

## Características de planta, suelo y productividad entre sorgo fertilizado e inoculado con micorriza arbuscular\*

### Plant traits, soil and productivity between fertilized sorghum and inoculated with arbuscular mycorrhizal

Arturo Díaz Franco<sup>1</sup>, Jaime R. Salinas García<sup>1</sup>, Fidel Espinosa Sandoval<sup>2</sup>, María de los Ángeles Peña del Río<sup>3</sup>, Francisco R. de la Garza Requena<sup>2</sup> y Oscar Arath Grageda Cabrera<sup>4§</sup>

<sup>1</sup>Campo Experimental Río Bravo-INIFAP. (diaz.arturo@inifap.gob.mx). Carr. Matamoros-Reynosa, km 61. Apdo. Postal 172, 88900, Río Bravo, Tam., México. <sup>2</sup>Facultad de Ingeniería y Ciencias, Universidad Autónoma de Tamaulipas. Centro Universitario Adolfo López Mateos, 87149, Cd. Victoria, Tamaulipas, México. <sup>3</sup>Campo Experimental General Terán, INIFAP. Carr. Montemorelos-China, km 31. Apdo. Postal 3, 67400, General Terán, N.L., México. <sup>4</sup>Campo Experimental Bajío. INIFAP. Carretera Celaya-San Miguel de Allende, km 6.5. Celaya, Guanajuato, México. C. P. 38110. Tel. 01 461 6115323. Ext. 233. <sup>§</sup>Autor para correspondencia: grageda.oscar@inifap.gob.mx.

#### Resumen

La inoculación con hongos formadores de micorrizas es una alternativa para mejorar el balance biológico del suelo y reducir el uso de fertilización inorgánica (FI). Durante cinco años consecutivos (2002-2006), se determinaron algunas características de suelo y planta en sorgo cultivado con inoculación del hongo micorrízico *Rhizofagus intraradices* (RI) y testigo fertilizado con 60-20-00 (FI). El rendimiento de grano fue similar entre tratamientos durante los cinco años, aunque el inoculado con RI superó en 17.7% (\$ 216.00 ha<sup>-1</sup>) la relación beneficio-costos con relación a FI. El contenido de clorofila, altura de planta, biomasa, pH, materia orgánica, conductividad eléctrica, P y K no presentaron significancia estadística entre los dos tratamientos. El N del suelo en FI superó con 6.7 mg kg<sup>-1</sup> al suelo con inoculación de RI. Por el contrario, la biomasa radical, el número de esporas de hongos micorrízicos arbusculares en el suelo y la emisión de CO<sub>2</sub> del suelo se incrementaron con la micorrización. El impacto de *R. intraradices* manifestó mayores rentabilidad de la producción de sorgo (ahorro de \$ 926.00 ha<sup>-1</sup>) y actividad biológica en el suelo.

**Palabras clave:** *Sorghum bicolor*, *Glomus intraradices*, *Rhizofagus intraradices*, fertilidad de suelo, nutrición.

#### Abstract

Inoculation with mycorrhizal fungi is an alternative to improve the biological balance of the soil and reduce the use of inorganic fertilizer (IF). For five consecutive years (2002-2006), some characteristics of soil and plant sorghum grown with mycorrhizal fungi inoculation *Rhizofagus intraradices* (RI) and fertilized with 60-20-00 control (FI) were determined. Grain yield was similar between treatments during the five years, although the inoculated RI exceeded 17.7 % (\$ 216.00 ha<sup>-1</sup>) benefit-cost relative to the FI relationship. Chlorophyll content, plant height, biomass, pH, organic matter, electrical conductivity, P and K showed no statistical significance between both treatments. The soil N with FI exceeded 6.7 mg kg<sup>-1</sup> soil inoculation with RI. In contrast, root biomass, the number of spores of arbuscular mycorrhizal fungi in soil and soil CO<sub>2</sub> emission increased with mycorrhizae. The impact of *R. intraradices* showed higher profitability of sorghum production (savings of \$ 926.00 ha<sup>-1</sup>) and biological activity in the soil.

