

SUELOS CONTAMINADOS CON Cu EN EL PACIFICO SUR DE COSTA RICA. I. FRACCIONES DE Cu Y EFECTO DEL FOSFATO SOBRE ELLAS¹/*

Jenny Pérez**
Elemer Bornemisza**

ABSTRACT

Copper contaminated soils on the South Pacific region of Costa Rica. I. Cu fractions and phosphate effects. Different Cu fractions were determined in 3 copper contaminated soils from the South Pacific region of Costa Rica. These soils were then treated with 0, 1, 2 or 3 t/ha of rock phosphate and with 1 t/ha of triple superphosphate. The effects of these treatments on the Cu fractions were observed. The fractions studied were exchangeable Cu (Cu-CA), adsorbed Cu (Cu-AAc), organic Cu (Cu-PYR), Cu associated with Fe and Al oxides Cu-OX) residual Cu (Cu-RES) and total Cu (Cu-T). Cu-T was high in the three soils (662-778 mg/Kg). The most soluble forms represented the lowest percentages, Cu-CA 0.6-2%, and Cu-AAc 7-11%. Organic Cu (133 to 187 mg/kg and oxide associated Cu (128 to 136 mg/kg acted similarly. Cu-PYR contributed more to plant available Cu than Cu-OX. Residual Cu was about half the total Cu. It was observed that this fraction possibly contributes to available Cu in spite of its low solubility. It is estimated that Olsen bicarbonate solution extracts principally Cu-CA, Cu-AAc and Cu-PYR; 0.1 N HCl also extracts these fractions and in addition some oxide associated Cu. The phosphate rock reduced appreciably the solubility of Cu, probably due to the formation of insoluble Cu phosphates. The best treatment was 3 t/ha of phosphate rock, and reduced Cu-CA in 60-75% and Cu-AAc in 14-19%.

INTRODUCCION

El empleo masivo de caldo bordelés durante varias décadas en explotaciones intensivas de banano en el Pacífico Sur de Costa Rica, originó la acumulación de residuos cúpricos en la capa arable

que afectan seriamente la productividad de estos suelos (Cordero y Ramírez, 1979).

A pesar de la trascendencia del problema, es escasa la investigación realizada.

El estudio de las diferentes formas bajo las cuales se encuentra el Cu en el suelo, puede brindar información sobre la disponibilidad biológica y físico-química, movilidad y transporte, así como sobre la proporción a la cual se presenta el micronutrimiento en el suelo (Tessier *et al.*, 1979).

Las fracciones del Cu usualmente distinguidas incluyen: a) Cu en solución e intercambiable; b) Cu específicamente adsorbido por sitios inorgánicos; c) Cu acomplejado por la materia orgánica; d) Cu ocluido por óxidos de Fe, Al y Mn y e) Cu retenido en la estructura cristalina de los minerales

1/ Recibido para su publicación el 28 de agosto de 1986.

* Parte de la tesis para optar al título de Ingeniero Agrónomo de la primera autora.

** Centro de Investigaciones Agronómicas, Facultad de Agronomía, Universidad de Costa Rica. Se reconoce la ayuda financiera recibida del CONICIT.

primarios y secundarios (McLaren y Crawford, 1973).

Las consideraciones anteriores, unidas a los ensayos preliminares de Mannix y Rodríguez (1967) y de Soto y Bornemisza (1982), con el objeto de atenuar los efectos nocivos producidos por las altas concentraciones de este elemento menor mediante la aplicación de P, condujeron a la realización del presente trabajo, donde se pretendió estudiar las diferentes categorías del Cu en el suelo y evaluar los cambios que sobre éstas ocasiona la aplicación de roca fosfórica.

MATERIALES Y METODOS

Toma y preparación de las muestras de suelo

El muestreo de los suelos se realizó en la zona de Palmar Sur, en terrenos sembrados con arroz y en el pasado cultivados con banano.

