

NIVELES CRÍTICOS DE NUTRIMENTOS EN SUELOS DE COSTA RICA UTILIZANDO LA SOLUCIÓN EXTRACTORA MEHLICH 3

Gilberto Cabalceta^{1/}, Eloy Molina**

Palabras clave: Métodos de análisis, Mehlich 3, Ultisoles, Inceptisoles, Vertisoles, Andisoles.

Keywords: Chemical methods, Mehlich 3, Ultisols, Inceptisols, Vertisols, Andisols.

Recibido: 27/10/05

Aceptado: 12/09/06

RESUMEN

Se estudió los niveles críticos de Ca, Mg, K, P, S, Cu, Zn y Mn en Ultisoles, Inceptisoles, Vertisoles y Andisoles de Costa Rica, con la solución extractora Mehlich 3. Los niveles críticos en los Ultisoles para Ca, Mg y K fueron 4,0, 0,8 y 0,2 cmol(+) l⁻¹, respectivamente, y para P, S, Cu, Mn y Zn 3,0, 36,0, 0,4, 4,0 y 1,5 mg l⁻¹, respectivamente. En los Inceptisoles se encontró 3,1, 1,1 y 0,2 cmol(+) l⁻¹ para el Ca, Mg y K, y 6,0, 32,0, 0,4, 4,0 y 1,7 mg l⁻¹ para P, S, Cu, Mn y Zn. En los Vertisoles los valores correspondieron a 27,0, 13,0 y 0,27 cmol(+) l⁻¹ para Ca, Mg y K, y 13,0, 32,0, 0,4, 4,0 y 3,0 mg l⁻¹ para P, S, Cu, Mn y Zn. En los Andisoles se encontraron valores para Ca, Mg y K de 5,0, 0,75 y 0,22 cmol(+) l⁻¹, y para P, S, Cu, Mn y Zn de 16,0, 31,0, 0,4, 4,0 y 2,5 mg l⁻¹. Cuando se analizaron todos los suelos en conjunto se obtuvo niveles críticos de 5,0, 0,7 y 0,17 cmol(+) l⁻¹ para Ca, Mg y K, y de 10,0, 31,0, 0,4, 4,0 y 2,0 mg l⁻¹ para P, S, Cu, Mn y Zn.

ABSTRACT

Critical nutrient levels in soils of Costa Rica with Mehlich 3 soil extractant. The critical levels of Ca, Mg, K, P, S, Cu, Zn, and Mn were studied in Ultisols, Inceptisols, Vertisols, and Andisols, using the extracting solution Mehlich 3. In Ultisols critical levels of 4.0, 0.8 and 0.2 cmol(+) l⁻¹ were found for Ca, Mg, and K, respectively, and 3.0, 36.0, 0.4, 4.0 and 1.5 mg l⁻¹ for P, S, Cu, Mn, and Zn, respectively. Regarding the Inceptisols, critical levels of 3.1, 1.1 and 0.2 cmol(+) l⁻¹ were found for Ca, Mg, and K, and 6.0, 32.0, 0.4, 4.0 and 1.7 mg l⁻¹ for P, S, Cu, Mn, and Zn. In Vertisols, critical levels of 27.0, 13.0 and 0.27 cmol(+) l⁻¹ were found for Ca, Mg, and K, and 13.0, 32.0, 0.4, 4.0 and 3.0 for P, S, Cu, Mn, and Zn. In Andisols critical levels of 5.0, 0.75 and 0.22 cmol(+) l⁻¹, were found for Ca, Mg, and K, and 16.0, 31.0, 0.4, 4.0 and 2.5 mg l⁻¹ for P, S, Cu, Mn, and Zn. When all samples were studied together, critical levels of 5.0, 0.7 and 0.17 cmol(+) l⁻¹ were found for Ca, Mg, and K, and 10.0, 31.0, 0.4, 4.0 and 2.0 mg l⁻¹ for P, S, Cu, Mn, and Zn.

INTRODUCCIÓN

La determinación del nivel crítico de un elemento es muy importante para valorar el grado de disponibilidad del mismo para las plantas, y se realiza por medio de estudios de correlación entre los rendimientos relativos del cultivo

(porcentaje de respuesta de un tratamiento con respecto a un testigo, al cual se le adiciona los tratamientos óptimos para que produzca al máximo) y la concentración del elemento en el suelo (Cabalceta 1993). Por nivel crítico se entiende aquella concentración de un elemento, por encima de la cual, la probabilidad de incrementos

1/ Autor para correspondencia. Correo electrónico: gcabalceta@cia.ucr.ac.cr

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

sensibles en la producción, debido a la aplicación del elemento es baja; mientras que, valores inferiores probablemente corresponderán a producciones pobres y la probabilidad de incrementos debido a la aplicación del elemento es alta, esto en relación con el método analítico utilizado y a la respuesta del cultivo cuando se aplica un determinado nutrimento (Cabalceta 1994).

La correlación y calibración de metodologías de laboratorio constituye una etapa vital en toda la dinámica de interpretación de análisis de suelos, transferencia de tecnología y recomendación al agricultor. El producto final de esta etapa son las tablas de niveles críticos, primero para interpretar los análisis, y segundo para tener pautas posteriores de recomendación. Un análisis de suelo o de tejido vegetal por sí mismo, no tiene valor si no es comparado con una tabla de niveles críticos que ayude a definir si estos son bajos, óptimos o tóxicos (Henríquez *et al.* 1995). La correlación y calibración a nivel de invernadero permite 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).

El método gráfico propuesto por Cate y Nelson (1965), es una forma simple de calibrar el análisis de suelos con la respuesta de la planta, ya que permite separar los datos en 2 poblaciones: suelos con respuesta probable a la aplicación del elemento y suelos con respuesta improbable. El método consiste en graficar los rendimientos relativos en función del análisis de suelos. En vez de intentar adecuar una función matemática continua a través de los puntos diseminados, se usa una hoja transparente de superposición, dividida en cuadrantes por líneas horizontales y verticales: esta hoja se superpone sobre los datos, de tal manera que el mayor número de puntos se ubique en los cuadrantes inferior izquierdo y superior derecho, y el número inferior de puntos se deja en los cuadrantes superior izquierdo e inferior derecho (Waugh *et al.* 1973, Sánchez 1981). Con

esta técnica, el nivel crítico en cuestión se obtiene en el punto donde la línea vertical corta el eje X (Cate y Nelson 1965); en tanto que la línea horizontal divide los suelos con respuesta, de aquellos sin respuesta a la adición del nutrimento analizado, y por lo general corta el eje de rendimiento relativo en valores que oscilan de 80-90%. La ubicación de muchos puntos en los cuadrantes superior izquierdo e inferior derecho, indica que el método de extracción no es apropiado para los suelos bajo estudio, o que no existe correlación entre el análisis de suelos y el rendimiento de la planta (Dahnke y Olson 1990). Cate y Nelson (1971), también sugirieron un método estadístico simple para definir los límites de las clases, dividiendo los datos en 2 grupos, usando niveles críticos tentativos sucesivamente para averiguar si un nivel crítico específico maximizará el total de habilidad predictiva (R^2) con las medias de los 2 grupos o clases como los valores predictores.

