSO_4 . There was not a clear effect on the proportion of recovered Fe which was 0, 50, and 48% for the 3, 6, and 12 kg Fe ha^{-1} . Gil-Ortiz and Bautista-Carrascosa (2004), in an incubation experiment and in a calcareous sandy loam soil using higher Fe rates, found that the percent Fe recovery of Fe-EDDHA increased by duplicating the Fe rate. The same authors observed that Fe recovery was higher in coarser soils, which also agrees with the findings of Follet and Lindsay (1971).

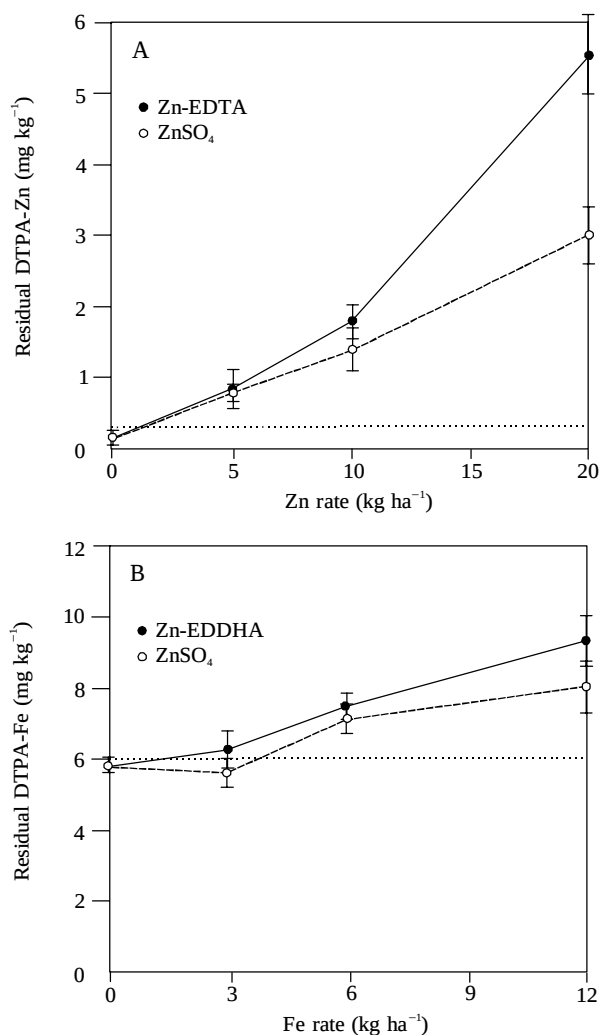


Figure 3. Effect of Zn and Fe source and rate on soil residual DTPA-Zn and DTPA-Fe. Values are mean of three replicates. Dotted lines indicate the initial micronutrient (Zn or Fe) concentration. Bars show standard deviation.

Figura 3. Efecto de la dosis y fuente de Zn y Fe sobre el nivel residual de Zn-DTPA y Fe-DTPA. Los valores son la media de tres repeticiones. Las líneas de puntos indican la concentración inicial de micronutrientes (Zn o Fe). Las barras muestran la desviación estándar.

De acuerdo con los resultados de nuestros experimentos, sólo los tratamientos con 10 kg Zn ha^{-1} (como Zn-EDTA) y 20 kg Zn ha^{-1} (como ZnSO_4 y Zn EDTA), y con 12 kg Fe ha^{-1} (como FeSO_4 y Fe-EDDHA) presentaron niveles adecuados de Zn y Fe requeridos para sostener la cosecha siguiente. Esta situación debe evaluarse bajo condiciones de campo, especialmente en el caso de Fe en suelos similares

CONCLUSIONES

El Zn-EDTA y el Fe-EDDHA fueron más efectivos que el ZnSO_4 y FeSO_4 para eliminar los síntomas

These results agree with reports that Zn fertilizers could maintain good residual Zn levels (Brown *et al.*, 1964; Singh and Abrol, 1986; Fageria *et al.*, 2002) especially in chelated forms. The expected residual level of Fe fertilizers is not as good, except when high Fe rates are used (Mortvedt and Giordano, 1971; Fageria *et al.*, 2002).

After harvest, soil DTPA extractable Zn and Fe levels for the two highest Zn and Fe rates seemed to be enough for a following crop (Figure 3); however, deficiency symptoms were only avoided with the highest application rates. According to the results of our experiments, only the treatments with 10 kg Zn ha⁻¹ (as Zn-EDTA) and 20 kg Zn ha⁻¹ (as ZnSO₄ and Zn EDTA), and with 12 kg Fe ha⁻¹ (as FeSO₄ and Fe-EDDHA) presented adequate Zn and Fe levels meant to support the following crop. This situation must be evaluated under field conditions, especially in the case of Fe in similar soils.

