

EFFECTOS DE DOS ENMIENDAS ORGÁNICAS SOBRE SUELOS ALTAMENTE INTEMPERIZADOS DEL TRÓPICO A DIFERENTES NIVELES DE pH.¹

Silvia Vega²

ABSTRACT. A hypothesis that organic manures can alleviate Al and Mn toxicity in acid soils, increase phosphorus availability in adequately limed soils and make micronutrients more available in over-limed soils was tested in a greenhouse experiment. To cover the diversity of factors limiting growth in acid soils, two acid soil materials from Hawaii (USA) were selected: an Oxisol high in Mn but low in Al, and an Ultisol high in Al but low in Mn. Three pH ranges of 4-5, 6-7, and 7,5 - 8 were established for each soil by either leaching with dilute hydrochloric acid or adding calcium hydroxide. Subsequently, ground leaves of cowpea (*Vigna unguiculata*) were mixed thoroughly with the soils at zero, five, and ten g/kg for each pH range. Soils of the lowest pH received three additional treatments: an unamended control (no basal fertilizer) and sewage sludge at five and ten g/kg. Inoculated soybeans (*Glycine max* L.) cv. Forrest were grown as a test crop. The results indicate that at low pH (4-5), both green manure and sewage sludge decreased Al phytotoxicity but increased Mn phytotoxicity. At neutral pH (6-7), additions of the green manure did not significantly increase phosphorus concentration in plant and soils, but increased soil solution Ca, Mg, and K. At alkaline pH (7,5 - 8), Fe deficiency occurred in plant grown in both soils; and additions of the green manure partially alleviated this deficiency.

RESUMEN. La hipótesis de que las enmiendas orgánicas pueden disminuir la toxicidad del Al y Mn en suelos ácidos, aumentar la disponibilidad de fósforo en suelos adecuadamente encalados y hacer más disponible a los micronutrientes en suelos sobre-encalados fue testada en un experimento de invernadero. Para cubrir la diversidad de factores que limitan el crecimiento de las plantas en suelos ácidos se seleccionaron dos materiales edáficos del estado de Hawaii (USA): un Oxisol ácido con alto contenido de Mn, pero con nivel bajo de Al y un Ultisol con alto contenido de Al, pero con nivel bajo de Mn. Los rangos de pH establecidos por cada tipo de suelo fueron de 4-5, 6-7 y 7,5 - 8 con ácido clorhídrico diluido o adicionando hidróxido de calcio. Posteriormente se mezclaron los suelos de los diferentes rangos de pH con cero, cinco y diez g/kg de material molido del abono verde (*Vigna unguiculata*). Los suelos de pH ácidos (4-5) recibieron cuatro tratamientos adicionales: un testigo con fertilización básica además de 0, 5 y 10 g/kg de lodo residual de depuradora. Como cultivo indicador se utilizó la soja (*Glycine max* L.) var. Forrest. Los resultados indican que a pH bajo (4-5), tanto el abono verde como el lodo de depuradora disminuyeron la fitotoxicidad del Al, pero aumentaron la fitotoxicidad de Mn. A pH neutro (6-7), las adiciones del abono verde no incrementaron, significativamente, la concentración del fósforo en los suelos y en la planta, pero incrementaron los niveles de Ca, Mg y K en la solución del suelo. A pH alcalino en las plantas cultivadas en los dos suelos, ocurrió deficiencia de Fe y las adiciones del abono verde aliviaron parcialmente esta deficiencia.

Key words: pH, organic amendments, phytotoxicity, Ultisol, Oxisol, deficiency.

Palabras claves: pH, enmiendas orgánicas, fitotoxicidad, Ultisol, Oxisol, deficiencia.

^{1.} Trabajo de tesis presentado a la Universidad de Hawaii (USA) para la obtención del Título de Master of Agronomy and Soil Science, área de concentración química de suelo.

^{2.} Profesor de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Asunción, Departamento de Suelo. Casilla de correo 1618, Campus Universitario, Asunción - Paraguay.

INTRODUCCIÓN

En los suelos ácidos, la adición de enmiendas orgánicas, especialmente los abonos verdes de la familia leguminosa y lodos residuales de depuradoras con niveles bajos de metales pesados, han mostrado beneficios considerables al aumentar la fertilidad de suelos y mejorar la nutrición de las plantas (HUE, 1992; BESSHO y BELL, 1992). Por ejemplo, los residuos de cultivos, estiércol de gallina y lodos residuales de depuradoras, se han venido usando con mucho éxito para destoxificar el aluminio y disminuir la acidez de los suelos (HUE, 1992; BESSHO y BELL, 1992; LU y HUE, 1990). Los mayores mecanismos de la destoxificación de aluminio por la utilización de enmiendas orgánicas incluye: incremento en el pH (HUE y AMIEN, 1989), desplazamiento del aluminio intercambiable por las bases de cambio (BESSHO y BELL, 1992) y/o complejamiento del aluminio por compuestos orgánicos (BARTLETT et al., 1991). Los suelos ácidos también pueden presentar toxicidad de manganeso, aunque en menor proporción (FOX et al., 1991; VEGA et al., 1992). Dadas las diferencias en la química del manganeso y el aluminio, cabría preguntar si el efecto de las enmiendas orgánicas sería tan beneficioso, en suelos con toxicidad de manganeso como en suelos con toxicidad de aluminio.

En suelos adecuadamente encalados (pH 6-7), la contribución de los abonos verdes en la disponibilidad del nitrógeno es bien reconocida (CHAE y TABATABAI, 1986), pero para el fósforo y otros nutrientes esenciales, los beneficios fueron menos estudiados. Algunos estudios (SING et al., 1988; TIAN et al., 1992) sugieren que las disponibilidades del fósforo y otros macronutrientes (Ca, Mg y K) aumentan considerablemente con el agregado de las enmiendas orgánicas.

En suelos que son naturalmente alcalinos o han sido sobre-encaledados, la deficiencia de algunos micronutrientes, particularmente hierro, se verifica normalmente. Las sales inorgánicas no son tan efectivas en corregir dichas deficiencias porque tienden a precipitar en suelos con pH altos, mientras que ciertos desperdicios orgánicos han mostrado que pueden ser promisorios (CHANEY y GIORDANO, 1977; Mc CASLIN et al., 1987).

El objetivo de este experimento fue evaluar el efecto de tres niveles de un abono verde de verano (*Vigna unguiculata*), del lodo residual de depuradora y de la fertilización básica en las toxicidades del aluminio y manganeso, en suelos de pH ácido (pH 4-5), además del efecto de tres niveles del abono verde mencionado en la disponibilidad del fósforo, calcio, magnesio y potasio en suelos adecuadamente encaledados, (pH 6-7) y en la disponibilidad de micronutrientes en suelos sobre-encaledados (pH 7,5-8).

MATERIALES Y MÉTODOS

MATERIALES:

Material edáfico. En este trabajo de investigación fueron utilizados dos suelos altamente intemperizados de la isla de Oahu, estado de Hawaii (USA). Dichos suelos fueron un Ultisol aluminico deficiente en calcio y manganeso (serie Paaloa, Rhodic kandudults, arcillosa, oxidico isotérmico) y un Oxisol manganífero deficiente en aluminio (Rhodic eustrtox, arcillosa, caolinitica isohipertérmico). El Ultisol de Paaloa se encuentra de 300 a 520 metros sobre el nivel del mar y recibe un promedio anual de lluvia que oscila entre 1750 a 2250 mm (HUANG et al., 1989). El Oxisol de Wahiawa ocurre a una altitud aproximada de 300 a 350 metros sobre el nivel del mar, con un promedio de lluvia de 1000 a 1250 mm/año (JACKSON et al., 1971). Las muestras correspondientes al Oxisol fueron colectadas del horizonte Ap (0-20 cm) y las derivadas del Ultisol de un horizonte Bt (20-40 cm). Las mismas se secaron al aire y posteriormente se tamizaron a través de un tamiz de 6 mm de diámetro. La lista de algunas propiedades físicas y químicas del suelo natural se encuentra en el cuadro 1.

Cuadro 1. Propiedades químicas y físicas seleccionadas de los suelos utilizados en este experimento.

PROPIEDADES SELECCIONADAS	ORDEN DEL SUELO	
	OXISOL	ULTISOL
Propiedades químicas		
pH (1:1 suelo y KCl 1M)	4.30	3.90
pH (1:1 suelo y H ₂ O)	5.20	4.40
Delta pH	- 1.00	- 0.50
pH de la solución del suelo	5.20	4.65
Conductividad eléctrica (dS/m)	0.35	0.66
Carbono soluble (mg/L)	90.50	74.60
CIC en NH ₄ Ac pH 7.0 (cmol/kg)	10.40	7.93
CIC efectivo (cmol/kg)	5.20	3.09
Saturación de bases (%)	49.0	13.1
Saturación de Al (%)	2.11	66.3
Me total (%)	1.89	0.09
Fósforo extraíble con NaHCO ₃ (mg/kg)	5.50	1.15
Cationes de la solución del suelo (mg/L)		
Ca	12.0	1.96
Mg	2.60	1.15
K	20.1	1.60
Na	14.9	12.5
Mn	2.50	0.13
Al	0.04	0.29
Cationes intercambiables con NH ₄ Ac pH 7.0 (cmol/kg)		
Ca	3.40	0.37
Mg	1.71	0.21
K	0.74	0.10
Na	0.24	0.26
Cationes extraíbles con KCl 1M (cmol/kg)		
Ca	4.30	0.34
Mg	3.50	0.23
Na	0.43	0.30
Al	0.11	2.05
Propiedades físicas		
Densidad de partículas, g/cm ³	2.86	3.12
Densidad aparente, g/cm ³	4.10	1.12
Porosidad, %	62.0	69.0
Capacidad de campo, %	38.0	34.0
Distribución del tamaño de partículas (%)		
arena	4.30	2.30
limo	46.2	48.2
arcilla	49.5	49.2
Clase textural	arcilloso	limoso

Material Orgánico. Los materiales orgánicos utilizados en este experimento fueron las hojas del abono verde *Vigna unguiculata* finamente molido (< 0,2 cm) y un lodo proveniente de depuradora municipal digerido anaeróbicamente del distrito Kailua, Hawaii. Los contenidos de los nutrientes en las dos enmiendas se observan en el cuadro 2.

Cuadro 2. Contenido de nutrientes totales en las enmiendas utilizadas en este experimento.

Fuente	Macronutrientes (%)				
	N	P	K	Ca	Mg
Abono verde	3,6	0,41	3,45	1,54	0,37
Lodo de depuradora	5,4	0,79	0,01	0,35	0,35

Fuente	Micronutrientes (mg/kg)				
	Cu	Zn	Mn	Fe	pH _{ROH}
Abono verde	13	50	63	500	--
Lodo de depuradora	416	1301	119	18935	6,58

Los niveles de metales pesados en el lodo de depuradora y el abono verde se encuentran dentro de los límites permisibles estipulados por la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los Estados Unidos (HUE y RANJITH, 1993).

