

NIVEL CRÍTICO DE ZINC EN SUELOS DE COSTA RICA

Eloy Molina^{1/}, Elemer Bornemisza**

Palabras clave: zinc, suelos, nivel crítico, fertilidad, taxonomía.

Keywords: zinc, soils, critical level, fertility, taxonomy.

Recibido: 01/11/05

Aceptado: 17/03/06

RESUMEN

Se determinó el nivel crítico de Zn disponible en 4 órdenes de suelos de Costa Rica (Ultisoles, Vertisoles, Inceptisoles y Andisoles, 25 de cada uno), con 5 soluciones extractoras: Olsen Modificado (OM), Mehlich 3 (M3), Morgan Modificado (MM), DTPA y HCl. La metodología de Cate y Nelson fue utilizada para establecer los niveles críticos. Los niveles críticos de Zn en Ultisoles, expresados en mg l⁻¹, fueron: 2,0 (OM), 1,5 (M3), 0,5 (MM), 0,5 (DTPA), y 4,0 (HCl). En Vertisoles: 3,0 (OM), 3,0 (M3); 0,8 (MM), 1,0 (DTPA), y 1,5 (HCl). En Inceptisoles: 2,3 (OM), 1,7 (M3), 0,6 (MM), 0,8 (DTPA), y 2,5 (HCl). En Andisoles: 3,0 (OM), 2,5 (M3), 0,5 (MM), 1,0 (DTPA), y 3,3 (HCl). Al agrupar los suelos sin dividir en órdenes, hubo una dispersión mayor de los datos en los gráficos de Cate y Nelson, con una gran cantidad de puntos en los cuadrantes superior izquierdo e inferior derecho. Los niveles críticos de Zn en los 100 suelos, expresados en mg l⁻¹, fueron: 2,0 (OM), 2,0 (M3), 0,3 (MM), 0,7 (DTPA), y 3,8 (HCl). Los resultados demostraron la importancia de dividir los suelos en ordenes, para obtener valores críticos mas precisos. La mayoría de estos valores concordaron con los ámbitos de nivel crítico informados por otros investigadores en suelos de diferentes regiones. La solución Mehlich 3 mostró un comportamiento promisorio para identificar problemas de disponibilidad de Zn en suelos de Costa Rica.

ABSTRACT

Critical available Zn level in Costa Rican soils. The critical level for available Zn for 4 soil orders (Ultisols, Vertisols, Inceptisols and Andisols 25 each) in Costa Rica was determined with 5 extracting solutions: Modified Olsen (OM), Mehlich 3 (M3), Modified Morgan (MM), DTPA and HCl. Cate and Nelson's methodology was used in order to establish the critical levels. The critical levels of Zn in Ultisols, expressed in mg l⁻¹, were: 2.0 (OM), 1.5 (M3), 0.5 (MM), 0.5 (DTPA), and 4.0 (HCl). In Vertisols: 3.0 (OM), 3.0 (M3); 0.8 (MM), 1.0 (DTPA), and 1.5 (HCl). In Inceptisols: 2.3 (OM), 1.7 (M3), 0.6 (MM), 0.8 (DTPA), and 2.5 (HCl). In Andisols: 3.0 (OM), 2.5 (M3), 0.5 (MM), 1.0 (DTPA), and 3.3 (HCl). When the soils were studied without a subdivision by order, a larger dispersion of the data in the Cate and Nelson's graph was observed, with several points in the upper left and lower right quadrants. The critical levels for Zn in the 100 soils expressed in mg l⁻¹ were 2.0 (OM), 2.0 (M3), 0.3 (MM), 0.7 (DTPA), and 3.8 (HCl). Results showed the importance of dividing the soils into orders, to obtain more precise critical levels. Most of the data agreed with values for critical levels reported by other authors. Mehlich 3 showed a very good performance in predicting Zn availability in Costa Rican soils.

1/ Autor para correspondencia. Correo electrónico: eamolina@cariari.ucr.ac.cr

* Centro de Investigaciones Agronómicas, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.

INTRODUCCIÓN

El análisis de suelos es una herramienta de gran utilidad para diagnosticar problemas nutricionales y establecer recomendaciones de fertilización.

La interpretación del análisis de suelos se basa en estudios de correlación y calibración de la cantidad de un elemento extraído del suelo por un procedimiento de análisis específico, con la respuesta de las plantas a la aplicación de una cantidad adecuada del nutrimento (Sánchez 1981). Para esto es necesario establecer el “nivel crítico”, el cual se define como el contenido de un elemento en el suelo por encima del cual la probabilidad de un incremento en el rendimiento debido a la aplicación del elemento es baja.

El término correlación se refiere al proceso en el cual se determina si la cantidad de un elemento extraído por un procedimiento específico se relaciona directamente con la respuesta de una planta a la adición del elemento (Cate y Nelson 1965, Dahnke y Olson 1990). La calibración consiste en determinar el grado de limitación al crecimiento vegetal, o la probabilidad de obtener una respuesta en crecimiento a la aplicación de un nutrimento, con base en el valor obtenido por un procedimiento seleccionado de análisis (Dahnke y Olson 1990). La calibración está estrechamente relacionada con la correlación e interpretación, y debe ser conducida en un número grande de suelos que presenten un ámbito amplio de concentración del elemento en estudio, considerando valores bajos, medios y altos (Cox y Kamprath 1972, Whitney *et al.* 1985, Evans 1987). Inicialmente la mayoría de estos trabajos son hechos en el invernadero, debido a las facilidades de controlar algunas fuentes importantes de variación, como el clima, el efecto del subsuelo, las plagas, etc. (Dahnke y Olson 1990). Además, resultan más rápidos y económicos (Cox y Kamprath 1972, Díaz-Romeu y Hunter 1978); permitiendo a la vez comparar diferentes métodos de extracción y determinar los niveles críticos tentativos. La calibración a nivel de campo establece los niveles críticos definitivos para un método de extracción

previamente seleccionado, y constituye la fase más importante en los estudios de calibración (Sánchez 1981).

Un método de calibración corriente, consiste en correlacionar la respuesta en rendimiento o cualquier otro parámetro de crecimiento, con el valor del análisis de suelos (Waugh *et al.* 1973). Cuando se usa el rendimiento absoluto, por lo general ocurre una considerable dispersión de puntos (Sánchez 1981), y una gran variabilidad (Hanway 1973). Para eliminar algo de esta dispersión, se utiliza el rendimiento relativo o porcentaje (Cate y Nelson 1971), el cual se define como el rendimiento de un tratamiento que proporciona las cantidades adecuadas, pero no excesivas, de todos los nutrimentos menos el que está siendo estudiado, dividido entre el rendimiento de un tratamiento igual al anterior, pero que incluya el elemento en estudio, el resultado obtenido se multiplica por 100 (Cate y Nelson 1965).