Las muestras se tomaron a una profundidad de 20 cm, se secaron al aire, trituraron y tamizaron.

Caracterización de suelos

Se efectuó la medición del pH en H_2O y KCl IN, con una relación suelo-solución 1:2,5 y la extracción de la acidez intercambiable se realizó con KCl IN en una relación 1:10 y se tituló con NaOH 0,0243N usando fenoftaleína como indicador.

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) se determinó por el método descrito por Jackson (1958). Los cationes de intercambio se extrajeron con $NH_4 OAc$ 1N pH 7 (Chapman, 1965) y los elementos menores por medio de la solución Olsen modificada; luego se estimó el contenido de cada elemento por absorción atómica. El P se determinó colorimétricamente después de la extracción con solución Olsen modificada.

El porcentaje de materia orgánica se estimó según el método de Walkley y Black, modificado por Saíz del Río y Bornemisza (1962) y los óxidos libres de Fe se obtuvieron mediante adaptación de la metodología propuesta por Homgren (Olson y Roscoe, 1982); para la extracción de los óxidos libres de Al se usó la técnica de Hashimoto y Jackson adaptada por Bornemisza e Igue (1967).

Para interpretar los análisis de suelo se usó la guía de niveles críticos elaborada por el Centro Agronómico Tropical de Investigación y

Enseñanza y el formulario técnico de suelos tropicales (Sáenz, 1975).

Incubación de los suelos con roca fosfórica (RF) o triple superfosfato (TSP)

Los suelos fueron tratados con roca fosfórica Carolina del Norte (la cual posee 6,2% de CO_3 3,5% de fluoruro y 29,5% de P_2O_5 total, del que un 6,8% es soluble en citrato de amonio neutral) en dosis equivalentes a 0, 1, 2 y 3 t/ha y con un nivel de triple superfosfato (46% P_2O_5) correspondiente a 1 t/ha.

Suelo y fertilizante se revolvieron hasta lograr una mezcla homogénea que se llevó a capacidad de campo y se colocó en sacos plásticos que poseían una adecuada aireación; en estas condiciones se incubaron por 30 días. Luego se secaron al aire, se molieron y de cada tratamiento se tomó una submuestra para la realización del fraccionamiento del Cu.

Fraccionamiento del Cu del suelo

Se siguió la metodología sugerida por McLaren y Crawford (1973), la cual se esboza a continuación:

- Cu en la solución del suelo e intercambiable (Cu-CA): 4 g de suelo y 40 ml de $CaCl_2$ 0,05 M fueron agitados por 24 h en tubos de centrifuga de 50 ml. El Cu se determinó por absorción atómica después de centrifugar la solución por 10 min a 1200 rpm.
- Cu específicamente adsorbido por sitios inorgánicos (Cu-AAc). Al residuo de la extracción anterior se le adicionó 40 ml de HOAc al 2,5%, se agitó por 24 h y se centrifugó (10 min a 1200 rpm) antes de proceder a la lectura de la absorción atómica correspondiente.
- Cu asociado a la materia orgánica (Cu-PYR): 0,4 g de suelo y 40 ml de $K_4P_2O_7$ 0,1 M fueron agitados por 24 h. El Cu se determinó en la solución centrifugada (15 min a 1200 rpm) y se expresó como el resultado de la resta del Cu-CA y del Cu-AAc del total extraído como Cu-PYR.
- Cu ocluido en óxidos e hidróxidos de Fe, Al y Mn (Cu-OX): el residuo del Cu-PYR

se lavó con H₂O deionizada, agitó, centrifugó y descartó el supernatante. El residuo se transfirió a cápsulas de porcelana, evaporando a sequedad en baño maría. Se agregó 20 ml de una solución a base de ácido oxálico 0,1 M y de oxalato de amonio 0,175 M, se colocó en baño maría a 100 C y se expuso a luz ultravioleta por 2,5 h. La suspensión se centrifugó y el supernatante se decantó obteniéndose un primer extracto. Al residuo se le adicionó 10 ml de solución, se agitó, centrifugó y combinó con el extracto anterior. El contenido de Cu se determinó en la solución resultante.