La disponibilidad de nutrimentos varía con el tipo de suelo y sus características químicas, por tal motivo, se justifica realizar estudios de correlación y calibración dividiendo los suelos en grupos u órdenes taxonómicos, con el propósito de definir los niveles críticos de los elementos con mayor precisión en cada uno de esos grupos. Este tipo de consideración ha sido muy poco utilizada en la mayoría de los estudios de calibración de análisis de suelos realizados hasta el momento (Molina 1993).

La solución extractora debe extraer los nutrimentos de las fracciones disponibles, tal como lo hacen las plantas. Aunque no es necesario que el método de análisis extraiga exactamente la misma cantidad del nutrimento que la planta, el valor extraído debe correlacionar bien con la cantidad absorbida por las plantas (Lindsay y Cox 1985). La mayoría de los métodos de análisis de suelos consisten en poner a agitar una muestra de suelo con la solución extractora por un periodo específico. Luego la solución es filtrada y se determina la cantidad del nutrimento que permanece en solución (Jones 1990). Los extractantes más utilizados han sido ácidos y bases diluidos, que disuelven las formas más disponibles de los

nutrientes. Los ácidos diluidos son utilizados en suelos ácidos; en tanto que las bases, como carbonatos y bicarbonatos, son preferidos en suelos alcalinos (Cox y Kamprath 1972, Lindsay y Cox 1985), algunos ejemplos son las soluciones Bray, Carolina del Norte y Troug (Jones 1990); Morgan modificado (Jones y Wolf 1984); Olsen modificado (Díaz-Romeu y Hunter 1978); y bicarbonato de amonio (Soltampour 1991).

Los agentes quelatantes y acomplejantes como el EDTA (ácido etilendiaminotetracético) y DTPA (ácido dietiltri-aminotetracético), han sido efectivos para extraer elementos menores, por lo que se han incluido en extractantes ácidos, tal es el caso del EDTA incluido en la solución Mehlich 3 (Mehlich 1984), y básicos como Olsen modificado (Díaz-Romeu y Hunter 1978).

Soluciones de sales como el NH_4OAc (Lanyon y Heald 1982) y KCl (Kamprath 1970), también son utilizadas como agentes extractantes, al extraer nutrientes catiónicos de las fracciones intercambiable y en la solución del suelo.

A las soluciones que pueden extraer más de una clase de elemento nutritivo en el suelo, se les conoce como agentes de extracción universal. Poseen la ventaja de que en un único proceso de extracción se puede determinar todos o la mayoría de los nutrientes necesarios para evaluar el estado de fertilidad de un suelo. Un ejemplo es Mehlich 1 (HCl 0,05 N, H_2SO_4 0,025 N), conocida como doble ácido o Carolina del Norte, la cual no fue efectiva en suelos alcalinos; por lo que se modificó mediante la combinación de ácido acético, cloruro de amonio, fluoruro de amonio y ácido clorhídrico, para formar la solución Mehlich 2 (Mehlich 1978, Jones 1990). Otras universales son las soluciones de EDTA y acetato de amonio ($\text{NH}_4\text{OAc-EDTA}$) y Olsen modificada (NaHCO_3 0,5 M, EDTA 0,01 M, superfloc 127 0,01%, pH 8,5), esta última muy utilizada en los trópicos -incluida Costa Rica- y con pocos estudios de correlación como extractante, especialmente de elementos menores (Lindsay y Cox 1985, Rohman y Cox 1988). Otra solución de este tipo es la Mehlich 3 (HOAc 0,2 M, NH_4NO_3 0,25 M, NH_4F 0,015 M, HNO_3 0,013 M, EDTA

0,001 M, pH 2,5) (Mehlich 1984), que ha generado gran interés a nivel mundial, ya que se adapta muy bien a suelos ácidos de los trópicos, y se han encontrado muy buenas correlaciones con otros extractantes de uso actual (Cabalceta y Cordero 1994a, Cabalceta y Cordero 1994b, Cabalceta 1995, Cabalceta y Bornemisza 1995, Gadea 1993, Molina 1993, Molina y Bornemisza 2001).

El objetivo de este estudio fue determinar el nivel crítico de Ca, Mg, K, P, S, Cu, Zn y Mn en invernadero, en Ultisoles, Inceptisoles, Vertisoles y Andisoles de Costa Rica, utilizando la solución extractora Mehlich 3.

MATERIALES Y MÉTODOS

Suelos de 4 órdenes de importancia agrícola en Costa Rica: Ultisoles; Inceptisoles; Vertisoles; y Andisoles (25 de cada uno) fueron muestreados a una profundidad de 0-20 cm. La ubicación de los suelos se resume a continuación:

Ultisoles: Pérez Zeledón (San José), Buenos Aires y Osa (Puntarenas), Talamanca y Siquirres (Limón), Sarapiquí (Heredia), y San Carlos (Alajuela).

Inceptisoles: Nicoya, Santa Cruz, Carrillo y Liberia (Guanacaste), Pococí, Talamanca y Guácimo (Limón), Sarapiquí (Heredia), San Carlos y los Chiles (Alajuela) y Golfito (Puntarenas).

Vertisoles: Nicoya, Santa Cruz, Carrillo, Bagaces y Cañas (Guanacaste), Santa Ana (San José) y La Guácima (Alajuela).

Andisoles: Cordillera volcánica de Talamanca, Central y Guanacaste, Guácimo (Limón) y San Vito (Puntarenas).

Análisis de laboratorio

Se realizó un análisis preliminar de la fertilidad de los suelos (pH en agua, materia orgánica, Ca, Mg, K, acidez intercambiable, P, S, Cu, Zn y Mn) empleando la metodología de Díaz-Romeu y Hunter (1978).

Se utilizó la solución extractora Mehlich 3 y cada suelo se repitió 3 veces. Muestras de

2,5 ml de suelo fueron agitadas con 25 ml de Mehlich 3 (HOAc 0,2 M, NH_4NO_3 0,25 M, NH_4F 0,015 M, HNO_3 0,013 M, EDTA 0,001 M, pH 2,5) por 10 min y luego filtradas con papel Whatman N.º 42 (Mehlich 1984).