**Keywords:** *Sorghum bicolor*, *Glomus intraradices*, *Rhizofagus intraradices*, soil fertility, nutrition.

\* Recibido: junio de 2013  
Aceptado: febrero de 2014

## Introducción

El deterioro progresivo de los agroecosistemas y el incremento de los costos en la producción, han dado origen a que la agricultura muestre productividad y rentabilidad insatisfactorias. En particular el sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench.] es el monocultivo de secano de mayor importancia en la región subtropical de Tamaulipas, cuyas limitaciones nutrimentales se han atendido mediante la adición de fertilizantes inorgánicos y su rentabilidad ha permanecido en el último decenio en un punto crítico para el productor (Salinas *et al.*, 2006). Williams *et al.* (2006), señalaron que es urgente la generación de tecnologías que disminuyan los costos de producción y que maximicen la rentabilidad del sorgo. Sin embargo, Roldán *et al.* (2006) y Díaz *et al.* (2007a) mencionan que las nuevas tecnologías deben estar dentro del criterio de agricultura sostenible, a través del manejo de los recursos disponibles en forma racional.

La agroecología contempla el mantenimiento del ambiente en los diversos sistemas agrícolas, así como el desarrollo de aspectos relacionados al continuo proceso de adaptación, cambio cultural y socioeconómico; todo ello mediante el uso de prácticas que son ecológicamente sanas, que satisfagan las necesidades de producción, que contribuyan con la economía y que mantengan los recursos naturales en equilibrio.

Una de las prácticas que encajan dentro de ese contexto es la inoculación con hongos micorrízicos arbusculares (HMA). La naturaleza simbiótica de las plantas con los HMA ha demostrado ser fundamental para la sostenibilidad de los ecosistemas, ya que son capaces de colonizar gran número de plantas terrestres. Los HMA interactúan con el suelo, planta, patógenos u otros microorganismos del suelo, y a través de diferentes mecanismos mejoran la nutrición y sanidad de la planta (Jeffries *et al.*, 2003; Smith y Read, 2008). Esta tecnología representa una alternativa para mejorar el balance biológico en el suelo y reducir el uso de fertilizantes químicos y de otros compuestos agroquímicos en el sistema de producción.

Las plantas necesitan la inoculación de especies de HMA eficientes en situaciones como ausencia o poblaciones reducidas de HMA nativas, suelos erosionados, degradados, contaminados o con especies micorrízicas ineficientes (González, 2002). Los HMA son capaces de colonizar el sistema radical de las plantas e inducir una simbiosis que deriva diversos procesos fisiológicos y bioquímicos. Dentro

## Introduction

The progressive deterioration of agro-ecosystems and increased production costs have given rise to show that agriculture productivity and profitability unsatisfactory. In particular sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench.] irrigated monoculture of major importance in the subtropical region of Tamaulipas, whose nutrient limitations have been addressed by the addition of inorganic fertilizers and profitability has been in the last decade at a critical point for the producer (Salinas *et al.*, 2006). Williams *et al.* (2006) noted that it is urgent generation technologies that reduce production costs and maximize the profitability of sorghum. However, Roldán *et al.* (2006) and Díaz *et al.* (2007a) mention that new technologies must be within the criteria of sustainable agriculture, through the management of available resources rationally.

Agroecology provides for the maintenance of the environment in different farming systems and development issues related to the ongoing process of adaptation, cultural and socio-economic change, all through the use of practices that are ecologically sound, which meet the needs of production, contribute to the economy and to keep natural resources in balance.

One of the practices that fit within that context is inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi (AMF). The symbiotic nature of plants with AMF has proved critical to the sustainability of ecosystems, as they are able to colonize large number of terrestrial plants. The HMA interact with soil, plant pathogens or other microorganisms in the soil and through different mechanisms improve the nutrition and health of the plant (Jeffries *et al.*, 2003; Smith and Read, 2008). This technology represents an alternative to improve the biological balance in the soil and reduce the use of chemical fertilizers and other agrochemicals in the production system.

Plants need inoculation of AMF species efficient in situations like absence or reduced populations of native AMF, eroded soils, degraded, contaminated or ineffective mycorrhizal species (González, 2002). AMF are able to colonize the root system of plants and induce a symbiosis that derives various physiological and biochemical processes. Among the benefits of the plant symbiosis with AMF are : a) increase the scanning area of the root system, b) reduce abiotic stress (drought, salinity, heavy metals); c) produce phytohormones, d) facilitate absorption of nutrients to the

de los beneficios que aporta a la planta la simbiosis con los HMA son: a) incrementan el área de exploración del sistema radical; b) disminuyen el estrés abiótico (sequía, salinidad, metales pesados); c) producen fitohormonas; d) facilitan la absorción de nutrientes a la planta, principalmente P y elementos menores especialmente los inmóviles como Cu, Zn, y Fe; e) producen glomalina que mejora la estructura del suelo al aglutinar partículas del suelo, y; f) inducen una acción protectora contra algunos hongos patogénicos del suelo (Jeffries *et al.*, 2003; Ferrera-Cerrato y Alarcón, 2008; Smith y Read, 2008).