- Cu residual (Cu-RES): el residuo de suelo del Cu-OX se evaporó a sequedad y se incineró a 660 C. Se tomó una submuestra de 0,2 g y se dirigió con una mezcla de HF-HClO₄ concentrado, según el método de Pratt (1965).
- Cu total (Cu-T): 0,2 g de suelo se digirieron según la metodología sugerida por Pratt (1965).

El contenido de Cu en las 6 fracciones se estimó por espectrofotometría de absorción atómica.

Análisis estadístico

Se realizaron análisis de varianza para las variables suelo, dosis de P, fracciones de Cu y sus interacciones; cuando la fuente de variación fue significativa se aplicó la prueba de Duncan para la comparación de las medias. Además, se efectuaron correlaciones simples entre las diversas fracciones estimadas.

RESULTADOS Y DISCUSION

Caracterización de los suelos

Los resultados del análisis de los suelos se presentan en el Cuadro 1. Los valores de pH en H₂O, que oscilaron entre 5,5 y 5,7, catalogan a estos suelos como ligeramente ácidos. La acidez intercambiable es alta para los suelos 1 y 2; la materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) son intermedias en los 3 suelos.

Los valores de los cationes cambiables y sus relaciones ponen de manifiesto una cantidad

adecuada de Ca, un ligero desbalance de K y una incipiente deficiencia de Mg. Se determinó un adecuado contenido de P. En cuanto a elementos menores se notó una cantidad óptima de Zn, deficiencia de Mn y una concentración alta de Fe.

Fraccionamiento del Cu

La concentración de Cu en las 6 fracciones y los contenidos expresados como porcentaje del Cu total se presentan en el Cuadro 2 y en la Figura 1, respectivamente.

Los contenidos de Cu-T en los 3 suelos variaron de 662 a 778 mg/kg, lo que refleja la presencia de niveles tóxicos y la consiguiente saturación de los sitios de adsorción. Esto podría explicar la alta concentración de Cu-AAc (48 a 78 mg/kg especialmente en el suelo 1, que posee el mayor contenido de Cu-T.

El Cu-RES comprendió una proporción sustancial del Cu-T (cerca del 50%) lo que podría indicar que las elevadas cantidades de Cu adicionadas artificialmente, condujeron a que el catión ocupara aún sitios de débil adsorción.

Gran parte del Cu se presentó en las fracciones Cu-PYR (19 a 26%) y Cu-OX (19%), resultado que contrasta al compararlo con los bajos porcentajes del Cu-CA (0,6 a 2%) y del Cu-AAc (7 a 11%). En lo que a disponibilidad hacia la planta se refiere, las dos últimas categorías cumplen un papel preponderante, no obstante la determinación precisa del Cu-PYR y el Cu-OX resulta fundamental al ser parte del Cu de disponibilidad potencial.

Las cantidades de Cu extraídas con solución Olsen modificada y HCl 0,1 N se consignan en el Cuadro 2. Al compararlas con las obtenidas en cada fracción, puede inferirse que el Olsen posiblemente extrajo las formas más solubles (Cu-CA y Cu-AAc), y parte del microelemento alojado en la materia orgánica. Es probable que el HCl extrajo éstos mismos y una porción del Cu-OX ya que el nivel es superior a las tres fracciones iniciales y se encuentra entre este valor, y la suma de éste y del Cu-OX. Por tanto ambas soluciones podrían sobreestimar el nivel de disponibilidad, al extraer Cu presente en otras fracciones de menor accesibilidad a las plantas.

Los coeficientes de correlación intraclase (RiE) se suman en el Cuadro 3. La relación altamente significativa encontrada entre el Cu-CA y Cu-AAc (RiE = 0,91) indica que ambas categorías son en cierto modo interdependientes.