Fertilización básica. Los suelos recibieron un tratamiento de fertilización básica en la siguiente cantidad (mg/kg): 140 (N), 200 (Ca), 48 (Mg), 169 (S), 10 (Fe), 5 (Cu), 2 (B) y 0.5 (Mo). El Ultisol recibió una fertilización extra de 10 mg/kg de Mn. El Ca, Mg, Fe, Cu, Zn, Mn y S fueron aplicados en forma de sales de sulfatos. El B fue aplicado como ácido bórico (H₃BO₃) y el Mo como molibdato de sodio (Na₂MoO₄). Basado en la curva de absorción de fósforo (HUE, 1991), el Ultisol recibió 400 mg/kg de P y 500 mg/kg de K y el Oxisol 200 mg/kg de P y 250 mg/kg de K.

Material Genético. Como cultivo indicador, se utilizó la soja (*Glycine max*) cultivar Forrest (Grupo de maduración = V). Este genotipo es considerado como un cultivar exigente en Fe (BROWN y JONES, 1977) y sensible a la toxicidad de Al y Mn.

MÉTODOS

Organización del experimento en el invernadero. Para estudiar los efectos de las enmiendas orgánicas en la composición del suelo y de la planta, a diferentes niveles de pH, se condujo un experimento en el invernadero.

Se establecieron tres rangos de pH (4-5, 6-7 y 7,5-8) para los dos tipos de suelos, ya sea utilizando HCl diluido o Ca(OH)₂, basado en la curva de titulación de encalado. Después de la acidificación o encalado, todas las muestras fueron mojadas hasta su capacidad de campo y luego estacionadas por tres semanas para reaccionar en bolsas de polietileno de 2 kg.

Para cuantificar el efecto de las enmiendas orgánicas en la disponibilidad y fitotoxicidad del Al y Mn, los suelos de rango de pH ácidos (4-5) fueron sometidos a seis diferentes tratamientos: un testigo sin fertilización básica (Testigo - FB), un testigo con fertilización básica (Testigo + FB), dos niveles del abono verde molido y del lodo de depuradora (5 y 10 g/kg). Los suelos tratados con las enmiendas orgánicas también recibieron la aplicación de la fertilización básica. Posteriormente los suelos fueron mojados nuevamente hasta su capacidad de campo.

Para cuantificar el efecto del abono verde en la fitodisponibilidad del fósforo y de las bases Ca, Mg y K, los suelos de pH neutro (6-7) fueron mezclados con 0, 5 y 10 g/kg del abono verde molido. Todos los suelos recibieron la aplicación de la fertilización básica y fueron mojados hasta su capacidad de campo. Los suelos sobreencalados (pH 7,5-8) recibieron los mismos tratamientos como los del pH neutro.

Después del equilibrio, se sembraron cinco semillas de soja Forrest en potes plásticos de 2 kg y se le agregó agua destilada para mantenerlo en su capacidad de campo. Luego, se dejaron a dos plántulas por pote. Los potes fueron dispuestos en un diseño completamente al azar con tres repeticiones por tratamiento. El diseño experimental resultó en un total de 72 observaciones: 36 observaciones para el pH bajo (2 suelos x 6 tratamientos x 3 repeticiones) y 18 observaciones por separado para el pH neutro y alcalino (2 suelos x 3 tratamientos x 3 repeticiones). Las plántulas cosechadas fueron cortadas al ras del piso, 22 días después de la siembra para las mediciones de la masa seca y de los análisis químicos respectivos. Posteriormente se midieron la longitud de las raíces de las plántulas en los tratamientos de pH bajos (pH 4-5), luego las mismas fueron lavadas para estar libres de suelo, secadas, pesadas y analizadas para Al y Mn. Las muestras de suelos fueron colectadas en pre-siembra y post-cosecha para el análisis químico.

Análisis laboratorial. Las soluciones inalteradas de suelo fueron colectadas por el método de la centrifuga (ADAMS et al., 1980) para las caracterizaciones químicas. En este método, aproximadamente 250 g de suelo húmedo (a capacidad de campo) se empacó en un embudo plástico de Buchner modificado con papel de filtro Whatman no. 42. El paquete completo fue centrifugado por 30 minutos. El pH de la solución y la conductividad eléctrica (CE) fue medida inmediatamente para evitar pérdidas significativas de CO₂. Luego, la solución del suelo fue refrigerada para análisis posteriores.

Los cationes intercambiables (Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^{+1} , Na^{+1}) fueron extraídos con el mismo procedimiento utilizados para determinar CIC (THOMAS, 1982). Los cationes Al^{+3} , Ca^{+2} , Mg^{+2} y Na^{+1} fueron extraídos también con KCl 1M (SHUMAN y DUNCAN, 1990). El CIC efectivo fue calculado por la suma de bases extraídas por $\text{NH}_4(\text{CH}_3\text{COO})$ 1M y la acidez intercambiable extraída con KCl 1M. Los micronutrientes (Fe, Cu, Zn y Mn) fueron extraídos con la solución del DTPA-TEA pH 7,3 (LINDSAY y NORVELL, 1978).

El fósforo fue extraído con una solución 0,5 M de NaHCO_3 y determinado por el método sulfo-molibdato/ácido ascórbico (OLSEN y SOMMERS, 1982). El pH del suelo en agua y KCl 1M fue medido potenciométricamente usando una relación de suspensión de 1:1. El carbono soluble oxidable fue determinado con el método de pirofosfato de Mn (III) (BARLETT y ROSS, 1988). Los cationes Ca, Mg, K, Na, Fe, Cu, Mn y Zn fueron determinados con el espectrofotómetro de absorción atómica.

La concentración total y monomérica del Al en la solución del suelo fue medida por el método de KERVEN et al. (1989). El Al en la planta fue determinado por el método de WILSON (1984). Las muestras de tejidos de plantas fueron secadas a 500°C y el residuo fue oxidado con HNO_3 y luego disuelto en HCl 0,1 M. La composición nutricional de la planta fue analizada con los métodos descriptos anteriormente.

Las propiedades físicas del suelo tales como densidad de partículas, densidad aparente, porosidad y distribución del tamaño de las partículas fueron medidas por los procedimientos descriptos por GOWLAND (1981).

Análisis estadísticos. Los análisis estadísticos de los suelos y de la planta fueron hechos en base a los valores de los promedios de la composición de la solución del suelo, antes de la siembra y después de la cosecha. La media entre los tratamientos fueron separados usando el test LSD (Least Significant Difference) al 5 % de probabilidad siguiendo un análisis de varianza hecho por PROC ANOVA del Statistical Analysis System (SAS INSTITUTE, 1985).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Efecto de la fertilización básica y orgánica sobre la composición y el crecimiento de la raíz a pH bajo (4-5).

Los efectos de las enmiendas orgánicas y la fertilización básica en el crecimiento y composición de la raíz de la soja se observan en el cuadro 3.

Cuadro 3. Efecto de la fertilización básica y orgánica (lodo de depuradora y abono verde) en el crecimiento y composición radicular de la soja en el Ultisol y Oxisol a pH bajo (4-5).*

Tratamiento	Peso de la raíz (g)	Longitud de la raíz (cm)	Al en la raíz (mg/kg)	Mn en la raíz (mg/kg)
ULTISOL				
Testigo-FB**	0,028 d	4,10 f	8790 a	58,3 c
Testigo+FB	0,045 d	10,3 e	6315 b	64,7 cb
Lodo, 5 g/kg	0,049 dc	13,1 d	4697 c	80,7 b
Lodo, 10 g/kg	0,122 b	17,9 c	4208 c	82,5 b
Ab. verde, 5 g/kg	0,083 c	16,7 b	4526 c	108 a
Ab. verde, 10 g/kg	0,290 a	25,3 a	2375 d	114 a
Pr>F***	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
OXISOL				
Testigo-FB	0,064 c	23,3 c	2906 a	987 a
Testigo+FB	0,101 a	29,9 a	2133 b	740 c
Lodo, 5 g/kg	0,098 a	30,0 a	1960 c	753 c
Lodo, 10 g/kg	0,095 ab	26,7 b	1436 d	916 ab
Ab. verde, 5 g/kg	0,087 b	26,3 b	1943 c	840 c
Ab. verde, 10 g/kg	0,094 ab	30,0 a	1273 d	962 a
Pr>F	0,0001	0,0006	0,0001	0,0074

* Las medias seguidas por las mismas letras no tienen diferencias significativas a $P \leq 0,05$ de acuerdo con el test LSD.

** FB=Fertilización básica

*** Probabilidad ($P < 0,05$) de que F calculada sea mayor a la F tabulada.

En el Ultisol de Paaloa donde la toxicidad de Al es el factor limitante, la fertilización básica disminuyó el Al de la raíz y aumentó el peso y la longitud de la raíz. Por ejemplo, el Al de la raíz disminuyó de 8790 mg/kg en el testigo-FB a 6315 mg/kg en el testigo+FB. Consecuentemente el peso de la raíz aumentó de 0,028 g a 0,045 g y la longitud del mismo de 4,1 cm a 10,3 cm comparando los tratamientos mencionados. El efecto mejorador de los fertilizantes sobre la longitud de las raíces fue reportado por BLAMEY et al. (1983).

Las aplicaciones de residuos orgánicos fueron incluso más efectivas que la fertilización básica en disminuir la concentración de Al en la raíz e incrementar el peso y la longitud de la raíz. Por ejemplo, la aplicación de 10 g/kg de abono verde disminuyó la concentración de Al de 6315 mg/kg (Testigo+FB) a 2375 mg/kg y aumentó el peso de la raíz de 0,045 g a 0,29 g. La longitud de la raíz aumentó también significativamente con la aplicación de residuos orgánicos llegando a valores máximos de 25,3 cm con la aplicación de la dosis más alta del abono verde (10 g/kg). A dosis iguales de aplicación, el abono verde fue mucho más efectivo que el lodo de depuradora en aumentar el peso y la longitud de la raíz.

Las raíces del testigo-FB estuvieron en avanzado estado de toxicidad de Al y se vieron achatados, engrosados, oscuros y duros indicando deterioro de la epidermis y la corteza (HUTCHINSON et al., 1986). Las raíces se volvieron progresivamente menos achatadas con la disminución del contenido de Al, a consecuencia de la aplicación de la fertilización básica y de las enmiendas orgánicas.

Una relación linear mucho más efectiva se obtuvo comparando la longitud y la concentración de Al en la raíz ($r^2=0,94$) que comparando el peso y la concentración de Al en la raíz ($r^2=0,50$). Por lo tanto, la longitud de la raíz es un mejor estimador de la toxicidad de Al (ALVA et al., 1986; MIYASAWA y WEBSTER, 1993). El cuadro 3 también revela que contrario a la concentración de Al en la raíz, la concentración de Mn en el Ultisol se incrementó con los aumentos sucesivos de las dos enmiendas orgánicas. Comparando las dos enmiendas se verifica que los suelos tratados con el abono verde tenían concentración más alta de Mn. Esto era de esperar llevando en cuenta que el abono verde tenía mayor concentración de Mn (cuadro 2).