En sorgo se ha observado que las plantas micorrizadas tienen mayor crecimiento, pigmentos fotosintéticos y conductancia estomatal en comparación con las plantas no micorrizadas (Ibrahim *et al.*, 1990; Abdel y Mohamedin, 2000; Díaz y Garza, 2007). Bressan *et al.* (2001) informaron que los HMA contribuyeron al incremento de biomasa y a una mayor absorción de N, P, K, Zn y Cu por la planta. Caris *et al.* (1998) evidenciaron que las hifas de HMA transportan  $Fe^{+}$  del suelo a la planta de sorgo. También, la capacidad simbiótica de la micorrización, en sorgo indujo un contenido similar de proteína en el grano que la adición de N ( $80 \text{ kg ha}^{-1}$ ) en el suelo (Díaz *et al.*, 2008a).

Por otro lado, en suelo no fertilizado e inoculado con micorriza incrementó la productividad del sorgo; además, esta práctica también resultó competitiva cuando se comparó con la fertilización química (Díaz *et al.*, 2007a; Díaz *et al.*, 2011). Sin embargo, poco se conoce sobre dicha competitividad en función al tiempo. La funcionalidad de los HMA influye directa e indirectamente, parcial o totalmente en las modificaciones de las propiedades fisicoquímicas del suelo a través del tiempo y, las variaciones dependen de las características del suelo y de su capacidad amortiguadora nutricional en la interacción suelo-planta-HMA (Baera, 1991; Mader *et al.*, 2000). Al respecto, la información sobre esas variaciones y el equilibrio nutricional es limitada, a pesar de que esos aspectos son determinantes en el crecimiento y la producción de los cultivos (Robles y Baera, 2004).

Algunos productores del norte de Tamaulipas han incorporado la práctica de inoculación de semilla con HMA al manejo agronómico del sorgo durante siete años consecutivos y sin el uso de fertilización inorgánica. El objetivo del estudio fue comparar el manejo del sorgo inoculado con el HMA (*R. intraradices*) vs fertilización inorgánica, en el rendimiento de grano, componentes del rendimiento, relación beneficio costo y fertilidad del suelo durante cinco años.

plant, mainly P and especially immobile trace elements such as Cu, Zn, and Fe, e) produce glomalins that improve soil structure to bind soil particles and, f) induce a protective effect against some pathogenic fungi in soil (Jeffries *et al.*, 2003; Ferrera-Cerrato and Alarcón, 2008; Smith and Read, 2008).

In sorghum it has been observed that mycorrhizal plants have higher growth, photosynthetic pigments and stomatal conductance compared to non-mycorrhizal plants (Ibrahim *et al.*, 1990; Abdel and Mohamedin, 2000; Díaz and Garza, 2007). Bressan *et al.* (2001) reported that the HMA contributed to increased biomass and increased absorption of N, P, K, Zn and Cu by the plant. Caris *et al.* (1998) showed that the hyphae of AMF + Fe transported soil to plant sorghum. Also, the ability of the mycorrhizal symbiotic in sorghum induced a similar content of grain protein that addition of N ( $80 \text{ kg ha}^{-1}$ ) in the ground (Díaz *et al.* 2008a).

Moreover, in not fertilized soil and inoculated with mycorrhizal sorghum increased productivity, in addition, this practice also proved competitive when compared to chemical fertilizers (Díaz *et al.*, 2007a; Díaz *et al.*, 2011). However, little is known about its competitiveness according to time. The functionality of the HMA influences directly and indirectly, partially or totally changes the physicochemical properties of the soil over time and variations depend on the characteristics of the soil and its nutrient buffering capacity in the soil-plant-HMA (Baera, 1991; Mader *et al.*, 2000). In this regard, information on these changes and nutritional balance is limited, although these aspects are crucial to the growth and production of crops (Baera and Robles, 2004).