Cuadro 1. Características físicas y químicas de los suelos utilizados en la investigación, Pacífico Sur.

	Suelo 1	Suelo 2	Suelo 3
pH (H ₂ O)	5,5	5,5	5,7
pH (HCl)	4,3	4,3	4,5
Acidez intercambiable (cmol (+)/kg)	1,2	0,8	0,4
Fe ₂ O ₃ (%)	1,9	2,1	2,1
Al ₂ O ₃ (%)	0,11	0,14	0,11
CIC (cmol (+)/kg)	24,6	26,7	29,2
M.O. (%)	2,5	2,7	3,2
P (mg/kg)	16,0	15,5	13,0
Ca (cmol (+)/kg)	12,7	15,8	18,6
K (cmol (+)/kg)	1,4	1,4	1,4
Mg (cmol (+)/kg)	1,5	2,8	3,3
Ca + Mg/K	10,1	13,2	15,5
Mg/K	1,0	2,0	2,4
Ca/Mg	8,6	5,6	5,6
Ca/K	9,0	11,2	13,2
100 K/Ca + Mg + K	9,0	7,0	6,0
Zn (mg/kg)	7,9	9,6	7,2
Fe (mg/kg)	260,8	270,8	342,0
Mn (mg/kg)	2,5	2,3	1,9
Arena (%)	18,0	23,0	8,0
Limo (%)	65,0	24,0	51,0
Arcilla (%)	27,0	53,0	41,0
Nombre textural	franco limoso	arcilloso	arcillo limoso

Cuadro 2. Contenidos de Cu mg/kg presentes en las diferentes fracciones y cantidades extraídas con 2 soluciones extractoras de tres suelos del Pacífico Sur.

Suelo	Fracciones								
	Cu-CA	Cu-AAc	Cu-PYR	Σ *	Cu-OX	Cu-RES	Cu-T	HCl	Olsen
1	15	78	187	280	136	306	718	349	239
2	6	48	133	187	131	375	690	228	139
3	4	50	144	198	128	331	662	275	161

* Σ = Σ (Cu-CA + Cu-AAc + Cu-PYR)

La alta relación existente entre las dos formas más disponibles de Cu, a saber, Cu-CA y Cu-AAc, con las fracciones Cu-PYR y Cu-OX, señala la posibilidad de que éstas últimas determinen la magnitud de las dos primeras categorías, por medio de transformaciones como la mineralización de la materia orgánica y las convierte además, en fuentes potenciales de Cu en los tres

suelos evaluados.

La relación encontrada entre el Cu-RES con el Cu en solución (Cu-CA) y el presente en los sitios inorgánicos (Cu-AAc) refleja la situación antes señalada de que el Cu adicionado se alojó aún en sitios de débil adsorción, lo cual facilitó su solubilización y equilibrio parcial con la solución del suelo.