En el Oxisol de Wahiawa donde la toxicidad de Mn era el factor limitante, la fertilización básica disminuyó la concentración de Mn en la raíz y aumentó el peso y la longitud de la raíz comparado al testigo-FB. La disminución de la concentración de Mn en la raíz, aparentemente es asociada con el aumento del pH debido a la aplicación del fertilizante (se discutirá más tarde). Contrario al efecto de la fertilización básica, la aplicación de las enmiendas orgánicas aumentó la concentración de Mn en la raíz y disminuyó el peso y longitud de la raíz. Por ejemplo, la aplicación de 10 g/kg de lodo de depuradora y de abono verde aumentaron las concentraciones de Mn de 740 mg/kg en el testigo+FB a 916 y 962 mg/kg, respectivamente.

A diferencia de la toxicidad de Al, la toxicidad de Mn no afecta la punta de la raíz primariamente y se distribuye más homogéneamente a través del sistema radicular. En consecuencia la longitud de la raíz puede no ser severamente afectada al menos que grandes cantidades de residuos orgánicos fuesen aplicados. Los resultados también indican que la soja Forrest puede acumular grandes cantidades de Mn en la raíz en suelos manganíferos. LONERAGAN (1988) incluso reportó que el nivel de Mn puede ser mayor en la raíz que en la parte aérea con suplemento elevado de Mn al sustrato donde crece la planta. Alta concentración de Mn en la raíz también fue reportado por AOBA (1986). Este autor encontró que la raíz de la manzana puede acumular aproximadamente 1200 mg/kg de Mn de un suplemento de 5 mg/kg en cultivos hidropónicos.

Efecto de la aplicación de la fertilización básica y orgánica en el crecimiento y composición nutricional de la parte aérea de la soja en suelos de pH bajos (pH 4-5).

La masa seca y la composición química de la parte aérea de la soja se enumeran en el cuadro 4.

En el Ultisol, las enmiendas orgánicas disminuyeron levemente la concentración de Al en la parte aérea y aumentó la masa seca. La diferencia entre las masas secas

Cuadro 4. Efecto de la fertilización básica y orgánica (lodo de depuradora y abono verde) en el crecimiento y composición de la parte aérea de la soja en el Ultisol y Oxisol a pH bajo (4 - 5).^{*}

Tratamiento	Masa seca (g)	Ca	Mg	K	P	Mn	Fe	Cu	Zn	Al
		----- % -----			----- mg/kg -----					
ULTISOL										
Testigo-FB**	0,28 d	0,37 c	0,29 d	1,64 c	0,27 c	68 cb	164 b	11 b	44 c	45 a
Testigo+FB	0,30 d	0,44 b	0,30 dc	2,70 b	0,37 ba	52 d	233 ba	18 a	69 bc	45 a
Lodo, 5 g/kg	0,36 cd	0,47 b	0,33 c	2,61 b	0,38 a	53 cd	368 ba	14 ba	83 b	48 a
Lodo, 10 g/kg	0,55 b	0,48 b	0,36 b	2,76 b	0,28 c	73 b	427 a	12 b	131 ba	38 a
Ab. verde, 5 g/kg	0,49 cb	0,48 b	0,39 ba	3,47 a	0,30 bc	105 a	172 b	12 b	86 b	36 a
Ab. verde 10 g/kg	1,18 a	0,54 a	0,41 a	3,41 a	0,18 d	110 a	210 b	6,7 c	97 ba	34 a
Pr>F***	0,0001	0,0002	0,0001	0,0001	0,0005	0,0001	0,0955	0,0019	0,0044	0,1960
OXISOL										
Testigo-FB	0,46 c	0,81 a	0,62 a	2,55 c	0,21 bdc	2383 a	28 c	9,7 b	89,3 c	31 b
Testigo+FB	0,82 a	0,71 a	0,66 a	3,26 b	0,19 dc	1283 d	37 bc	10 b	117 ba	31 b
Lodo, 5 g/kg	0,77 a	0,73 a	0,70 a	3,02 b	0,16 d	1531 dc	56 a	12 ba	115 ba	27 b
Lodo, 10g/kg	0,63 b	0,81 a	0,76 a	3,21 b	0,26 bac	1693 c	47 ba	13 a	130 a	40 a
Ab. verde 5 g/kg	0,74 a	0,81 a	0,69 a	3,50 a	0,26 ba	1578 c	50 a	12 ba	109 b	32 b
Ab. verde 10 g/kg	0,59 b	0,95 b	0,73 a	3,75 a	0,29 a	1886 b	48 ba	14 a	103 bc	29 b
Pr>F	0,0001	0,0848	0,482	0,0001	0,0136	0,0001	0,0117	0,0146	0,0049	0,0395

* Las medias seguidas por las mismas letras no tienen diferencias significativas a $P \leq 0,05$ de acuerdo con el test LSD.

** FB= Fertilización básica.

*** Probabilidad ($P \leq 0,05$) de que la F calculada sea mayor a la F tabulada.



de la parte aérea fueron mínimas entre el testigo-FB, el testigo+FB y el nivel de 5 g/kg de residuo municipal. Las plantas que crecieron en estos tres tratamientos presentaron cotiledones muertos y necrosis en las hojas unifoliadas y trifoliadas. Esto sugiere que las adiciones de la fertilización básica y 5 g/kg de residuo municipal no fueron suficientes para sobreponer la toxicidad de Al en el Ultisol. El rango más alto (10 g/kg) del residuo municipal y ambos niveles del abono verde, sin embargo, aumentaron significativamente la masa seca de la parte aérea indicando que la toxicidad de Al en la soja de la variedad Forrest disminuyó considerablemente con estos tratamientos.

Comparado al Al de la raíz, la concentración de Al en la parte aérea fue muy baja. Por ejemplo, la concentración más alta de Al en la parte aérea (50 mg/kg) en el testigo-FB estuvo muy por debajo del 8792 mg Al/kg encontrado en la raíz (cuadro 4). Esto indica que las plantas susceptibles a la toxicidad de Al pueden acumular grandes cantidades de este elemento en la raíz, lo cual no puede ser trasladado a la parte aérea (RHUE, 1977). La concentración de Al en la parte aérea parece ser un indicador pobre de la toxicidad del mismo. Por ejemplo, la adición de 10 g/kg del abono verde disminuyó la concentración de Al en la parte aérea a razón de 9 mg/kg del testigo. Sin embargo con el mismo tratamiento, el nivel de Al en la raíz disminuyó a razón de 6500 mg/kg del testigo (Cuadro 4).

La fertilización básica y las enmiendas orgánicas aumentaron significativamente la absorción de Ca comparado al testigo - FB. Por ejemplo, el Ca de la parte aérea aumentó de 0,37% en el testigo - FB a 0,44% en el testigo+FB y a 0,54% al nivel más alto de aplicación del abono verde. Asimismo, el abono verde fue más efectivo que el lodo de depuradora en aumentar el nivel de Ca en la parte aérea, probablemente debido a que el contenido natural de este elemento en dicho abono es más elevado (Cuadro 2). En cualquiera de los tratamientos, la concentración de Ca estuvo por debajo del nivel crítico de deficiencia de 0,8 % reportados para algunos cultivos de soja (FOY et al., 1969) pero estuvo en el rango de suficiencia (0,36 - 2%) reportado por de MOOY et al. (1973). FOY et al. (1993) reportaron que las primeras hojas trifoliadas de soja Forrest cultivadas sobre suelos ácidos de pH 4,3 tuvieron concentración de Ca menor a 0,1%.

El alto nivel de Al en la raíz compite antagónicamente con el Ca por absorción y translocación, creando una deficiencia potencial de Ca en la parte aérea (RENGEL y ELLIOT, 1992). Las plantas que crecieron en el testigo-FB, testigo+FB y en el tratamiento de 5 g/kg de ambas enmiendas tuvieron distorsión de hojas y colapso de los petiolos. Aunque con la adición de 10 g/kg, la distorsión de hojas y el colapso de los petiolos aún persistieron, el problema fue considerablemente menos severo. Las plantas se vieron más sanas y verdes. De acuerdo a FOY et al. (1993) el colapso de los petiolos y la distorsión de hojas son síntomas típicos de deficiencia de Ca inducido por alta concentración de Al en la soja.

La adición de la fertilización básica y residuos orgánicos también aumentó la concentración de Mg en la parte aérea. En todos los tratamientos, la concentración de Mg en la parte aérea estuvo dentro del nivel de suficiencia (0,26 - 1%) reportado por de MOOY et al. (1973). FOY et al. (1993) reportaron que la concentración de Mg en el primer trifolio de la soja Forrest que creció sobre un suelo tóxico en Al fue aproximadamente 0,37 %.

Similar al Ca y Mg, la aplicación de la fertilización básica y residuos orgánicos aumentó significativamente las concentraciones de K, P, Fe, Cu y Zn. Deficiencia de dichos elementos no era de esperar a pH bajo porque las concentraciones de los mismos estuvieron en todo momento por encima de los niveles críticos de deficiencia, reportados por de MOOY (1973) y MARSCHNER (1989) para la soja.

En el Oxisol tóxico en Mn, la adición de la fertilización básica disminuyó la concentración de Mn y aumentó la masa seca en la parte aérea. El Mn de la parte aérea disminuyó de 2383 mg/kg en el testigo-FB a 1383 mg/kg en el testigo+FB y la masa seca aumentó de 0,46 a 0,82 g. Las enmiendas orgánicas, por el contrario, aumentaron la concentración de Mn y disminuyeron las masas secas en relación al testigo+FB. Por ejemplo, el Mn de la parte aérea aumentó significativamente de 1383 mg/kg en el testigo+FB a 1693 y 1886 mg/kg con la adición de 10 g/kg del lodo de depuradora y el abono verde, respectivamente. Asimismo, la alta concentración de Mn en la parte aérea disminuyó las masas secas de 0,82 g en el testigo+FB a 0,63 y 0,59 g al nivel de aplicación de 10 g/kg del lodo de depuradora y el abono verde, respectivamente.

Las plantas que crecieron en el testigo-FB fueron más afectadas por la toxicidad del Mn comparadas a las que crecieron en los otros tratamientos. Las mismas presentaron pecas de coloración negruzca y amarronada en los cotiledones, las hojas unifoliadas y trifoliadas. Posteriormente, las hojas se doblaron hacia abajo presentando necrosis en la periferia y punta con desecación y caída final. Además de estos síntomas de toxicidad de Mn (HORST, 1988), las hojas maduras fueron cloróticas y las hojas trifoliadas más jóvenes tuvieron una coloración blanca. Este último síntoma es frecuentemente interpretado como deficiencia de Fe inducido por toxicidad de Mn (AMBERGER et al., 1982).