CONCLUSIONS

Zn-EDTA and Fe-EDDHA were more effective than ZnSO₄ and FeSO₄ in eliminating deficiency symptoms and increasing plant Zn and Fe contents and uptake in corn and sorghum.

Chelated Zn and Fe sources produced slightly higher DM yields than sulfate, with approximately 20% lower rates. However, their higher efficiency was not enough to overcome their larger cost which turned on a lower benefit/cost ratio as compared to simple sulfate salts.

Zn-EDTA and Fe-EDDHA were more effective than sulfate forms in increasing residual levels of extractable DTPA Zn and Fe. This difference was larger at higher Zn and Fe rates.

Besides economical considerations, factors such as crop species sensitivity to Zn or Fe deficiency, crop value, residual effect and length of the crop, must be considered before choosing the Zn or Fe source for crops grown under calcareous soils.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to thank the Company Tradecorp Spain for funding in part this research. Mauricio Molina would like to acknowledge PUC-MECESUP (0210) scholarship.

LITERATURE CITED

Alhendawi, R. A., V. Römhild, E. A. Kirkby, and H. Marschner. 1997. Influence of increasing bicarbonate concentrations on plant growth, organic acid accumulation in roots and iron uptake by barley, sorghum and maize. *J. Plant Nutr.* 20: 1731-1753.

Amrani, M., D. G. Westfall, and G. A. Peterson. 1999. Influence of water solubility of granular Zn fertilizers on plant uptake and growth. *J. Plant Nutr.* 22: 1815-1827.

de deficiencia y aumentar los contenidos y absorción de Zn y Fe de la planta en maíz y sorgo.

Las fuentes queladas de Zn y Fe produjeron rendimientos ligeramente más altos de MS, con dosis aproximadamente 20% más bajas. Sin embargo, su mayor eficiencia no fue suficiente para superar su mayor costo lo que se tradujo en una menor relación beneficio/costo en comparación con las sales simples de sulfato.

El Zn-EDTA y el Fe-EDDHA fueron más efectivos que las formas de sulfato para aumentar los niveles de Zn y Fe extractables con DTPA. Esta diferencia fue más grande en dosis más altas de Zn y Fe.

Además de las consideraciones económicas, factores como la sensibilidad de las especies de cultivo a la deficiencia de Zn o Fe, valor del cultivo, efecto residual y duración del cultivo, deben considerarse antes de seleccionar la fuente de Zn ó Fe para el desarrollo de los cultivos en suelos calcáreos.

—End of the English version—



Boer, G. T., and H. M. Reisenauer. 1973. DTPA as an extractant of available soil iron. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 4: 121-128.

Brown, A. L., B. A. Krantz, and P. E. Martin. 1964. The residual effect of zinc applied to soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 28: 236-238.

Fageria, N. K., V. C. Baligar, and R. B. Clark. 2002. Micronutrients in crop production. *Adv. Agron.* 77: 185-268.

Follet, R. H., and W. L. Lindsay. 1971. Changes in DTPA-extractable zinc, iron, manganese, and copper in soils following fertilization. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 35: 600-602.

Gangloff, W., D. G. Westfall, G. A. Peterson, and J. J. Mortvedt. 2002. Relative availability coefficients of organic and inorganic Zn fertilizers. *J. Plant Nutr.* 25: 259-273.

Gee, G. W., and J. W. Bauder. 1986. Particle size analysis. In: *Methods of Soil Analysis. Part 1.* Klute, A. (ed). Agron. Monog. 9. ASA. Madison, WI. pp: 383-412.

Gil-Ortiz, R., and I. Bautista-Carrascosa. 2004. Effects of Fe-EDDHA chelate application on evolution of soil extractable iron, copper, manganese, and zinc. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 35: 559-570.

Godsey, C. B., J. P. Schmidt, A. J. Schlegel, R. K. Taylor, C. R. Thompson, and R. J. Gehl. 2003. Correcting iron deficiency in corn with seed row-applied iron sulphate. *Agron. J.* 95: 160-166.

Goos, R. J., and S. Germain. 2001. Solubility of twelve iron fertilizer products in alkaline soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 32: 2317-2323.

Grant, W. T. 1982. Exchangeable cations. In: Page, A. L., R. H. Miller, and D. R. Keeney (eds). *Methods of Soil Analysis. Part 2.* 2nd edition. Agron. Monog. 9. ASA. Madison, WI. pp: 159-165.

Lindsay, W., and W. Norvell. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42: 421-428.

Lindsay, W. L. 1991. Inorganic equilibria affecting micronutrients in soil. In: *Micronutrients in Agriculture.* Mortvedt, J. J., F. R. Cox, L. M. Shuman, and R. M. Welch (eds). SSSA. Madison, Wis. USA. pp: 89-112.

