

EFFECTO DE LA ADICIÓN DE RESIDUOS DE COSECHA Y DE UN HONGO MICORRIZÓGENO SOBRE EL CRECIMIENTO DE TRIGO Y PARÁMETROS QUÍMICOS Y BIOLÓGICOS DE UN ANDISOL

Effect of addition of crop residues and mycorrhizal fungi on wheat growth and the chemical and biological parameters of an Andisol

Yonathan Redel¹, Rosa Rubio¹ y Fernando Borie^{1*}

ABSTRACT

Among the diverse agrotechnological practices applicable to low-input investment agricultural systems, the additions of plant residues to soils as a nutrient source, and the appropriate management of arbuscular mycorrhizal (MA) symbiosis, are being worldwide considered. Therefore, the main objective of this study was to test the application effect of two crop residues and mycorrhizal inoculation on wheat (*Triticum aestivum* L.) plants growing in an acidic soil (Typic Dstrandeps) and some chemical and biological soil parameters. Both, lupine (*Lupinus albus* L.) and wheat residues were added to soil at equivalent rates of 6 Mg ha⁻¹, and wheat cv. Otto was sown above, with and without the inoculation of a native strain of exogenous MA fungi (*Glomus etunicatum* CH 110). Organic amendments significantly increased dry matter yield by 50-60% and mineral acquisition by wheat plants near up to 100%. The wheat residues increased soil pH and P availability, while the lupine residues enhanced MA colonization from 49 to 61%. The inoculation of an exogenous MA fungus decreased the mineral acquisition, especially Al, which might contribute to reducing toxicity problems in acidic soils.

Key words: crop residues, arbuscular mycorrhiza, mineral acquisition, acidic soil

RESUMEN

Entre las diversas prácticas agrotecnológicas aplicables a sistemas agrícolas de baja inversión, se consideran la adición de residuos de plantas como una fuente de nutrientes, y el manejo adecuado de la simbiosis micorriza arbuscular (MA). Por ello, el objetivo general de este estudio fue determinar el efecto de la aplicación de residuos de cosecha e inoculación micorrízica sobre el desarrollo y nutrición mineral de plantas de trigo (*Triticum aestivum* L.) creciendo en un suelo ácido (Typic Dstrandeps) y algunos parámetros químicos y biológicos del suelo. Residuos de lupino (*Lupinus albus* L.) y de trigo se adicionaron al suelo a una dosis equivalente a 6 Mg ha⁻¹, sobre el cual se sembró trigo cv. Otto, con y sin inoculación de una cepa nativa de un hongo MA exógeno (*Glomus etunicatum* CH 110). La adición de residuos orgánicos incrementaron significativamente el rendimiento de materia seca en un 50-60% y la adquisición mineral de las plantas de trigo hasta en un 100%. Los residuos de trigo incrementaron el pH del suelo y la disponibilidad de P, mientras que los residuos de lupino incrementaron la colonización de hongos MA de 49 a 61%. La inoculación de un hongo MA exógeno disminuyó la adquisición de minerales, especialmente Al, lo que puede contribuir a la disminución de problemas de toxicidad en suelos ácidos.

Palabras clave: residuos de cosecha, micorriza arbuscular, adquisición de minerales, suelos ácidos

¹ Universidad de La Frontera, Facultad de Ciencias Agropecuarias y Forestales, Casilla 54-D, Temuco, Chile. E-mail: fborie@ufro.cl

*Autor para correspondencia.

Recibido: 16 de mayo de 2005.

Aceptado: 25 de octubre de 2005.

INTRODUCCIÓN

Los residuos de cosecha constituyen, generalmente, un inconveniente para el establecimiento del cultivo siguiente en una rotación, por lo que su destino más frecuente es la quema, tanto en sistemas de labranza convencional como en labranza reducida y cero labranza. Esta práctica, si bien presenta la ventaja de la remoción rápida del residuo, posee el inconveniente de incrementar la erosión eólica e hídrica al dejar el suelo descubierto, lo que a su vez reduce la infiltración, el almacenamiento de agua y provoca el encostramiento superficial (Mills y Fey, 2003).

La aplicación de residuos al suelo conlleva una serie de beneficios físicos, biológicos y nutritivos, como mejorar su estructura y capacidad de infiltración (Roose y Barthes, 2001), producir un incremento en los organismos del suelo por la incorporación de materia orgánica como fuente energética (Vetterlein y Hüttl, 1999), aportar nutrientes liberando nitrógeno, potasio, calcio y magnesio, entre otros (Tang y Yu, 1999), reducir la erosión hídrica y eólica y disminuir el contenido de aluminio potencialmente fitotóxico (Vetterlein y Hüttl, 1999).

La descomposición de los residuos es producida por sucesivas comunidades de organismos, comenzando con la acción de la mesofauna sobre materiales de mayor tamaño y más fácilmente degradables, como celulosa y proteínas. La velocidad de descomposición de los residuos se verá afectada por factores como la calidad del material que se adiciona (Kwabiah *et al.*, 2003), pH, temperatura (Magid *et al.*, 2004), precipitaciones y evapotranspiración (Ortega *et al.*, 2002) y la relación C:N de los residuos de cosecha, consecuencia de la cantidad de nitrógeno disponible para los microorganismos (Bertol *et al.*, 2004).

La adición de residuos al suelo promueve el desarrollo de todo tipo de microorganismos, sean éstos de vida libre o simbióticos. Entre estos últimos destacan las micorrizas (Schreiner y Bethlenfalvay, 2003), las que se ven favorecidas como consecuencia de un mejoramiento de las condiciones en las cuales se va a desarrollar la simbiosis (Kabir *et al.*, 1997). Las micorrizas arbusculares (MA) son asociaciones simbióticas formadas entre determinados hongos del phylum Glomeromycota, clase Glomeromycetes (Schüßler, 2004) y las raíces de la

mayor parte de las plantas vasculares. Ellas provienen de una unión íntima entre el medio edáfico y el sistema funcional absorbente de la planta, a modo de sistema radical complementario (Miyasaka y Habte, 2001).