Para el análisis químico de suelos, el uso de una solución extractora de carácter universal es el procedimiento óptimo. El extractante universal es un término utilizado para designar aquellas soluciones o procedimientos de análisis que son capaces de extraer formas disponibles para las plantas de varios nutrimentos simultáneamente, de manera rápida, reproducible y de bajo costo (Raj 1994). Algunos de los métodos de análisis químico de Zn disponible en los suelos presentan esta característica, tal es el caso de las soluciones Mehlich 3 y Olsen Modificado, que determinan simultáneamente macro y micronutrimentos.

Los estudios de calibración de análisis de suelos para Zn son muy escasos en las zonas tropicales. Para el diagnóstico de problemas de Zn, la mayoría de los laboratorios de análisis de suelos en los trópicos utilizan Mehlich 1, Mehlich 3, EDTA, Olsen Modificado y DTPA (Sims y Johnson 1991). Los niveles críticos reportados por estos laboratorios son muy variables; para DTPA: 0,5–1 mg kg⁻¹, HCl 0,1M: 1–5 mg kg⁻¹, Olsen Modificado: 1–10 mg kg⁻¹ (Lindsay y Cox 1985).

Lindsay y Norvell (1969), desarrollaron el método de DTPA para extraer Zn en suelos calcreos de Colorado, sugiriendo un nivel crítico de

0,5 mg Zn kg⁻¹. Singh y Takkar (1981) evaluaron varios extractantes de Zn en suelos arroceros de la India y encontraron correlaciones significativas entre el Zn extraíble con DTPA y EDTA, la absorción de Zn por la planta, y el rendimiento del arroz. Los autores sugirieron un nivel crítico de 0,86 mg Zn kg⁻¹ con DTPA y 1,42 mg Zn kg⁻¹ con EDTA.

Havlin y Soltanpour (1981), establecieron un nivel crítico de 0,9 mg Zn kg⁻¹ en 40 suelos calcáreos de Colorado bajo cultivo de maíz, con la solución AB-DTPA. En el mismo estudio se encontró un nivel de 0,7 mg Zn kg⁻¹ con DTPA, similar al valor de 0,8 mg Zn kg⁻¹ reportado por Lindsay y Norvell (1978) para este extractante.

En un trabajo de invernadero con 8 suelos ácidos de Carolina del Norte, Junus y Cox (1987) encontraron niveles críticos de 1,62 y 1,53 mg Zn l⁻¹ para soja y maíz, respectivamente, con el uso de Mehlich 3.

Con Olsen Modificado el nivel crítico de Zn propuesto fue de 3 mg l⁻¹ (Díaz-Romeu y Hunter 1978), Rhoman y Cox (1988), hallaron un nivel crítico de 1 mg Zn l⁻¹ para maíz utilizando Olsen Modificado. En este estudio, los contenidos de Zn extraíbles con Mehlich 1 y Mehlich 3, AB-DTPA y Olsen Modificado, correlacionaron significativamente entre sí.

Molina y Cabalceta (1990) evaluaron 4 métodos de extracción de Zn disponible en Ultisoles y Vertisoles de Costa Rica. El orden de extracción de Zn en los suelos fue Mehlich 3 > Olsen Modificado > DTPA > Morgan Modificado. Utilizando una ecuación de regresión lineal se obtuvo que el nivel crítico de 0,8 mg Zn kg⁻¹ con DTPA (Lindsay y Norvell 1978), correspondió a 1,18 mg Zn l⁻¹ con Olsen Modificado.

Pasos (1990), en un estudio realizado en un Vertisol de Costa Rica, encontró respuesta a la aplicación foliar de Zn en arroz, cuando el suelo presentaba 1,4 mg Zn l⁻¹ extraíble con Olsen Modificado. Un resumen de los niveles críticos de Zn propuestos se presenta en el cuadro 1.

El objetivo del presente estudio fue determinar los niveles críticos de Zn disponibles para las plantas mediante el uso de 5 procedimientos analíticos en 4 órdenes de suelos de Costa Rica.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se tomó 25 muestras de suelos de 4 órdenes de importancia agrícola del país: Ultisoles, Vertisoles, Inceptisoles y Andisoles, a una profundidad de 0 a 20 cm. Las muestras se tomaron en todas las provincias del país, tal y como se detalla en una publicación previa de Cabalceta y Cordero (1994). Los suelos fueron secados al aire y luego molidos y tamizados con una criba de 2 mm.

Se realizó un análisis preliminar de la fertilidad de los suelos (pH en agua, materia orgánica por el método de dicromato de potasio, Ca, Mg, y acidez intercambiable extraíbles con KCl 1M, y P y K extraíbles con Olsen Modificado) empleando la metodología de Díaz-Romeu y Hunter (1978). Se utilizaron 5 métodos de extracción de Zn: Olsen Modificado (OM), Mehlich 3 (M3), Morgan Modificado (MM), DTPA y HCl, cuyos procedimientos son descritos por Molina y Bornemisza (2000), y se resumen en el cuadro 2.

Para correlacionar y calibrar la cantidad extraída de Zn por los diferentes métodos con la respuesta de una planta a la aplicación del elemento, se realizó una prueba de invernadero con sorgo forrajero (*Sorghum bicolor*) como cultivo indicador. Se estableció 2 tratamientos en cada uno de los 100 suelos: óptimo y \pm Zn. Para diseñar la fertilización base u óptima, se utilizó el resultado del análisis de cada suelo con Olsen Modificado y KCl, y las curvas de sorción de P, K, y S (Díaz-Romeu y Hunter 1978), aplicando los tratamientos de fertilización a cada suelo de acuerdo con los criterios descritos por Cabalceta y Bornemisza (1994).

Se utilizaron vasos plásticos con 150 ml de suelo, con 3 repeticiones de cada tratamiento. Se sembraron 10 semillas de sorgo en cada vaso, raleando luego a 6 plantas por vaso. El riego se hizo por capilaridad, a través de un filtro de cigarrillo introducido por la base del vaso, y cuyo extremo fue sumergido en una bandeja con agua desionizada que mantuvo un contenido de 50 mg N l⁻¹. La cosecha fue realizada 6 semanas después de la siembra, cortando las plantas al ras

Cuadro 1. Niveles críticos de Zn extraíble con varios métodos.

Método	Cultivo	Nivel crítico	Referencia
Olsen Modificado	Sorgo	3 mg l ⁻¹	Díaz-Romeu y Hunter, 1978
Olsen Modificado	Maíz	1 mg l ⁻¹	Rohman y Cox, 1988
DTPA	Sorgo	0,5 mg l ⁻¹	Lindsay y Norvell, 1978
DTPA	Arroz	0,86 mg l ⁻¹	Singh y Takkar, 1981
DTPA	Maíz	0,7 mg l ⁻¹	Havlin y Soltanpour, 1981
DTPA	Sorgo	0,5 mg l ⁻¹	Brown <i>et al.</i> , 1971
DTPA	Café	2,1 mg l ⁻¹	Lima y Malavolta, 1998
Mehlich 3	General	1,0 mg l ⁻¹	Mehlich, 1984
Mehlich 3	Soya	1,62 mg l ⁻¹	Junus y Cox, 1987
Mehlich 3	Maíz	1,53 mg l ⁻¹	Junus y Cox, 1987
Mehlich 3	General	1-2 mg l ⁻¹	Sims y Johnson, 1991
HCl 0,1M	General	1-5 mg l ⁻¹	Sims y Johnson, 1991
HCl 0,1M	Maíz	1 mg l ⁻¹	Wear y Sommer, 1948
HCl 0,1M	Café	4,2	Lima y Malavolta, 1998
Morgan Modificado	General	1,2 mg l ⁻¹	Jones y Wolf, 1984

del suelo. Se midió el peso seco luego de secar la muestra en una estufa a 70°C durante 48 h.