La concentración de Fe en todos los tratamientos estuvo por debajo del rango de 50 - 150 mg/kg sugerido como adecuado para la mayoría de las plantas (MARSCHNER, 1989). Las plantas que crecieron sobre el Oxisol presentaron concentraciones más altas de Mn que aquellas que crecieron sobre el Ultisol. Asimismo los niveles de Fe fueron mucho más bajos en las plantas que crecieron sobre el Oxisol. Esto indica que la deficiencia de Fe inducido por toxicidad de Mn pudo haber sido un factor limitante en el Oxisol.

La concentración de Ca, Mg, Cu y Zn aumentaron con la aplicación de la fertilización básica y las enmiendas orgánicas sobre el Oxisol. En el estado natural, el Oxisol es más rico en cationes que el Ultisol (Cuadro 1), por lo tanto las plantas que crecieron en el Oxisol tuvieron mayores concentraciones de bases que aquellas que crecieron sobre el Ultisol. La concentración de Al en la parte aérea en el Oxisol fue mucho más baja que en el Ultisol, sugiriendo que este suelo no tiene toxicidad de Al. La concentración de P y K en los dos suelos fueron similares.

Efecto de la aplicación de la fertilización básica y orgánica en la composición del suelo a pH bajo (4-5).

Los efectos de las enmiendas orgánicas y la fertilización básica en la composición de la solución del suelo, Al extraído con KCl y los micronutrientes (Fe, Mn, Cu, Zn) extraídos con DTPA se observan en los cuadros 5 y 6.

Debido a la similitud de algunos datos y por simplicidad, la mayoría de las propiedades químicas serán discutidas juntas

para los dos tipos de suelos. Parámetros críticos como el pH, Al, Mn, Ca y Fe serán discutidos por separado por cada suelo.

En el Ultisol tóxico en Al, tanto la fertilización básica como las enmiendas orgánicas aumentaron significativamente el pH de la solución del suelo y disminuyeron la concentración del Al total, Al monomérico y el Al extraído con KCl. Por ejemplo, el pH de la solución aumentó de 3,61 en el testigo-FB a 4,08 en el testigo+FB y a 4,39 y 4,45 con la aplicación de 10 g/kg de lodo de depuradora y el abono verde, respectivamente. El Al monomérico soluble disminuyó de 42,5 mg/L en el testigo-FB a 2,82 mg/L en el testigo+ FB y a 0,69 y 0,43 mg/L con el agregado de 10 g/kg del lodo de depuradora y abono verde, respectivamente. Se encontró una relación lineal ($r^2=0,93$) cuando el pH de la solución del suelo se comparó con la concentración del Al monomérico, indicando la dependencia directa del Al soluble del pH del suelo.

Cuadro 5. Efecto de la fertilización básica y orgánica (lodo de depuradora y abono verde) en la composición de la solución del suelo y del Al extraído con KCl en el Ultisol y Oxisol a pH bajo (pH 4-5). *

Tratamiento	pH	CE	C dS/m	Al Total	Al mono mérico	Mn	Ca	Mg	K	Na	Al ext. con KCl cmol/kg
ULTISOL											
Testigo-FB**	3,61 d	1,72 e	64 d	44,8 a	42,5 a	1,00 d	31 e	44 e	13 d	62 d	2,80 a
Testigo+FB	4,06 e	3,65 d	63 d	2,92 b	2,82 b	1,53 c	91 d	56 d	509 c	61 d	2,10 b
Lodo, 5 g/kg	4,27 d	4,48 c	93 c	1,05 c	9,97 c	1,70 cb	113 c	64 c	491 c	116 b	1,60 c
Lodo, 10 g/kg	4,38 b	5,31 a	117 a	0,78 dc	0,69 c	1,97 b	147 b	82 b	519 c	164 a	1,37 e
Ab. verde	4,33 c	4,53 c	90 c	0,87 dc	0,79 c	1,90 b	140 b	65 c	612 b	67 d	1,47 d
Ab. verde	4,46 a	4,75 b	109 b	0,50 d	0,43 c	2,63 a	174 a	91 a	683 a	78 c	1,08 f
Pr>F***	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
OXISOL											
Testigo-FB	4,55 e	3,55 d	41,7 e	0,37 a	0,35 a	154 a	236 b	1,43 e	126 d	63 d	1,12 a
Testigo+FB	4,93 d	4,39 c	52,3 d	0,16 b	0,13 b	83 d	186 e	157 d	274 c	70 c	0,52 b
Lodo, 5 g/kg	5,17 c	4,91 b	66,7 c	0,08 c	0,07 c	86 d	202 d	171 c	276 c	117 b	0,39 c
Lodo, 10g/kg	5,22 c	5,50 a	85,0 a	0,05 d	0,03 d	97 c	215 c	184 b	282 c	154 a	0,24 c
Ab. verde	5,33 b	4,48 c	67,0 c	0,04 ed	0,02 d	94 c	245 b	177 c	333 b	62 d	0,23 c
Ab. verde	5,54 a	5,00 b	80,7 b	0,01 e	0,01 d	107 b	267 a	197 a	399 c	63 dc	0,10 d
Pr>F	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001

* Las medias seguidas por las mismas letras no tienen diferencias significativas a $P \leq 0,05$ según el test LSD.

** FB=Fertilización básica.

*** Probabilidad ($P \leq 0,05$) de que la F calculada sea mayor a la F tabulada.

Cuadro 6. Efecto de la fertilización básica y orgánica (lodo de depuradora y abono verde) en la concentración de Fe, Mn y Zn extraídos con DTPA a pH bajo (pH 4-5).

Tratamiento	Fe	Mn	Cu	Zn
	mg kg ⁻¹			
	ULTISOL			
Testigo-FB	273 c	6,40 d	2,5 d	1,9 d
Testigo+FB	340 b	11,3 b	6,4 b	5,2 c
Lodo, 5 g/kg ⁻¹	339 b	10,2 c	6,5 b	9,2 b
Lodo, 10 g/kg ⁻¹	370 a	9,90 c	7,4 a	13,4 a
Ab. verde 5 g/kg	334 b	11,8 b	5,6 c	5,8 c
Ab. verde 10 g/kg	341 b	14,1 a	5,6 c	5,3 c
Pr>F***	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
	OXISOL			
Testigo-FB	29,3 d	316 a	5,53 c	5,27 d
Testigo+FB	32,3 dc	264 c	7,27 b	9,01 c
Lodo, 5 g/kg ⁻¹	39,3 b	284 bc	8,11 a	13,1 b
Lodo, 10 g/kg ⁻¹	45,3 a	280 bc	8,52 a	15,0 a
Ab. verde 5 g/kg	33,0 dc	277 bc	6,89 b	8,90 c
Ab. verde 10 g/kg	35,0 c	297 ba	7,21 b	9,71 c
Pr>F	0,0001	0,0089	0,0001	0,0001

* Las medias seguidas por las mismas letras no tienen diferencias significativas a $P \leq 0,05$ de acuerdo con el test LSD.

** FB=Fertilización básica.

*** Probabilidad ($P \leq 0,05$) de que la F calculada sea mayor que la F tabulada

El aumento del pH de la solución del suelo con la aplicación de la fertilización básica pudo haber derivado del intercambio de los iones fosfatos y sulfatos con los OHs localizados en la superficie de los óxidos (UEHARA y GILLMAN, 1981; MATHEUS y JOOST, 1989). Aumentos en el pH de la solución del suelo, a través de agregado de enmiendas orgánicas, también fueron reportados por HOYT y TURNER (1975), HUE y AMIEN (1989) y BESSHO y BELL (1992). HOYT y TURNER (1975) sugirieron que el NH_3 liberado de la descomposición de residuos orgánicos aumenta el pH del suelo y HUE y AMIEN (1989) propusieron que el aumento del pH es debido a la producción de OHs; por (1) disolución de óxidos de Fe y Mn en ambiente de reducción o (2) reacciones de intercambio de ligando entre los aniones orgánicos y OHs terminales de los sesquióxidos. El abono verde fue más efectivo que el lodo de depuradora en aumentar el pH del suelo tal vez como resultado de una más rápida mineralización del mismo.

La similitud en la concentración de Al total y monomérico en ambos testigos es cuestionable y sugiere que el contenido de la materia orgánica del suelo natural pudo haber tenido un efecto mínimo en el complejamiento del Al durante el período de tiempo del experimento. Las aplicaciones de 10 g/kg de las dos enmiendas orgánicas aumentó la diferencia entre el Al total y monomérico en un 15% aproximadamente. Por lo tanto, residuos orgánicos frescos pueden complejar mas Al probablemente debido a la liberación de ácidos orgánicos (HUE et al., 1986; BESSHO y BELL, 1992). BESSHO y BELL (1992) también reportaron que la

aplicación de 10 g/kg de hojas de legumbres a un suelo ácido de Australia arrojó una diferencia aproximada de 10% entre el Al soluble total y el monomérico.

La disminución de Al extraído con KCl por la aplicación de las enmiendas orgánicas y la fertilización básica pudo haber derivado del aumento de pH, lo cual precipita al Al como $\text{Al}(\text{OH})_3$ (BOHN et al., 1985) y/o del complejamiento del Al por compuesto orgánico (RITCHIE, 1989).

Una relación hiperbólica se obtuvo cuando se comparó la longitud relativa de la raíz con la concentración del Al monomérico. Asimismo se encontró que un 10% de reducción en la longitud de la raíz de la soja Forrest se espera cuando la concentración del Al monomérico soluble es aproximadamente 0,3 mg/L. Este nivel es cercano al valor crítico de 0,4 mg/L de Al monomérico soluble encontrado por BRUCE et al. (1988) para la longitud relativa de la raíz de la soja Forrest.

Una deficiencia de Ca no era de esperar en el Ultisol porque la mínima concentración de este elemento en el testigo+B fue de 31 mg/L. El nivel crítico de Ca soluble fue reportado como 10,8 mg/kg para suelos de Alabama, USA (ADAMS y MOORE, 1983). Además, la relación entre Ca soluble y Ca total siempre estuvo por encima de 0,15 lo cual es requerido para un adecuado crecimiento de las raíces (ADAMS, 1966). El bajo nivel de Ca en la parte aérea de la planta pudo haber derivado de la interferencia de Al para la translocación del Ca y la acumulación de este elemento en la raíz (CLARKSON, 1984).

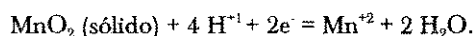
En el Oxisol tóxico en Mn, la aplicación de la fertilización básica aumentó el pH de la solución del suelo y aumentó significativamente el Mn soluble y el Mn extraído con DTPA. En el testigo-FB el pH de la solución fue de 4,55, el Mn soluble y el Mn extraído con DTPA de 154 mg/L y 316 mg/kg, respectivamente. Con la fertilización (testigo + FB) el pH del suelo aumentó a 4,93, el Mn soluble y el Mn extraído con DTPA disminuyó a 83 mg/L y 264 mg/kg, respectivamente.