Entre los efectos beneficiosos de las micorrizas, destacan los aspectos nutricionales, tales como la nutrición mineral de fósforo, nitrógeno, azufre, calcio, y potasio, entre otros, las cuales se ven incrementadas debido a que las hifas aumentan el área de absorción radical (Goh *et al.*, 1997; Barea, 1998) y los efectos de resistencia de la planta frente a estrés bióticos y abióticos como son los patógenos radicales, déficit hídrico, salino y fitotoxicidad por aluminio (Borie y Rubio, 1999) y manganeso (Mendoza y Borie, 1998). Además, las MA poseen un rol estabilizador de suelos, de tipo físico, debido a su abundante micelio que es capaz de agregar partículas de suelo (Barea, 1998) y de tipo químico, por la producción de glomalina por parte de las hifas del hongo, una glicoproteína con capacidad cementante recientemente reportada en la literatura (Wright y Upadhyaya, 1998; Borie *et al.*, 2000; Rillig y Steinberg, 2002; Borie *et al.*, 2006).

La aplicación de restos de cosecha en suelos ácidos adquiere especial importancia por la acción del residuo que disminuye la actividad fitotóxica del aluminio, al igual que lo hace la asociación con hongos micorrizógenos por parte de variedades de cereales tolerantes (Borie y Rubio, 1999). En este contexto aparece relevante el trabajo de Soedarjo y Habte (1983), en el que se destaca que en un suelo ácido, con y sin cal, adicionado de hojas provenientes de una leguminosa arbórea (*Leucaena leucocephala*) como abono verde mezclada con el suelo, la inoculación con hongos MA fue crucial para la sobrevivencia de la planta hospedera, ya que las plantas no inoculadas no prosperaron, siendo la efectividad de la micorrización la misma para la materia orgánica que para la enmienda calcárea, y superior a las no adicionadas con cal ni materia orgánica.

Debido a que el hongo MA es un simbiote obligado que no crece en un medio axénico, la inoculación es útil en agricultura sólo para aquellos cultivos que poseen previamente una etapa de almácigo o vivero, de modo que son trasladados micorrizados al sitio definitivo (Rubio *et al.*, 1990). Sin embargo, para la agricultura extensiva, mejorar las condiciones de manejo que favorezcan la permanencia al

máximo de propágulos de hongos MA, sean éstos esporas, micelio o raíz colonizada, evidentemente traerá beneficios al cultivo siguiente en un sistema de rotación (Miyasaka y Habte, 2001).

El objetivo de este trabajo consistió en comparar, en condiciones de invernadero, los efectos de la adición de residuos de cosecha en: a) el crecimiento del trigo, b) algunas características químicas y biológicas del suelo, c) los propágulos de hongos MA dejados en el suelo por el cultivo, y d) la nutrición mineral de las plantas de trigo creciendo en un suelo ácido con y sin inoculación de un hongo MA exógeno.

MATERIALES Y MÉTODOS

El ensayo se realizó en los laboratorios e invernaderos del Departamento de Ciencias Químicas de la Universidad de La Frontera, Temuco, Chile, desde junio de 1999 hasta junio de 2000. El suelo utilizado en los ensayos (Cuadro 1) correspondió a un Andisol de la serie Vilcún (Typic Dystrandep), el cual se tamizó a 3 mm, eliminándose la fracción correspondiente a macroagregados. Al suelo se agregaron 2 g de residuos por maceta, equivalentes a 3 g kg⁻¹ suelo. El residuo de trigo (*Triticum aestivum* L.) consistió en hojas y capotillo y el de lupino (*Lupinus albus* L.) se obtuvo a partir de hojas secas de lupino blanco. Dichos residuos (Cuadro 2) se molieron finamente y se agregaron en 150 g de

Cuadro 1. Características químicas del suelo serie Vilcún (Typic Dystrandeps).

Table 1. Chemical characteristics of the Vilcun series soil (Typic Dystrandeps).

Variable	Contenido
P disponible, µg g ⁻¹	4
P total, µg g ⁻¹	2540
P orgánico, µg g ⁻¹	1480
K, µg g ⁻¹	274
pH H ₂ O	5,48
Materia orgánica, %	18
K, meq 100 g ⁻¹	0,70
Na, meq 100 g ⁻¹	0,07
Ca, meq 100 g ⁻¹	9,33
Mg, meq 100 g ⁻¹	1,23
Al, meq 100 g ⁻¹	0,07
Bases, meq 100 g ⁻¹	11,33
CICE, meq 100 g ⁻¹	11,40
Saturación Al, %	0,61

CICE: Capacidad de intercambio catiónico efectivo

suelo mezclados homogéneamente disponiéndose en una capa en la parte superior de la maceta. La cantidad total de suelo agregada a cada maceta fue de 650 g.

En la siembra se emplearon semillas de trigo cv. Otto, esterilizadas previamente con NaOCl 70 mM por 5 min y lavadas exhaustivamente con agua para eliminar los restos de cloro. Después de humectarlas durante 24 h en placas Petri para su pregerminación, se sembraron tres semillas por maceta, dejando posteriormente dos plantas por maceta. En el ensayo se evaluó tanto el efecto de la adición de residuos en un suelo con su micorriza nativa (Mn) como con Mn más la adición de 50 g de inóculo (Mn + Ge) de *Glomus etunicatum* CH 110 (Morton y Bentivenga, International Culture Collection of Vesicular Arbuscular Mycorrhizal Fungi INVAM, Morgantown, USA). Este inóculo demostró ser efectivo en un estudio previo realizado en un cultivo de cebada (*Hordeum vulgare* L.) en suelo ácido (Borie y Rubio, 1999).

El ensayo se efectuó en condiciones de invernadero con una temperatura de 18 ± 2°C. La fertilización fosfatada se efectuó ocho días después de la siembra en dosis de 177 mg Ca(H₂PO₄)₂ maceta⁻¹, equivalente a 100 kg P ha⁻¹. El N se aplicó en forma de salitre potásico (KNO₃) disuelto en agua en dosis total de 720 mg maceta⁻¹, equivalente a 200 kg N ha⁻¹ repartidas en dos parcialidades. La primera de ellas (30%) se aplicó 12 días después de la siembra, y la segunda a los 40 días al inicio de macolla (Estado

Cuadro 2. Composición química de los residuos de lupino y trigo.