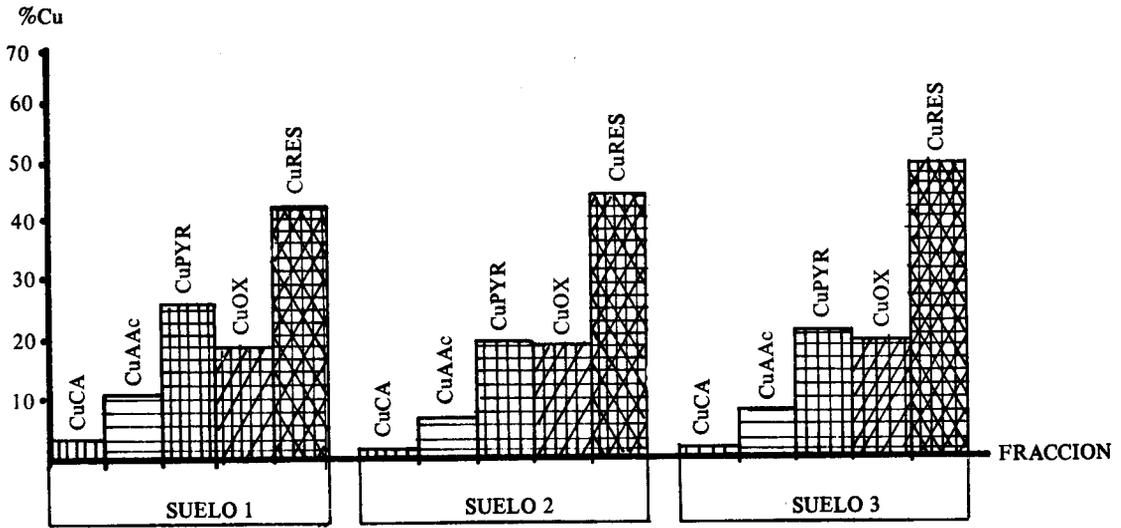


Fig. 1. Distribución del Cu en diferentes fracciones de 3 suelos de la zona sur.

Cuadro 3. Coeficiente de correlación intracase (RiE)

	Cu-AAc	Cu-PYR	Cu-OX	Cu-RES	Cu-T
Cu-CA	0,91**	0,97**	0,99**	0,99**	0,99**
Cu-AAc		0,92**	0,96**	0,99**	0,99**
Cu-PYR			0,28ns	0,96**	0,99**
Cu-OX				0,98**	0,99**
Cu-RES					0,99**

** Significativo al 0,01

ns=no significativo

La elevada correlación encontrada entre el Cu-T con el resto de las fracciones, incluso con las dos formas minoritarias (Cu-CA y Cu-AAc), podría atribuirse a una cierta solubilidad aunque reducida del Cu-T en estos suelos, que se debe a que esta fracción se originó en parte considerable del Cu aplicado como fungicida.

Efecto de la roca fosfórica (RF) y del triple superfosfato (TSP) sobre el Cu en las diversas fracciones

Los aumentos en la cantidad de P adicionado ocasionaron una disminución general en las fracciones Cu-CA, Cu-AAc, Cu-RES y Cu-T; el Cu-PYR y el Cu-OX prácticamente no se alteraron (Cuadro 4).

El análisis de varianza mostró que, con excepción del Cu-OX, hubo diferencias significativas para los factores suelo y dosis de fósforo, al igual que para la interacción entre ambos.

Al evaluar en forma independiente el comportamiento de las 4 dosis de P se encontraron diferencias significativas sólo para el Cu-CA y el Cu-T. La prueba de Duncan (Cuadro 5) reveló que en ambas fracciones los tratamientos de 2 y 3 t RF/ha fueron superiores a los demás, en el tanto en que disminuyeron los niveles de Cu. Las dosis de 1 t RF/ha y 1 t TSP/ha fueron equivalentes entre sí (Figuras 2 y 3) en cuanto a la disminución de Cu que ocasionaron.

Cuadro 4. Efecto del P proveniente de roca fosfórica o triple superfosfato sobre el contenido de Cu (mg/kg) en diversas fracciones del suelo (promedio de 5 repeticiones).

Fracción	Suelo 1					Suelo 2					Suelo 3				
	Tratamiento t/ha					Tratamiento t/ha					Tratamiento t/ha				
	0	1 TSP*	1 RF**	2 RF	3 RF	0	1 TSP	1 RF	2 RF	3 RF	0	1 TSP	1 RF	2 RF	3 RF
Cu-CA	15	17	14	11	6	6	4,5	3	2,5	1,5	4	3	3	2	1
Cu-AAc	78	75	73	71	67	48	44	46	42	34	50	46	46	45	40
Cu-PYR	187	182	190	192	189	133	132	129	134	132	144	145	146	147	151
Cu-OX	136	136	136	134	137	131	135	133	133	125	128	130	131	125	128
Cu-RES	306	267	267	257	257	375	379	366	346	356	331	311	318	290	290
Cu-T	718	697	690	682	683	690	685	662	655	665	662	655	642	628	621

* TSP: Triple Superfosfato (46%P₂O₅).