En el ensayo de invernadero fue utilizado un diseño experimental irrestricto al azar, con 2 tratamientos y 3 repeticiones. Con los datos de peso seco se calculó el porcentaje relativo de cada suelo:

$$\% Y = \frac{\text{Peso seco tratamiento sin el elemento}}{\text{Peso seco tratamiento con el elemento}} \times 100$$

Para determinar los niveles críticos, se construyó un gráfico de Cate y Nelson (1965), ubicando en el eje de las ordenadas los rendimientos

relativos, y en el eje de las abscisas los resultados del análisis químico del nutrimento y cada solución extractora utilizada. En los puntos trazados se sobrepuso un plástico transparente con un cuadrante dibujado, de tal manera que la mayor cantidad de puntos quedaran ubicados en la parte inferior izquierda y en la superior derecha del cuadrante. Así se separaron 2 poblaciones: una de bajo contenido de Zn (inferior izquierda), y otra de alto contenido de Zn (superior derecha). El nivel crítico de Zn se determinó extrapolando la línea divisoria del cuadrante al eje de las X, donde están los resultados iniciales de Zn en los suelos con las diferentes soluciones extractoras.

Cuadro 2. Soluciones extractoras utilizadas en la determinación de Zn disponible.

Solución	Composición	Relación suelo/solución v/v	Referencia
Olsen Modificado	0,5M NaHCO ₃ + 0,01M EDTA + 0,05 g l ⁻¹ Superfloc 127, pH 8,5	1/10*	Díaz-Romeu y Hunter, 1978
Mehlich 3	0,2M HOAc + 0,25M NH ₄ NO ₃ + 0,015M NH ₄ F + 0,013M HNO ₃ + 0,001M EDTA, pH 2,5	1/10*	Mehlich, 1984
Morgan Modificado	1M NaOAc + 0,54M HOAc + 0,00013M DTPA, pH 4,8	1/2**	Jones y Wolf, 1984
DTPA	0,005M DTPA + 0,01M CaCl ₂ + 0,01M Trietilonamina, pH 7,3	1/2***	Gaines y Mitchell, 1979
HCl	0,1M HCl	1/4****	Wear y Evans, 1968

* Tiempo de agitación 10 min, ** Tiempo de agitación 5 min, *** Tiempo de agitación 20 min, **** Tiempo de agitación 30 min.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Ultisoles

El nivel crítico (NC) en este grupo de suelos estuvo muy relacionado con la capacidad de extracción de cada solución. Los métodos de OM y M3 extrajeron casi las mismas cantidades de Zn (Molina y Bornemisza 2000) y su NC fue muy similar, con valores de 2 mg l⁻¹ con OM, y 1,5 mg l⁻¹ con M3 (Figura 1). Este valor se sitúa en forma intermedia de acuerdo con la información disponible por otros investigadores. Díaz-Romeu y Hunter (1978), propusieron un NC de 3 mg Zn l⁻¹ con OM en suelos con características ampliamente diferentes de fertilidad, en tanto que Rhoman y Cox (1988) calibraron el método de OM para la determinación de Zn en suelos ácidos, y obtuvieron un NC de 1,0 mg l⁻¹.

El NC con M3 coincidió con el informado por Junus y Cox (1987) en maíz y soya, utilizando suelos ácidos del sureste de EE.UU.

Las soluciones MM y DTPA presentaron un NC de 0,5 mg l⁻¹ (Cuadro 3 y Figura 1), lo que muestra que poseen igual capacidad de extracción de Zn, probablemente debido a que ambos contienen el mismo agente quelatante. El NC con DTPA coincidió con el valor encontrado por Lindsay y Norvell (1978) en suelos calcáreos de Colorado. Con el extractante MM, Jones y Wolf (1984) sugirieron un NC de 1,2 mg l⁻¹ en suelos con pH <7, aunque no existe ningún estudio publicado que respalde este valor.

El HCl mostró el NC más alto (4 mg l⁻¹) (Cuadro 3), lo cual estuvo relacionado con su mayor capacidad de extracción de Zn.

Vertisoles

Con excepción del HCl, el NC en este grupo de suelos fue superior al de Ultisoles, lo que se podría explicar por el pH más alto en Vertisoles, que al igual que en otros suelos similares, se presentan condiciones apropiadas para disminuir la