Table 2. Chemical composition of the lupine and wheat residues.

Variable	Lupino ¹	Trigo ²
C, %	41	42
N, %	1,72	0,94
C/N	24	44
P, µg g ⁻¹	594	1527
Zn, µg g ⁻¹	144,3	138,3
Mn, µg g ⁻¹	3423	31,5
Cu, µg g ⁻¹	20,6	16,2
Al, µg g ⁻¹	565	235,3
Ca, µg g ⁻¹	6588	1108
Mg, µg g ⁻¹	2012	972
K, µg g ⁻¹	5860	5880

¹ hojas; ² hojas y capotillo.

21, Zadoks *et al.*, 1974). Cada 14 días se aplicaron 10 mL de una solución nutritiva (Johnson *et al.*, 1996) exenta de P. Las plantas se regaron periódicamente con agua potable y se controló manualmente la emergencia de cualquier tipo de maleza. El último riego se efectuó seis días antes de la cosecha. Las plantas se cosecharon en el estado de grano lechoso (Estado 73, Zadoks *et al.*, 1974). El período de crecimiento comprendió desde el 6 de junio al 15 de noviembre (23 semanas).

Una vez cortado el material vegetal, se determinó separadamente el peso seco aéreo y radical. El porcentaje de colonización por hongos micorrizógenos se realizó sobre trozos de raíz fresca, de acuerdo con la metodología de Phillips y Hayman (1970) y observación bajo lupa (Tennant, 1975). En el suelo proveniente de los tratamientos con y sin inoculación se determinó el número de esporas de hongos MA, las que se separaron de acuerdo a la técnica de gradiente de sacarosa (Sieverding, 1991). En el suelo se determinó pH en agua en relación 1:2,5; P disponible de acuerdo a la extracción con solución de NaHCO_3 pH 8,5 (Olsen y Sommers, 1982); la actividad fosfática de acuerdo a Rubio *et al.* (1990) basada en la cuantificación del p-nitrofenol liberado por la acción de enzimas del suelo sobre el p-nitrofenilfosfato usado como sustrato. Para el análisis foliar, la parte aérea se molió y calcinó a 550°C y las cenizas fueron digeridas con una mezcla ácida y el P se cuantificó por espectrofotometría molecular; calcio (Ca), magnesio

(Mg), potasio (K), aluminio (Al), manganeso (Mn), cobre (Cu) y zinc (Zn) se determinaron mediante espectrofotometría de absorción atómica. El contenido mineral se calculó como producto del peso seco aéreo y concentración foliar de cada maceta.

El diseño experimental fue completamente al azar, con seis tratamientos y cuatro repeticiones, teniendo por tratamientos la combinación de la inoculación (inoculado o no) con el tipo de residuo (trigo o lupino) y se mantuvo un control sin residuo. En el tratamiento estadístico de los datos se verificó normalidad y posteriormente, mediante transformación arcoseno, del cual se realizó un análisis de varianza y un análisis factorial 3x2 usando los procedimientos de ANDEVA del programa SAS (SAS Institute, 1990). Se determinó significancia estadística a $P \leq 0,05$ y las medias se compararon por la prueba de rango múltiple de Duncan.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La aplicación de residuos de cultivos, tanto de lupino como de trigo, incrementaron la biomasa aérea de las plantas de trigo, tanto en un suelo con micorriza nativa como en suelo inoculado, siendo mayor su efecto en el suelo no inoculado, en el que se observaron incrementos significativos entre 50-60% del rendimiento de materia seca (Figura 1A) para ambos residuos. No obstante, el efecto de un incremento significativo sobre el peso de la raíz se

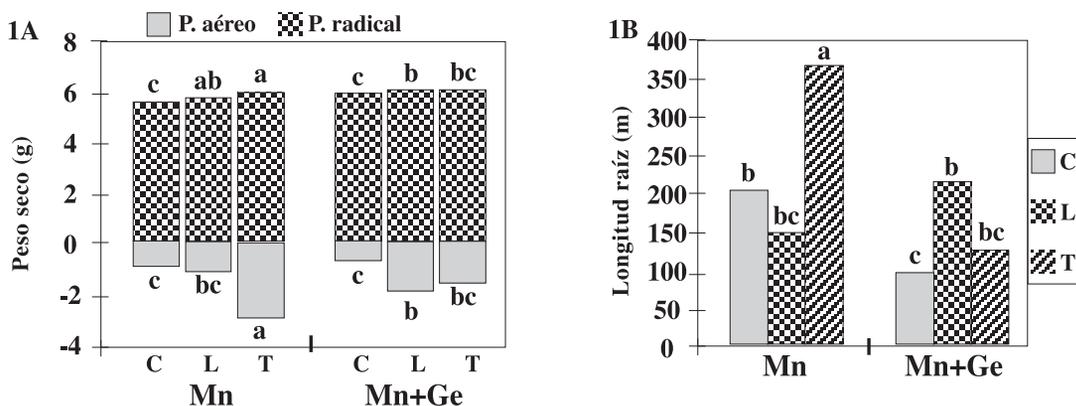


Figura 1. Efecto de la adición de residuos (C: testigo; L: lupino; T: trigo) en el peso seco de trigo (1A) y longitud total de raíces (1B) en un suelo natural (Mn) e inoculado con *Glomus etunicatum* (Mn + Ge).

Figure 1. Effect of the residues addition (C: control; L: lupine; T: wheat) on wheat dry matter (1A) and total root length (1B) in a natural (Mn) or inoculated soil with *Glomus etunicatum*

observó solamente con la adición de residuo de trigo en el suelo con su microflora nativa. Por el contrario, en suelo inoculado con *G. etunicatum* exógeno si bien se observó un incremento en el rendimiento, éste fue significativamente menor que en el suelo natural (Figura 1A y Cuadro 3). Lo anterior podría estar indicando que en suelos inoculados, el hongo exógeno estaría consumiendo más fotosintato que el hongo nativo en suelos sin inocular, lo que conllevaría a un incremento menor en el crecimiento en comparación con los hongos MA nativos, o bien que estos últimos serían más eficientes. El peso de la raíz se relacionó directamente con la longitud de la raíz ($r^2 = 0,75$), observándose una mayor longitud con la adición del residuo de trigo (Figura 1B).