**RF: Roca Fosfórica (29,5%de P₂O₅ total, 6,8% soluble en citrato de amonio).

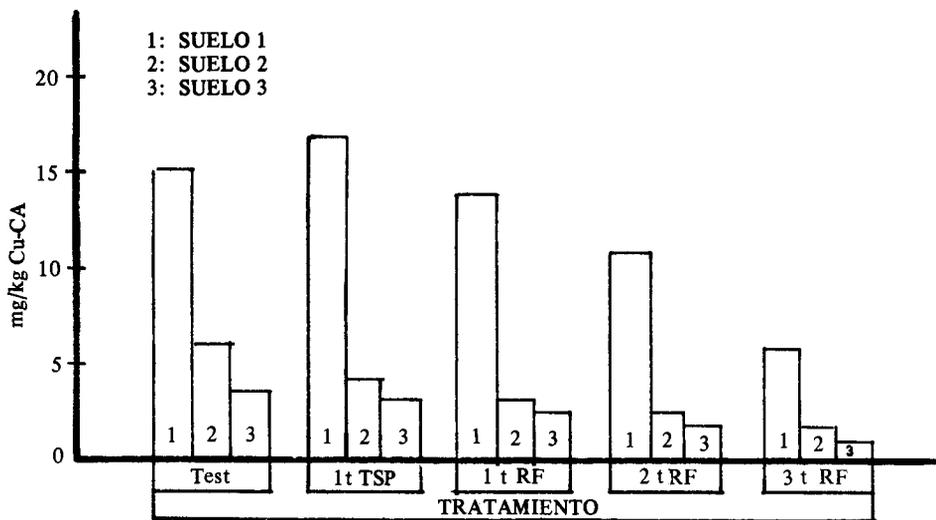


Fig. 2. Efecto de la roca fosfórica y del triple superfosfato sobre el contenido de Cu en la fracción Cu-Ca.

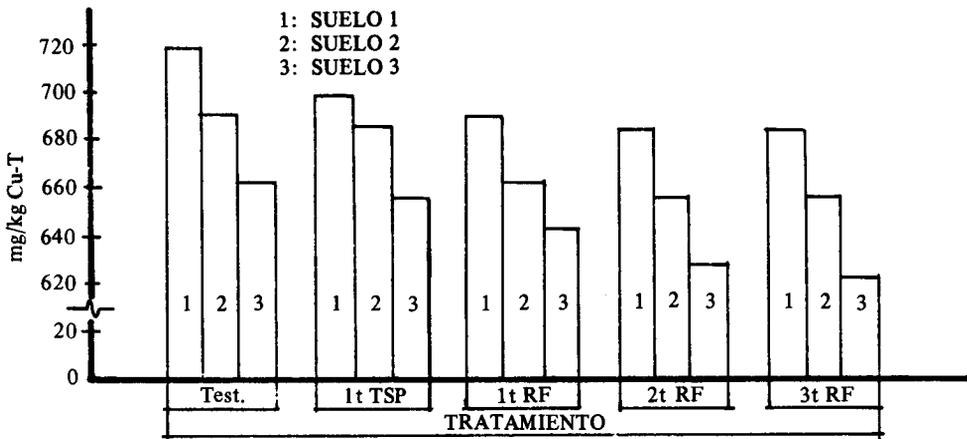


Fig. 3. Efecto de la roca fosfórica y del triple superfosfato sobre el contenido de Cu en la fracción Cu-T.

Cuadro 5. Contenido promedio de Cu en las fracciones Cu-CA y Cu-T.