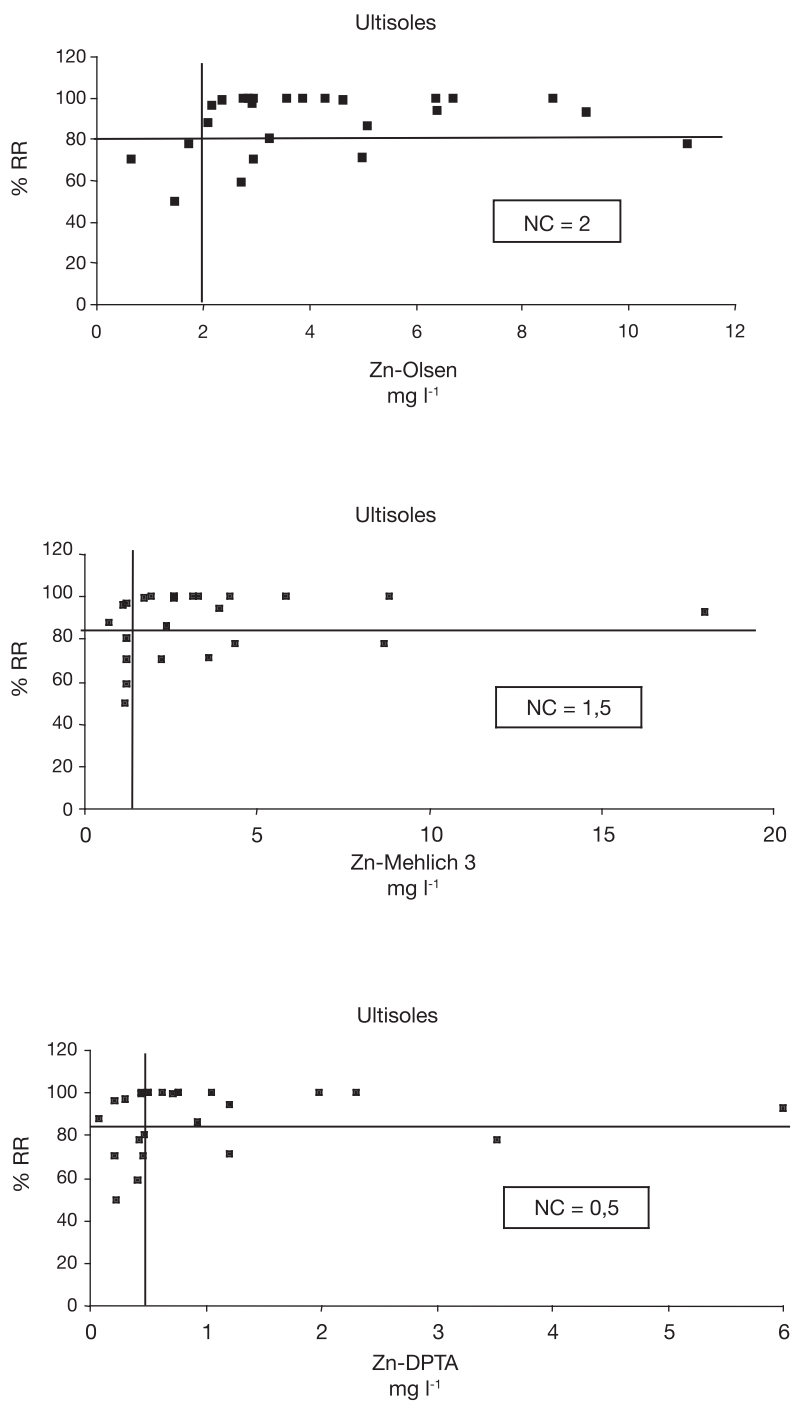


Fig. 1. Nivel crítico de Zn extraíble con Olsen, Mehlich 3 y DTPA en Ultisoles.

Cuadro 3. Nivel crítico de Zn con 5 soluciones extractoras en 4 órdenes de suelos de Costa Rica.

Suelo	Olsen	Mehlich 3	DTPA	Morgan	HCl
	Zn (mg l ⁻¹)				
Ultisoles	2	1,5	0,5	0,5	4
Vertisoles	3	3	1	0,8	1,5
Inceptisoles	2,3	1,7	0,8	0,6	2,5
Andisoles	3	2,5	1	0,5	3,3
Todos	2	2	0,7	0,3	3,8

disponibilidad de Zn. Lins y Cox (1989), encontraron que el NC de Zn extraíble con Mehlich 1 se incrementó conforme aumentó el pH.

OM presentó un NC de 3 mg l⁻¹ (Figura 2). Lo que coincide plenamente con el valor sugerido por Díaz-Romeu y Hunter (1978); y corrobora el resultado obtenido por Pasos (1990), quien encontró respuesta a la aplicación de Zn en arroz cultivado en un Typic Pellusterts de Guanacaste, con un contenido inicial de 1,4 mg Zn l⁻¹ extraíble con OM. El NC con M3 fue también de 3 mg l⁻¹ (Figura 2), superior al valor de 1 mg l⁻¹ recomendado por Mehlich (1984). Al igual que se presentó en Andisoles, la capacidad de extracción de OM y M3 fue muy similar. Ambos métodos utilizan EDTA como agente quelatante para extraer Zn, lo que aparentemente explica la concordancia encontrada en el NC.

MM y DTPA mostraron los valores de NC más bajos, con 0,8 y 1 mg l⁻¹, respectivamente (Cuadro 3). Sing y Takkar (1981), encontraron un NC de 0,86 mg kg⁻¹ con DTPA en suelos calcáreos bajo cultivo de arroz. La solución de DTPA fue diseñada para suelos de pH alto (Lindsay y Norvell 1978), y el nivel crítico recomendado oscila entre 0,5 y 1 mg l⁻¹, lo que coincide con los resultados de este estudio.

El HCl presentó un NC de 1,5 mg l⁻¹ (Cuadro 3). Sin embargo, sólo 1 suelo respondió al Zn y se ubicó en el cuadrante inferior izquierdo del gráfico de Cate y Nelson, lo que indica que

el método no parece ser efectivo para predecir la posibilidad de respuesta a la aplicación de Zn en Vertisoles. La ausencia de correlación entre el Zn-HCl y los otros métodos en estos mismos suelos (Molina y Bornemisza 2001), permite respaldar mejor esta conclusión. El HCl parece ser más efectivo en suelos ácidos (Martens y Lindsay 1991). Sin embargo, Gupta y Mittal (1981) lograron establecer un NC de 2,2 mg Zn kg⁻¹ extraíble con HCl en suelos calcáreos de la India, y además correlacionó significativamente con el porcentaje de rendimiento relativo ($r=0,588^{**}$).

En síntesis, las soluciones OM, M3, MM y DTPA fueron consistentes para determinar el NC de Zn en Vertisoles, y los resultados concuerdan con otros valores informados por otros investigadores.

Inceptisoles

En este orden se presentó la respuesta más baja a la aplicación de Zn, con muy pocos suelos ubicados en el cuadrante inferior izquierdo, a pesar que los contenidos extraíbles de este elemento por las diferentes soluciones fueron muy similares a los otros grupos de suelos. Aún así fue posible establecer el NC tentativo para cada extractante, el cual presentó valores, intermedios con relación a Ultisoles y Vertisoles.

Con OM el NC fue de 2,3 mg l⁻¹ (Figura 3), muy similar al encontrado en Ultisoles. El NC