Aunque el incremento del potencial de inóculo MA obtenido al inocular el suelo con *G. etunicatum* no incidió en un incremento en el rendimiento, se obtuvieron diferencias con los parámetros del suelo. Así, los valores de pH, P-Olsen y fosfatasa ácida fueron significativamente mayores en el suelo inoculado que sin inocular (Cuadro 3) y en ambos tipos de suelos, la respuesta fue mayor con la adición de residuos de trigo que de lupino, a excepción de la fosfatasa ácida (Figura 2). Los mayores valores observados se deben principalmente al efecto directo de la inoculación por el hongo MA y secundariamente por la adición de residuos.

La información en la literatura es contradictoria en relación al efecto de los residuos sobre el creci-

miento y nutrición de las plantas cultivadas en suelos ácidos, basado en la disponibilidad de nutrientes, lo que ha sido relacionado con la capacidad de incrementar el pH (Noble *et al.*, 1996; Tang y Yu, 1999; Tang *et al.*, 1999). Además, se ha sugerido que este efecto está correlacionado con la concentración del exceso de cationes y nitrógeno de la planta (Tang y Yu, 1999). Esto se hace evidente cuando los residuos de lupino con mayor contenido de N y cationes se comparan con los de paja de trigo, esperándose que lupino pudiera inducir un mayor incremento en el pH (Tang y Yu, 1999); sin embargo, esto no se observó en este estudio. Las razones para la menor efectividad del residuo de lupino para incrementar el pH en comparación con paja de trigo, no pueden ser totalmente dilucidadas con los datos obtenidos en este experimento. No obstante pudiera deberse a descomposición y mineralización más acelerada de la leguminosa (Vidal *et al.*, 2002), debido a una mejor relación C/N (Cuadro 2) que el cereal, generando un descenso en el pH. Lo anterior ha sido sugerido por Pocknee y Summer (1997), quienes al adicionar residuos al suelo encontraron que éstos produjeron NH_4^+ . La única observación consistente fue que las plantas que crecieron en suelo adicionado con residuos de lupino, tuvieron un nivel significativamente mayor de colonización micorrícica que en aquél sin adición de residuos, o que crecieron en un suelo con adición de paja de trigo. Por otra parte, se podría asumir que el incremento en el pH del suelo adicionado con residuos de trigo afectó el contenido mineral de las plantas que crecieron sobre este sustrato, mientras

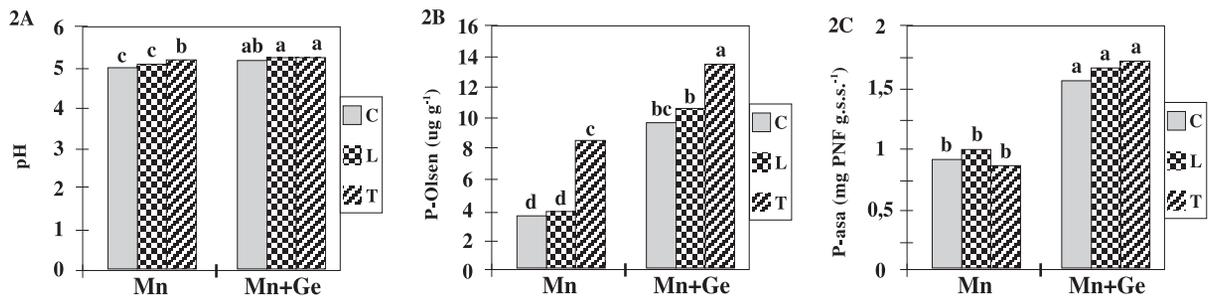


Figura 2. Efecto de la adición de residuos (C: testigo; L: lupino; T: trigo) en el pH (2A), P-Olsen (2B), y actividad fosfatasa ácida (2C) en un suelo natural (Mn) e inoculado con *Glomus etunicatum* (Mn + Ge). PNF: paranitrofenol.

Figure 2. Effect of the residues addition (C: control; L: lupine; T: wheat) on soil pH (2A), P-Olsen (2B), and acid phosphatase activity (2C) in a natural (Mn) or inoculated soil with *Glomus etunicatum* (Mn + Ge). PNF: paranitrophenol.

Cuadro 3. Grado de significancia de las diferencias obtenidas por análisis factorial con la inoculación de *Glomus etunicatum*.

Table 3. Significance degree of the differences obtained by factorial analysis with *Glomus etunicatum* inoculation.

Variable	Significancia
Peso aéreo	**
Peso radical	N.S.
Longitud radical	**
pH	***
P-Olsen	***
Actividad fosfatasa	***
Longitud de raíz colonizada	*
Nº esporas	*

Elementos	Concentración	Contenido
P	***	***
K	***	N.S.
Ca	***	***
Mg	**	*
Zn	***	***
Mn	***	***
Cu	**	***
Al	***	***

N.S.: no significativo

*, **, *** significativo a $P \leq 0,05$; $0,01$ y $0,001$, respectivamente.

que el efecto de la aplicación de material de lupino se debe a una mayor actividad de la simbiosis MA. La introducción de *G. etunicatum* permitió una mayor efectividad en el aumento en el pH debida a la mejor micorrización (Borie y Rubio, 1999).

La adición de residuos produjo efectos diferentes de acuerdo a la inoculación con hongos MA. Así, en el suelo con micorriza nativa (Mn) la adición de residuos produjo un descenso en el número de esporas de MA (Figura 3). Sin embargo, la aplicación de residuos de lupino promovió la colonización por MA. La inoculación con hongos exógenos afectó negativamente la longitud de raíz colonizada y la colonización, pero en conjunto con la adición de residuos de trigo incrementó significativamente la esporulación.

