Agronomía Costarricense 18(2): 147-161. 1994

NIVELES CRITICOS DE FOSFORO EN ULTISOLES, INCEPTISOLES, VERTISOLES Y ANDISOLES DE COSTA RICA 1/*

*Gilberto Cabalceta***
*Alvaro Cordero***

ABSTRACT

Critical phosphorus soil test levels in Ultisols, Inceptisols, Vertisols and Andisols of Costa Rica. The critical test level of P in four soil orders of agricultural importance in Costa Rica was studied using the Cate and Nelson methodology. Five extracting solutions, Mehlich 3, Mehlich 1, Bray 1, Modified Olsen and Modified Morgan, were used to evaluate the critical P levels in 25 Ultisols, 25 Inceptisols, 25 Vertisols and 25 Andisols. Different critical levels were found in each soil order when different extracting solutions were used. Critical levels of 6, 4, 3, 2 and 1 mg P/L were found in Ultisols with the solutions Modified Olsen, Modified Morgan, Mehlich 3, Bray 1 and Mehlich 1, respectively. Regarding the Inceptisols, critical levels of 7, 7, 6, 5, and 4 mg P/L were found with Modified Olsen, Mehlich 1, Mehlich 3, Bray 1 and, Modified Morgan, respectively. In Vertisols, critical levels of 20, 13, 11, 10 and 10 mg P/L were found with Modified Morgan, Mehlich 3, Bray 1, Mehlich 1 and Modified Olsen, respectively. Critical levels of 20, 18, 16, 15, and 8 mg P/L were found with Bray 1, Modified Olsen, Mehlich 3, Mehlich 1 and Modified Morgan, respectively, in Andisols. When the soil samples (100) were analized together, critical levels of 10, 10, 8, 6, and 5 mg P/L were found with Modified Olsen, Mehlich 3, Mehlich 1, Bray 1, and Modified Morgan.

INTRODUCCION

Una forma de predecir el comportamiento de un determinado nivel de P en el suelo es correlacionar el P extraído con el rendimiento, el % de rendimiento relativo o el P absorbido (Fitts y Nelson, 1956).

El desarrollo de una prueba de suelo para cualquier nutrimento, tradicionalmente se ha desarrollado en 3 etapas (Corey, 1987):

1- Selección de un extractante.
2- Correlación, definida como el proceso utilizado para seleccionar los mejores análisis para suelos de un área determinada.
3- Calibración, que puede ser entendida como el proceso que define la probabilidad de obtener una respuesta de crecimiento ante un nutrimento aplicado a cualquier nivel de análisis de suelo.

La cantidad de un nutrimento extraído se expresa usualmente como bajo, medio o alto, o como un ámbito de concentración crítica.

La investigación de una correlación usualmente se realiza en dos etapas: primero un estudio exploratorio en invernadero con muchas muestras de suelo, seguido posteriomente por otro de campo

1/ Recibido para publicación el 1 de noviembre de 1993.
* Parte de la Tesis de Maestría en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales, presentada por el primer autor ante la Universidad de Costa Rica.
** Centro de Investigaciones Agronómicas, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.

con menos muestras cuidadosamente seleccionadas. Los estudios en invernadero permiten controlar las condiciones ambientales. Sin embargo, los resultados obtenidos en invernadero no deben ser directamente transferidos a las condiciones de campo (Dahnke y Olson, 1990).

De igual forma, los estudios en invernadero eliminan la influencia de variables no controlables como subsuelo, clima y variabilidad de suelos. Es importante señalar que entre más muestras de suelo sean utilizadas, mayor será la certeza de que los resultados son exactos. Es importante seleccionar suelos dentro de un ámbito amplio de disponibilidad de nutrimentos, que refleje una distribución normal (Snedecor y Cochran, 1971).

En las evaluaciones del P disponible en los suelos por medios químicos, se debe considerar la relación entre la cantidad, la intensidad, la difusión y otros factores que influyen en la disponibilidad para las plantas, como por ejemplo, la capacidad buffer en suelos ácidos y neutros que depende de la cantidad de óxidos cristalinos e hidratados de Fe y Al, o la suma de Ca intercambiable y $CaCO_3$ en suelos calcáreos (Kamprath y Watson, 1980).

Existen básicamente 4 mecanismos de remoción de P de la fase sólida por medio de extractantes:

a) Acción solvente de los ácidos: generalmente las soluciones ácidas tienen un pH de 2 a 3, que generan suficientes H^+ para disolver los fosfatos dicálcicos. Las soluciones ácidas solubilizan algunos de los fosfatos de Al y Fe. El orden de mayor a menor solubilidad en estas soluciones es P-Ca > P-Al > P-Fe (Thomas y Peaslee, 1973).

b) Desplazamiento de aniones: el P adsorbido en la superficie del carbonato de Ca e hidróxidos hidratados de Fe y Al puede ser reemplazado por otros aniones tales como acetato, citrato, lactato, sulfato y bicarbonato (Dean y Rubins, 1947; Olsen, *et al.*, 1954). Cuando los aniones orgánicos y el sulfato están presentes en las soluciones ácidas reducen la readsorción de P.

c) Acomplejantes de cationes que unen P: los iones de F son muy efectivos en acomplejar iones de Al por lo que liberan P de P-Al (Chang y Jackson, 1957). Los iones F precipitan el Ca, por lo tanto el P presente en el $CaHPO_4$ puede ser extraído por soluciones que contienen F (Thomas y Peaslee, 1973). Los iones de Al pueden ser acomplejados por los aniones orgánicos de citrato y lactato.

d) Hidrólisis de cationes que unen al P: las soluciones extractantes que contienen iones OH^- extraen P de los P-Al y P-Fe a través de la hidrólisis. Debido a esto, el $NaHCO_3$ tamponado a un pH de 8,5 es muy efectivo para extraer P-Al y, en alguna medida, P-Fe (Tyner y Davide, 1962).

Para determinar si la concentración de cada uno de los elementos con una solución extractora específica, es adecuada para el cultivo o no, es necesario establecer el nivel crítico. Por nivel crítico se entiende aquella concentración de un elemento por encima de la cual, la probabilidad de incrementos sensibles en la producción debido a la aplicación del elemento es baja, mientras que valores inferiores muy probablemente corresponderán a producciones pobres y la probabilidad de incrementos debido a la aplicación del elemento es alta. Uno de los objetivos más importantes de una solución extractora consiste en disolver y remover solamente los nutrimentos de significado inmediato para el crecimiento de las plantas y debe hacerlo cuantitativamente; una buena solución extractora debe predecir la disponibilidad del elemento de interés dentro de un amplio rango de pH del suelo, como también debe ser particularmente sensible a bajos niveles de disponibilidad donde las deficiencias son probables (Bertsch, 1987).

En Costa Rica se cuenta con estudios de niveles críticos de P (Cuadro 1) que son muy generales (pues incluyen todos los tipos de suelos) o muy específicos (porque se refieren exclusivamente a algún cultivo), por lo que el objetivo del presente estudio fue determinar en invernadero, utilizando sorgo como planta indicadora, los niveles críticos de P en 4 órdenes de suelo de Costa Rica, Ultisoles, Vertisoles, Inceptisoles y Andisoles, con 5 métodos de extracción.

Cuadro 1. Estudio de niveles críticos de P determinados en Costa Rica con la solución Olsen Modificada.

	Nivel crítico (mg/L)	Referencia
MAG*	10	(Bertsch, 1987)
CATIE**	12	(Díaz-Romeu y Hunter, 1978)
Arroz	4	(Cordero y Miner, 1975)
Arroz	5	(Cordero, 1991)
Maíz	10	(Cordero y Miner, 1975)
Cebolla	15	(Soto, 1988)
Invernadero	15	(Cordero y Miner, 1975)

* Ministerio de Agricultura y Ganadería, San José, Costa Rica.

** Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Turrialba, Costa Rica.

MATERIALES Y METODOS

Muestreo y ubicación de los sitios

Se realizaron muestreos de 4 órdenes de suelos de importancia agrícola en Costa Rica: Ultisoles, Inceptisoles, Vertisoles y Andisoles. De cada orden se tomaron 25 muestras a una profundidad de 0 a 20 cm, en las localidades de:

-Pérez Zeledón (9) de San José; Buenos Aires (5), Golfito (1) y Osa (3) de Puntarenas; Limón (1), Talamanca (1) y Siquirres (1) de Limón; Sarapiquí (2) de Heredia; y Los Chiles (2) de Alajuela, en Ultisoles.

-Nicoya (1), Santa Cruz (1), Bagaces (1), Liberia(1) y Carrillo (2) de Guanacaste; Pococí (1), Talamanca (5) y Guácimo (2) de Limón; Sarapiquí (2) de Heredia; San Carlos (1) y Los Chiles (2) de Alajuela; Golfito (1) y Osa (1) de Puntarenas; Limón (1) de Limón; Pérez Zeledón (2) de San José; y Turrúcares (1) de Alajuela, en Inceptisoles.

-Cañas (5), Santa Cruz (12), Bagaces (3), Carrillo (2) y Nicoya (1) de Guanacaste; Santa Ana (1) de San José y La Guácima (1) de Alajuela, en Vertisoles.

-Poás (2), Alfaro Ruiz (1) y Upala (1) de Alajuela; Alvarado (2), La Unión (1), Jiménez (1), Cartago (2), Oreamuno (1) y Turrialba (1) de Cartago; Heredia (1) y Santo Domingo (1) de Heredia; Tilarán (1) de Guanacaste; Guácimo (4) de Limón; Coto Brus (4) y Corredores (1) de Puntarenas; y León Cortés (1) de San José, en Andisoles (Figura 1).

Los suelos fueron secados al aire y luego molidos y tamizados con una criba de 2 mm.

Análisis de laboratorio

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

Luego se utilizaron 5 métodos de extracción de P; cada metodología se repitió 3 veces en cada suelo y adicionalmente se incluyó una muestra control cada 20 suelos. Los métodos se indican en el Cuadro 2.

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

Ensayo de invernadero

Para correlacionar y calibrar la cantidad extraída de P por los diferentes métodos con la respuesta de una planta a la aplicación del elemento, se realizó una prueba de invernadero utilizando sorgo forrajero (*Sorghum bicolor)* como cultivo indicador. Se establecieron 2 tratamientos en cada suelo: óptimo y ± P. Para diseñar la fertilización 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,

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

Solución	Extractantes	Relación suelo/solución (vol/vol)	Referencia
Olsen modificada	0,5M $NaHCO_3$ + 0,01M EDTA + 0,5 g/10 L Superfloc 127, pH 8,5	1:10*	Díaz-Romeu y Hunter, 1978
Mehlich III	0,2N HOAc + 0,25N NH_4NO_3 + 0,015N NH_4F + 0,013N HNO_3 + 0,001M EDTA pH 2,5	1:10*	Mehlich, 1984
Mehlich I	0,05N HCl + 0,025N H_2SO_4	1:10**	TCSTPA, 1980
Morgan modificada	1N NaOAc + 0,54N HOAc 0,00013M DPTA pH 4,8	1:2**	Jones y Wolf, 1984
Bray I	0,025N HCl + 0,03N NH_4F	1:10**	TCSTPA, 1980

* Tiempo de agitación 10 min.
** Tiempo de agitación 5 min.

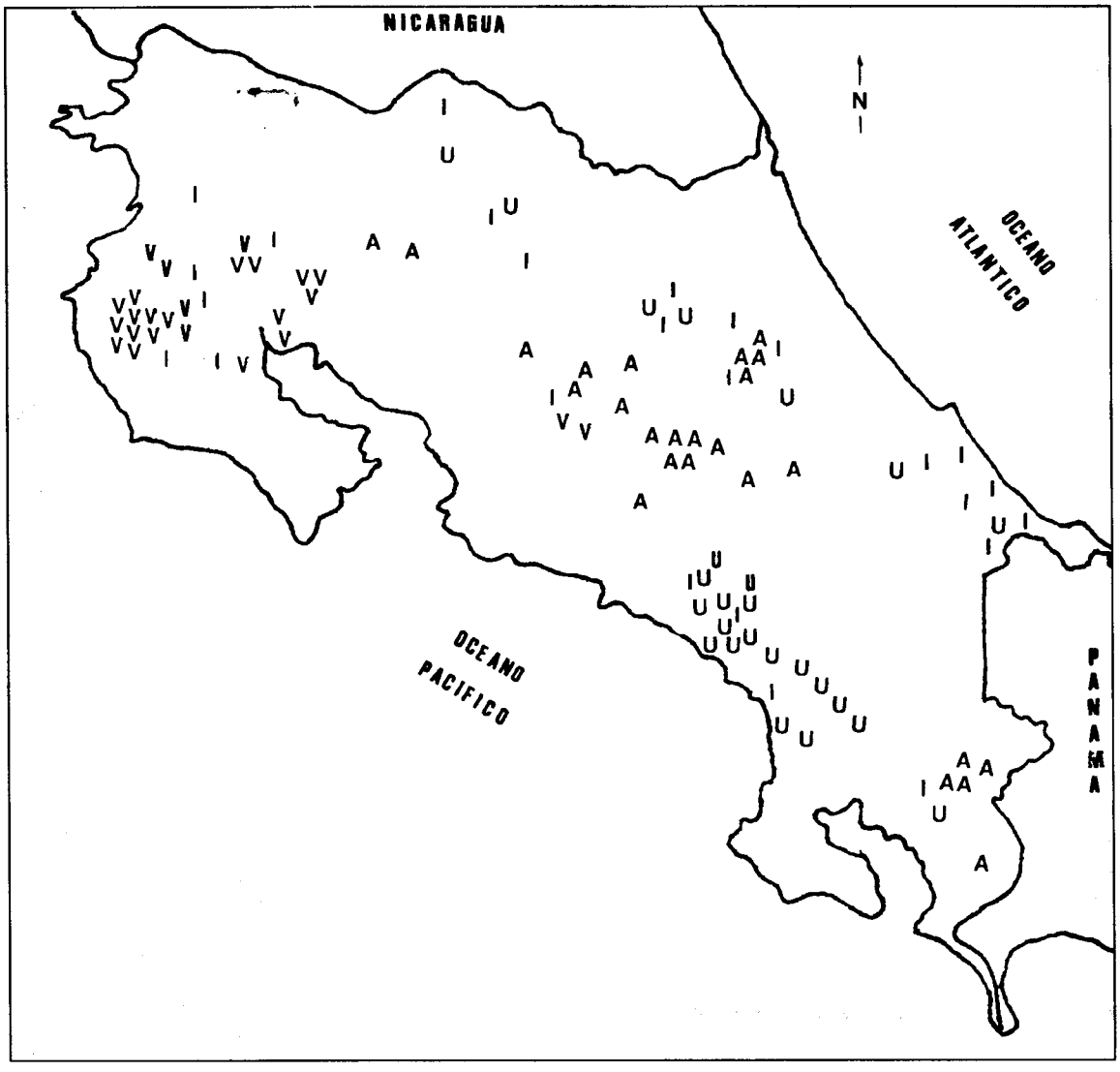

Fig. 1. Sitios de muestreo de Ultisoles (U), Inceptisoles (I), Vertisoles (V), y Andisoles (A) de Costa Rica para el estudio de niveles críticos.