Some farmers in northern Tamaulipas have incorporated the practice of seed inoculation with AMF to sorghum agronomic management for seven consecutive years without the use of inorganic fertilizer. The aim of the study was to compare the management of sorghum inoculated with AMF (*R. intraradices*) vs inorganic fertilization in grain yield, yield components, benefit cost ratio and soil fertility for five years.

## Materials and methods

### Location

This research was conducted under rainfed conditions in the Experimental Río Bravo, National Research Institute for Forestry, Agriculture and Livestock (INIFAP), Río Bravo,

## Materiales y métodos

### Localización

Esta investigación se desarrolló en condiciones de secano en el Campo Experimental Río Bravo del INIFAP, Río Bravo, Tam., México, localizado a 25° 57' latitud norte, 98° 01' longitud oeste y altitud de 30 m. Es un área semiárida (subtropical), con temperatura media anual de 23 °C y precipitación promedio anual de 635 mm. El análisis físico y químico del suelo mostró que se trata de un Vertisol con una textura arcillosa y pH de 7.9 (FAO, 1999).

### Manejo experimental

Durante cinco años, de 2002 a 2006, una rotación anual de cultivo sorgo-descanso fue realizada, *i. e.* un cultivo de sorgo en el ciclo otoño-invierno y un periodo de barbecho en el ciclo primavera-verano; los residuos del cultivo se incorporaron al suelo. El híbrido de sorgo para grano que se utilizó fue 'Pioneer 82G63'. La siembra fue mecanizada, con humedad residual, ésta se realizó a finales de enero y principios de febrero. Los tratamientos fueron: 1) inoculación con micorriza arbuscular *R. intraradices* (Micorriza INIFAP<sup>MR</sup>) (Díaz *et al.*, 2007a) y; 2) testigo con fertilización inorgánica en presembrado, la dosis recomendada para secano es de 60-20-00 (Montes y Aguirre, 1992). El diseño experimental fue de bloques al azar con tres repeticiones. Las parcelas fueron de seis surcos de 0.8 m de ancho y de 52 m de longitud. Para el manejo agronómico y fitosanitario, las indicaciones locales fueron consideradas (Rosales y Montes, 2005).

### Variables y muestreos

El rendimiento de grano se estimó por triplicado en cada uno de los tratamientos. Cada muestreo se realizó en dos surcos de 10 m de longitud. Las panojas se cosecharon y trillaron y la humedad de grano se ajustó al 14% después de la cosecha en todas las unidades experimentales. La relación beneficio-costado (B/C; valores 2007) se estimó a nivel anual a través de la ecuación:  $B/C = RG \times P/C$ , donde RG es el rendimiento de grano. P el precio. C el costo (Montes y Aguirre, 1992). El costo del inoculante micorrízico fue de \$ 45.00 ha<sup>-1</sup>.

En el quinto año se midieron algunas características de planta y de suelo. En floración, se cuantificó el índice de clorofila a través del determinador Minolta SPAD 502, es decir, se usó un método indirecto no destructivo para estimar la

Tamaulipas, Mexico, located at 25° 57' north latitude, 98° 01' west longitude and altitude 30 m. It is a semi-arid area (subtropical), with an average annual temperature of 23 °C and average annual rainfall of 635 mm. Physical and chemical analysis showed that soil is a Vertisol clay texture and a pH of 7.9 (FAO, 1999).

### Experimental management

For five years, from 2002 to 2006, an annual crop rotation sorghum - break was made, *i. e.* sorghum crop in the fall-winter and a fallow period in the spring-summer cycle, incorporated into the soil. The hybrid grain sorghum used was 'Pioneer 82G63'. Planting was machined with residual moisture that was held in late January and early February. The treatments were: 1) inoculation with arbuscular mycorrhizal *R. intraradices* (mycorrhiza INIFAPMR) (Díaz *et al.*, 2007a); and 2) control with inorganic fertilizer at sowing, the recommended dose is rainfed 60-20-00 (Montes and Aguirre, 1992). The experimental design was a randomized block with three replications. Plots were six rows of 0.8 m wide and 52 m long. For agronomic and phytosanitary management, local indications were considered (Rosales and Montes, 2005).

### Variables and sampling

Grain yield was estimated in triplicate at each of the treatments. Each sample was performed in two rows of 10 m length. The panicles were harvested and threshed grain and moisture was adjusted to 14% after harvest in all test units. The benefit-cost (B/C; 2007 values) ratio was estimated on an annual basis through the equation:  $B/C = RG \times P/C$ , where RG is the grain yield. P the price. Cost C (Montes and Aguirre, 1992). The cost of mycorrhizal inoculant was \$ 45.00 ha<sup>-1</sup>.