Para la extracción se utilizó el equipo semiautomático de Custom Laboratorios (Hunter 1975). La concentración de Ca, Mg, K, Cu, Zn y Mn, fue determinada con un espectrofotómetro de absorción atómica; el P y el S fueron determinados con un colorímetro (Díaz-Romeu y Hunter 1978).

Ensayo de invernadero

Para correlacionar y calibrar la cantidad extraída de los nutrimentos, con la solución Mehlich 3, con la respuesta de una planta a la aplicación del elemento, se realizó una prueba de invernadero utilizando sorgo forrajero (*Sorghum bicolor*) como planta indicadora. Los tratamientos para cada elemento en cada suelo fueron: óptimo y \pm el nutrimento a evaluar. Para diseñar la fertilización óptima, se utilizó el resultado del análisis del suelo con Olsen modificado (P, K, Cu, Mn y Zn), KCl 1 N (Ca, Mg, acidez intercambiable) y $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 0,008 M (S), y las curvas de sorción de P, K, S, Cu, Mn y Zn (Díaz-Romeu y Hunter 1978). Los criterios utilizados para fertilizar el tratamiento óptimo fueron los siguientes:

- Para el Ca, la fertilización del óptimo se estableció con base en la cantidad de Ca extraída con KCl 1 N y el porcentaje de saturación de acidez. En los suelos con $<4 \text{ cmol}(+) \text{ l}^{-1}$ de Ca, se aplicó el elemento para elevar su contenido a ese nivel y reducir la saturación de acidez por debajo de 20%. En suelos con $<1 \text{ cmol}(+) \text{ l}^{-1}$ no se añadió más de $2 \text{ cmol}(+) \text{ l}^{-1}$, con el objetivo de no alterar mucho las relaciones catiónicas de las bases. Como fuente se utilizó CaCO_3 calidad reactivo, el cual se mezcló con el suelo 1 mes antes de sembrar, y se mantuvo en incubación húmeda para favorecer la reacción.

- Para el Mg, todos los suelos con $<1 \text{ cmol}(+) \text{ l}^{-1}$ recibieron una dosis de $1 \text{ cmol}(+) \text{ l}^{-1}$ de Mg en el óptimo, usando MgCl_2 como fuente.
- Para el K, los suelos con $<0,2 \text{ cmol}(+) \text{ l}^{-1}$ de K, recibieron la cantidad de K necesaria para subir su contenido en el suelo hasta ese nivel, de acuerdo con lo que indicó la curva de sorción respectiva. Si el suelo tenía $>0,2 \text{ cmol}(+) \text{ l}^{-1}$ de K, no se aplicó K al óptimo. La fuente fue KCl.
- Para el P, los suelos con $<36 \text{ mg l}^{-1}$ (3 veces el nivel crítico propuesto por Díaz-Romeu y Hunter 1978) extraído con Olsen modificado, recibieron en el óptimo la dosis del elemento necesaria para elevar su contenido a ese nivel, de acuerdo con la curva de sorción; el tratamiento individual para P consistió en un tratamiento faltante, esto es, el óptimo menos P. En los suelos con $>36 \text{ mg l}^{-1}$ de P, no se agregó P al óptimo, y el tratamiento individual de P fue aditivo, con una cantidad correspondiente a 36 mg l^{-1} de P. Se utilizó H_3PO_4 como fuente.
- Para el S, suelos con $<24 \text{ mg l}^{-1}$ de S (2 veces el nivel crítico propuesto por Díaz-Romeu y Hunter 1978) extraído con $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 0,008 M, recibieron en el óptimo la dosis del elemento necesaria para elevar su contenido a ese nivel, de acuerdo a lo que indicaba la curva de sorción, y el tratamiento individual para S fue faltante, esto es, el óptimo menos S. En los suelos con $>24 \text{ mg l}^{-1}$ de S no se agregó S al óptimo, y el tratamiento individual de S fue aditivo, con una cantidad correspondiente a 24 mg l^{-1} de S. Se utilizó H_2SO_4 como fuente.
- Para el Cu, todos los suelos presentaron contenidos de Cu extraíble, con Olsen modificado, por encima del nivel crítico, por lo que el tratamiento siempre fue

aditivo, recibiendo una dosis de 10 mg l⁻¹ de Cu con CuCl₂·2 H₂O como fuente.

- Para el Zn, se agregó 15 mg l⁻¹ de Zn al óptimo en los suelos con <3 mg l⁻¹ de Zn extraído con Olsen modificado. Cuando el contenido era >3 mg l⁻¹, el tratamiento fue aditivo y no se añadió al óptimo. La fuente fue ZnCl₂.
- Para el Mn, los suelos con <5 mg l⁻¹ de Mn, recibieron una dosis de 15 mg l⁻¹ del elemento en el óptimo, con MnCl₂. En los suelos con >5 mg l⁻¹, el tratamiento fue aditivo y no se agregó al óptimo.
- Para el N, todos los suelos recibieron una base de 50 mg l⁻¹ aplicados al suelo, y 50 mg l⁻¹ de N en el agua de riego, utilizando NH₄NO₃ como fuente.

Para la siembra del sorgo, se utilizaron vasos plásticos con 150 ml de suelo, con 3 repeticiones en cada tratamiento. Se sembraron 10 semillas de sorgo en cada vaso, raleando luego a 6 plantas por vaso. El riego fue 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 con 50 mg l⁻¹ de N. La cosecha fue realizada 6 semanas después de la siembra, cortando las plantas a ras del suelo. Se midió el peso seco luego de mantener 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 25 suelos para cada uno de los 4 órdenes, con 2 tratamientos para cada uno de los 8 elementos y 3 repeticiones. Con los datos de peso seco se calculó el rendimiento relativo (% Y) de cada suelo:

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

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 de cada nutriente con la solución Mehlich 3. En los puntos trazados se sobrepuso un plástico transparente con un cuadrante dibujado, de tal manera que la mayor cantidad de puntos quedara ubicado en la parte inferior izquierda y la superior derecha del cuadrante. Así se separan 2 poblaciones: una de baja fertilidad (inferior izquierda) y una de alta fertilidad (superior derecha). El nivel crítico se determinó extrapolando la línea divisoria del cuadrante al eje de las X, donde están los resultados iniciales del nutriente con la solución Mehlich 3. Una correlación perfecta para la solución extractora colocaría más del 90 % de los datos en estas 2 poblaciones. En el eje de las Y, se espera resultados de rendimientos relativos entre 80 y 90%.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Contenidos de nutrientes extraídos

En los cuadros 1 y 2 se exponen los ámbitos, promedios y las desviaciones estándar de los nutrientes extraídos con las soluciones extractoras utilizadas para determinar los diferentes niveles críticos, en los diferentes órdenes de suelos de Costa Rica y las soluciones que se utilizan actualmente. En el cuadro 3 se presentan los coeficientes de correlación (r) entre las soluciones.