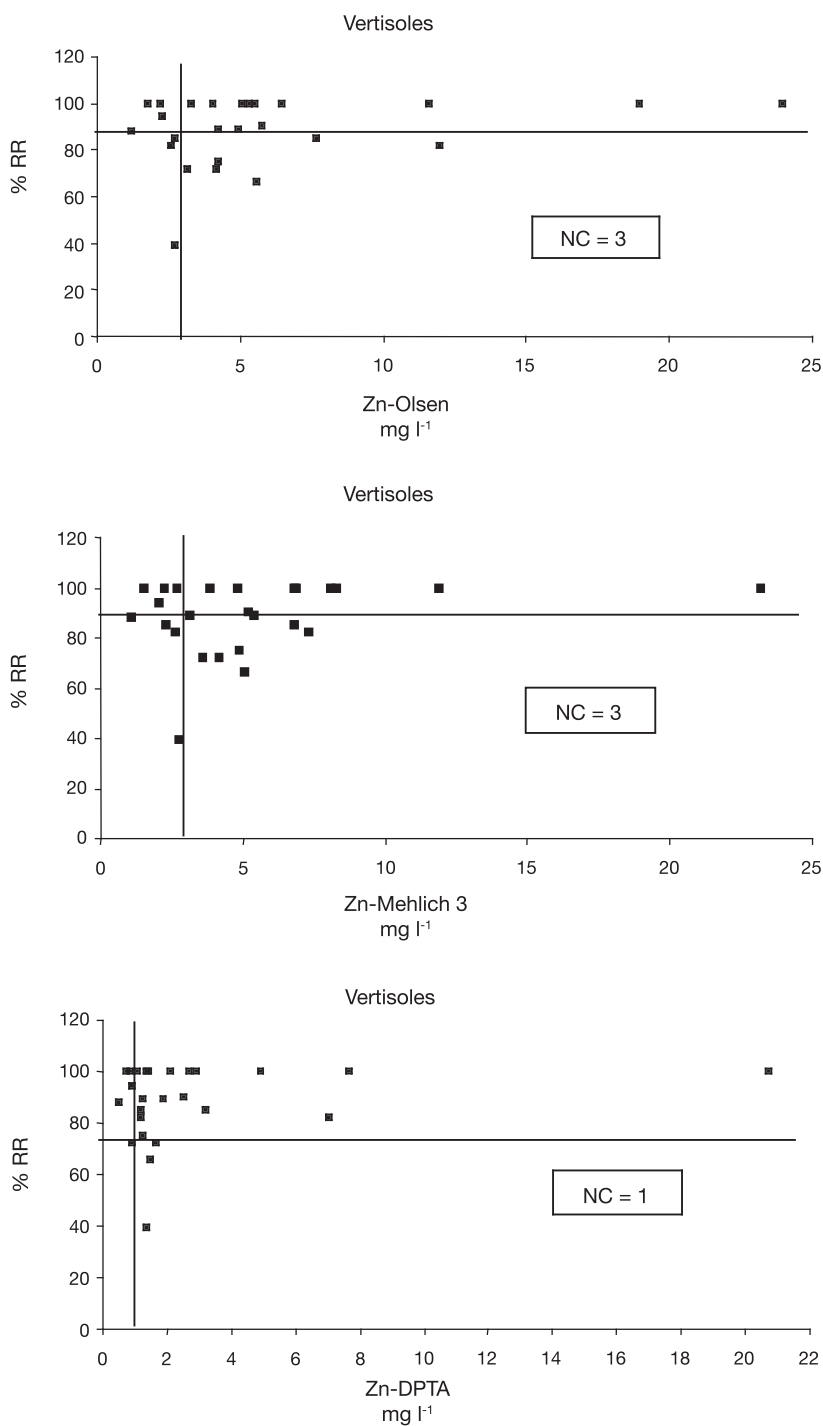


Fig. 2. Nivel crítico de Zn extraíble con Olsen, Mehlich 3 y DTPA en Vertisoles.

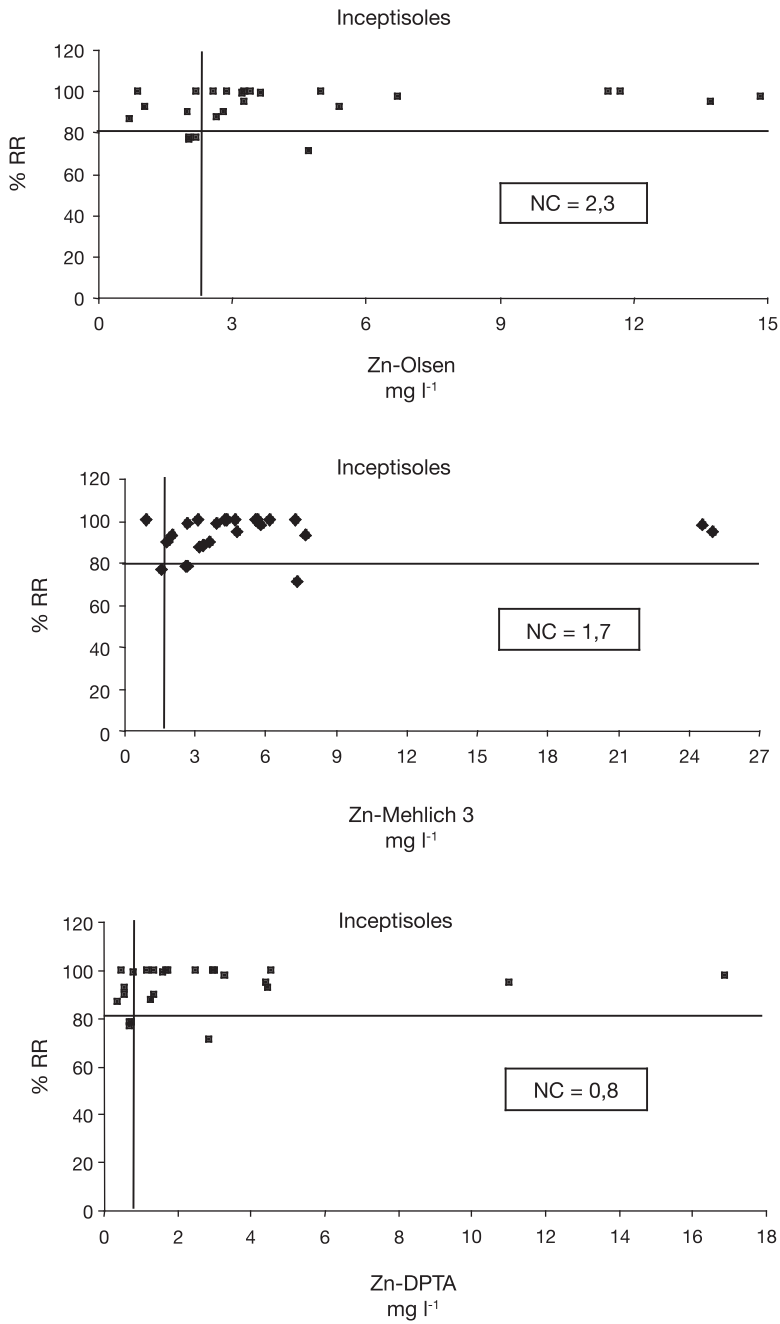


Fig. 3. Nivel crítico de Zn extraíble con Olsen, Mehlich 3 y DTPA en Inceptisoles.

con M3 fue establecido en $1,7 \text{ mg l}^{-1}$ (Figura 3). Se mantuvo la tendencia del OM a mostrar un NC ligeramente superior a M3.

MM y DTPA presentaron un NC similar ($0,6$ y $0,8 \text{ mg l}^{-1}$, respectivamente) (Cuadro 3), lo que indica que estas 2 soluciones actúan de la misma forma en el suelo, al poseer ambas idéntico agente quelatante.

El HCl mostró un NC de $2,5 \text{ mg l}^{-1}$ (Cuadro 3), lo que coincidió con su mayor capacidad de extracción en este grupo de suelos (Molina y Bornemisza 2001). Con esta solución, el NC reportado oscila entre 1 y 5 mg l^{-1} , y su efectividad parece estar limitada a suelos ácidos (Sims y Johnson 1991).

En resumen, todos los métodos de análisis permitieron la determinación de un NC tentativo, lo cual coincide plenamente con los altos coeficientes de correlación encontrados entre los 5 extractantes (Molina y Bornemisza 2001).

Andisoles

En este grupo se presentaron las concentraciones más altas de Zn extraíble, probablemente por la influencia del alto contenido de materia orgánica.