1978). Los criterios utilizados para fertilizar el tratamiento óptimo fueron los siguientes:

-Para el P, en este caso el elemento en evaluación, los suelos con < 36 mg P/L, (3 veces el nivel crítico) extraíble con Olsen Modificado, recibieron en el óptimo la dosis del elemento necesaria para elevar su contenido a ese nivel, de acuerdo con lo que indicaba 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 mg P/L no se agregó P al óptimo, y el tratamiento individual de P fue aditivo, con una cantidad correspondiente a 36 mg P/L. Se utilizó H_3PO_4 como fuente.

-Para el N, todos los suelos recibieron una base de 50 mg N/L aplicados al suelo, y 50 mg N/L en el agua de riego, utilizando NH_4NO_3 como fuente.

-Para el K, los suelos con < 0,2 cmol(+) K/L, 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 cmol(+) K/L, no se aplicó K al óptimo. La fuente fue KCl.

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

-Para el Mg, todos los suelos con < 1 cmol(+) Mg/L recibieron una dosis de 1 cmol(+)/L de Mg en el óptimo, usando $MgCl_2$ como fuente.

-Para el S, suelos con < 24 mg S/L (2 veces el nivel crítico), extraído con $Ca(H_2PO_4)_2$, 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. Los suelos con > 24 mg S/L no recibieron 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 tanto en ningún caso se adicionó al óptimo.

-Para el Zn, se agregó 15 mg Zn/L al óptimo en los suelos con menos de 3 mg Zn/L extraíble con Olsen Modificado. La fuente fue $ZnCl_2$.

-Para el Mn, los suelos con < de 5 mg Mn/L, recibieron una dosis de 15 mg/L del elemento en el óptimo, con $MnCl_2$.

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 conteniendo 50 mg N/L. La cosecha fue realizada 6 semanas después de la siembra, cortando las plantas al ras del suelo. Se midió el peso seco luego de mantener la muestra en una estufa a 70°C durante 48 h.

Análisis estadístico

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 de P y 3 repeticiones. Con los datos de peso seco se calculó el rendimiento relativo (%Y) 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), ploteando en el eje de las ordenadas los rendimientos relativos, y en el eje de las abcisas los resultados del análisis químico de cada nutrimento y 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 baja fertilidad (inferior izquierda) y otra 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 de P en los suelos con las diferentes soluciones. Una correlación perfecta para una solución extractora colocaría más del 90% de los datos en estas 2 poblaciones.

RESULTADOS Y DISCUSION

En el Cuadro 3 se presentan los niveles críticos de P en los 4 órdenes de suelos estudiados y el nivel crítico general para todos los suelos en conjunto, con las 5 soluciones extractoras.

Ultisoles

Los niveles críticos de P en los Ultisoles variaron entre 1 y 6 mg/L según la solución extractora utilizada (Figura 2). El mayor valor (6 mg P/L) se obtuvo con la solución Olsen Modificada, la cual por poseer OH^- e hidrolizar el Al y el Fe, extrae el P del fosfato de aluminio (P-Al) y algunas formas del fosfato de hierro (P-Fe) (Tyner y Davide, 1962; Maida, 1978). Estas dos formas de fosfatos son las principales en este orden de suelo.

La solución Morgan Modificada extrajo valores medios (4 mg P/L) en suelos ácidos, por poseer un pH de 4,8 que actúa como un solvente suave para los P-Al y P-Fe. Wolf (1982) también encontró valores medios entre 5 y 15 mg/L de P en suelos con baja CIC, arenosos y franco arenosos.

Cuadro 3. Niveles críticos de P en cuatro órdenes de suelo y a nivel general con cinco soluciones extractoras.

Orden de suelo	Soluciones extractoras				
	Olsen modificado	Mehlich 3	Morgan modificado	Mehlich 1	Bray 1
	mg P/L				
Ultisol	6	3	4	1	2
Inceptisol	7	6	4	7	5
Vertisol	10	13	20	10	11
Andisol	18	16	8	15	20
General	10	10	5	8	6

Con las soluciones Mehlich 3 y Bray 1 se encontró un nivel crítico de 3 y 2 mg P/L, respectivamente. Estas soluciones de ácidos débiles diluidos han sido señaladas por varios autores (Chang y Jackson, 1957; Hanlon y Johnson, 1984) como muy confiables para predecir respuestas de fertilizantes en suelos ácidos y neutros, y menos efectivas en suelos básicos. Sin embargo, en Ultisoles de Costa Rica se obtuvo valores muy bajos. Se supone que el P es extraído en la solución Mehlich 3 al reaccionar con el ácido acético (ácido débil) y el fluoruro de amonio (Hanlon y Johnson, 1984); en Ultisoles el fluoruro puede acomplejar fuertemente al Al y liberar el P (Chang y Jackson, 1957). Los resultados de este estudio no se ajustan a los encontrados por Mehlich (1984), el cual propone un nivel crítico de P en Mehlich 3 de 30 mg/L. De igual manera Bray 1 es una solución ácida que posee H^+ y un pH que oscila entre 2 y 3, la cual disuelve P-Ca, P-Al y P-Fe en ese orden de magnitud (Thomas y Peaslee, 1973) y también posee fluoruro que acompleja fuertemente el Al y libera el P de P-Al.

Mehlich 1 fue la solución con el nivel crítico más bajo en los Ultisoles (1 mg P/L). Esto resulta lógico pues la extracción de P con esta metodología se basa en la solubilización de P-Ca por efecto de los iones H^+; por lo tanto, en suelos con poca cantidad de P-Ca, es esperable está baja extracción. Este valor de 1 mg P/L es inferior al reportado por Kamprath y Watson (1980) de 10 mg/L para suelos arcillosos y de 20 a 25 mg/L en suelos arenosos, y aún a los informados como bajos por Jones *et al.* (1974), que corresponden valores entre 6 y 16 mg/L.

Inceptisoles

En este orden, los niveles críticos determinados con las diferentes soluciones extractoras no variaron mucho y su ámbito fue de 4 a 7 mg P/L (Figura 3), a pesar de que los Inceptisoles son un grupo muy heterogéneo. Las soluciones Olsen Modificada y Mehlich 1 mostraron un nivel crítico de 7 mg/L, aunque su forma de extraer el P es muy diferente; Olsen Modificada es una solución básica muy efectiva extrayendo P-Al y un poco de P-Fe, por la presencia de iones OH^+ que hidrolizan al Al y Fe (Kamprath y Watson, 1980), mientras que Mehlich 1 es una solución de reacción ácida que disuelve P-Ca principalmente y en menor grado P-Al y P-Fe (Thomas y Peaslee, 1973).

Niveles críticos de 6 y 5 mg P/L fueron encontrados con las soluciones Mehlich 3 y Bray 1, respectivamente. Estas 2 soluciones extraen P de forma muy similar porque contienen ácidos débiles y NH_4F, lo que hace que el P sea liberado por el F de los P-Ca al precipitar el Ca, o de los P-Al al acomplejar al Al (Chang y Jackson, 1957), o por medio de los H^+ presentes en las soluciones ácidas (pH entre 2 y 3) que disuelven P-Ca, P-Al y P-Fe en ese orden de magnitud (Thomas y Peaslee, 1973).

El menor nivel crítico en este orden de suelos se obtuvo con la solución Morgan Modificada, con un valor de 4 mg/L, igual al obtenido en los suelos ácidos (Ultisoles). Esta solución actúa como un solvente suave (pH 4,8) para P-Al y P-Fe, y el acetato de sodio desplaza aniones y cationes a la solución (Wolf, 1982).