Niveles críticos de Ca, Mg, K, P y S

Ultisoles

En el cuadro 1 se presentan los niveles críticos (NC) obtenidos con la solución Mehlich 3 en Ultisoles. Se encontró un NC de 4 cmol(+) l⁻¹ para el Ca, valor igual al establecido por el Ministerio de Agricultura y Ganadería y el CATIE (Bertsch 1998), para todos los suelos de Costa Rica con la solución KCl 1 M. Cerca de la mitad de los Ultisoles utilizados para el estudio presentaron menos de 4 cmol(+) l⁻¹, concordando con los resultados encontrados por Bertsch (1986), quien indica que en suelos viejos (muy meteorizados) se

Cuadro 1. Interpretación de análisis de suelos de Costa Rica con la solución extractora Mehlich 3.

Ultisoles								
	cmol (+) l ⁻¹			mg l ⁻¹				
	Ca	Mg	K	P	S	Cu	Mn	Zn
Deficiente	<2	<0,4	<0,1	<2	<18	<0,2	<2	<1,0
Nivel crítico	4	0,8	0,2	3	36	0,4	4	1,5
Suficiente	4-19	0,8-4	0,2-0,5	3-10	36-50	1-5	4-10	1,5-5
Alto	>19	>4	>0,5	>10	>50	>5	>10	>5
Inceptisoles								
	cmol (+) l ⁻¹			mg l ⁻¹				
	Ca	Mg	K	P	S	Cu	Mn	Zn
Deficiente	<2	<0,6	<0,1	<3	<16	<0,2	<2	<1,0
Nivel crítico	3,1	1,1	0,2	6	32	0,4	4	1,7
Suficiente	3,1-18	1,1-5	0,2-0,8	6-18	32-50	1-5	4-10	1,7-5
Alto	>18	>5	>0,8	>18	>50	>5	>10	>5
Vertisoles								
	cmol (+) l ⁻¹			mg l ⁻¹				
	Ca	Mg	K	P	S	Cu	Mn	Zn
Deficiente	<20	<6,0	<0,2	<6	<16	<0,2	<2	<2
Nivel crítico	27	13	0,27	13	32	0,4	4	3
Suficiente	27-50	13-20	0,27-0,7	13-40	32-50	1-5	4-10	3-5
Alto	>50	>20	>0,7	>40	>50	>5	>10	>5
Andisoles								
	cmol (+) l ⁻¹			mg l ⁻¹				
	Ca	Mg	K	P	S	Cu	Mn	Zn
Deficiente	<2	<0,4	<0,1	<8	<15	<0,2	<2	<2
Nivel crítico	5	0,75	0,22	16	31	0,4	4	2,5
Suficiente	5-20	0,75-5	0,22-0,5	16-50	31-50	1-5	4-10	2,5-5
Alto	>20	>5	>0,5	>50	>50	>5	>10	>5
General								
	cmol (+) l ⁻¹			mg l ⁻¹				
	Ca	Mg	K	P	S	Cu	Mn	Zn
Deficiente	<2	<0,4	<0,1	<5	<15	<0,2	<2	<1,5
Nivel crítico	5	0,7	0,17	10	31	0,4	4	2
Suficiente	5-20	0,7-5	0,2-0,5	10-30	31-50	1-5	4-10	2-5
Alto	>20	>5	>0,5	>30	>50	>5	>10	>5

Cuadro 2. Contenidos de Ca, Mg, K, P y S con las soluciones extractoras KCl 1 N, Olsen modificado, Ca(H₂PO₄)₂ y Mehlich 3, en 4 órdenes de suelos de Costa Rica.

	cmol(+) l ⁻¹										mg l ⁻¹				
	Ca		Mg		K		P		S		Mehlich 3	Olsen modificado	Ca(H ₂ PO ₄) ₂	Mehlich 3	Mehlich 3
	KCl IN	Mehlich 3	KCl IN	Mehlich 3	Olsen modificado	Mehlich 3	Olsen modificado	Mehlich 3	Olsen modificado						
ULTISOLES															
Ámbito	0,45-21,63	0,31-21,00	0,15-8,33	0,08-8,47	0,05-0,81	0,05-1,24	1,3-21,9	1,2-14,2	0,9-49,6	20,9-94,8					
Promedio	4,36	4,62	1,31	1,5	0,25	0,38	5,2	2,7	11,7	42,4					
D.E.	4,73	4,41	1,68	1,86	0,19	0,30	4,3	2,7	10,9	16,2					
INCEPTISOLES															
Ámbito	1,38-45,08	1,33-33,33	0,69-7,47	1,25-8,61	0,15-1,75	0,16-1,64	0,5-26,2	1,8-32,4	0,8-13,6	18,3-68,2					
Promedio	19,56	17,78	3,70	4,63	0,61	0,68	6,9	11,2	6,0	33,8					
D.E.	12,56	12,81	2,26	2,36	0,39	0,41	6,5	10,1	3,3	10,0					
VERTISOLES															
Ámbito	26,92-68,42	23,29-55,71	5,42-19,08	8,68-29,17	0,08-0,83	0,16-1,62	0,3-51,9	1,7-29,1	3,7-65,93	30,7-103,5					
Promedio	46,71	42,32	12,09	19,9	0,27	0,52	8,6	10,4	15,14	42,79					
D.E.	14,63	16,69	4,10	6,77	0,19	0,36	10,6	7,9	14,7	17,1					
ANDISOLES															
Ámbito	0,63-33,46	0,74-29,04	0,21-6,53	0,19-7,01	0,13-2,50	0,18-2,26	2,2-76,2	0,5-99,6	1,3-22,5	25,7-71,5					
Promedio	6,81	7,47	1,14	1,72	0,62	0,72	18,8	18,5	8,5	39,7					
D.E.	6,57	6,02	1,26	1,49	0,58	0,60	20,7	29,5	5,5	12,2					

D.E. desviación estándar.