Las adiciones de 10 g/kg de lodo de depuradora y el abono verde aumentaron más el pH de la solución del suelo a 5,22 y 5,54, respectivamente. El mayor aumento de pH en el Oxisol con la aplicación de los diferentes tratamientos comparado al Ultisol puede ser debido a la menor capacidad buffer del primero.

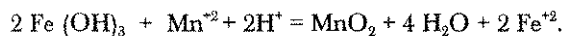
Aunque las enmiendas orgánicas aumentaron el pH de la solución del suelo, también aumentaron considerablemente la concentración del Mn soluble y del Mn extraído con DTPA. Por ejemplo, Mn soluble aumentó de 83 mg/L en el testigo+FB a 107 mg/L y el Mn extraído con DTPA de 264 a 297 mg/kg con la adición de 10 g/kg del abono verde. El abono verde fue más efectivo que el lodo de depuradora en aumentar el Mn soluble y el Mn extraído con DTPA.

Trabajos anteriores ya han demostrado que las enmiendas orgánicas aumentaron la concentración de Mn en el Oxisol de Wahiawa (FUJIMOTO y SHERMAN, 1948; ASGHAR y KANEHIRO, 1980; HUE, 1988; VEGA et al., 1992).

A diferencia del Al, el Mn es un elemento de transición y puede ser sometido a reacciones de complejamiento y de óxido - reducción (BARTLETT, 1988). Comparado a los otros elementos de transición, el Mn^{+2} es un complejador pobre porque solamente un electrón está disponible para la formación del complejo en el orbital d. El complejamiento del Mn, sin embargo, aumenta con el aumento del pH debido también al aumento de la disponibilidad de ligandos. A bajo pH, los electrones derivados de la descomposición de los residuos orgánicos y la abundancia del H^{+1} puede favorecer la disolución de los minerales y la disponibilidad del Mn de acuerdo a la siguiente reacción.



La alta concentración de Mn en el Oxisol disminuyó la concentración del Fe extraído con DTPA (cuadro 5) como es explicado por la siguiente ecuación (HEM, 1964).



En el Oxisol, al igual que en el Ultisol, las concentraciones de Al total, Al monomérico y el Al extraído con KCl disminuyeron con la aplicación de la fertilización básica y orgánica. Sin embargo, la concentración de Al en este Oxisol fue mucho más bajo que su par el Ultisol. Por el contrario el Ca soluble fue considerablemente mayor en el Oxisol que en el Ultisol.

En ambos suelos (Ultisol y Oxisol), la conductividad eléctrica (CE) aumentó con la fertilización básica y orgánica. Para los mismos tratamientos, el Oxisol tuvo mayor CE que el Ultisol, probablemente debido a las concentraciones más altas de cationes en el primero (cuadro 1).

El carbono oxidable soluble y el sodio soluble en ambos suelos son similares. Con la aplicación de lodo de depuradora se obtuvo una concentración un poco mayor de carbono oxidable, pero fue considerablemente mayor en la concentración de Na soluble comparado a los tratamientos con el abono verde en ambos suelos.

Contrario a la concentración de K soluble, el Mg en la solución del suelo fue mayor en el Oxisol que en el Ultisol. Las adiciones del abono verde fueron más efectivas que el lodo de depuradora en aumentar la concentración de K y Mg en ambos suelos. Obviamente las concentraciones de K y Mg en el abono verde (Cuadro 2) fueron mayores que en el lodo de depuradora y esto explica la diferencia.

Las concentraciones de Zn y Cu extraídos con DTPA aumentaron significativamente con la adición de la fertilización básica y el lodo de depuradora en ambos suelos, pero no fueron afectados con la adición del abono verde. Las concentraciones más altas de micronutrientes en el lodo de depuradora que su contraparte el abono verde (cuadro 2) explica adecuadamente estos resultados.

Efecto del abono verde en la composición y el crecimiento de la planta en suelos adecuadamente encalados (pH 6-7).

El efecto de la aplicación del abono verde en el crecimiento y composición de la planta a pH neutro es observado en el cuadro 7.

En el Ultisol, el encalado aumentó la masa seca de la parte aérea considerablemente. El testigo del Ultisol encalado produjo 1,65 g/pote que es aproximadamente cinco veces más alto que la masa seca producida (0,3 g/pote) en el testigo del suelo ácido (cuadro 4). Además de tener una biomasa mayor, las plantas que crecieron en el Ultisol encalado adecuadamente fueron mucho más vigorosas y verdes que las plantas que crecieron en las condiciones de toxicidad de Al a pH bajo.

El efecto de la adición del abono verde en la masa seca y la concentración del P de las plantas que crecieron en el Ultisol neutro fueron mínimos. La masa seca aumentó de 1,65 g a 1,74 y 1,78 g cuando el abono verde fue adicionado al nivel de 0, 5 y 10 g/kg, respectivamente. Aunque la diferencia de biomasa entre el testigo y el nivel más alto de adición del abono verde fue estadísticamente significativa, el aumento fue muy pequeño. La concentración de P aumentó levemente de 0,13 a 0,14 y 0,15 % cuando los niveles respectivos de la aplicación del abono verde fue de 0, 5 y 10 g/kg. Estos aumentos no fueron estadísticamente significativos. La absorción relativamente constante del P sugiere que otros factores derivados de la enmienda mejoró el crecimiento de la planta.

Similar al P, las concentraciones de Ca, Mg, K, Mn, Fe, Cu y Zn prácticamente no fueron afectados por la adición del abono verde. Aunque el N de la planta no fue medido, la aparición de la deficiencia de N no era de esperar porque 140 mg N/Kg fue aplicado a todos los tratamientos como fertilización básica. Además la soja es una leguminosa que fija el N atmosférico y no se observó deficiencia de N en la cosecha. Es probable que el residuo orgánico haya liberado a la solución del suelo algún compuesto no identificado que es un estimulador de crecimiento. Estos compuestos, que actúan como las hormonas pueden aumentar la biomasa sin cambiar la composición nutricional de las plantas.

Cuadro 7. Efecto de la aplicación del abono verde *Vigna unguiculata* en el crecimiento y composición de la parte aérea de la soja en el Ultisol y Oxisol a pH neutro (6-7).*

Tratamiento	Masa seca (g)	Ca	Mg	K	P	Mn	Fe	Cu	Zn
		%				mg/kg			
ULTISOL									
Testigo+FB	1,65 b	0,65 a	0,31 a	2,74 a	0,13 a	71 a	110 a	12,7 a	31,7 b
Ab. verde 5 g/kg	1,74 ba	0,65 a	0,32 a	2,70 a	0,14 a	76 a	113 b	12,0 a	35,0 ba
Av. verde, 10 g/kg	1,78 a	0,62 a	0,33 a	2,88 a	0,15 a	77 a	180 b	13,7 a	38,0 a
P>F***	0,0723	0,8277	0,5559	0,6076	0,8178	0,3803	0,0120	0,7127	0,0327
OXISOL									
Testigo+FB	1,71 a	0,85 a	0,45 a	2,02 b	0,11 a	176 c	99,7 a	14 a	54 b
Ab. verde 5 g/kg	1,43 b	0,71 b	0,44 a	2,36 ba	0,12 a	202 b	85,3 ba	13 a	71 ba
Ab. verde 10 g/kg	1,29 b	0,69 b	0,43 a	2,71 a	0,13 a	234 c	67,0 b	15 a	77 a
P>F	0,0047	0,0067	0,9698	0,0938	0,1729	0,0004	0,012	0,7127	0,0644

* Las medias seguidas por las mismas letras no tienen diferencias significativas a $P \leq 0,05$ según el test LSD.

** FB=Fertilización básica

*** Probabilidad ($P \leq 0,05$) de que la F calculada sea mayor a la F tabulada.

En el Oxisol, el encalado también aumentó considerablemente la masa seca (comparar cuadro 4 y 7). Por ejemplo, la masa seca de las plantas que crecieron sobre el suelo encalado fue de 1,71 g que es aproximadamente 2 veces más que la masa seca (0,82 g) de las plantas que crecieron en el testigo del Oxisol ácido. Contrario al efecto de la cal agrícola, la adición sucesiva de 0, 5 y 10 g/kg del abono verde disminuyó la masa seca de 1,71 g a 1,43 y 1,29 g/plote, respectivamente. La concentración de P permaneció prácticamente inalterada. Aunque la concentración de Ca disminuyó con las adiciones sucesivas de la enmienda orgánica, no aparecieron síntomas de deficiencia de este elemento en la planta.

La aparición de deficiencia o toxicidad de Mg, Cu y Zn fue también improbable porque las concentraciones de estos elementos permanecieron prácticamente inalterados con la adición del abono verde.

La disminución en el rendimiento de la masa seca de la soja, aparentemente estuvo relacionado a una toxicidad de Mn y/o tal vez a una deficiencia de Fe. Las hojas jóvenes de las plantas que crecieron con 5 g/kg del abono verde presentaron algunas pecas marrones esporádicas (toxicidad de Mn) y leve clorosis (deficiencia de Fe). Las plantas que crecieron con 10 g/kg de abono verde ya presentaron numerosas pecas y puntos marrones en las hojas maduras y

clorosis más acentuados en las hojas más jóvenes. La concentración de Mn aumentó de 176 mg/kg a 202 y 234 mg/kg y la de Fe disminuyó de 99,7 mg/kg a 85,3 y 67 mg/kg cuando se agregaron respectivamente 0, 5 y 10 g/kg del abono verde.

Como la soja de la variedad Forrest es muy susceptible a la toxicidad de Mn (BROWN y JONES, 1977) dicha, toxicidad pudo haber ocurrido en esta variedad cuando la concentración de Mn en la parte aérea fue mayor a 176 mg/kg. Estos mismos autores ya observaron toxicidad de Mn en dicha variedad cuando la concentración de Mn en la parte aérea fue 58 mg/kg.

Efecto del abono verde en la composición del suelo adecuadamente encalado (pH 6-7)

El efecto del abono verde en la composición del suelo a pH neutro se observa en los cuadros 8 y 9, respectivamente.

En ambos suelos, el pH, la CE y el C de la solución del suelo aumentó significativamente con el agregado sucesivo de la enmienda orgánica. La adición del abono verde modificó levemente la concentración del Na soluble y del Cu y Zn extraído con el DTPA.