- Loeppert, R. H. 1986. Reactions of iron and carbonates in calcareous soils. *J. Plant Nutr.* 9: 195-214.
- Loeppert, R. H., and C. T. Hallmark. 1985. Indigenous soil properties influencing the availability of iron in calcareous soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49: 597-603.
- Lucena, J. J. 2000. Effect of bicarbonate, nitrate and other environmental factors on iron deficiency chlorosis. A review. *J. Plant Nutr.* 23: 1591-1606.
- Ma, Y. B., and N. C. Uren. 1997. The fate and transformation of zinc added to soils. *Aust. J. Soil Res.* 35: 727-738.
- Marschner, H., V. Römhild, and M. Kissel. 1986. Different strategies in higher plants in mobilization and uptake of iron. *J. Plant Nutr.* 9: 695-713.
- Martens, D. C., and W. L. Lindsay. 1990. Testing soils for copper, iron, manganese and zinc. *In: Soil Testing and Plant Analysis*. Westerman, R. L. (ed). SSSA. Madison, WI. pp: 229-264.
- Mc Lean, E. O. 1982. Soil pH and lime requirement. *In: Page, A. L., R. H. Miller, and D. R. Keeney (eds). Methods of Soil Analysis. Part 2. 2nd edition. Agron. Monog. 9. ASA. Madison, WI. pp: 199-223.*
- Morris, D. R., R. H. Loeppert, and T. J. Moore. 1990. Indigenous soil factors influencing iron chlorosis of soybean in calcareous soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54: 1329-1336.
- Mortvedt, J. J. and P. M. Giordano. 1971. Response of grain sorghum to iron sources applied alone or with fertilizers. *Agron. J.* 63: 758-761.
- Mulvaney, R. L. 1996. Nitrogen: Inorganic forms. *In: Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods. American Society of Agronomy. Sparks, D. L., A. L. Page, P. A. Helmke, R. H. Loeppert, P. N. Soltanpour, M. A. Tabatabai, G. T. Johanson, and M. E. Summer (eds). Madison, WI. pp: 1123-1184.*
- Nelson, D. W., and L. E. Sommers. 1996. Total carbon, organic carbon and organic matter. *In: Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods. American Society of Agronomy. Sparks, D. L., A. L. Page, P. A. Helmke, R. H. Loeppert, P. N. Soltanpour, M. A. Tabatabai, G. T. Johanson, and M. E. Summer (eds). Madison, WI. pp: 961-1010.*
- Obrador, A., J. M. Alvarez, M. D. Fernández, and M. López-Valdivia. 2002. Changes with time of zinc forms in an acid, neutral, and a calcareous soil amended with three organic zinc complexes. *Aust. J. Soil Res.* 40: 137-148.
- Olsen, S. R., C.V. Cole, F. S. Watanabe, and L. A. Dean. 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. USDA Circular 939:1-19. Gov. Printing Office Washington D.C.
- Rhoades, J. D. 1982. Soluble salts. *In: Page, A. L., R. H. Miller, and D. R. Keeney (eds). Methods of soil analysis. Part 2. 2nd edition. Agron. Monog. 9. ASA. Madison, WI. pp: 167-169.*
- Sadzawka, A., M. Carrasco, R. Grez, y M. Mora. 2004a. Métodos de análisis recomendados para los suelos chilenos. Comisión de Normalización y Acreditación, Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo. Santiago, Chile. 113 p.
- Sadzawka, A., R. Grez, M. Carrasco, y M. Mora. 2004b. Métodos de análisis de tejidos vegetales. Comisión de Normalización y Acreditación, Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo. Santiago. Chile. 53 p.
- SAS Institute Inc. 1999. SAS 8 Online Doc® Version Eight. Available. <http://v8doc.sas.com>. Accessed May., 2007.
- Self, J. R., and J. B. Rodríguez. 1998. Laboratory manual for AG-564. Soil and plant chemical analysis. Soil, water and plant testing laboratory. Department of Soil and Crop Sciences. Colorado State University, Fort Collins, Colorado, USA. 142 p.
- Sims, J. T., and G. V. Johnson. 1991. Micronutrient soil tests. *In: Micronutrients in Agriculture. Mortvedt, J. J., F. R. Cox, L. M. Shuman, and R.M. Welch (eds). SSSA. Madison, WI. pp: 427-476.*
- Singh, M. V., and I. P. Abrol. 1986. Transformation and movement of zinc in an alkali soil and their influence on the yield and uptake of zinc by rice and wheat crops. *Plant Soil* 94: 445-449.
- Vempati, R. K., and R. H. Loeppert. 1988. Chemistry and mineralogy of Fe-containing oxides and layer silicates in relation to plant available iron. *J. Plant Nutr.* 11: 1557-1574.
- Xiang, H. F., H. A. Tang, and O. H. Ying. 1995. Transformation and distribution of forms of zinc in acid, neutral and calcareous soils of China. *Geoderma* 66: 121-135.