En un grupo tan heterogéneo como el de los Inceptisoles podría haberse esperado gran variación entre el comportamiento de las soluciones; a pesar de esto, fue el grupo de suelos que tuvo menor variabilidad en los niveles críticos encontrados con las diferentes soluciones extractoras. Esto probablemente podría explicarse por la presencia de cantidades parecidas de los iferentes tipos de fosfatos, por lo tanto, cualquiera

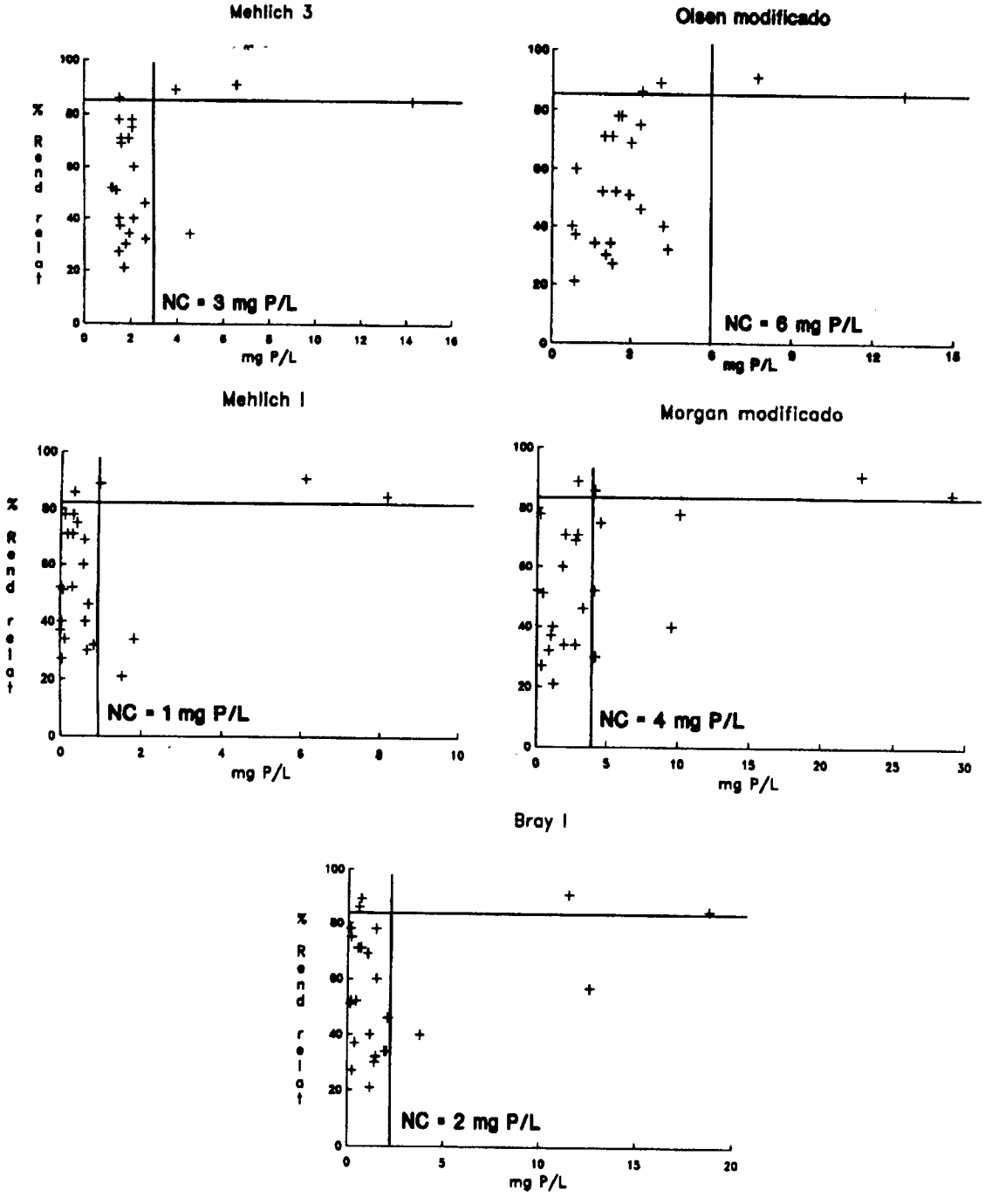

Fig. 2. Determinación de los niveles crítcos de P con diferentes soluciones extractoras en Ultisoles de Costa Rica por medio de la metodología de Cate y Nelson (1965).

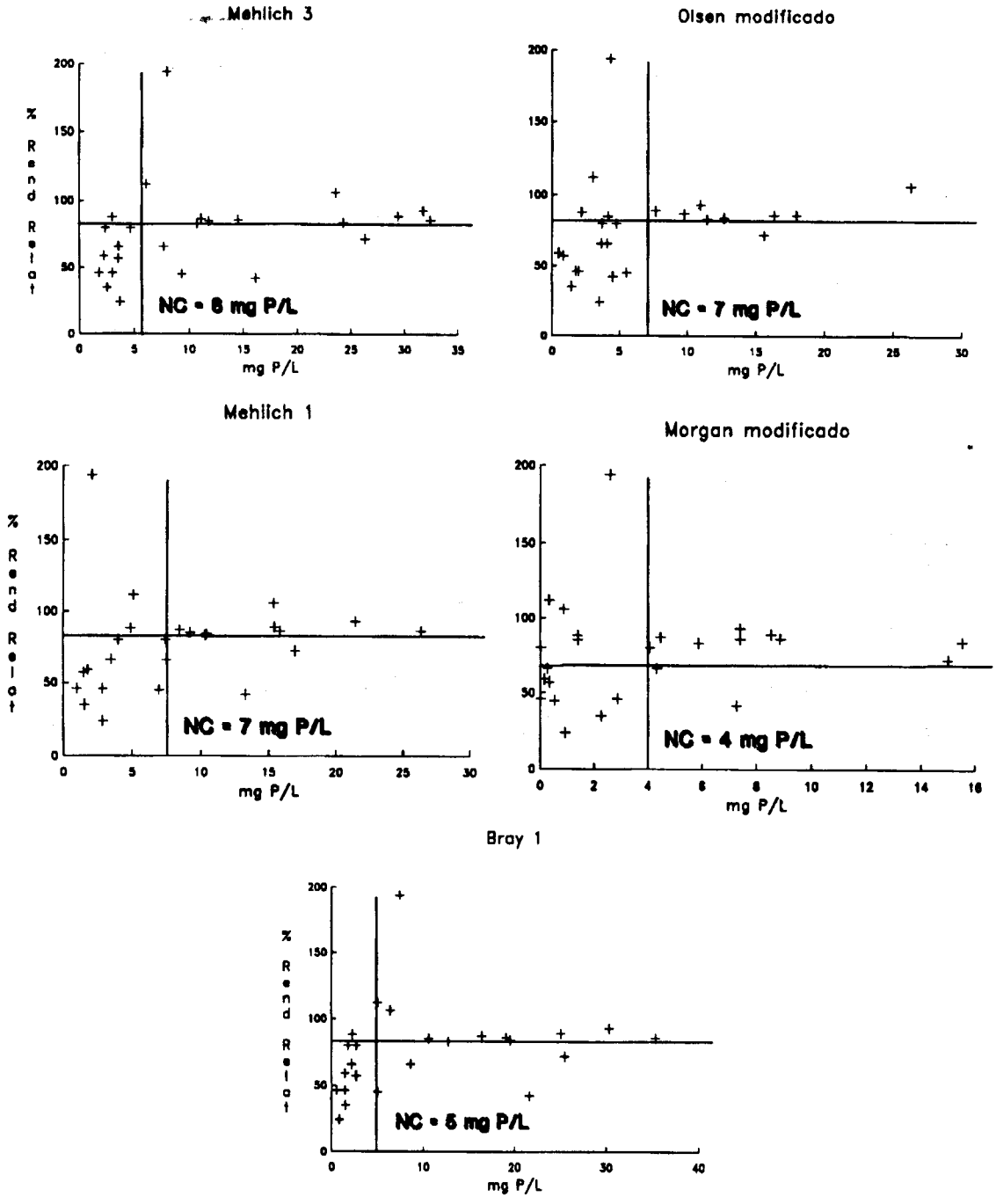

Fig. 3. Determinación de los niveles críticos de P con diferentes soluciones extractoras en Inceptisoles de Costa Rica por medio de la metodología de Cate y Nelson (1965).

que fuera el mecanismo de extracción tuvo posibilidades de actuar sobre cantidades semejantes de fosfatos.