Tratamiento	mg/kg	
	Cu-CA	Cu-T
Testigo	8,14a*	690,27 a
1 t TSP/ha	8,18 a	679,30 b
1 t RF/ha	6,70 a	664,60 bc
2 t RF/ha	5,08 ab	655,67 d
3 t RF/ha	2,94 b	656,70 cd

* Medias dentro de cada columna seguida por igual letra no son significativamente diferentes (para un nivel de significación de 0,05%).

La disminución en los contenidos de Cu-CA se atribuyó a la formación de $\text{Cu}_3(\text{PO}_4)_2$, el cual es poco soluble. Sin embargo, para lograrlo, es necesario primero agotar el Cu de reserva, que es abundante en estos suelos. Sólo cuando éste se agota se notará una disminución en el nivel de Cu-CA. El suelo 1 necesitó más P para reducir el Cu presente en esta fracción, debido a que tenía más Cu de reserva alojado en el Cu-RES, en contraste con los suelos 2 y 3 (Cuadro 4).

La reducción del Cu-T se atribuyó tentativamente a la acción del fosfato, ya que éste pudo haber obstaculizado la solubilización del microelemento durante la determinación, resultando en una subestimación de la fracción.

El Cu-PYR no mostró cambio alguno ante el fósforo aplicado, a pesar del posible equilibrio existente de esta fracción con la solución del suelo. Es probable que en estos suelos el Cu-PYR se encuentre en forma de complejos poco disociados, los que al mineralizarse lentamente ocasionan una degradación progresiva, pudiendo eventualmente ser utilizados por la planta. Se sugiere, además que el Cu en esta categoría es liberado, pero al mismo tiempo se reemplaza por Cu de otra fracción; o que, en estos suelos existe otra forma más disponible que es la encargada de abastecer el microelemento a la solución del suelo.

El Cu-OX tampoco se alteró con la adición de fosfatos, lo que se atribuyó a la fuerte oclusión a que está sujeto, y que lo hace inaccesible al intercambio, e impide su solubilización y, bajo estas condiciones, su precipitación por el fósforo.

CONCLUSIONES

El Cu-T fue alto en los 3 suelos del Pacífico Sur de Costa Rica (662 a 778 mg/kg).

La fracción residual (Cu-RES) es la principal reserva del Cu en los suelos (cerca del 50% del Cu-T), seguida por la orgánica (Cu-PYR), con 19 a 26%, y la ocluida por óxidos de Fe y Al (Cu-OX), con 19%.

Las formas adsorbidas (Cu-CA y Cu-AAc) fueron las menores y las más disponibles y mantienen relación directa con la orgánica (Cu-PYR), y en menor grado con la ocluida (Cu-OX).

A pesar de la insolubilidad que se le atribuye al Cu-RES, es probable que también contribuya en forma lenta a la presencia de Cu disponible.

El extractor Olsen modificado parece solubilizar al Cu-CA, Cu-AAc y Cu-PYR, mientras que el HCl 0,1N parece disolver en adición a estas fracciones parte del Cu-OX.

La aplicación de roca fosfórica a los suelos ocasionó la disminución significativa del Cu-T, y de las fracciones de Cu-CA, Cu-AAc y Cu-RES.

La disminución en los contenidos de Cu en algunas de las fracciones al aplicar fosfato de roca, se atribuyó a la formación de $\text{Cu}_3(\text{PO}_4)_2$ insoluble.

La dosis de 3 t RF/ha disminuyó en forma efectiva la concentración de Cu soluble, (entre el 60-75% en el caso del Cu-CA y entre el 14-29% en el Cu-AAc).

RESUMEN

Se realizó un fraccionamiento del Cu en 3 suelos del Pacífico Sur, Costa Rica, a los que se les aplicó el equivalente a 0,1,2 y 3 t RF/ha y 1 t TSP/ha, incubándoseles por 30 días.