Cuadro 3. Contenidos de Cu, Mn y Zn con las soluciones extractoras Olsen modificado y Mehlich 3, en 4 órdenes de suelos de Costa Rica.

	mg l ⁻¹					
	Cu		Mn		Zn	
	Olsen modificado	Mehlich 3	Olsen modificado	Mehlich 3	Olsen modificado	Mehlich 3
ULTISOLES						
Ámbito	4,5-25,8	1,6-9,9	1,3-377	2,0-391	0,65-11,1	0,73-28,2
Promedio	10,4	3,9	88,1	96,7	4,23	3,99
D.E.	5,4	2,1	28,3	33,6	2,57	5,48
INCEPTISOLES						
Ámbito	3,7-65,7	2,0-11,1	11,0-241	10,3-329	0,70-14,8	0,97-25,0
Promedio	17,7	5,9	87,5	129	4,00	5,80
D.E.	12,5	2,4	61,5	81,1	4,00	6,00
VERTISOLES						
Ámbito	9,2-31,9	4,8-21,4	18,7-132	68,3-187	1,23-24,0	1,10-23,2
Promedio	20,1	13,2	60,0	125	6,07	5,47
D.E.	6,0	4,4	28,3	33,6	5,39	4,48
ANDISOLES						
Ámbito	7,3-79,7	2,0-15,0	2,7-61,0	2,93-128	1,20-22,0	0,50-58,7
Promedio	26,8	7,1	23,2	25,4	8,43	10,16
D.E.	20,4	4,2	15,8	24,6	6,50	14,36

D.E. desviación estándar.

pueden encontrar deficiencias de Ca; así mismo, reporta que en las zonas con predominancia de Ultisoles (Pérez Zeledón, Sarapiquí, Los Chiles y Buenos Aires) se puede encontrar 50% o más de suelos con niveles menores a 4 cmol(+) l⁻¹. El NC del Mg fue de 0,8 cmol(+) l⁻¹, menor que el usado actualmente en Costa Rica con la solución KCl 1 M (1 cmol(+) l⁻¹). De acuerdo con Gadea (1993), existe una alta correlación entre las cantidades extraídas de Ca y Mg con Mehlich 3 y KCl, lo que explica en parte la similitud encontrada en este estudio con relación a sus NC. El NC del K fue de 0,2 cmol(+) l⁻¹, idéntico al que se utiliza actualmente en Costa Rica con la solución Olsen modificada. Con base en estos resultados se

puede concluir que la probabilidad de respuesta a la aplicación de K, cuando se tiene menos de 0,2 cmol(+) l⁻¹ extraídos con la solución Mehlich 3, es alta.

Se encontró un NC de 3 mg l⁻¹ de P con Mehlich 3. La acción extractora del P por esta solución se presenta al reaccionar con el ácido acético (ácido débil) y el fluoruro de amonio (Hanlon y Johnson 1984). Este último puede acomplejar fuertemente al Al y liberar el P en Ultisoles, donde la fijación de P se da principalmente como fosfatos de Al. Originalmente Mehlich (1984) había propuesto un NC de P de 30 mg l⁻¹, pero en Ultisoles de Costa Rica el valor fue muy inferior. El NC de S fue relativamente

alto con esta solución (36 mg l⁻¹), probablemente debido a que posee F y extrae el S de los óxidos y parte del S orgánico por la condición ácida que posee (Mehlich 1984).

Inceptisoles

El cuadro 1 presenta los NC en Inceptisoles. El valor obtenido para el Ca fue de 3,1 cmol(+) l⁻¹ y fue el resultado de pocas muestras que mostraron contenidos de Ca inferiores a 4 cmol(+) l⁻¹, ya que la mayoría de los Inceptisoles de este estudio presentaron contenidos superiores a ese nivel. El Mg mostró un valor de 1,1 cmol(+) l⁻¹ y al igual que el Ca los niveles en que se encuentra el Mg en este grupo de suelos puede ser suficiente para el crecimiento de plantas (la mayoría de suelos tuvieron rendimientos relativos superiores a 80%). Con respecto al K se encontró un nivel crítico de 0,2 cmol(+) l⁻¹, igual al que se utiliza actualmente con la solución de Olsen modificado.

Se encontró un NC de 6 mg l⁻¹ de P con Mehlich 3 en Inceptisoles de Costa Rica. Esta solución contiene ácidos débiles y NH₄F: el fluor libera el P de los P-Ca o P-Al al precipitar el Ca o acomplejar el Al (Chang y Jackson 1957), o también por el pH de 2,5 que disuelve P-Ca, P-Al y P-Fe (Mehlich 1984). Con el S se determinó un NC de 32 mg l⁻¹.

Vertisoles

Los NC para los Vertisoles se presentan en el cuadro 1. Siguiendo el método gráfico de Cate y Nelson (1965) la solución Mehlich 3 obtuvo un NC de Ca de 27 cmol(+) l⁻¹ y de Mg de 13 cmol(+) l⁻¹, ya que las cantidades intercambiables de estos cationes son siempre altas y es poco probable que ocurran deficiencias de estos nutrientes, pues la génesis de estos suelos involucra el acúmulo de bases, principalmente Ca. Esto causó que muy pocos suelos presentaran porcentaje RR inferiores a 80, mostrando que en Vertisoles con altos contenidos de Ca y Mg la respuesta a su aplicación es muy poco probable. El K obtuvo un NC de 0,27 cmol(+) l⁻¹, el cual fue el valor mayor encontrado en los órdenes de suelos estudiados, explicado en parte por la mayor capacidad de

fijación de K que presentan estos suelos, debido a la presencia de arcillas montmorilloníticas.

Se encontró un NC de 13 mg l⁻¹ de P en Vertisoles, más del doble que en Inceptisoles. En este grupo de suelos, la solución Mehlich 3 extrae el P por medio del fluor que precipita el Ca (alto en estos suelos) en CaF₃ y el P presente como CaHPO₄ puede ser extraído (Hanlon y Johnson 1984). Se encontró un NC de 32 mg l⁻¹, igual al señalado para los Inceptisoles y semejante al de los otros grupos de suelos estudiados.

Andisoles

El NC de Ca en Andisoles fue de 5 cmol(+) l⁻¹ utilizando la solución extractora Mehlich 3 (Cuadro 1). Este valor discrepa de lo reportado por Martín (1970) para el Ca en suelos volcánicos de Costa Rica, pues establece que menos de 4 cmol(+) l⁻¹ es un nivel deficiente. El NC del Mg fue de 0,75 cmol(+) l⁻¹, ligeramente inferior al reportado para KCl. Los NC de Ca y Mg en Andisoles fueron muy similares a los encontrados en Ultisoles en este mismo estudio, lo que indica que el comportamiento de la solución Mehlich 3 es más consistente en suelos ácidos. El NC de K fue de 0,22 cmol(+) l⁻¹, también muy similar al encontrado en Ultisoles.

En este orden de suelos se determinó el mayor NC de P (16 mg l⁻¹), probablemente debido a la naturaleza ácida de la solución (pH 2,5) que disuelve P-Ca, P-Al y P-Fe en ese orden de magnitud, y también porque el ión fluoruro es muy efectivo acomplejando el Al y de esta forma libera el P de los P-Al (Mehlich 1978, Chang y Jackson 1957). El NC de S fue de 31 mg l⁻¹, muy similar al encontrado en los otros órdenes de suelo.