Vertisoles

El nivel crítico de P en estos suelos extraído con los 5 métodos varió entre 11y 20 mg/L (Figura 4). Las soluciones Mehlich 1 y Olsen Modificada presentaron un nivel crítico de 10 mg/L, por lo que son igualmente efectivas para la determinación de P en suelos con pH y contenido de bases alto. En Vertisoles el HCO_3^- que posee la solución Olsen Modificada es muy efectivo pues reemplaza cerca de la mitad del P adsorbido en la superficie de las arcillas, precipita el Ca soluble como $CaCO_3$ y además el Na reduce la actividad del Ca (Dean y Rubins, 1947; Olsen *et al.*, 1954); mientras que la solución Mehlich 1 en Vertisoles disuelve los P-Ca por efecto del H^+ y el sulfato reduce la readsorción de P disuelto por la solución ácida (Mehlich, 1978); Kamprath y Watson, 1980).

Niveles críticos semejantes (11 y 13 mg/L) se determinaron con las soluciones Bray 1 y Mehlich 3, respectivamente. Ambas soluciones son similares en su forma de extraer, pues poseen iones H^+ para disolver P-Ca, P-Al y P-Fe en ese orden de magnitud (aunque los P-Fe se disuelven poco cuando el contacto suelo-solución es muy corto) porque el pH generalmente oscila entre 2 y 3 (Thomas y Peaslee, 1973; Mehlich, 1978); sin embargo, estos H^+ en suelos básicos son menos efectivos y neutralizados rápidamente por las bases, de manera que estas soluciones de ácidos diluidos resultan menos efectivas en suelos básicos (Chang y Jackson, 1957; Hanlon y Johnson, 1984). Estas dos soluciones poseen también F, por lo que en Vertisoles el Ca es precipitado por el fluoruro como CaF_3 y el P presente en el suelo como $CaHPO_4$ puede ser extraído (Thomas y Peaslee, 1973; Kamprath y Watson, 1980; Hanlon y Johnson, 1984).

Andisoles

Los niveles críticos de P obtenidos para los Andisoles variaron de 8 mg/L con la solución Morgan Modificada a 20 mg/L con Bray 1 (Figura 5). El valor alto de 20 mg/L se debió a que las soluciones ácidas como Bray 1 disuelven tanto los P-Ca, como los de P-Al y P-Fe, porque el pH generalmente oscila entre 2 y 3 (Thomas y Peaslee, 1973; Mehlich, 1978); también porque el ión fluoruro es muy efectivo acomplejando el Al y de esta forma es posible liberar el P de los P-Al (Chang y Jackson, 1957). En estos suelos volcánicos las arcillas que predominan son la alofana y la imogolita (Espinosa, 1992). La otra solución que posee F es Mehlich 3, pero en una concentración inferior (0,015N NH_4F) que Bray 1 (0,03N NH_4F), por lo que su nivel crítico fue de 16 mg P/L; esta solución además posee HNO_3 que extrae una porción de P-Ca (Mehlich, 1984). Michaelson y Ping (1986) encontraron que las soluciones Mehlich 3, Mehlich 2 y Bray 1, que contienen ácidos débiles y F, correlacionaron fuertemente con Al + Fe extraído con oxalato, y que la solución Mehlich 3 fue superior cuando compararon suelos derivados de "loess" y de cenizas volcánicas. Con la solución Olsen Modificada se obtuvo un valor intermedio entre las 2 soluciones anteriores de 18 mg/L. Fixen y Grove (1990) afirman que el bicarbonato (HCO_3) y el F remueven formas similares de P, aunque el F es más competitivo o agresivo. En este estudio fue un poco más agresivo el bicarbonato, en el orden de los Andisoles.

Nivel crítico general de P en 100 suelos de Costa Rica

Olsen Modificada. El nivel crítico encontrado con la solución Olsen Modificada cuando se analizaron los 100 suelos (Figura 6), coincide con el nivel crítico (10 mg P/L) utilizado con esta solución por el Ministerio de Agricultura y Ganadería, y se asemeja al nivel encontrado por el CATIE de 12 mg/L (Bertsch, 1987). Este nivel crítico fue calibrado por Cordero y Miner (1975), para el cultivo del maíz, mientras que para arroz se calibró en 4 mg/L. Olsen *et al.* (1954) encontró un nivel de 10 mg P/L extraído con Olsen Modificado, como adecuado en trigo, alfalfa y algodón.

Mehlich 3. Con esta solución se encontró un nivel crítico (Figura 6) igual al encontrado con la solución Olsen Modificada, aunque cuando se compararon los datos se observó una tendencia a extraer un poco más de P; resultados similares han sido reportados por Molina y Cabalceta (1990), Munter *et al.*, (1987) y Michaelson y Ping (1986). Esto se debe a que el HCO_3 y el F, aniones dominantes en Olsen Modificada y Mehlich 3, respectivamente, remueven formas similares de P, aunque este último tiene una mayor capacidad de extracción (Fixen y Grove, 1990). De acuerdo con Mehlich (1984), el nivel crítico de P con la solución Mehlich 3 para suelos de Carolina del Norte es de 30 mg/L.