La inoculación con *G. etunicatum* probablemente produjo una competencia por sustrato con los hongos naturales, que se manifestó en una disminución en el porcentaje de colonización y en un menor crecimiento aéreo y radical. En la literatura se han reportado competencias entre hongos MA con ectomicorrizas (Dos Santos *et al.*, 2001) por nutrientes

en el suelo, o con otros microorganismos y/o fauna del suelo (Schreiner y Bethlenfalvay, 2003), que traen como consecuencia una reducción en el número de hifas. La adición de residuos de trigo en conjunto con la inoculación produjo un aumento de 4 a 5 veces en el número de esporas. El trigo, al ser un cultivo micotrófico, favoreció la producción de propágulos, entre ellos esporas. La razón de que la inoculación aumentara la esporulación puede deberse a que la micorrización por *G. etunicatum* es más dependiente del hospedero que la formación de la simbiosis con los hongos nativos presentes en el suelo (Klironomos, 2003).

En las Figuras 4 y 5 se puede observar que la adición de residuos promovió, en general, la concentración y el contenido foliar de elementos. El residuo de lupino incrementó la concentración de Ca, Zn, Cu, Mn y Al y el contenido de K, Ca, Mg, Zn, Cu, Mn, y Al, mientras que el de trigo aumentó la concentración de P, Al y Cu y el contenido de todos los elementos. La inoculación produjo un descenso significativo en la concentración de P, Ca, Cu, Zn, Mn y Al y el contenido de todos los elementos, excepto K (Cuadro 3).

El ensayo en macetas evidencia algunos efectos netos del material adicionado en la adquisición de nutrientes. Para evaluar el efecto de algún tratamiento particular en la adquisición mineral por la planta, se acepta que el total de los elementos minerales es un parámetro útil, cuando se tienen en consideración los efectos bien balanceados en la adquisición mineral en el tejido de la planta y producción de biomasa (Jarrel y Beverley, 1981). Efectivamente, el contenido mineral de la parte aérea permitió identificar efectos benéficos de la aplicación de residuos en promover una mayor absorción de nutrientes, no solamente de P, K, Cu y Zn, sino también de Ca y Mg. En reportes previos se sostiene que la mayoría de los efectos benéficos de la aplicación de residuos orgánicos, incluyendo residuos de cosecha a suelos ácidos, han sido atribuidos mayormente al incremento de cationes intercambiables, como Ca, Mg y K (Tang y Yu, 1999), o al incremento de P disponible (Kwabiah *et al.*, 2003). El beneficio obtenido en suelos adicionados con residuos, pareciera ser por aumento en P disponible, mayor pH y desarrollo de la simbiosis, los que pueden contribuir de alguna forma a la adquisición de minerales por la planta, como ha quedado demostrado en un trabajo reciente por Borie *et al.*

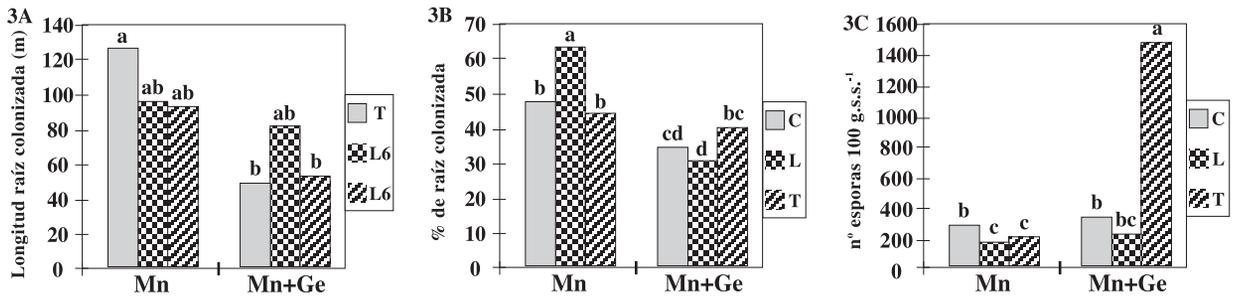


Figura 3. Efecto de la adición de residuos (C: testigo; L: lupino; T: trigo) sobre los propágulos micorrícicos en un suelo natural (Mn) e inoculado con *Glomus etunicatum* (Mn + Ge).

Figure 3. Effect of the residue addition (C: control; L: lupine; T: wheat) on mycorrhizal propagules in a natural (Mn) or inoculated soil with *Glomus etunicatum* (Mn + Ge).

(2002). La menor adquisición de P en suelos inoculados se debería a una reducida eficiencia de captación de este nutriente, consecuencia de una raíz más corta, o a una menor eficiencia de las cepas foráneas. Asimismo, el mayor establecimiento de la colonización micorrícica por residuos de lupino estaría relacionado con el efecto de este material en la adquisición de K, Ca, Mg, Zn y Cu, ya que de acuerdo a Clark (1997) y Clark y Zeto (2000), se conoce que la adquisición de éstos se incrementa por la inoculación de micorriza en suelos ácidos.

Por otra parte, se evidenció un efecto generalizado en la inoculación de MA en la reducción del contenido de todos los elementos, en especial de Al, cuyo contenido bajó un 49%, lo cual podría ser de interés en suelos ácidos para prevenir problemas de toxicidad. Borie y Rubio (1999) encontraron que la inoculación con MA previene la toxicidad por Al en cebada en un Andisol; ellos también reportaron un aumento en la concentración y contenido de P foliar en los tratamientos inoculados, efecto no encontrado en este trabajo. Se ha sugerido que el mecanismo que contribuye al efecto buffer se basa en la retención de metales en las exoestructuras fúngicas (Barea *et al.*, 1991) y en el caso del Al, se ha encontrado que las MA reducen la disponibilidad del Al inorgánico en la rizósfera de las plantas micorrizadas, además de un cambio en la homeostasis y menor absorción de P (Cumming y Ning, 2003). Otro mecanismo posible sería la quelación de Al por parte de glomalina, una glicoproteína producida por

los hongos MA, la cual ha demostrado tener capacidad de quelación de metales que producen fitotoxicidad (Gonzalez-Chavez *et al.*, 2004).