Cuadro 8: Efecto de la aplicación del abono verde *Vigna Unguiculata* en la composición de la solución del suelo y P extraíble en el Ultisol y Oxisol a pH neutro (6.7).*

Tratamientos	pH	Ce	C dS/m	Ca	Mg	K mg/L	Na	Mn	P Extrac. mg/kg
ULTISOL									
Testigo+FB	6.07 c	1.79 b	73 c	167 c	12.9 c	245 c	32 c	0.37 a	21.3 a
Ab. verde 5 g/kg	6.32 b	2.54 a	88 b	200 b	19.1 b	330 b	38 b	0.47 a	22.3 a
Ab. verde 10 g/kg	6.57 a	2.93 a	108 a	247 a	25.0 a	402 a	43 a	0.50 a	20.7 a
P>F***	0.0009	0.0117	0.0002	0.0010	0.0001	0.0001	0.0003	0.0746	0.7039
OXISOL									
Testigo+FB	6.27 c	2.33 c	63 c	536 c	65.1 c	177 c	56a	233c	45.7b
Ab. verde 5 g/kg	6.59 b	3.10 b	85 b	595 b	84.2 b	209 b	55a	673b	50.3a
Ab. verde 10 g/kg	6.83 a	3.43 a	101c	617 c	98.8 a	240 c	63a	12.80a	51.7a
P>F	0.0001	0.0001	0.0001	0.0003	0.0001	0.0001	0.2296	0.0001	0.0159

* Las medias seguidas por las mismas letras tienen diferencias significativas a $P \leq 0,05$ de acuerdo con el test LSD.

** FB=Fertilización básica.

*** Probabilidad ($P \leq 0,05$) de que la F calculada sea mayor a la F tabulada.

El nivel de Mn soluble y el Mn extraído con DTPA fueron considerablemente más altos en el Oxisol. En el Oxisol de Wahiawa, el Mn extraído con el DTPA aumentó de 2,33 a 6,73 y 12,8 mg/L con las aplicaciones respectivas de 0, 5 y 10 g/kg de abono verde. Asimismo, la adición de 10 g/kg del abono verde aumentó la concentración de Mn soluble a 0,5 mg/L. Los resultados indican que la biomasa de la parte aérea de la soja Forrest se reduciría considerablemente cuando la concentración del Mn soluble es mayor a 5 mg/L. MASCARENHAS et al., (1985), sin embargo, reportó que concentraciones bajas tal como 2 mg/Kg de Mn en la solución nutritiva ya fue tóxico para la soja Forrest. Los resultados también indican que la toxicidad de Mn aún puede ocurrir a pH alto en suelos manganíferos si algún residuo orgánico se agrega a estos suelos. Esto puede ser un problema potencial si el suelo es usado como vertedero de residuos. En Hawái por ejemplo, grandes cantidades de residuos no descompuestos de caña de azúcar y de piña son anualmente vertidas sobre estos suelos (ASGHAR y KANEHIRO, 1980).

El P extraído con NaHCO_3 no fue prácticamente afectado por las adiciones de dosis sucesivas de abono verde en el Ultisol. En el Oxisol, sin embargo, la adición de 10 g/kg del abono mencionado aumentó la concentración de P de 45,7 mg/kg a 51,7 mg/kg. Dado los bajos valores del rango de los niveles críticos (8 - 16 mg/kg) para el P extraíble por OLSEN et al. (1954), la concentración de P fue suficiente para un buen desarrollo de la planta en ambos suelos. La liberación

de 6 mg/kg del P extraíble derivado de los 10 g/kg del abono verde puede ser, sin embargo, importante si el abono es aplicado directamente a suelos no fertilizados previamente (estado natural). El Oxisol de Wahiawa, por ejemplo, en su estado natural contiene 5,5 mg/kg de P extraíble (cuadro 1) lo cual aumentaría a 11 mg/kg con la aplicación del abono verde con la dosis mencionada.

Cuadro 9. Efecto de la aplicación del abono verde *Vigna Unguiculata* en la concentración de Fe, Mn, Cu y Zn en el Ultisol y Oxisol a pH neutro (6-7).

Tratamiento	Fe	Mn	Cu	Zn
ULTISOL				
Testigo+FB	52 a	5.87 c	3.64 a	3.13 a
Ab. verde	43 b	7.50 b	3.97 a	3.23 a
Ab. verde	41 b	11.8 a	8.83 a	3.36 a
P>F***	0,0163	0,0003	0,3909	0,3857
OXISOL				
Testigo+FB	15.7 a	139 b	6.20 a	5.70 a
Ab. verde	15.3 a	205 a	5.80 a	5.73 a
Ab. verde	16.6 a	225 a	5.90 a	6.70 b
P>F	0,3075	0,0002	0,3516	0,3558

* Las medias seguidas por las mismas letras no tienen diferencias significativas a $P \leq 0,05$ según el test LSD.

** FB= Fertilización básica.

*** Probabilidad ($P \leq 0,05$) de que F calculada sea mayor a la F tabulada.

El abono verde aumentó la concentración de Ca, Mg y K



soluble en ambos suelos, aunque Ca y Mg soluble fueron considerablemente más altos en el Oxisol comparado al Ultisol. Esta diferencia probablemente derivó de la mejor fertilidad natural del Oxisol con respecto al Ultisol (cuadro 1). Aunque el Oxisol en su estado natural fue también más rico en K que el Ultisol natural, la aplicación de K derivado de la fertilización básica resultó en una concentración más alta de este elemento en el Ultisol.

El cuadro 10 muestra la cantidad (mg/kg) de Ca, Mg y K liberado en ambos suelos con la aplicación de 5 y 10 g/kg del abono verde. Por ejemplo, la adición de 10 g/kg del abono verde liberó 80 y 81 mg/kg de Ca soluble en el Ultisol y Oxisol, respectivamente. Dado el nivel crítico de Ca soluble como 10,8 mg/kg para suelos de Alabama, (USA) (ADAMS y MOORE, 1983) la aplicación de este 10 g/kg de abono verde sería más que suficiente para aliviar la deficiencia de Ca en estos suelos. Los resultados también indican que más del 50% del Ca (cuadro 10) fue mineralizado durante estos 2 meses del experimento.

Cuadro 10. Concentración de Ca, Mg y K (mg/kg) liberado de la aplicación del abono verde *Vigna unguiculata* en la solución del suelo del Ultisol y Oxisol a pH neutro (6 - 7).

Suelo	Ab. verde g/kg ¹	Ca ----- mg/kg	Mg ----- mg/kg	K ----- mg/kg
Ultisol	5	33	6.2	85
	10	80	12.1	157
Oxisol	5	59	19.1	33
	10	81	33.7	63

Con la adición de 10 g/kg del abono verde se liberó en el Ultisol y Oxisol 12,1 y 33,7 mg/kg de Mg, respectivamente. Los resultados indican que más del 90% del Mg fue mineralizado en el Oxisol y aproximadamente 32% en el Ultisol (cuadro 10).

Asimismo, la adición de 10 g/kg del abono verde liberó 157 y 63 mg/kg de K soluble en el Ultisol y Oxisol respectivamente. Menos del 50% del K presente en la enmienda se mineralizó en ambos suelos (cuadro 2). Los resultados indican que la adición del abono verde (*Vigna unguiculata*) a suelos encalados adecuadamente, aumenta significativamente la fertilidad del mismo. Por lo tanto, dicho abono es un buen fertilizante orgánico.

Efecto del abono verde sobre la composición y crecimiento de la planta en suelos sobre-encalados (pH 7,5-8).

Los efectos de la adición del abono verde sobre el crecimiento y la composición de la soja en suelos sobre-encalados se observan en el cuadro 11.

En el Ultisol de Paalooa, las adiciones sucesivas de 0, 5 y 10 g/kg del abono verde aumentaron significativamente las masas secas de 0,57 g a 0,72 y 1,11 g por pote. Las plantas que recibieron 10 g/kg de la enmienda orgánica tuvieron apariencia normal. Por el contrario, las plantas en el testigo fueron severamente cloróticas y achatadas; sugiriendo que alguna deficiencia nutricional ocurrió. La deficiencia de algún macronutriente, aparentemente es improbable ya que los mismos fueron adicionados con la fertilización básica y la concentración de Ca, Mg, K y P en el tejido, prácticamente se mantuvieron constantes.

Dado el nivel crítico de deficiencia de Mn, Cu y Zn en la hoja de la soja como 15, 4 y 10 mg/kg (de MOOY et al., 1973), respectivamente, los tres micronutrientes tuvieron niveles de suficiencia. Sin embargo, el incremento en la producción de biomasa estuvo fuertemente relacionado al aumento de la concentración de Fe en el tejido vegetal. La concentración de Fe en el tejido aumentó de 49,7 mg/kg en el suelo sin adición del abono verde a 64,7 y 82,7 mg/kg con las aplicaciones respectivas de 5 y 10 g/kg de dicho abono.

La concentración de Fe en el abono verde fue de 500 mg/kg (cuadro 2) y en caso de una mineralización total de este elemento se liberaría solamente 5 mg del mismo. Esta contribución no sería suficiente para explicar el incremento de 15 y 33 mg/kg de Fe en las plantas que crecieron en el testigo. El aumento en la absorción de Fe fue probablemente debido al complejamiento del Fe del suelo con ligandos orgánicos liberados por el abono verde.

El Fe⁺³ complejoado en forma orgánica puede ser absorbido por la membrana celular de las raíces (MARSCHNER, 1989) luego es reducido a Fe⁺² por un mecanismo turbo (NADPH) que poseen todas las plantas dicotiledoneas en las células epidérmicas de la raíz (BIENFAIT, 1988). El Fe⁺² complejoado resultante es luego trasladado a la parte aérea (BIENFAIT, 1988). Además es muy posible que las aplicaciones de la enmienda hayan aumentado la concentración de sideroforos (compuesto llamado desferri oxamina B) en el suelo. Los sideroforos fueron identificados como los mayores complejadores del Fe⁺³ (MARSCHNER, 1989). HASELWANDTER et al. (1988) reportó que algunos fertilizantes orgánicos tales como estiércol de gallina y el compost liberaron suficiente cantidad de sideroforos para aliviar la clorosis férrica en plantas. El efecto mejorador de otras enmiendas orgánicas, tal como el lodo residual de depuradoras en la nutrición de Fe de plantas de sorgos que crecieron sobre suelos calcáreos, también fueron reportados (McCASLIN et al., 1987; MATHERS et al., 1980).

Los resultados también indican que la soja Forrest es una variedad ineficiente para absorber Fe (BROWN y JONES, 1977) cuando se comparan la biomasa aérea de las plantas que crecieron en el testigo del suelo sobreencalado y el encalado adecuadamente (comparar cuadros 7 y 11).

Cuadro 11. Efecto de la aplicación del abono verde *Vigna unguiculata* en el crecimiento y composición de la parte aérea de la soja en el Ultisol y Oxisol a pH sobre-encalado (7,5 - 8).*

	Masa Seca (g)	Ca	Mg	K	P	Mn	Fe	Cu	Zn
Tratamiento		%				mg/kg			
ULTISOL									
Testigo+FB**	0,57 c	0,78 a	0,24 a	2,34 b	0,19 a	34 a	49,7c	8,33 a	18,7a
Ab. verde 5 g/kg	0,72 b	0,89 a	0,23 a	2,30 a	0,19 a	35 a	64,7b	9,50 a	23,3a
Ab. verde, 10 g/kg	1,11 a	0,89 a	0,27 a	2,78 a	0,19 a	46 a	83,7a	10,70a	22,3 a
P>F***	0,0002	0,1938	0,6662	0,0392	0,9832	0,2320	0,0003	0,1630	0,4767
OXISOL									
Testigo+FB	0,70 b	1,14 a	0,34 a	3,17 a	0,15 a	38,3a	52,0b	10,3a	25,0a
Ab. verde 5 g/kg	0,73 ba	1,04 ba	0,33 a	3,29 a	0,17 a	39,0a	57,0b	12,0a	24,0ba
Ab. verde 10 g/kg	0,88 a	0,97 b	0,31 a	3,56 a	0,19 a	54,0a	70,0a	11,8a	21,0b
P>F	0,0960	0,0362	0,6894	0,2615	0,3374	0,0990	0,0093	0,6864	0,0704

* Las medias seguidas por las mismas letras no tienen diferencias significativas a $P \leq 0,05$ según el test LSD.