El NC de OM fue de 3 mg l^{-1} (Figura 4), valor idéntico al que se presentó en Vertisoles, y que coincide con el NC recomendado por Díaz-Romeu y Hunter (1978) para suelos de América Central. Al confeccionar un gráfico de Cate y Nelson con los datos de rendimiento relativo y Zn extraíble con OM, obtenidos por Bertsch *et al.* (1984), en Andisoles alejados del Valle Central, el NC fue de $2,5 \text{ mg l}^{-1}$, valor cercano al encontrado en el presente estudio, aunque con una población de sólo 9 suelos.

El NC con M3 fue ligeramente inferior al de OM, con un valor de $2,5 \text{ mg l}^{-1}$ (Figura 4). De acuerdo con Sims y Johnson (1991), el NC de Zn con M3 oscila entre 1 y 2 mg l^{-1} . El uso de esta solución en suelos del trópico es relativamente reciente, por lo que todavía no se cuenta con suficientes estudios de calibración, y no hay información disponible sobre su efectividad

en suelos volcánicos, con excepción del estudio realizado por Gadea (1993), con los mismos Andisoles del presente trabajo, y quien encontró que M3 fue efectiva para la determinación de Ca, Mg y K.

El NC de Zn con MM fue de $0,5 \text{ mg l}^{-1}$ (Cuadro 3), que constituye menos de la mitad del valor sugerido por Jones y Wolf (1984) en suelos con pH ácido. Con DTPA, el NC fue de 1 mg l^{-1} (Figura 4), el cual se ubica ligeramente por encima del rango establecido por Lindsay y Norvell (1978) para este agente.

El HCl mostró el nivel crítico más alto ($3,3 \text{ mg l}^{-1}$) (Cuadro 3), lo que podría explicarse por su mayor capacidad de extracción de Zn en este grupo de suelos (Molina y Bornemisza 2001).

Los resultados de este estudio muestran que todos los métodos parecen ser efectivos para la determinación del nivel crítico de Zn en Andisoles. Sin embargo, es importante indicar que el OM presentó los coeficientes de correlación más bajos al compararlo con los otros métodos (Molina y Bornemisza 2001), por lo que aparentemente fue menos eficaz para el diagnóstico de problemas de Zn en este grupo de suelos.

Nivel crítico general de Zn en los 100 suelos

El agrupamiento de los suelos sin dividirlos en órdenes, causó una mayor dispersión de los datos en los gráficos de Cate y Nelson, con una cantidad importante de puntos ubicados en los cuadrantes superior izquierdo e inferior derecho. Este resultado enfatiza la importancia de dividir los suelos en grupos taxonómicos con características de fertilidad más homogéneas, ya que permite establecer con mayor precisión el nivel crítico de un nutriente.

El NC de Zn con OM en los 100 suelos fue de 2 mg l^{-1} , idéntico al de Ultisoles (Figura 5), pero inferior al encontrado en los otros órdenes. Este valor es intermedio entre el NC de 1 mg l^{-1} reportado por Rohman y Cox (1988), y el de 3 mg l^{-1} indicado por Díaz-Romeu y Hunter (1978). Mediante la representación gráfica del porcentaje de rendimiento relativo de sorgo y el contenido de

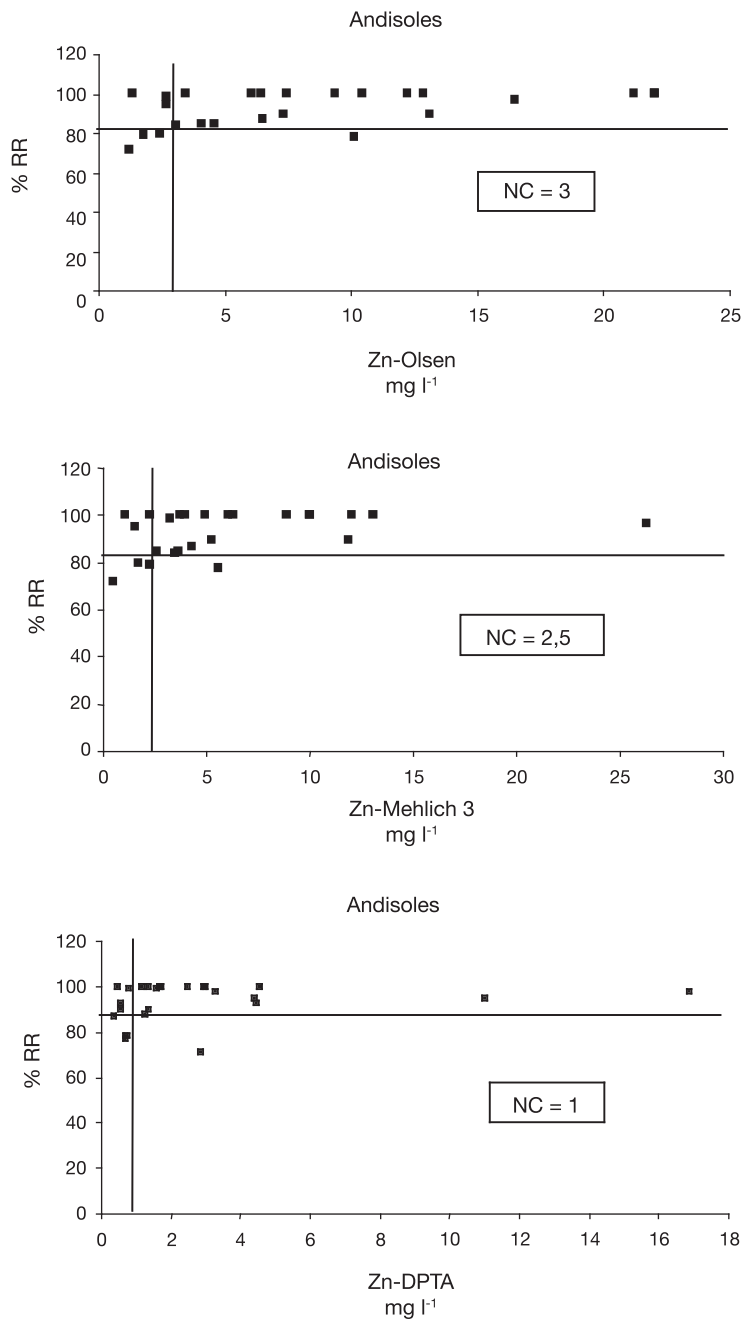


Fig. 4. Nivel crítico de Zn extraíble con Olsen, Mehlich 3 y DTPA en Andisoles.