In the fifth year, some characteristics of plant and soil were measured. At flowering, chlorophyll index quantified by Minolta SPAD determiner 502, *i. e.*, a non-destructive method for estimating indirect photosynthetic activity was used. This index considered 25 samples per plot, made in the middle of the flag leaf, plant height at maturity, leaf fresh and dry biomass were recorded and root biomass. At the end of the cultivation cycle, soil-testing compounds were made in each of the pilot at a depth of 30 cm units. These, in turn, were divided into three sub-samples to determine: a) CO<sub>2</sub>; b) spore count and; c) physical and chemical analysis.

actividad fotosintética. Dicho índice consideró 25 muestreos por parcela, hechos en la parte central de la hoja bandera; en madurez se registraron altura de planta, biomasa foliar fresca y seca, así como biomasa radical.

Al término del ciclo del cultivo, muestreos compuestos de suelo se hicieron en cada una de las unidades experimentales a una profundidad de 30 cm. Éstos, a su vez, se dividieron en tres sub-muestras para determinar: a) Emisión de CO<sub>2</sub>, b) conteo de esporas y c) análisis físico y químico.

### Análisis de suelo

Las determinaciones para el análisis químico fueron: pH (1:2 suelo-agua); materia orgánica medida con el método de dicromato de potasio; conductividad eléctrica en pasta saturada con potenciómetro; nitrógeno inorgánico (NO<sub>3</sub>-N) estimado a través del método de ácido salicílico; el P se obtuvo por el método de Olsen; y el K mediante el método de absorción atómica (Van Loon, 1980). La extracción de esporas del suelo fue mediante el procedimiento de tamizado y decantación; posteriormente, el conteo de esporas se realizó en 100 g de suelo (Gerderman y Nicholson, 1963). Para la emisión de CO<sub>2</sub> se utilizó el método del sistema automático de medida cerrado con el respirómetro PBI-Dansensor (modelo Check Mate II) (Anderson, 1982).

### Análisis estadístico

Los datos se sometieron a análisis de varianza mediante un diseño experimental de bloques completos al azar. Con la prueba de F se estimó la diferenciación entre los dos tratamientos evaluados. Para el caso del rendimiento de grano se hicieron análisis por año, además se realizó un análisis acumulativo que comprendió los cinco años (2002-2006). Los análisis estadísticos se realizaron con el programa Statgraphics Plus (Manugistics, Inc., 1997).

## Resultados

### Producción y características de planta

El rendimiento de sorgo entre la inoculación con *R. intraradices* y la fertilización química no presentó diferencia estadística significativa durante los cinco años de evaluación. Ello propició que la práctica con el HMA superara en la relación B/C a la fertilización química (60-20-00) en todos los

### Soil analysis

Determinations for chemical analysis were: pH (1:2 soil-water), organic matter measured by the method of potassium dichromate; electrical conductivity in saturated paste potentiometer; (NO<sub>3</sub>-N) inorganic nitrogen estimated by the method of salicylic acid; the P was obtained by the method of Olsen, and K by the atomic absorption method (Van Loon, 1980). The soil removal was spores by sieving and decanting procedure, after which the spore count was performed on 100 g of soil (Gerderman and Nicholson, 1963). For CO<sub>2</sub> emissions the method of automatic measurement system with closed respirometer PBI-Dansensor (Check Mate II model) (Anderson, 1982) was used.

### Statistical analysis

Data were subjected to analysis of variance using an experimental design of randomized complete block. With the F test to differentiate between the two treatments evaluated were estimated. In the case of grain yield analysis year were also a cumulative analysis that included five years (2002-2006) was performed. Statistical analyzes were performed using Statgraphics Plus (Manugistics, Inc., 1997).