General

Los NC utilizando los 100 suelos (sin dividirlos en órdenes) se presenta en el cuadro 1. El Ca obtuvo un valor de 5 cmol(+) l⁻¹, el cual es un poco mayor al que se utiliza actualmente en Costa Rica con la solución de KCl 1 M (4 cmol(+) l⁻¹). Con el Mg el nivel encontrado fue de 0,7 cmol(+) l⁻¹, menor al que se utiliza con KCl 1 M de 1 cmol(+) l⁻¹. Con respecto al K, obtuvo

un valor menor al analizar los 100 suelos ($0,17 \text{ cmol}(+) \text{ l}^{-1}$) que cuando se estudiaron los órdenes por separado.

Se determinó un nivel crítico de P general (Figura 1), igual al utilizado en Costa Rica con la solución Olsen modificado (10 mg l^{-1}), debido a que los aniones HCO_3^{-1} y F^{-1} en Olsen modificado y Mehlich 3, respectivamente, remueven formas similares de P. Mehlich (1978) reportó un nivel crítico de 30 mg l^{-1} de P para suelos de Carolina del Norte. El S obtuvo un nivel crítico de 31 mg l^{-1} cuando se estudiaron los 100 suelos juntos (Figura 1).

Es importante señalar que existe un ámbito específico de variación intrínseca de cada determinación y específicamente para el P es de 25-30%, con las soluciones Olsen modificado y Mehlich 3. La utilidad práctica de esta variación radica en que la persona que esté interpretando un análisis con alguna de estas soluciones debe considerar que el elemento puede estar variando en ese porcentaje, por efecto estrictamente del análisis de laboratorio. Por lo tanto, un valor de 10 mg l^{-1} debe interpretarse fluctuando entre 7-13 mg l^{-1} (Corrales *et al.* 2005).

Niveles críticos de Cu, Mn y Zn

Cobre

Los gráficos de Cate y Nelson mostraron que la mayor parte de los datos se ubicaron en los cuadrantes superiores, debido principalmente a que hubo muy baja respuesta a la aplicación de Cu. Sólo fue posible ubicar un suelo en el cuadrante inferior izquierdo en Ultisoles, con una ligera respuesta al Cu, por lo que el valor del NC se ubicó en $1,6 \text{ mg l}^{-1}$ de Cu, que fue el valor más bajo del elemento encontrado en este orden de suelos. El resultado no concuerda con el NC de $0,37 \text{ mg l}^{-1}$ reportado por Makarin y Cox (1983) con esta solución. Rohman y Cox (1988) establecieron un NC de $0,27 \text{ mg l}^{-1}$ con Mehlich 3 en suelos ácidos de Carolina del Norte. La mayoría de los valores se presentaron por encima de 2 mg l^{-1} , superando el NC de $0,5 \text{ mg l}^{-1}$ sugerido

originalmente por Mehlich (1984). Cuando se trató de calibrar el método en los 100 suelos (sin dividirlos en órdenes), fueron obtenidos los mismos resultados mencionados anteriormente (Figura 2).

Manganeso

En el comportamiento del Mn en los gráficos de Cate y Nelson, se determinó un NC de 4 mg l^{-1} al unir todos los suelos (Figura 2). La mayoría de los datos se ubicó en los cuadrantes superiores, debido principalmente a que hubo muy baja respuesta a la aplicación de Mn y los contenidos de este elemento fueron altos. Sólo en Ultisoles fue posible obtener un nivel tentativo de 5 mg l^{-1} , al ubicar un suelo en el cuadrante inferior izquierdo. Otros suelos con valores inferiores a 5 mg l^{-1} no respondieron al Mn. Al respecto, Mascagni y Cox (1985) encontraron un NC de $1,5 \text{ mg l}^{-1}$ con Mehlich 3 en suelos ácidos, en tanto que Mehlich (1984) sugirió un nivel crítico de 4 mg l^{-1} con Mehlich 3. No fue posible determinar el nivel crítico en los otros órdenes de suelos, los cuales presentaron valores más altos de Mn extraídos con Mehlich 3. Estos resultados muestran que la deficiencia de Mn es muy poco común en suelos de Costa Rica, y sólo se tienen algunos informes de su aparición en Vertisoles

Sin embargo, en este grupo de suelos la concentración de Mn fue muy alta, a pesar de que se esperaban algunos suelos con niveles bajos. Es posible que el secado tan prolongado de la muestra de suelo al aire en el invernadero, haya causado un incremento en el contenido de Mn disponible para las plantas, tal como ha sido informado por Obando *et al.* (1984), que encontraron un aumento en la cantidad de Mn extraíble con Olsen modificado y DTPA después de secar las muestras al aire.

Zinc

El Zn fue el único micronutriente que presentó un NC bien definido en todos los órdenes. En Ultisoles el NC fue de $1,5 \text{ mg l}^{-1}$ (Cuadro 1), valor que coincide con el informado por Junus