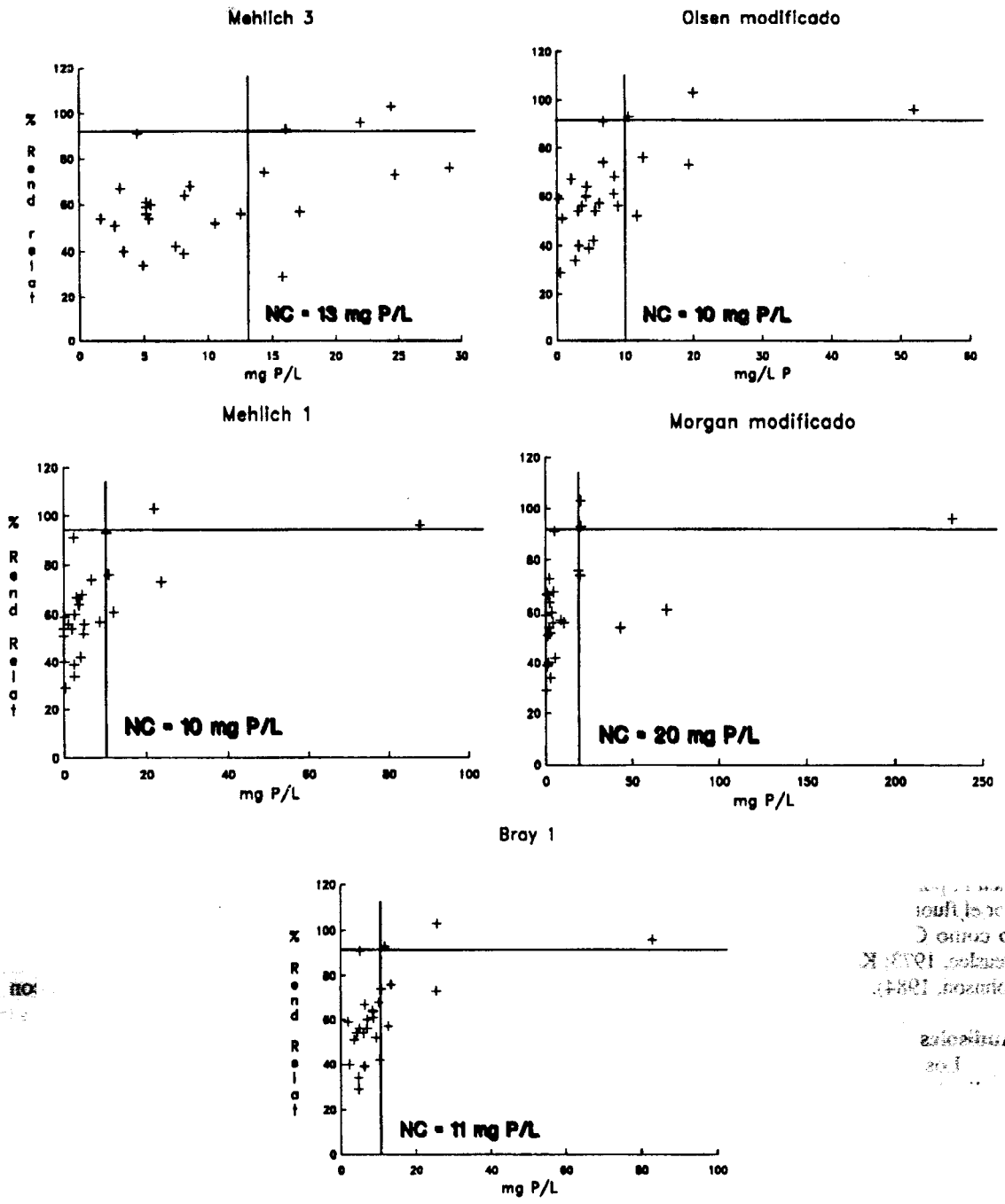

Fig. 4. Determinación de los niveles críticos de P con diferentes soluciones extractoras en Vertisoles de Costa Rica por medio de la metodología de Cate y Nelson (1965).

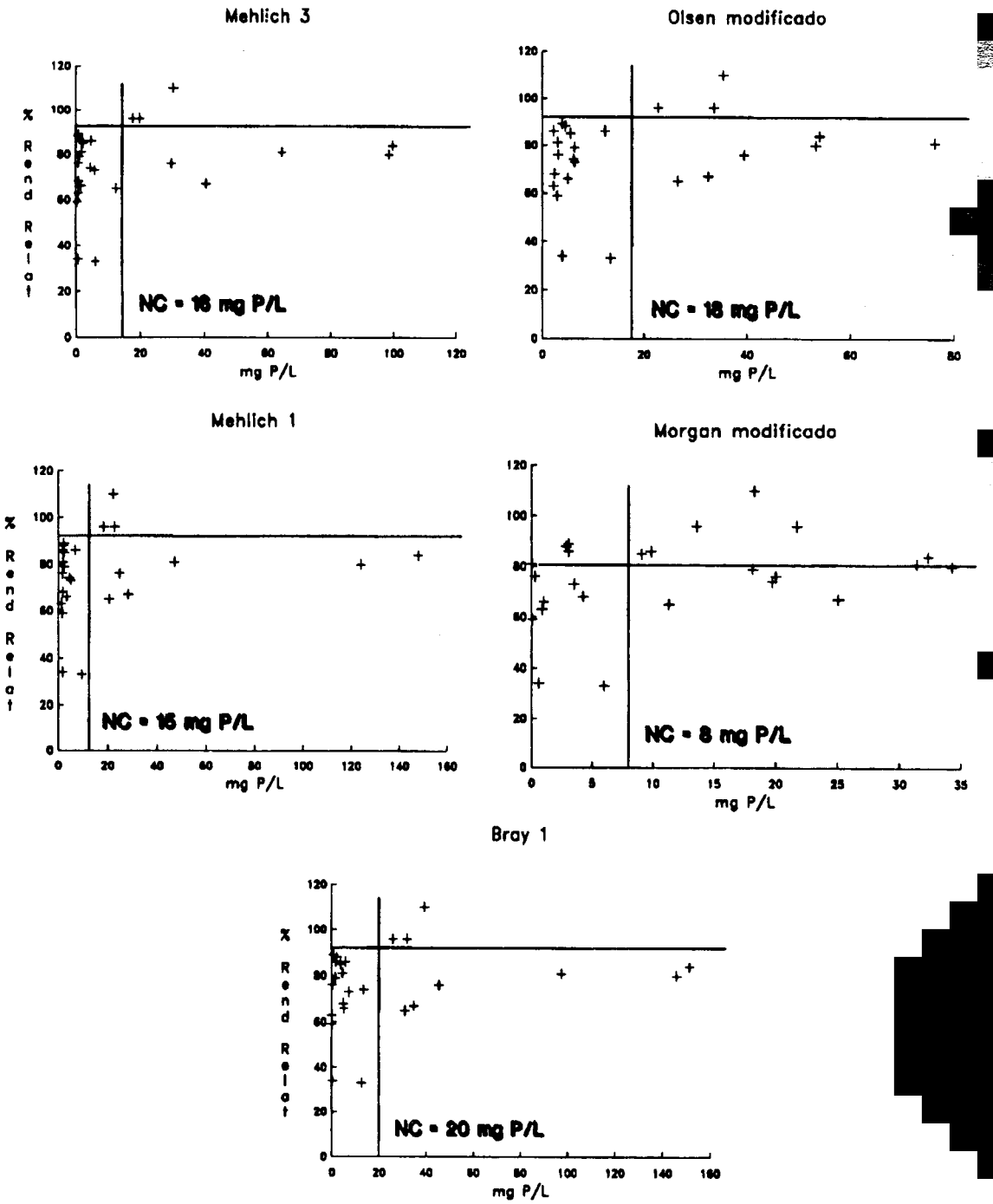

Fig. 5. Determinación de los niveles críticos de P con diferentes soluciones extractoras en Andisoles de Costa Rica por medio de la metodología de Cate y Nelson (1965).