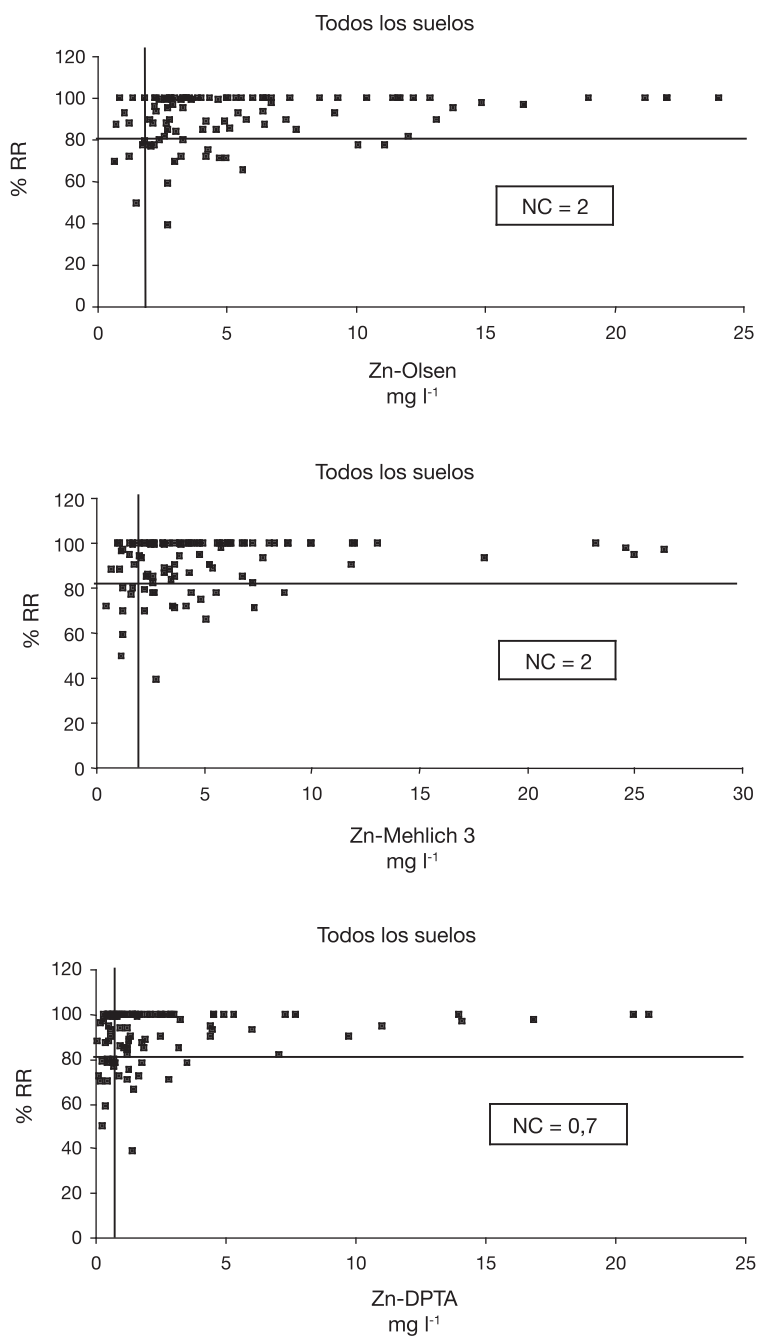


Fig. 5. Nivel crítico de Zn extraíble con Olsen, Mehlich 3 y DTPA en todos los suelos.

Zn extraíble con OM, de los resultados informados por Bertsch *et al.* (1984), Sancho y Cordero (1984), y Vega *et al.* (1986), se logró establecer un NC de 1,3 mg l⁻¹, en 22 suelos clasificados como Vertisoles, Mollisoles, Inceptisoles, Entisoles, Alfisoles y Andisoles.

El NC con M3 fue igual que con OM (Cuadro 3), lo cual constituye una característica adecuada en los estudios de calibración porque facilita la interpretación de los análisis. El NC con M3 en los 100 suelos superó los valores encontrados por otros investigadores (Mehlich 1984, Junus y Cox 1987, Rhoman y Cox 1988, Sims y Johnson 1991).

El NC con MM fue establecido en 0,3 mg l⁻¹ (Cuadro 3), inferior al valor encontrado a nivel de orden, que osciló entre 0,5 y 0,8 mg l⁻¹. La explicación se puede encontrar en el gran número de suelos con contenidos bajos de Zn-MM que no respondieron a la aplicación de este elemento, lo que dificultó la selección del NC respectivo.

Con DTPA, el NC se ubicó en 0,7 mg l⁻¹ (Figura 5), lo cual corresponde, aproximadamente, al promedio de los valores encontrados a nivel de orden de suelos, y coincide con el ámbito de NC reportado para esta solución en zonas tropicales (Lindsay y Cox 1985). Los resultados también concuerdan con el NC de 0,6 mg l⁻¹ encontrado por Lindsay y Norvell (1978) en suelos de pH alto de Colorado, en los cuales también se utilizó sorgo como cultivo indicador bajo condiciones de invernadero.

Tanto MM como DTPA presentaron muy buenas correlaciones entre sí y con los otros métodos; sin embargo, poseen el inconveniente de que extraen muy poca cantidad de Zn en suelos deficientes, lo que dificulta la detección del elemento por las técnicas convencionales, y podría aumentar el riesgo de errores de interpretación debido a problemas de contaminación de la muestra o durante el proceso analítico.

Al igual que en la mayoría de los órdenes, el HCl presentó el NC más alto en los 100 suelos (Cuadro 3), debido a su mayor capacidad de extracción de Zn. Sin embargo, este método no correlacionó con ningún otro en Vertisoles, debi-

do a su pH alto, y porque probablemente su uso está más limitado a suelos ácidos.

En conclusión, los resultados indican que OM, M3, MM y DTPA son efectivos para determinar la disponibilidad de Zn para las plantas, y permiten predecir la respuesta a la aplicación de Zn como fertilizante mediante la determinación de su nivel crítico en los suelos. Se establecieron niveles críticos de Zn con cada método y hubo algunas variaciones en sus valores, de acuerdo con la taxonomía del suelo, resultado que demuestra que el nivel crítico de Zn varía entre grupos de suelos, por lo que es recomendable considerar la taxonomía como una variable importante en los estudios de calibración de análisis de suelos.

El DTPA no es una solución "universal" como lo propone Rajj (1994), debido a que sólo determina los contenidos de Fe, Cu, Zn y Mn, y es necesario utilizar otro extractante para el análisis de bases y P, lo que hace más lenta y cara su implementación como método de rutina en un laboratorio.

La solución M3 podría sustituir al OM para el análisis de Zn, con la ventaja de que mediante un sólo proceso de extracción es posible analizar una gran cantidad de nutrimentos, debido al carácter universal de este extractante. El DTPA también mostró un comportamiento adecuado en los suelos estudiados para la determinación del nivel crítico de Zn, y los contenidos de Zn extraíble con este método correlacionaron muy bien con los otros procedimientos (Molina y Bornemisza 2001).

LITERATURA CITADA

- BERTSCH F. 1986. Manual para interpretar la fertilidad de los suelos de Costa Rica, San José, Universidad de Costa Rica, 86 p.
- BERTSCH F., CORDERO A., ALVARADO A. 1984. Fertilidad de Typic Dystrandepts en Costa Rica. I. Metodología, acidez y cationes (Ca, Mg, K, Fe, Mn, Zn y Cu). Turrialba 31: 187-197.
- BROWN A.L., QUIRK J., EDDING J.L. 1971. A comparison of analytical methods for soil zinc. Soil Science Society of America Proceedings 35: 105-107.