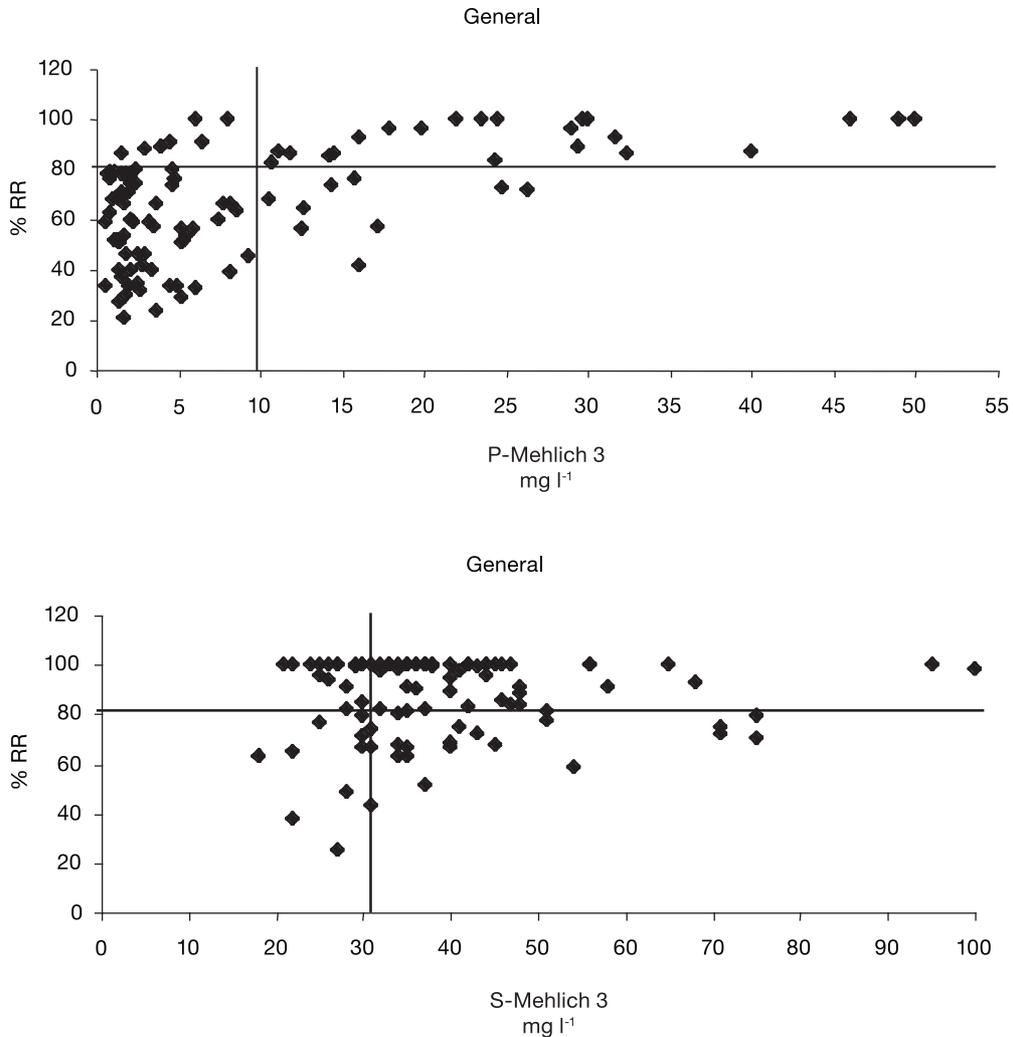


Fig. 1. Nivel crítico de P y S extraíble con Mehlich 3 en los 100 suelos.

y Cox (1987) en maíz y soya en suelos ácidos del sureste de EE.UU. El NC en Inceptisoles fue de 1,7 mg l⁻¹ (Cuadro 1), siendo el orden donde se presentó menos respuesta a la aplicación del elemento.

El NC en Vertisoles fue el más alto, con un valor de 3 mg l⁻¹, que coincide con el NC en Olsen Modificado encontrado por Molina (1993). Ambos métodos utilizan EDTA como agente

quelatante, lo que aparentemente explica la concordancia encontrada en el NC. La disponibilidad de Zn en Vertisoles por lo general es menor debido a su pH alto (± 7), lo que probablemente causó un valor más alto del NC. El NC en Andisoles fue de 2,5 mg l⁻¹, ligeramente superior al propuesto originalmente por Mehlich (1984).

Al agrupar todos los suelos sin dividirlos en órdenes, el NC en Mehlich 3 fue de 2 mg l⁻¹

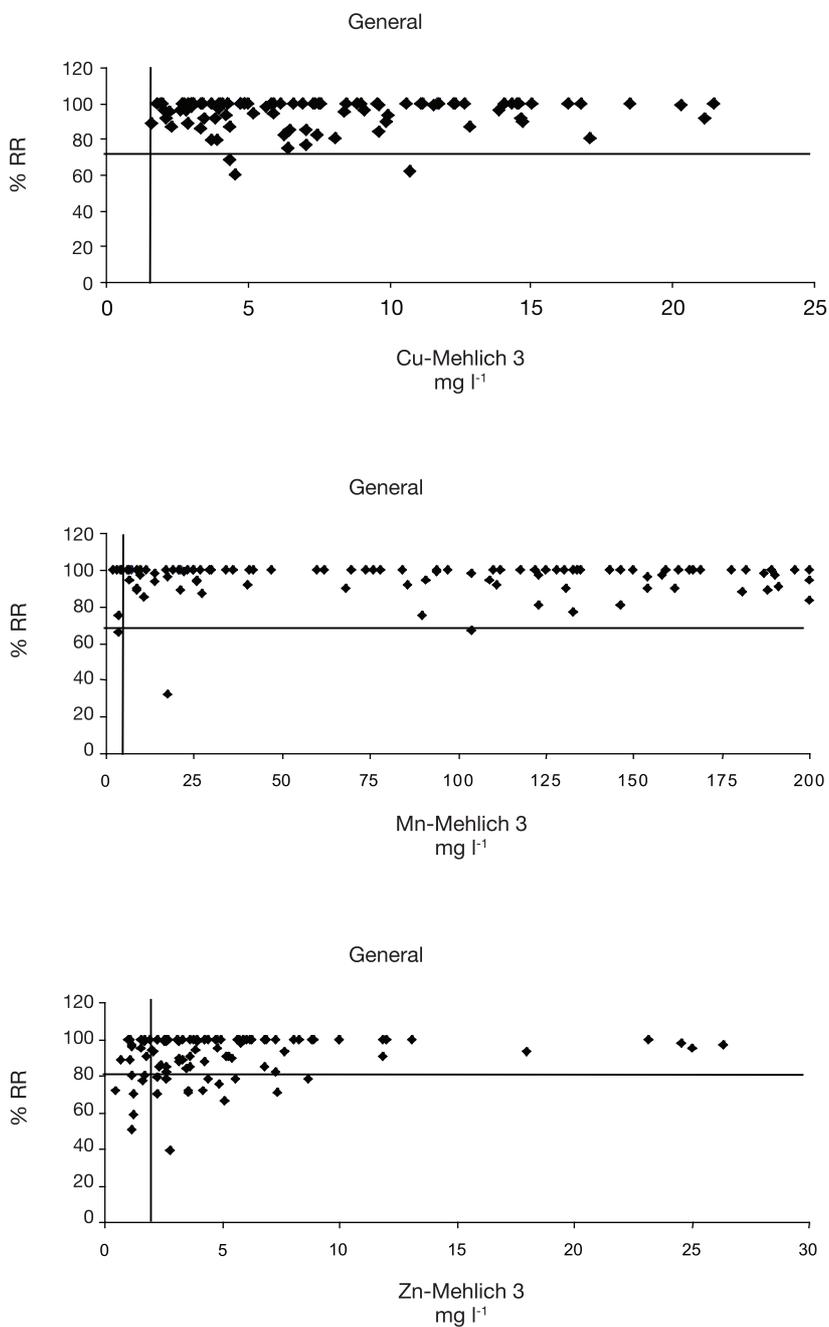


Fig. 2. Nivel crítico de Cu, Mn y Zn extraíble con Mehlich 3 en los 100 suelos.

(Figura 2), valor idéntico al encontrado con Olsen modificado en los mismos suelos (Molina 1993). Este nivel supera a los reportados por otros investigadores con este mismo extractante (Junus y Cox 1987, Rhoman y Cox 1988).