CONCLUSIONES

La adición de residuos orgánicos de cosecha, tanto de lupino como de trigo, incrementó significativamente la biomasa aérea de las plantas de trigo creciendo en condiciones de invernadero en suelos con micorriza nativa. La adición de residuos orgánicos de cosecha, tanto de trigo como de lupino, incrementaron el pH y la disponibilidad de P del suelo, en particular la adición de residuos de trigo, mientras que la inoculación con un hongo MA exógeno disminuyó el rendimiento, incrementó el pH y la disponibilidad de P. La adición de residuos de cosecha de lupino, incrementó la colonización de las MA en suelos con su micorriza nativa, mientras que la inoculación y residuos de trigo incrementaron la esporulación. La adición de residuos de cosecha incrementó en las plantas de trigo el contenido de todos los elementos minerales. La inoculación con un hongo MA exógeno disminuyó la adquisición de elementos minerales, en especial Al, lo cual podría ser de interés en suelos ácidos para prevenir problemas de toxicidad.

RECONOCIMIENTOS

Proyecto FONDECYT 1990756

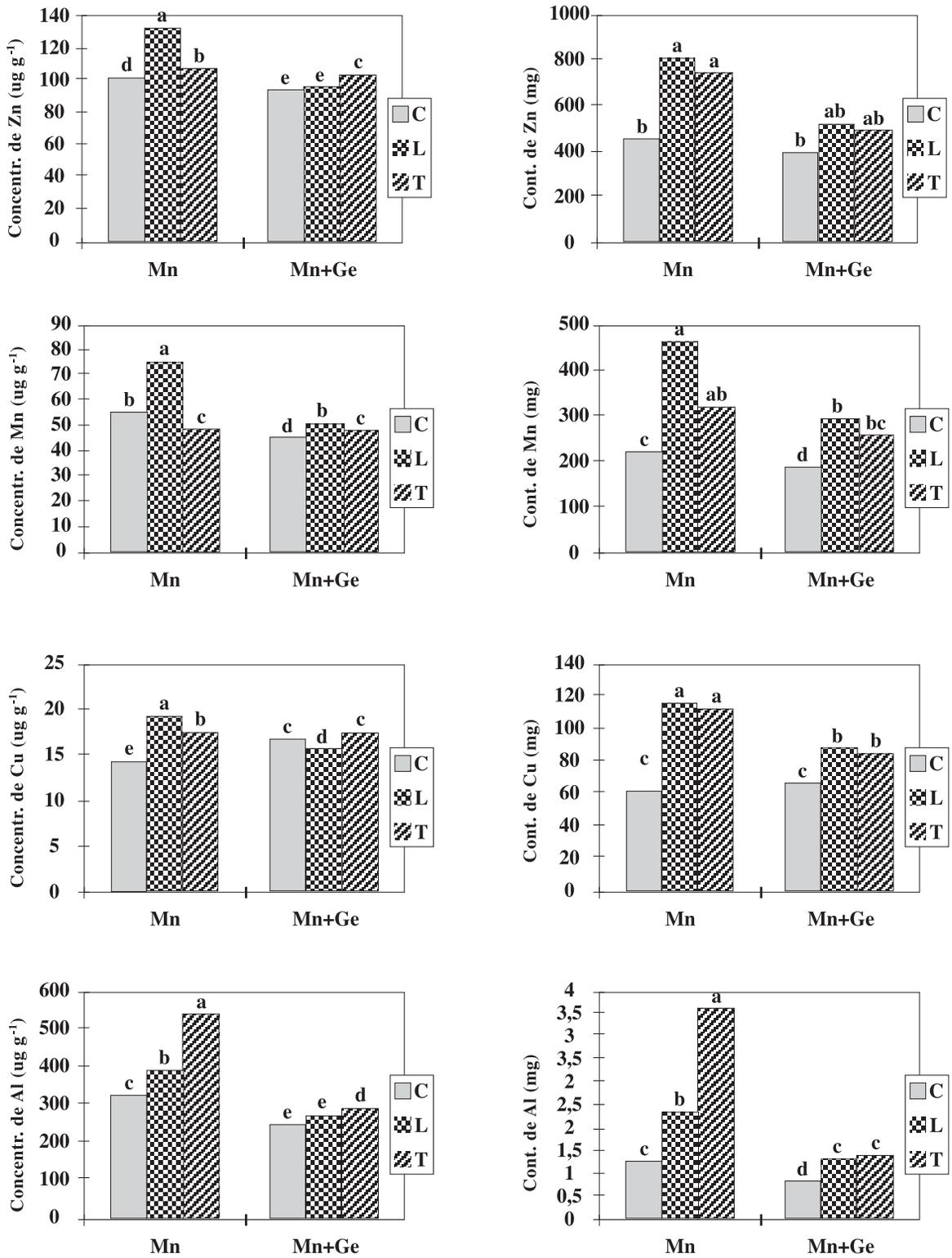


Figura 4. Efecto de la adición de residuos (C: testigo; L: lupino; T: trigo) sobre la nutrición de macronutrientes de las plantas de trigo en un suelo natural (Mn) e inoculado con *Glomus etunicatum* (Mn + Ge).

Figure 4. Effect of the residue addition (C: control; L: lupine; T: wheat) on the macronutrient nutrition of wheat plants in a natural (Mn) or inoculated soil with *Glomus etunicatum* (Mn + Ge).