## Results

### Production and plant traits

Sorghum yield between inoculation with *R. intraradices* and chemical fertilization not statistically different during the five years of evaluation. This led to the practice exceeded the HMA in the B/C to chemical fertilizer (60-20-00) in all years of study. In the fifth year, the price of sorghum was \$ 1 920.00 t ha<sup>-1</sup>, the cost of production per hectare in time with the inoculation of AMF was \$ 2 274.00, while the cost of inorganic fertilizer was \$ 3 200.00. On average, a 17.7% increase in profitability was recorded for the HMA, with respect to chemical fertilization (Table 1). The index values of chlorophyll (as a reflection of nutritional status), plant height and fresh and dry foliar biomass did not differ between cultivated sorghum annually with mycorrhizal inoculation and inorganic fertilization referred to in the last year of assessment. In contrast, inoculation with HMA radical biomass (10.2 g) significantly greater than that associated with the fertilized handling (Table 2) was associated.

años del estudio. En el quinto año, el precio del sorgo fue de \$ 1 920.00 t ha<sup>-1</sup>; el costo de producción por hectárea en temporal con la inoculación del HMA fue de \$ 2 274.00, mientras que el costo de la fertilización inorgánica fue de \$ 3 200.00. En promedio, un incremento de 17.7% de rentabilidad se registró para el HMA, con respecto a la fertilización química (Cuadro 1). Los valores del índice de clorofila (como un reflejo del estatus nutrimental), altura de planta y la biomasa foliar fresca y seca no mostraron diferencias significativas entre el sorgo cultivado anualmente con inoculación micorrízica y el referido a la fertilización inorgánica en el último año de evaluación. Por el contrario, a la inoculación con HMA se asoció una biomasa radical (10.2 g) mayor de manera significativa que la relacionada con el manejo fertilizado (Cuadro 2).

### Soil characteristics

Chemical analysis indicated that soil pH, organic matter, electrical conductivity, P and K, showed no change after five years between treatments. However, the concentration of N associated with the fertilized treatment (37-8 mg kg<sup>-1</sup>) was significantly higher ( $p=0.042$ ) (Table 3).

With respect to soil, biological variables, quantification AMF spore was higher ( $p=0.045$ ) by effect of mycorrhizal inoculation. This treatment was 87 spores most (16 %) than that of the synthetic fertilization. Also, practice inoculation with mycorrhizal fungi significantly increased CO<sub>2</sub> emissions it was higher (77 %) to synthetic fertilization (Table 3).

### Cuadro 1. Rendimiento de grano y relación beneficio-costo comparativo entre inoculación micorrízica y fertilización química en sorgo.

Table 1. Grain yield and comparative cost-benefit relationship between mycorrhizal inoculation and chemical fertilization in sorghum.

Año	<i>R. intraradices</i>		Fertilizado (60-20-00) (testigo)	
	t ha <sup>-1</sup>	B/C	t ha <sup>-1</sup>	B/C
2002	2.84 n.s.*	2.5	2.80 n.s.	1.9
2003	3.78 n.s.	3.4	3.90 n.s.	2.6
2004	4.96 n.s.	4.4	5.24 n.s.	3.6
2005	2.58 n.s.	2.3	2.73 n.s.	1.9
2006	4.47 n.s.	4.5	4.84 n.s.	4.3
Promedio	3.72 n.s.	3.4	3.90 n.s.	2.8
<i>P&gt;F</i>				
<i>Años (A)</i>	0.001			
<i>Trat. (T)</i>	0.165			
<i>A x T</i>	0.858			

n.s.= Diferencias no significativas ( $p<0.05$ ) en la misma fila.

### Cuadro 2. Efecto de la inoculación micorrízica y fertilización química sobre diferentes parámetros fisiológicos de la planta de sorgo en el último año de evaluación experimental.

Table 2. Effect of mycorrhizal inoculation and chemical fertilization on different physiological parameters of the sorghum plant in the last year of experimental evaluation.

Variable	HMA <i>R. intraradices</i>	60N-20P-00K (testigo)	<i>P&gt;F</i>
Clorofila (SPAD) (n=75)	48.2	51.2	n.s.*
Altura de planta (cm) (n=30)	112.6	115.0	n.s.
Biomasa foliar fresca (g) (n=30)	135.3	141.6	n.s.
Biomasa foliar seca (g) (n=30)	86.0	88.7	n.s.
Biomasa radical (g) (n=30)	41.2	31.0	0.023

n.s.= no significativo ( $p<0.05$ ).

## Características de suelo

El análisis químico del suelo indicó que los valores de pH, materia orgánica, conductividad eléctrica, P y K, no presentaron modificaciones después de cinco años entre tratamientos. No obstante, la concentración de N asociada al tratamiento fertilizado ( $37.8 \text{ mg kg}^{-1}$ ) resultó significativamente superior ( $p=0.042$ ) (Cuadro 3).