CONCLUSIONES

1. La solución extractora Mehlich 3 puede ser una alternativa eficaz para el análisis de suelos de Costa Rica y sustituir las soluciones extractoras KCl 1 M, $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 0,008 M (500 mg l⁻¹ P) y Olsen modificado, ya que permitió establecer niveles críticos de nutrientes satisfactorios para la gran mayoría de los nutrientes.
2. La solución extractora Mehlich 3 presenta una buena correlación con los demás métodos.
3. Por el manejo fácil de la extracción y la determinación, permite analizar mayor cantidad de nutrientes en forma simultánea, disminuyendo los costos y el tiempo de análisis.
4. Con el elemento p podrían requerirse mayores estudios de correlación.
5. Olsen modificado es una solución que presenta problemas de manejo en el laboratorio, debido a que su viscosidad obstruye las mangueras de los equipos y a la interferencia generada por el color amarillo proveniente de la materia orgánica.
6. La solución Mehlich 3 tiene la ventaja adicional que permite una fácil determinación de la concentración de nutrientes utilizando el Espectrómetro de Plasma, contrario al extracto de Olsen modificado que por su viscosidad no es apropiado para correr muestras con este moderno instrumento.

LITERATURA CITADA

- BERTSCH F. 1986. Manual para interpretar la fertilidad de los suelos de Costa Rica. Oficina de Publicaciones, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. 86 p.
- BERTSCH F. 1998. La fertilidad de los suelos y su manejo. ACCS, San José, Costa Rica. 157 p.
- CABALCETA G. 1993. Niveles críticos de fósforo, azufre y correlación de soluciones extractoras en Ultisoles, Inceptisoles, Vertisoles y Andisoles de Costa Rica. Tesis de maestría, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. 167 p.
- CABALCETA G., CORDERO A. 1994a. Niveles críticos de fósforo en Ultisoles, Inceptisoles, Vertisoles y Andisoles de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 18(2):147-161.
- CABALCETA G., CORDERO A. 1994b. Niveles críticos de azufre en Ultisoles, Inceptisoles, Vertisoles y Andisoles de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 18(2):163-174.
- CABALCETA G. 1995. Correlación de soluciones extractoras de fósforo en suelos de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 19(1):29-37.
- CABALCETA G., BORNEMISZA E. 1995. Correlación de soluciones extractoras de azufre en suelos de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 19(1):39-45.
- CATE R.B. Jr., NELSON L.A. 1965. A rapid method for correlation of soil test analysis with plant response data. North Carolina State University, International Soil Fertility Project (Tech. Bull. No. 1).
- CATE R.B. Jr., 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.
- CHANG S.C., JACKSON M.L. 1957. Fractionation of soil phosphorus. *Soil Sci.* 84:133-144.
- CORRALES M., BERTSCH F., BEJARANO J.A. 2005. Los laboratorios de análisis de suelos y foliares en Costa Rica: informe del Comité de Laboratorios de Análisis de Suelos y Aguas. *Agronomía Costarricense* 29(3): 125-135.

- COX F.R., KAMPRATH E.J. 1972. Micronutrient soil test, pp. 45-72. *In: J.J. Morvedt et al.* (eds). Micronutrients in Agriculture. SSSA, Madison, Wisconsin.
- DANHNKE W.C., OLSON R.A. 1990. Soil test calibration, correlation and recommendation, pp. 45-72. *In: R.L. Westerman* (ed). Soil testing and plant analysis. SSSA, Madison, Wisconsin.
- DÍAZ-ROMEU R., HUNTER A. 1978. Metodología de muestreo de suelo, análisis químico de suelos y tejido vegetal y de investigación en invernadero. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 61 p.
- GADEA A.J. 1993. Niveles críticos de calcio, magnesio y potasio en cuatro órdenes de suelos de Costa Rica. Tesis de maestría, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. 135 p.
- HONLON E.A., JOHNSON G.V. 1984. Bray/kurts, Mehlich III, AB/D and ammonium acetate extractions of P, K and Mg in four Oklahoma soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 15: 277-294.
- HUNTER A. 1975. New techniques and equipment for routine plant and analytical procedure, pp. 467-483. *In: E. Bornemisza y A. Alvarado* (eds). Soil management in Tropical America. North Carolina State University, Raleigh.
- HENRÍQUEZ C., BERTSCH F., SALAS R. 1995. Fertilidad de suelos: manual de laboratorio. ACCS, San José, Costa Rica. 64 p.
- JONES J.B., WOLF B. 1984. Manual of soil testing procedure using modified (Wolf) Morgan extracting reagent. Benton Laboratories, Athens, Georgia. 61 p.
- JONES J.B. 1990. Universal soil extractants: their composition and use. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 21(13-16):1091-1101.
- KAMPRATH E.J. 1970. Exchangeable aluminum as a criterion for liming leached mineral soils. *Soil Science Society of America Proceedings* 34:252-254.
- LANYON L.E., HEALD W.R. 1982. Magnesium, calcium, strontium and barium., pp. 159-165. *In: A.L. Page et al.* (eds). Methods of soil analysis, Part 2. Agronomy Monograph N.º 9, ASA-SSSA.
- LINDSAY W.L., COX F.R. 1985. Micronutrients soil test for tropics. *Fertilizer Research* 7:169-200.
- MAKARIN A.K., COX F.R. 1983. Evaluation of the need for cooper with several soil extractants. *Agronomy Journal* 75:493-496.
- MASCAGNI H.J., COX F.R. 1985. Calibration of manganese availability index for soybean soil test data. *Soil Science Society of America Journal* 49: 383-386.
- MARTINI J. 1970. Caracterización del estado nutricional de los principales Andosoles de Costa Rica, mediante la técnica del elemento faltante en invernadero. *Turrialba* 20(1):72-84.
- MEHLICH A. 1978. New extractant for soil test evaluation of phosphorus, potassium, magnesium, calcium, sodium, manganese and zinc. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 9(6):455-476.
- 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. 1993. Calibración de métodos de análisis de cobre, zinc y manganeso disponible en Ultisoles, Vertisoles, Inceptisoles y Andisoles de Costa Rica. Tesis de maestría, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. 146 p.
- 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.
- OBANDO R.A., BORNEMISZA E., MATA R. 1984. Formas de manganeso en suelos derivados de cenizas volcánicas y dedicados a praderas de la Meseta Central Oriental. *Agronomía Costarricense* 8(1):33-43.
- RHOMAN P.C., COX F.R. 1988. Evaluation of modified Olsen extracting reagent for cooper, zinc and manganese. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 19:1859-1870.
- SÁNCHEZ P. 1981. Suelos del trópico: características y manejo. IICA, San José, Costa Rica. 634 p.
- SOLTAMPUR P.N. 1991. Determination of nutrient availability and elemental toxicity by AB-DTPA soil test and ICPS. *Advances in Soil Science* 16:165-190.
- 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, North Carolina State University, Raleigh. *Boletín Técnico* N.º 7.