** FB= Fertilización básica

*** Probabilidad ($P \leq 0,05$) de que la F calculada sea mayor que la F tabulada.

Por ejemplo, el testigo del suelo sobreencalado produjo 0,57 g de biomasa lo cual es 65,5% más bajo que la biomasa (1,65 g) producida en el suelo encalado adecuadamente

En el Oxisol sobre-encalado, los aumentos de la biomasa fueron también controlados por la disponibilidad de Fe. El rendimiento de la masa seca y la concentración de Fe en la planta aumentaron levemente con la adición de 5 g/kg del abono verde y aumentaron significativamente con el agregado de 10 g/kg del mismo abono con respecto al testigo.

El efecto mejorador de la nutrición de Fe fue mucho menos efectivo en el Oxisol comparado al Ultisol. Por ejemplo, agregando 10 g/kg del abono verde al Oxisol se aumentó la concentración de Fe en la planta solamente 18 mg/kg comparado a 33 mg/kg de incremento en el Ultisol. Por lo tanto se detectó clorosis férrica en las plantas que crecieron en todos los tratamientos. Tal vez el mecanismo de complejamiento del Fe no fue muy efectivo en el Oxisol. Además, el sobre-encalado en este suelo disminuyó la producción de biomasa en un 58% si se compara a la producción de dicha biomasa en los suelos encalados adecuadamente.

Efecto del abono verde en la composición del suelo a pH básico (pH 7,5 - 8)

El efecto del abono verde en la composición del suelo se

observa en los cuadros 12 y 13, respectivamente.

En ambos suelos el pH, la conductividad eléctrica (CE), el P extraíble y la concentración de C, Ca, Mg, K y Na soluble aumentaron con la adición sucesiva del abono verde. El comportamiento del C soluble y el fósforo extraíble fue por demás interesante. Ambos parámetros fueron más concentrados en los suelos sobre-encalados que en los suelos encalados adecuadamente.

El pH alcalino puede absorber mayor cantidad de materiales orgánicos y por lo tanto es de esperar aumento en la concentración del C soluble. Sin embargo no se encuentra una explicación por el aumento del P extraíble. Con el agregado del abono verde se extrajo considerablemente mayor cantidad de P en el suelo sobreencalado que en el encalado apropiadamente.

Aunque las adiciones del abono verde aumentaron significativamente la concentración de Fe en el tejido, el Fe extraído por DTPA permaneció casi constante en todos los tratamientos. Estos resultados señalan que el Fe extraído por este método no es un buen indicador de la disponibilidad del Fe. Dado el nivel crítico de deficiencia de Fe para suelos calcáreos como 4,5 mg/kg (LINDSAY y NORVELL, 1978) el nivel de Fe en ambos suelos fue suficiente. Sin embargo síntomas de deficiencia de este elemento ocurrieron en plantas que crecieron en ambos suelos.

Cuadro 12. Efecto de la aplicación del abono verde *Vigna unguiculata* en la composición de la solución del suelo y P extraíble en el Ultisol y Oxisol a pH alcalino (7,5 - 8).*

Tratamiento	Masa Seca (g)	Ca	Mg	K	P	Mn	Fe	Cu	Zn
		----- % -----				----- mg/kg -----			
ULTISOL									
Testigo+FB**	7.56 b	2.68 c	133 b	402 c	5.03 c	252 c	31 b	0.17 a	26.3 b
Ab. verde 5 g/kg	7.73 a	2.97 b	153 b	450 b	8.10 b	329 b	38 a	0.30 a	30.0 ba
Ab. verde 10 g/kg	7.82 a	3.34 a	207 a	487 c	10.90 c	393 a	39 a	0.40 a	34.3 a
P>F***	0,0023	0,0001	0,0037	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,2230	0,0421
OXISOL									
Testigo+FB	7.55 c	3.36 c	105 c	882 b	22 c	154 b	39.7c	0.50 a	61.0 b
Ab. verde 5 g/kg	7.75 b	3.97 b	127 b	966 a	34 b	188 ba	44.3 b	0.33 a	63.7 ba
Ab. verde 10 g/kg	7.87 a	4.47 a	150 a	967 a	54 a	226 a	50.8 a	0.60 a	65.3 a
P>F	0,0001	0,0001	0,0001	0,0072	0,0001	0,0108	0,0001	0,0076	0,0320

* Las medias seguidas por las mismas letras no tienen diferencias significativas a $P \leq 0,05$ de acuerdo con el test LSD.

** FB= Fertilización básica.

*** Probabilidad ($P \leq 0,05$) de que la F calculada sea mayor a la F tabulada

Cuadro 13. Efecto de la aplicación del abono verde *Vigna unguiculata* en la concentración de Fe, Mn, Cu y Zn en el Ultisol y Oxisol a pH alcalino (7,5 - 8).*

Tratamiento	Fe	Mn	Cu	Zn
	mg/kg			
ULTISOL				
Testigo+FB**	32 a	3.27 c	2.97 a	2.83 a
Lodo, 5 g/kg ⁻¹	32 a	4.07 b	2.85 a	2.90 a
Lodo, 10 g/kg ⁻¹	34 a	5.20 a	3.01 a	3.30 a
Pr>F***	0,5120	0,0001	0,6878	0,3808
OXISOL				
Testigo+FB	10.7 b	87 ba	4.9 b	5.90 a
Lodo, 5 g/kg ⁻¹	11, a b	83 ba	5.2 ba	5.84 a
Lodo, 10 g/kg ⁻¹	12,3 a	100 a	5.3 a	6.63 a
Pr>F	0,0110	0,0581	0,1098	0,1436

* Las medias seguidas por las mismas letras no tienen diferencias significativas a $P \leq 0,05$ según el test LSD.

** FB= Fertilización básica.

*** Probabilidad ($P \leq 0,05$) de que la F calculada sea mayor a la F tabulada.

CONCLUSIONES

En los suelos ácidos (pH 4,0 - 5,0)

- La fertilización básica y las enmiendas orgánicas (*Vigna unguiculata* y lodo de depuradora) fueron efectivos en reducir la toxicidad del Al.

- La fertilización básica disminuyó la toxicidad de Mn pero las enmiendas orgánicas la intensificaron.

En los suelos neutros (pH 6,0 - 7,0)

- El abono verde (*Vigna unguiculata*) aumentó la toxicidad de Mn en plantas cultivadas sobre el Oxisol, pero no produjo efectos adversos en el Ultisol.

- La aplicación del abono verde no produjo efectos considerables en la concentración de P en los suelos y en la planta.

- La aplicación del abono verde aumentó significativamente la concentración de Ca, Mg y K en la solución del suelo indicando que este material es un buen fertilizante orgánico.

En los suelos sobre-enclados (pH 7,5 - 8,0)

- El abono verde aumentó la concentración de Fe y la masa seca de la parte aérea de la planta en ambos suelos. La clorosis derivada de la deficiencia de Fe fue casi eliminada con la aplicación de 10 g/kg del abono en el Ultisol, pero no en el Oxisol. Tal vez un nivel de aplicación más elevado de dicho abono sería necesario para eliminar la deficiencia de Fe.

- El Fe extraído con el DTPA no refleja el efecto de la aplicación del abono verde.

LITERATURA CITADA

- ADAMS, F. 1966. Calcium deficiency as a causal agent of ammonium phosphate injury to cotton seedlings. *Soil Science Proceedings (USA)* 30: 485-488.
- ADAMS, F., C. BURMESTER, N.V. HUE, y F.L. LONG. 1980. A comparison of column-displacement and centrifuge methods for obtaining soil solutions. *Soil Science of America Journal (USA)* 44: 733-735.
- ADAMS, F., y B. L. MOORE. 1983. Chemical factors affecting root growth in subsoil horizons of coastal plain soils. *Soil Science of America Journal (USA)* 47: 99-102.
- ALVA, A. K., D. G. EDWARDS, D.G. ASHER, y F. P. BLAMEY. 1986. Effect of phosphorus/aluminum molar ratio and calcium concentration on plant response to aluminum toxicity. *Soil Science of America Journal (USA)* 50: 133-137.
- AMBERGER, A., R. GUSTER, y A WUNSCH. 1982. Iron chlorosis induced by high copper and manganese supply. *Journal of Plant Nutrition (USA)* 5: 715-720.
- AOBA, K. 1986. Excess manganese disorder in fruit trees. *Japan Agricultural Resource Quarterly (JAPON)* 20: 38-47.
- ASGHAR, M., y Y. KANEHIRO. 1980. Effects of sugar-cane trash and pineapple residue on soil pH, redox potential, extractable Al, Fe, and Mn. *Tropical Agriculture (Trinidad)* 57: 30-45.
- BARTLETT, J. B. 1988. Manganese redox reactions and organic interactions in soils. 59-73. *In* R.D. Graham et al. *Manganese in Soils and Plants*. Kluwer Academic Publ. Dordrecht, The Netherlands.
- BARTLETT, R. J., W. S. HARPER, y J. RANKIN. 1991. Predicting toxicity of reactive solution aluminum using kinetic speciation. 35-42. *In* R.J. Wright et al. (ed.) *Plant-soil interactions at low p H*. Kluwer Academic Publ. The Netherlands.
- BARTLETT, R. J., y D. S. ROSS. 1988. Colorimetric determination of oxidizable carbon in acid soil solutions. *Soil Science Society of America Journal (USA)* 42: 421-428.
- BESSHO, T. y L. C. BELL. 1992. Soil solid and solution phase changes and mung bean response during amelioration of aluminum toxicity with organic matter. *Plant Soil* 140 : 183-196.
- BIENFATT, H. F. 1988. Mechanisms in Fe-efficiency reactions of higher plants. *Journal of Plant Nutrition (USA)* 11: 605-629.
- BLAMEY, F. P. C., D. G. EDWARDS, C. J. ASHER. 1983. Effects of Aluminum, OH: Al end P: Al molar ratios, and ionic strength on soybean root elongation in solution culture. *Soil Science* 136: 197-207.
- BOHN, H., B. MC NEAL, y G. O CONNOR. 1985. *Soil Chemistry*. 2nd ed. John Wiley and sons Inc., New York, NY.
- BROWN, J. C., y W. E. JONES. 1977. Fitting Plants Nutritionally to soils. I. Soybeans. *Agron. Journal (USA)* 69: 399-404.
- BRUCE, R.C., L. A. WARRELL, D. G. EDWARDS, y L. C. BELL. 1988. Effects of aluminum and calcium in the soil solution of acid soils on root elongation of Glycine max cv. Forrest. *Australian Journal Soil Resources (AUSTRALIA)* 38: 319-338.
- CHAE, Y. M., y M. A. TABATABAI. 1986. *Journal of Environmental Quality (USA)* 15: 198-198.
- CHANEY, R. y P. GIORDANO. 1977. Soil for management of organic wastes and waste water. *American Society of Agronomy (USA)* Madison, WI.
- CHEN, Y., y T. AVIAD. 1990. Effects of humic substances on plant growth. 161-186. *In* Mc Carthy et al. (ed.) *Humic substances in Soil and Crop Sciences; selected readings*. Soil Science Society of American Journal (USA) Inc., Madison, WI.
- CLARKSON, D. T. 1984. Calcium transport between tissues and its distribution in the plants. *Plant, Cell and Environment* 7: 449-4576.
- DE MOOY, C. J., J. PESEK, y E. SPALDON. 1973. Mineral Nutrition. 267-352. *In* B.E. Caldwell (ed.) *Soybeans: Improvement, Production, and Uses*. American Society of Agronomy (USA) Madison, WI.
- FOX, R. L., N. V. HUE, R. C. JONES, y R. S. YOST. 1991. Plant-soil interactions associated with acid, weathered soils. 197-204. *In* R.J. Wright et al. (ed.) *Plant-soil interactions at low pH*. Kluwer Academic Publ. The Netherlands.
- FOY, C. D. 1992. Soil chemical factors limiting plant root growth. 97-149. *In* J.L Hatfield (ed.) *Advances in Soil Science*. Volume 19. Springer-Verlag, New York, N Y.