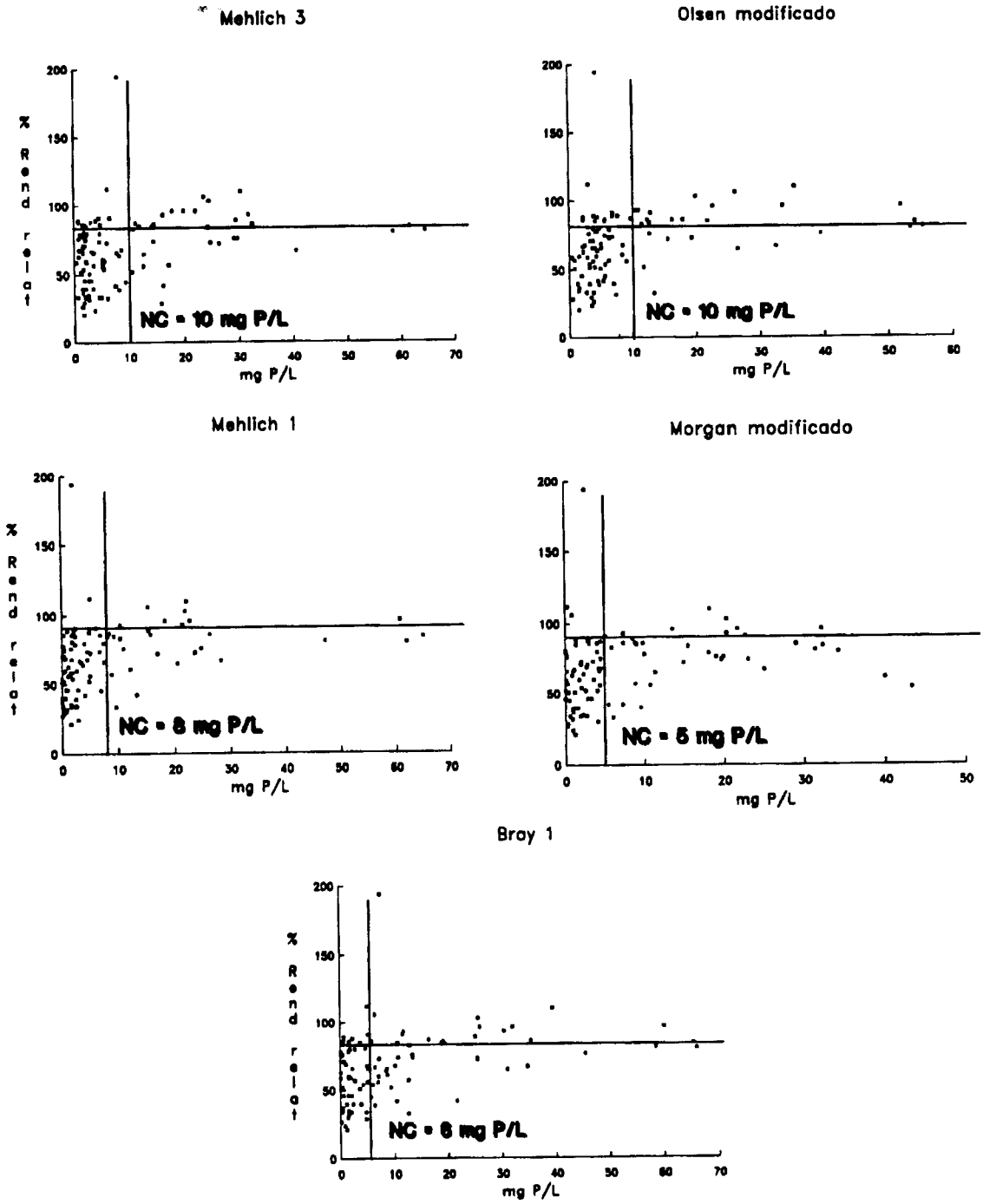

Fig. 6. Determinación de los niveles críticos de P con diferentes soluciones extractoras en 100 suelos de Costa Rica por medio de la metodología de Cate y Nelson (1965).

Mehlich 1 (Carolina del Norte). Al analizar todos los suelos en conjunto, esta solución presentó un nivel crítico (8 mg P/L) (Figura 6), un poco inferior al indicado generalmente para esta solución, debido a que Mehlich 1 no extrajo suficiente P de los Ultisoles (Cuadro 1), lo que bajó el nivel crítico general. El valor de 8 mg P/L difiere sustancialmente del nivel crítico de 40 mg P/L encontrado por Cordero y Miner (1975) bajo las mismas condiciones para suelos de Costa Rica y Nicaragua, pero con un porcentaje de Ultisoles inferior al 5%. Con esta solución extactora el nivel crítico parece depender de la textura del suelo: en suelo arcillosos es de alrededor de 10 mg/L, mientras que en suelos arenosos es de 20 a 25 mg/L; lo cual es debido a la alta capacidad buffer del P en suelos arcillosos y al agotamiento de la solución ácida por la alta CIC, o también por readsorción de P (Kamprath y Watson, 1980). Para suelos planos de la costa este de los Estados Unidos han propuesto los siguientes niveles de P extraído con Mehlich 1: un nivel bajo de 6 a 16 mg/L, uno medio de 16 a 34 mg/L y uno alto de más de 35 mg/L (Jones *et al.*, 1974). Se ha reportado que el método no se adapta bien a suelos alcalinos (TCSTPA, 1980). Nótese que estos trabajos no dividieron los suelos por órdenes, solamente por textura o por alguna región en especial.

Bray 1. Con esta solución se obtuvo un nivel crítico de 6 mg P/L (Figura 6), valor también inferior al reportado en otros países como México para trigo y maíz (25 mg/L), Medio Oeste de los Estados Unidos en frijol y maíz (30 mg/L) y en la India para el cultivo del trigo (11 mg/L) (Kamprath y Watson, 1980). Este valor bajo estuvo influenciado por los niveles críticos bajos encontrados con esta solución en Ultisoles e Inceptisoles (2 y 5 mg/L, respectivamente).

Morgan Modificada. El nivel crítico más bajo se obtuvo con esta solución (5 mg P/L) (Figura 6), cuando se compararon todos los suelos, debido probablemente a que el ácido acético y el pH de 4,8 de esta solución no disolvieron mucho los P-Al y P-Fe, aunque el acetato de sodio sí fue efectivo desplazando aniones a la solución como se observó en los Vertisoles, donde se obtuvo un nivel crítico de 20 mg/L. Wolf (1982) encontró valores medios entre 5 y 15 mg P/L en suelos con baja CIC, arenosos y franco arenosos, y de 10 a 24 mg P/L en suelos con alta CIC, francos, francos arcillosos y suelos orgánicos.

CONCLUSIONES

Se encontró una gran variación en los niveles críticos de P de cuatro órdenes de suelos y también existió diferencias cuando se utilizó en un orden de suelo, soluciones extractoras con distintas propiedades.

Se observaron bajos niveles críticos P en los Ultisoles e Inceptisoles (1 a 7 mg/L), siendo los Ultisoles los que mostraron los menores niveles críticos (1 mg/L con la solución Mehlich 1, 3 mg/L con Mehlich 3 y 2 mg/L con Bray 1) y niveles críticos más altos en los Vertisoles y Andisoles (20 mg/L con las soluciones Morgan Modificada y Bray 1, respectivamente).

Los resultados obtenidos muestran que la solución Mehlich 3, extrae niveles críticos muy semejantes a las soluciones Olsen Modificada, Bray 1 y Mehlich 1, en los Inceptisoles, Vertisoles y Andisoles. En los Ultisoles, Mehlich 3 produjo niveles críticos similares a Mehlich 1 y Bray 1.

La solución Morgan Modificada se comportó diferente a las demás soluciones, no siendo un extractante bueno para los diferentes suelos de Costa Rica.

La solución Olsen Modificada cuando se evaluó con el total de la población presentó el mismo valor de P (10 mg/L) recomendado por el Laboratorio de Suelos del Ministerio de Agricultura y Ganadería, para interpretar cualquier análisis de suelos de Costa Rica, sin importar el orden. Igual valor presentó la Mehlich 3.

Los resultados indican que la Mehlich 3 puede ser una alternativa muy buena para los análisis de P en suelos de Costa Rica, por la buena correlación que presenta con los demás métodos, por el fácil manejo en la extracción y análisis de las muestras y por ser el procedimiento más económico ya que se puede utilizar en diferentes tipos de suelos y permite extraer simultáneamente todos los nutrimentos. La única desventaja que se observó es el bajo valor del nivel crítico encontrado en los Ultisoles (3 mg/L), sin embargo, con una buena calibración a nivel de campo, esta solución se perfila muy prometedora.