Se obtuvieron 6 fracciones: Cu cambiante (Cu-CA), Cu específicamente adsorbido (Cu-AAc), Cu orgánico (Cu-PYR), Cu asociado a los óxidos de Fe y Al (Cu-OX), Cu residual (Cu-RES) y Cu total (Cu-T). Se encontró que el Cu-T fue alto en los 3 suelos (662 a 778 mg/kg). Las formas minoritarias fueron el Cu-CA (0,6 a 2%) y el Cu-AAc (7 a 11%) y representan las fuentes más solubles. El Cu-RES fue la reserva de la mayor parte del Cu-T (50%). A pesar de la insolubilidad que se atribuye a esta fracción, es probable que contribuya a la presencia de Cu soluble. El Cu-PYR (133 a 187 mg/kg) y el Cu-OX (128 a 136 mg/kg) fueron comparables en cuanto a cantidad se refiere, pero es el primero el que proporciona los mayores aportes al Cu disponible.

El extractor Olsen modificado parece solubilizar al Cu-CA, Cu-AAc y Cu-PYR, mientras que el HCl 0,1N parece disolver en adición a estas fracciones parte del Cu-OX.

En cuanto al efecto de la roca fosfórica, se observó que con 3 t/ha se logró una reducción sensible del Cu soluble, atribuido a la formación de $\text{Cu}_3(\text{PO}_4)_2$ insoluble. El Cu-CA disminuyó en un 60-75% y el Cu-AAc en un 14-29%.

AGRADECIMIENTO

Se agradece la colaboración del Dr. Mathew O'Callaghan por las ideas y comentarios brindados.

Se agradece al International Fertilizer Development Center por el fosfato de roca para los experimentos.

LITERATURA CITADA

- BORNEMISZA, E.; IGUE, R. 1967. Oxidos libres de hierro y aluminio en suelos tropicales. Turrialba 17 (1): 23-30.
- CHAPMAN, H. 1965. Cation-exchangeable capacity. *In* Methods of soil analysis, chemical and microbiological properties. Ed. by Black, C. *et al.* Wisconsin, America Society of Agronomy.
- CORDERO, A.; RAMIREZ, G. 1979. Acumulamiento de cobre en los suelos del Pacífico Sur de Costa Rica y sus efectos detrimentales en la agricultura. *Agronomía Costarricense* 3 (1): 63-78.
- JACKSON, M. 1958. Soil chemical analysis. New Jersey, EEUU, Prentice Hall.498 p.
- MANNIX, J.; RODRIGUEZ, R. 1967. Estudio sobre la toxicidad del Cu acumulado en los suelos del litoral Pacífico Sur de Costa Rica. *In* Reunión Anual del PCCMA, 13, San José, Costa Rica.p. 77-80.
- McLAREN, R.; CRAWFORD, D. 1973. Studies on soil copper.I. The fractionation of copper in soils. *Journal of Soil Science* 24 (2): 172-181.
- OLSON, R; ROSCOE, E. 1982. Iron. *In* Method of soil analysis. Ed. by Page, A. Wisconsin, American Society of Agronomy. p. 301-312.
- PRATT, P. 1965. Digestion with hidrofúorico and perchloric acid for total potassium and sodium. *In* Methods of soil analysis chemical and microbiological properties. Ed. by Black, C. *et al.*, Wisconsin, American Society of Agronomy. p. 1019-1021.
- SAENZ, A. 1975. Formulario técnico de suelos tropicales. San José, Universidad de Costa Rica. 366 p.
- SAIZ DEL RIO, J.; BORNEMISZA, E. 1962. Análisis químico de suelos. Turrialba, Costa Rica, IICA. 107 p.
- SOTO, R.; BORNEMISZA, E. 1982. Efecto de la roca fosfórica sobre suelos con excesos de cobre en el Pacífico Sur. *In* Congreso Agronómico Nacional. Resúmenes. San José, Costa Rica. p. 94-95.
- TESSIER, A.; CAMPBELL, P.; BISSON, M; 1979. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metal. *Analytical Chemistry* 51 (7): 844-850.