- FOY, C. D., A. L. FLEMMING, y W. H. ARMIGER. 1969. Aluminum tolerance of soybean varieties in relation to calcium nutrition. *Agron. J.* 61: 505-511.
- FOY, C. D., T. E. CARTER JR., J.A. DUKE, y T.E. DEVINE. 1993. Correlation of shoot and root growth and its role in selecting for aluminum tolerance in soybean. *Journal of Plant Nutrition* 16: 305-325.
- FUJIMOTO, C. K., y D. SHERAMN. 1948. Behavior of manganese in the soil and the manganese cycle. *Soil Science* 66: 131-145.
- GILKES, R. J., y R. M. MC KENZIE. 1988. Geochemistry and Mineralogy of Manganese in soils. 23-35. In R.D. Graham et al (ed.) *Manganese in Soils and Plants*. Kluwer Academic Publ. Dordrecht, The Netherlands.
- GOWLAND, P. 1981. Soil physics 461: Laboratory exercises. Department of Agronomy and Soil Science. University of Hawaii. Honolulu, HI.
- HASELWANDTER, K., R. KRISMER, H. HOLZMANN, y C. P. PATRICK. 1988. Hydroxamate siderophore content of organic fertilizers. *Journal of Plant Nutrition (USA)* 11: 959-967.
- HEM, J. D. 1964. Deposition and solution of manganese dioxides. US Geological Survey Water Supply Paper (USA) 1667-B
- HORST, W. J. 1988. The physiology of manganese toxicity. 175-188. In R.D. Graham et al. (ed.) *Manganese in Soils and plants*. Kluwer Academic Publ. Dordrecht, The Netherlands.
- HOYT, P. B., y R. C. TURNER. 1975. Effects of organic materials added to very acid soils on pH, aluminum, exchangeable NH_4 , and crop yields. *Soil Science* 119: 227-237.
- HUANG, R. H., R. S. YOST, y N. V. HUE. 1989. Assessing field inoculation with introduced and indigenous VA mycorrhizal inocula by crop growth and yield on soil cleared of tropical rain forest. Productivity in Farmers' fields. 252-258. North Carolina State University Raleigh, NC.
- HUE, N. V., y S. A. RANJITH. 1993. Sewage sludge in Hawaii: chemical composition and reactions with soils and plants. *Journal of water, air and soil Pollution*. (in press).
- HUE, N. V. 1991. Effects of organic acids/anions on P sorption and phytoavailability in soils with different mineralogy. *Soil Science* 152: 463-471.
- HUE, N. V., G. R. CRADDOCK, y F. ADAMS. 1986. Effect of organic acids on aluminum toxicity in subsoils. *Soil Science Society of America Journal (USA)* 50: 28-34.
- HUE, N. V. 1992. Correcting soil acidity of a highly weathered soil with chicken manure and sewage sludge. *Communications Soil Science and Plant Analysis* 23: 241-264.
- HUE, N. V. 1988. A possible mechanism for manganese phytotoxicity in Hawaii soils amended with a low-Mn sewage sludge. *Journal of Environment Quality (USA)* 17: 473-479.
- HUE, N. V. y I. AMIEN. 1989. Aluminum detoxification with green manure. *Communications. Soil Science and Plant Analysis* 20: 1499-1511.
- HUTCHINSON, T. C., L. BOZIC, y . MUÑOZ-VEGA. 1986. Responses of five species of conifer seedlings to aluminum stress. *Journal of Water, Air and Soil Pollution* 31: 367-375.
- JACKSON, M. L., T. W. M. LEVELT, J. K. SYERS, R. W. REX, R. N. CLAYTON, G. D. SHERMAN, y. UEHARA. 1971. Geomorphological relationship of tropospherically derived quartz in the soils of the Hawaiian islands. *Soil Science Society of American Proceedings (USA)* 35: 515-525.
- KERVEN, G. L., D. G. EDWARDS, C. J. ASHER, P. S. HALLMAN, y S. KOKOT. 1989. Aluminum determination in soil solution. II. Short-term colorimetric procedures for the measurement of inorganic aluminum in the presence of organic acids ligands. *Australian Journal Soil Resources (AUSTRALIA)* 27: 91-102.
- LINDSAY, W. L., y W. A. NORVELL. 1978. Development of a DTPA test for Zinc, Iron, Manganese, and Copper. *Soil Science Society of America Journal (USA)* 42: 421-428.
- LONERAGAN, J. F. 1988. Distribution and movement of manganese in plants. 113-124. In R.D. Graham et al. (ed.) *Manganese in soils and plants*. Kluwer Academic Publ. Dordrecht, The Netherlands.
- LU, Z. y N. V. HUE. 1990. Correcting soil acidity using crop residues. *Agron. Abstr.* p. 273. American Society of Agronomy Inc. (USA) Madison, WI.
- MARSCHNER, H. 1989. Mineral nutrition of higher plants. Academic Press. Northern Ireland.

- MASCARENHAS, H. A. A., M. A. C. DE MIRANDA, y E.A. BULISANI. 1985. Soybean tolerance to manganese in the tropics. 313-318. *In* S. Shanmugasundaram et al. (ed.) Soybean in Tropical and Subtropical Cropping Systems, Shanna Taiwan Asian Veg. Res. Div. Center.
- MATHERS, A. C., J. D. THOMAS, B.A. STEWARD, y J. E. HERRING. 1980. Manure and inorganic fertilizer effects on sorghum and sunflower growth in Fe-deficient soil. *Agronomy Journal*. 72 : 1025-1029.
- MATTHEWS, B.W., y R.E. JOOST. 1989. Use of sulfate salts to reduce subsoil aluminum toxicity: a review. *Journal Hawaii Pacific Agriculture (USA)* 2: 24-30.
- MC CASLIN, B.D., J. G. DAVIS, L. CIHACEK, y L.A. SCHLUTER. 1987. Sorghum yield and soil analysis from sludge amended calcareous Fe-deficient soil. *Agronomy Journal (USA)* 79: 204-209.
- MIYASAKA, S. y C. WEBSTER. 1993. Differential response of two taro cultivars to aluminum: I. Plant growth. *Journal of Plant Nutrition (USA)* (in press).
- OLSEN, S.R., G.V. COLE, F.S. WATANABE, y L.A. DEAN. 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. U.S. Dep. of Agric. Cir. 939. U.S. Government Printing Office. Washington, DC.
- OLSEN, S.R., y L.E. SOMMERS. 1982. Phosphorus. 403-430. *In* A.L. Page et al. (ed.) Methods of soil analysis, Part 2: chemical and microbiological properties. 2nd. ed. Soil Science Society of American Journal (USA) Inc., Madison, WI.
- RENGEL, Z., y D.C. ELLIOT. 1992. Mechanism of aluminum inhibition on net Ca^{+2} uptake by amaranthus protoplasts. *Plant physiology* 98: 632-638.
- RHUE, R.D. 1979. Differential Aluminum Tolerance in crop plants. 61-80. *In* H. Mussell and R.C. Staples (ed.) Stress physiology on crop plants. John Wiley and sons, NY.
- RITCHIE, G.S.P. 1989. The chemical behaviour of aluminum, hydrogen, and manganese in acid soils. 1-60. *In* A.D. Robson (ed.) Soil acidity and plant growth. Academy Press. Sidney, Australia.
- SAS Institute, Inc. 1985. SAS user's guide: statistics, version 5 ed. SAS Institute, Inc., Cary, NC.
- SHUMAN, L.M., y R.R. DUNCAN. 1990. Soil exchangeable cations and Aluminum measured by ammonium chloride, potassium chloride, and ammonium acetate. *Communications Soil Science and Plant analysis* 21: 1217-1228.
- SING-YADVINDER, B.S., M.S. MASKINA, y O.P. MEELU. Effect of organic manures, crop residues and green manure (*Sesbania aculeata*) on nitrogen and phosphorus transformations in a sandy loam at field capacity and under waterlogged conditions. *Biology, Fertility and Soils (INDIA)* 6: 183-187.
- THOMAS, G.W. 1982. Exchangeable cations. 159-165. *In* A.L. Page et al. (ed.) Methods of soil analysis, part 2: chemical and microbiological properties. 2nd. ed. Soil Science Society of America Journal (USA) Inc., Madison, WI.
- TIAN, G., B.T. KANG, y L. BRUSSAARD. 1992. Effects of chemical composition on N, Ca, and Mg release during incubation of leaves from selected agroforestry and fallow plant species. *Biogeochemistry* 16: 103-119.
- UEHARA, G., y G. GILLMAN. 1981. The mineralogy, chemistry, and physics of tropical soils with variable charge clays. Westview tropical Agriculture series No. 4, Westview press, Boulder, CO.
- WILSON, D.O. 1984. Determination of aluminum in plant tissue digests using a catechol violet colorimetric method. *Commun. Soil Science and Plant Analysis* 15: 1269-1279.
- VEGA, S., M.G. CALISAY, y N.V. HUE. 1992. Manganese toxicity in Cowpea as affected by soil pH and sewage sludge amendments. *Journal of Plant Nutrition (USA)* 15: 219-231.