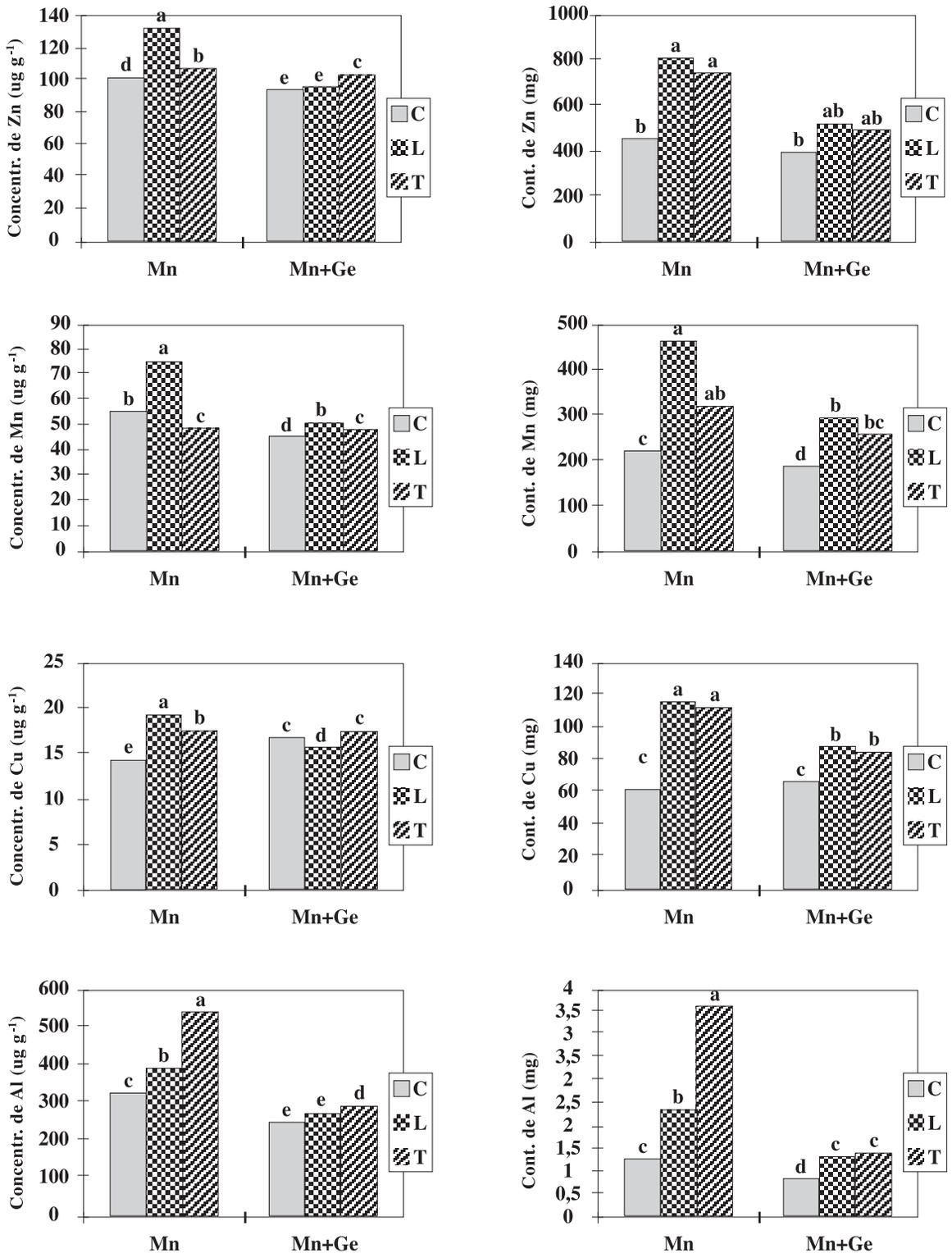


Figura 5. Efecto de la adición de residuos (C: testigo; L: lupino; T: trigo) sobre la nutrición de micronutrientes y Al de las plantas de trigo en un suelo natural (Mn) e inoculado con *Glomus etunicatum* (Mn + Ge).

Figure 5. Effect of the residue application (C: control; L: lupine; T: wheat) on the micronutrient and Al nutrition of wheat plants in a natural (Mn) or inoculated soil with *Glomus etunicatum* (Mn + Ge).