En lo que respecta a las variables biológicas del suelo, la cuantificación de esporas de HMA fue mayor ( $p=0.045$ ) por efecto de la inoculación micorrizógena. Este tratamiento tuvo 87 esporas más (16%) que el de la fertilización sintética. También, la práctica inoculación con hongo micorrizico incrementó significativamente las emisiones de  $\text{CO}_2$ , mismo que fue mayor (77%) a las de la fertilización sintética (Cuadro 3).

## Discusión

La inoculación con *R. intraradices* mantuvo un rendimiento competitivo al nivel del tratamiento fertilizado, mediante el sistema sorgo-descanso durante los cinco años continuos. Por lo tanto, la práctica de inocular con el HMA promovió una producción de sorgo eficiente y rentable, debido al menor costo por insumos y sin impacto negativo por contaminación de suelo y agua, como sucede con la fertilización química. Lo anterior refleja lo experimentado por algunos productores de sorgo que han utilizado el HMA durante seis años o más sin la adición de fertilizantes.

En el último ciclo de cultivo no se observaron diferencias significativas en el índice de clorofila, altura de planta y biomasa foliar, en el sorgo cultivado con el sistema de monocultivo y la inoculación con *R. intraradices* y la fertilización química. Sin embargo, el desarrollo radical fue significativamente mayor con el tratamiento de inoculación. Esta característica ha sido observada, comúnmente, en otros estudios (Díaz *et al.*, 2007b; Díaz *et al.*, 2008b) y puede ser atribuida a la acción de las fitohormonas producidas por los HMA en la simbiosis (Ferrera-Cerrato y Alarcón, 2008; González, 2002).

La cantidad de N en el suelo donde se llevó a cabo la inoculación con el HMA decreció significativamente, lo cual puede ser una indicación del agotamiento del elemento por la falta de su reposición. Aunque este desequilibrio fue

## Cuadro 3. Comparación de características químicas y biológicas de suelo, cultivado con sorgo después de cinco años consecutivos utilizando inoculación con el HMA *R. intraradices* o fertilización química.

**Table 3. Comparison of chemical and biological characteristics of soil, cultivated sorghum after five consecutive years using HMA inoculation with *R. intraradices* or chemical fertilization.**

Variable	HMA <i>R. intraradices</i>	60N-20P-00K (testigo)	P>F
pH	8.1	8.0	n.s.*
Materia orgánica (%)	2.1	2.0	n.s.
Conductividad eléctrica (mmhos $\text{cm}^{-1}$ )	0.66	0.71	n.s.
Nitrógeno ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	31.1	37.8	0.042
Fósforo ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	14.9	15.9	n.s.
Potasio ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	370	407	n.s.
Esporas de HMA (No. $100 \text{ g}^{-1}$ suelo)	540	453	0.041
Emisión de $\text{CO}_2$ (mol $\text{g}^{-1}$ suelo)	0.0042340	0.0023875	0.006

\*n.s.= no significativo ( $p<0.05$ ).

## Discussion

Inoculation with *R. intraradices* remained a competitive level performance fertilized treatment by sorghum - break system for five continuous years. Therefore, the practice of inoculation with AMF promoted efficient and profitable production of sorghum, due to lower cost inputs without negative impact on soil and water pollution, as with chemical fertilization. This reflects experienced by some sorghum producers who have used the HMA for six years or more without the addition of fertilizers.

In the last growing season, no significant differences were observed in the rate of chlorophyll, plant height and leaf biomass in sorghum grown in monoculture system and inoculation with *R. intraradices* and chemical fertilization. However, root development was significantly higher with inoculation treatment. This feature has been commonly observed in other studies (Díaz *et al.*, 2007b; Díaz *et al.*, 2008b) and may be attributed to the action of the plant hormone produced by the AMF symbiosis (González, 2002; Ferrera-Cerrato and Alarcón, 2008).

tangible, no se manifestó a través del índice de clorofila, la biomasa foliar, ni en el rendimiento de grano. Bressan *et al.* (2001) informaron que los HMA en sorgo y soya, contribuyeron en el incremento de biomasa y a una mayor absorción de N, P, K, Zn y Cu por la planta.