- CATE R.B., NELSON L.A. 1965. A rapid method for correlation of soil tests analysis with plant response data. North Carolina State Agricultural Experiment Station Technical Bulletin 1.
- CATE R.B., NELSON L.A. 1971. A simple statistical procedure for partitioning soil test correlation data into two classes. Soil Science Society of America Proceedings 35: 858-860.
- CABALCETA G., CORDERO A. 1994. Niveles críticos de fósforo en Ultisoles, Inceptisoles, Vertisoles y Andisoles de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 18 (2): 147-161.
- COX F.R., KAMPRATH E.J. 1972. Micronutrient soil test. *In: Micronutrients in Agriculture*, J.J. Morvedt *et al.* (eds), Madison, Wisconsin, SSSA. p. 45-72.
- DAHNIKE W.C., OLSON R.A. 1990. Soil test calibration, correlation and recommendation. *In: Soil testing and plant analysis*, R.L. Westerman (ed), Madison, Wisconsin, SSSA. p. 45-72.
- DÍAZ-ROMEY R., HUNTER A. 1978. Metodología de muestreo de suelos, análisis químico de suelos y tejido vegetal e investigación en invernadero. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 68 p.
- EVANS C.E. 1987. Soil test calibration. *In: Soil testing: sampling, correlation, calibration and interpretation*, J.R. Brown (ed), Madison, Wisconsin, SSSA. p. 23-29.
- GADEA A. 1993. Niveles críticos de calcio, magnesio y potasio en cuatro órdenes de suelos de Costa Rica. Tesis M.Sc., Sistema de Estudios de Posgrado, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. 135 p.
- GAINES T.P., MITCHEL J.A. 1979. Chemical methods for soil and plant analysis. Tifton, University of Georgia, Agronomy Handbook No 1. 105 p.
- GUPTA V.K., MITTAL S.B. 1981. Evaluation of chemical methods for estimating available zinc and response of green gram (*Phaseolus aureus*) to applied zinc in calcareous soils. *Plant and Soil* 63: 477-484.
- HANWAY J.J. 1973. Experimental methods for correlating and calibrating soil test. *In: Soil testing and plant analysis*, L.M. Walsh y J.D. Beaton (eds), Madison, Wisconsin, SSSA, p. 55-66.
- HAVLIN J.L., SOLTANPOUR. 1981. Evaluation of NH_2HCO_3 -DTPA soil test for iron and zinc. *Soil Science Society of America Journal* 45: 70-75.
- JARVIS S.C. 1984. The forms of occurrence of manganese in some acidic soils. *Journal of Soil Sciences* 35: 421-429.
- JONES J.B., WOLF B. 1984. Manual of soil testing procedure using modified (Wolf) Morgan extracting reagent. Athens, Georgia, Benton Laboratories. 61 p.
- JUNUS M.A., COX F.R. 1987. A zinc soil test calibration based upon Mehlich 3 extractable zinc, pH, and cation exchange capacity. *Soil Science Society of America Journal* 51: 678-683.
- LINDSAY W.L., COX F.R. 1985. Micronutrients soil test for the tropics. *Fertilizer Research* 7: 169-200.
- LINDSAY W.L., NORVELL W. A. 1969. Equilibrium relationships of Zn^{2+} , Fe^{3+} , Ca^{2+} , and H^+ with EDTA and DTPA in soils. *Soil Science Society of America Proceedings* 33: 62-68.
- LINDSAY W.L., NORVELL W.A. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. *Soil Science Society of America Journal* 42: 421-428.
- LINS I.D.G., COX F.R. 1989. Effects of soil texture, zinc and pH on corn yield and plant zinc concentration. *In: Trop soils technical report 1986-1987, Trop soils management*, North Carolina State University, Raleigh. p. 158-160.
- MARTENS D.C., LINDSAY W.L. 1990. Testing soils for copper, iron, manganese, and zinc. *In: Soil testing and plant analysis*, 3rd ed. R.L. Westerman (ed), Madison, Wisconsin, SSSA. p. 229-264.
- MEHLICH A. 1984. Mehlich 3 soil extractant: a modification of Mehlich 2 extractant. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 15: 1409-1416.
- MOLINA E., BORNEMISZA E. 2001. Correlación entre métodos de análisis de Zn disponible en cuatro órdenes de suelos de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 25 (2):65-72.
- MOLINA E., CABALCETA G. 1990. Correlación de diferentes soluciones extractoras en Vertisoles y Ultisoles de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 14 (1): 37-44.
- PASOS M.A. 1990. Efecto de dosis y épocas de aplicación de Zn sobre el rendimiento de arroz (*Oryza sativa*) cv, 1821 creciendo bajo riego en un Vertisol de Guanacaste, Costa Rica. Tesis Ing. Agr. Universidad de Costa Rica, Sede Regional de Guanacaste. 65 p.

- RAIJ VAN B. 1994. New diagnostic techniques, universal soil extractants. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 25 (7/8): 799-816.
- RHOMAN P.C., COX F.R. 1988. Evaluation of modified Olsen extracting reagent for copper, zinc and manganese. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 19: 1859-1870.
- SÁNCHEZ P. 1981. Suelos del trópico: características y manejo. San José, Costa Rica, IICA. 634 p.
- SANCHO F., CORDERO A. 1984. Evaluación de la fertilidad de diez suelos del Pacífico Seco de Costa Rica mediante la técnica del elemento faltante o aditivo. *Agronomía Costarricense* 8 (2): 111-118.
- SIMS J.T., JOHNSON G.V. 1991. Micronutrient soil test. *In: Micronutrients in agriculture*, 2nd ed. J.J. Morvedt *et al.* (ed.), Madison, Wisconsin, SSSA, p. 427-477.
- SINGH H.J., TAKKAR P.N. 1981. Evaluation of efficient soil test methods for zinc and their critical values in salt-affected soils for rice. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 12: 383-406.
- VEGA E.V., BORNEMISZA E., ALVARADO A. 1986. Relaciones fósforo-zinc en dos toposecuencias de la parte central de la Península de Nicoya, Guanacaste. *Agronomía Costarricense* 10 (1/2): 65-72.
- WAUGH D.L., CATE R.B., NELSON L.A. 1973. Modelos discontinuos para una rápida correlación, interpretación y utilización de los datos de análisis de suelos y las respuestas a los fertilizantes. ISFEIP Boletín Técnico No. 7, North Carolina State University, Raleigh.
- WEAR J.I., EVANS C.E. 1968. Relationship of zinc uptake by corn and sorghum to soil zinc measured by three extractants. *Soil Science Society of America Proceedings* 32: 543-46.
- WEAR J.I., SOMMER A.L. 1948. Acid-extractable zinc of soils in relation to the occurrence of zinc deficiency symptoms of corn: a method of analysis. *Soil Science Society of America Proceedings* 12: 143-144.
- WHITNEY D.A., COPE J.T., WELCH I.F. 1985. Prescribing soil and crop nutrient needs. *In: Fertilizer technology and use*, 3rd ed. O.P. Enyelstad (ed.), Madison, Wisconsin, SSSA. p. 25-51.