LITERATURA CITADA

- Barea, J. 1998. Biología de la rizósfera. Investigación y Ciencia 256:74-81.
- Barea, J.M., R. Azcón, and C. Azcón-Aguilar. 1991. Vesicular arbuscular mycorrhizal fungi in nitrogen fixing systems. Method. Microbiol. 24:391-346.
- Bertol, I., D. Leite, and W.A. Zoldan. 2004. Corn crop residue decomposition and related parameters. Rev. Bras. Cienc. Solo 28:369-375.
- Borie, F., Y. Redel, R. Rubio, J.L. Rouanet, and J.M. Barea. 2002. Interactions between crop residues application and mycorrhizal development and some soil-root interface properties and mineral acquisition by plants in an acidic soil. Biol. Fertil. Soils 36:151-160.
- Borie, F., and R. Rubio. 1999. Effects of arbuscular mycorrhizae and liming on growth and mineral acquisition on aluminum-tolerant and aluminum-sensitive barley cultivars. J. Plant Nutr. 22:121-137.
- Borie, F., R. Rubio, A. Morales, y C. Castillo. 2000. Relación entre densidad de hifas de hongos micorrizógenos arbusculares y producción de glomalina con las características físicas y químicas de suelos bajo cero labranza. Rev. Chil. Hist. Nat. 73:749-756.
- Borie F., R. Rubio, J.L. Rouanet, M. Morales, G. Borie, and C. Rojas. 2006. Effects of tillage systems on soil characteristics, glomalin content and mycorrhizal propagules in a Chilean Ultisol. Soil Till. Res. In press.
- Clark, R. 1997. Arbuscular mycorrhizal adaptation, spore germination, root colonization and host plant growth and mineral adquisition at low pH. Plant Soil 192:15-22.
- Clark, R., and S. Zeto. 2000. Mineral acquisition by mycorrhizal plants. J. Plant Nutr. 23:867-902.
- Cumming, J.R., and J. Ning. 2003. Arbuscular mycorrhizal fungi enhance aluminium resistance of broomsedge (*Andropogon virginicus* L.). J. Exp. Bot. 54:1447-1459.
- Dos Santos V.L., R.M. Muchovej, A. Chaer, J.C. Néves, and M.C. Kasuya. 2001. Vesiculo-arbuscular-ectomycorrhiza succession in seedlings of *Eucalyptus* spp. Braz. J. Microbiol. 32:81-86.
- Gonzalez-Chavez, M.C., R. Carrillo-Gonzalez, S.F. Wright, and K.A. Nichols. 2004. The role of glomalin, a protein produced by arbuscular mycorrhizal fungi, in sequestering potentially toxic elements. Environ. Pollut. 130:317-323.
- Goh, T., M. Bonerje, S. Tuand, and D. Burton. 1997. Vesicular arbuscular mycorrhizae mediated uptake and translocation of P and Zn by wheat in a calcareous soil. Can. J. Soil Sci. 77:339-346.
- Jarrel, W., and R. Beverley. 1981. The dilution effect in plant nutrient studies. Adv. Agron. 34:197-224.
- Johnson, J., C. Vance, and D. Allan. 1996. Phosphorus deficiency in *Lupinus albus*. Altered lateral root development and enhanced expression of phosphoenolpyruvate carboxylase. Plant Physiol. 112:31-41.
- Kabir, Z., Y. O' Halloran, J. Fyles, and C. Hamel. 1997. Seasonal changes of arbuscular mycorrhizal fungi affected by tillage practices and fertilization: hyphal density and mycorrhizal root colonization. Plant Soil 192:285-293.
- Klironomos, J. 2003. Variation in plant response to native and exotic arbuscular mycorrhizal fungi. Ecology 84:2292- 2301.
- Kwabiah, A.B., N.C. Stoskopf, C.A. Palm, and R.P. Voroney. 2003. Soil P availability as affected by the chemical composition of plant materials: implications for P-limiting agriculture in tropical Africa. Agric. Ecosyst. Environ. 100:53-61.
- Magid, J., J. Luxhoi, and O.B. Lyshede. 2004. Decomposition of plant residues at low temperatures separates turnover of nitrogen and energy rich tissue components in time. Plant Soil 258:351-365.
- Mendoza, J., and F. Borie. 1998. The effect of *Glomus etunicatum* inoculation on aluminum, phosphorus, calcium and magnesium uptake in two barley genotypes with different aluminum tolerance. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 29:681-695.
- Mills, A., and M. Fey. 2003. Declining soil quality in South Africa. Effects of land use on soil organic matter and surface crusting. S. Afr. J. Sci. 99:429- 436.
- Miyasaka, S.C., and M. Habte. 2001. Plant mechanisms and mycorrhizal symbiosis to increase phosphorus uptake efficiency. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 32:1101-1147.
- Noble, A., Y. Zenneck, and J. Randall. 1996. Leaves litter ash alkalinity and neutralization of soil acidity. Plant Soil 179:293-302.
- Olsen, S.R., and L.E. Sommers. 1982. Phosphorus. p. 403-430. In A.L. Page et al. (eds.) Methods of soil analysis. Part 2. 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, Wisconsin, USA.
- Ortega, R.A., G.A. Peterson, and D.G. Westfall. 2002. Residue accumulation and changes in soil organic matter as affected by cropping intensity in no-till dryland agroecosystems. Agron. J. 94:944-954.
- Phillips, L., and D. Hayman. 1970. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and VA mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. Trans. Br. Mycol. Soc. 55:158-161.
- Pocknee, S., and M. Summer. 1997. Cation and nitrogen contents of organic matter determine its soil liming potential. Soil Sci. Soc. Am. J. 61:86-92.

- Rillig, M.C., and P.D. Steinberg. 2002. Glomalin production by an arbuscular mycorrhizal fungus: a mechanism of habitat modification? *Soil Biol. Biochem.* 34:1371-1374.
- Roose, E., and B. Barthes. 2001. Organic matter management for soil conservation and productivity restoration in Africa: a contribution from Francophone research. *Nutr. Cycl. Agroecosys.* 61:159-170.
- Rubio, R., E. Moraga, and F. Borie. 1990. Acid-phosphatase-activity and vesicular-arbuscular mycorrhizal infection associated with roots of four wheat cultivars. *J. Plant Nutr.* 13:585-598.
- SAS Institute. 1990. SAS/STAT users guide: statistic. Version 6. 4th ed. SAS Institute, Cary, North Carolina, USA.
- Schreiner, R.P., and G.J. Bethlenfalvay. 2003. Crop residue and Collembola interact to determine the growth of mycorrhizal pea plants. *Biol. Fertil. Soils* 39:1-8.
- Schüßler, A. 2004. Das fünfte Pilz-Phylum: die Glomeromycota. *BIOspektrum* 10:741-742
- Sieverding, E. 1991. Vesicular-arbuscular mycorrhiza management in tropical agrosystems. 371 p. Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH, Eschborn, Germany.
- Soedarjo, M., and M. Habte. 1983. Vesicular-arbuscular mycorrhizal effectiveness in an acid soil amended with fresh organic matter. *Plant Soil* 149:197-203.
- Tang, C., G. Sparling, C. Mac Lay, and C. Raphael. 1999. Effect of a short term legume residue decomposition on soil acidity. *Austr. J. Soil Res.* 37:561-573.
- Tang, C., and Q. Yu. 1999. Impact of chemical composition of legume residues and initial soil pH on pH change of a soil after residue incorporation. *Plant Soil* 215:29-38.
- Tennant, D. 1975. A test of a modified line intersection method of measuring root length. *J. Ecol.* 63:995-1001.
- Vetterlein, D., and R. Hüttl. 1999. Can applied organic matter fulfill similar functions as soil organic matter? Risk-benefit analysis for organic matter application as a potential strategy for rehabilitation of disturbed ecosystems. *Plant Soil* 213:1-10.
- Vidal, I., J. Etchevers, y A. Fischer. 2002. Dinámica del nitrógeno bajo diferentes rotaciones, sistemas de labranza y manejo de residuos en el cultivo de trigo. *Agric. Téc. (Chile)* 62:121-132.
- Wright, S., and A. Upadhyaya. 1998. A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant Soil* 198:97-107.
- Zadoks, J., T. Chang, and C. Konzak. 1974. A decimal code for the growth stage of cereals. *Weed Res.* 14:415-420.