RESUMEN

Se estudió, utilizando la metodología de Cate y Nelson, el nivel crítico de P en 4 órdenes de suelos de importancia agrícola en Costa Rica: 25 Ultisoles, 25 Inceptisoles, 25 Vertisoles y 25

Andisoles, con 5 soluciones extractoras: Olsen Modificada, Mehlich 3, Mehlich 1, Morgan Modificada y Bray 1. Se encontraron niveles críticos diferentes en cada orden de suelo, según la solución extractora utilizada. Los niveles críticos de P encontrados en los Ultisoles fueron de 6 mg/L con la solución Olsen Modificada, 4 mg/L con Morgan Modificada, 3 mg/L con Mehlich 3, 2 mg/L con Bray 1, y de 1 mg/L con Mehlich 1. En los Inceptisoles se obtuvieron niveles críticos de 7 mg/L con Olsen Modificada y Mehlich 1, 6 mg/L con Mehlich 3, 5 mg/L con Bray 1 y 4 mg/L con Morgan Modificada. Con respecto a los Vertisoles, los niveles críticos fueron de 20 mg/L con Morgan Modificada, 13 mg/L con Mehlich 3, 11 mg/L Bray 1, 10 mg/L con Olsen Modificada y Mehlich 1. En los Andisoles se encontraron 20 mg/L con Bray 1, 18 mg/L con Olsen Modificada, 16 mg/L con Mehlich 3, 15 con Mehlich 1 y 8 mg/L con Morgan Modificada. Cuando se analizó los 100 suelos en conjunto se obtuvo niveles críticos de 10 mg/L en Olsen Modificada y Mehlich 3, 8 mg/L con Mehlich 1, 6 mg/L con Bray 1 y 5 mg/L con Morgan Modificada.

LITERATURA CITADA

BERTSCH, F. 1987. Manual para interpretar la fertilidad de los suelos de Costa Rica. San José, C.R. Oficina de Publicaciones de la Universidad de Costa Rica. 81 p.

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 Proyect (Tech. Bull. No. 1).

CORDERO, A; MINER, G. 1975. A calibration program for corn and rice fertilization and soil test data in Costa Rica. *In* Soil Management in Tropical America. Ed. by E. Bornemisza y A. Alvarado. Raleigh, North Carolina State University. p. 518-531.

CORDERO, A. 1991. Información generada durante los últimos 10 años en la fertilización del arroz y maíz de Costa Rica. San José, Programa Regional de Reforzamiento a la Investigación Agronómica sobre los granos básicos en Centroamérica-CORECA-CEE-IICA. sp.

COREY, R.B. 1987. Soil test procedure: correlation. *In* Soil testing: sampling, correlation, calibration, and interpretation. Ed. by J.R. Brown. Madison, Wisconsin, ASA. p. 15-29.

CHAN, S.C.; JACKSON, M.L. 1957. Fractionation of soil phosphorus. Soil Sci. 84:133-144.

DAHNKE, W.C.; OLSON, R.A. 1990. Soil test correlation, calibration, and recommendation. *In* Soil testing and plant analysis. Third edition. Ed. by R.L. Westerman. Madison, WI. p. 45-71.

DEAN, L.A.; RUBINS, E.J. 1947. Anion exchange in soils: I. Exchangeable phosphorus and the anion-exchange capacity. Soil Sci. 63:377-387.

DIAZ-ROMEU, R; HUNTER, A. 1978. Metodología de muestreo de suelo, análisis químico de suelos y tejido vegetal y de investigación en invernadero. Turrialba, Costa Rica, Catie. 61 p.

ESPINOSA, J. 1992. Phosphorus diagnosis and recommendations in volcanic ash soils. *In* TropSoils Bulletin No. 92-01. Proceedings of the TropSoils Phosphorus Decision Support System Workshop, College Station, TX, March 11-12. Department of Agronomy and Soil Science, College of Tropical Agriculture and Human Resources, University of Hawaii, Honolulu, HI. p. 109-115.

FITTS, J.W.; NELSON, W.L. 1956. The determination of lime and fertilizer requirements of soils through chemical tests. Advan. Agron. 8:241-282.

FIXEN, P.E.; GROVE, J.H. 1990. Testing soils for phosphorus. *In* Soil testing and plant analysis. 3ed. Ed. by R.L. Westerman. SSSA Book Series 3. pp. 141-180.

HANLON, E.A.; JOHNSON, G.V. 1984. Bray/Kurtz, Mehlich III, AB/D and ammonium acetate extractions of P, K and Mg in four Oklahoma soils. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 15:277-294.

HUNTER, A. 1975. New techniques and equipment for routine plant analytical procedure. *In* Soil Management in Tropical America. Ed. por E. Bornemisza y A. Alvarado, North Carolina State University, Raleigh. p. 467-483.

JONES, J.B.; COPE, J.T.; LANCASTER, J.D. 1974. Soil testig methods used by the 13 southeastern states. Southern Cooperative Series Bulletin 190.

JONES, J.R.; WOLF, B. 1984. Manual of soil testing procedure using Modified (Wolf) Morgan extracting-reagent . Athens, Georgia, Benton Laboratories. 61 p.

KAMPRATH, E.J.; WATSON, M.E. 1980. Conventional soil and tissue tests for assessing the phosphorus status of soils. *In* The role of phosphorus in agriculture. Ed. by F.E. Khasawneh *et al.* Madison, Wisconsin, ASA. p. 471-514.

MAIDA, J.H.A. 1978. Phosphate availability indices related to phosphate fractions in selected Malawi soils. J. Sci. Food Agric. 29:423-428.

MEHLICH, A. 1978. Influence of fluoride , sulfate acidity on extractable phosphorus, calcium, magnesium and potassium. Commun. Soil Sci. Plant anal. 9:455-476.

MEHLICH, A. 1984. Mehlich 3 soil extractant: a modification of Mehlich 2 extractant. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 15(12):1409-1416.

MICHAELSON, G.L.; PING, C.L. 1986. Extraction of phosphorus from the major agricultural soils of Alaska. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 17(3):275-297.

MOLINA, E.; CABALCETA, G. 1990. Correlación de diferentes soluciones extractoras de Vertisoles y Ultisoles de Costa Rica. Agronomía Costarricense 14(1):37-44.

MUNTER, R.; ELIASON, R.; FLAUS, M. 1987. A comparison of Mehlich III soil extractant with conventional extractant on typical Minnesota soil. *In* Committee on soil testing and plant analysis and the Subcommittee on soil extractants. (13., 1987, Saint Louis, Missouri). University of Minnesota, St. Paul, Minnesota, NCR.

OLSEN, S.R.; COLE, C.V.; WATANABE, F.S.; DEAN, L.A. 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extractions with sodium bicarbonate. USDA circular No. 939.

SNEDECOR, G. W.; COCHRAN, W.G. 1971. Statistical methods. 6th Ed. The Iowa State University Press, Ames.

SOTO, J.A. 1988. Requerimentos nutricionales de la cebolla (*Allium cepa*) en los suelos de la región norte de Cartago. II. Niveles críticos de P, K, S y respuesta a N. Agronomía Costarricense 12(1):53-57.

THE COUNCIL ON SOIL TESTING AND PLANT ANALYSIS (TCSTPA). 1980. Reference methods for soil testing. Athens, University of Georgia. 125 p. (Handbook).

THOMAS, G.W.; PEASLEE, D.E. 1973. Testing soils for phosphorus. *In* Soil testing and plant analysis. L.M. Walsh and J.D. Beaton (ed.). Revised ed. SSSA, Madison, WI. p. 115-132.

TYNER, E.H.; DAVIDE, J.G. 1962. Some criteria for evaluating phosphorus tests for lowland rice soils. *In* Trans. Comm. IV and V Int. Soc. of Soil Sci. Ed. by G.L. Neale. Palmerston North, New Zealand. Soil Bureau, P.B., Lower Hutt, New Zealand. p. 625-634.

WOLF, B. 1982. An improved universal extracting solution and its use for diagnosing soil fertility. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 3(12):1005-1033.