En un estudio hecho con maíz en macetas, durante cinco ciclos consecutivos, Robles y Baera (2004) concluyeron que los valores de las variables medidas en la planta se redujeron con el tiempo en el tratamiento inoculado, comparado con el fertilizado, al parecer debido al agotamiento de la fertilidad del suelo por la extracción continua de nutrimentos por el cultivo. Por el contrario, Díaz *et al.* (2008c) compararon maíz (*Zea mays* L.) de secano, inoculado con HMA y un testigo con la fórmula 60-20-00, y registraron que en tres años sucesivos tanto el contenido de clorofila como la producción de grano fue semejante en ambos tratamientos, variables que correlacionaron positivamente ( $r=0.93$ ). En un estudio similar, Salinas *et al.* (2005) reportaron, que después de dos años, los niveles de materia orgánica, N, P y K en tres profundidades del suelo fueron semejantes cuando se compararon el frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) fertilizado (40-20-00) y el inoculado con HMA no fertilizado.

El manejo con inoculación del HMA promovió una cantidad superior de esporas de HMA en el suelo, además de biomasa microbiana reflejada en el CO<sub>2</sub> emitido. Estos caracteres revelan una mayor actividad biológica en el suelo inoculado. Dentro de los agrosistemas sostenibles, es importante que el suelo mantenga un balance entre las propiedades biológicas, químicas y físicas (Alguacil *et al.*, 2008; Smith y Read, 2008). Diferentes estudios han demostrado que la biomasa microbiana en el suelo es un indicador sensible de calidad del suelo dentro de una variedad de prácticas agronómicas (Ndiaye *et al.*, 2000; Roldán *et al.*, 2006). Las hifas extraradicales de los HMA asociadas con la producción de glomalina, tienen importancia en la formación de agregados estables en el suelo (González *et al.*, 2004; Boire *et al.*, 2006). Los suelos agregados son más resistentes a fuerzas erosivas, tienen mejor aireación, mejoran la diversidad y la actividad microbiana (Lupwayi *et al.*, 1998; Palma *et al.*, 2000). Harinikumary y Bagyaraj (1989), compararon la secuencia en la rotación de diferentes cultivos con y sin fertilización química en condiciones semiáridas y demostraron que en ausencia del fertilizante se observó una mayor actividad micorrízica arbuscular nativa.

Los microorganismos también juegan un papel importante en la fertilidad ya que modifican las características químicas del suelo, las cuales están sujetas a las interacciones

The amount of N in the soil where they carried out the inoculation with AMF decreased significantly, which may be an indication of the depletion of the element by the lack of replacement. Although this imbalance was tangible through chlorophyll index, leaf biomass or grain yield was not stated. Bressan *et al.* (2001) reported that the AMF in sorghum and soybeans, have contributed to the increase in biomass and a higher absorption of N, P, K, Zn and Cu by the plant.

In a study with maize in pots for five consecutive cycles, Robles and Baera (2004) concluded that the values of the variables measured in the plant decreased with time in the inoculated treatment, compared with the fertilized, apparently due to depletion of soil fertility by continuous extraction of nutrients by the crop. Conversely, Díaz *et al.* (2008c) compared maize (*Zea mays* L.) rainfed inoculated with AMF and a witness to the formula 60-20-00 and recorded in three successive years both chlorophyll content and grain yield was similar in both treatments, variables that correlated positively ( $r=0.93$ ). In a similar study, Salinas *et al.* (2005) reported that after two years, the levels of organic matter, N, P and K in three soil depths were similar when the bean (*Phaseolus vulgaris* L.) fertilized (40-20-00) were compared and inoculated with AMF unfertilized.

Handling with HMA inoculation promoted a higher amount of AMF spores in soil microbial biomass also reflected in the CO<sub>2</sub> emitted. These characters show a greater biological activity in the soil inoculated. Within sustainable agricultural systems, it is important that the soil maintain a balance between biological, chemical and physical properties (Alguacil *et al.*, 2008; Smith and Read, 2008). Different studies have shown that microbial biomass in soil is a sensitive indicator of soil quality in a variety of agronomic practices (Ndiaye *et al.*, 2000; Roldán *et al.*, 2006).

The extra-radical associated AMF production Glomalin hyphae are important in the formation of stable aggregates in the soil (González *et al.*, 2004; Boire *et al.*, 2006). The soil aggregates are more resistant to erosive forces, have better ventilation, improve the diversity and microbial activity (Lupwayi *et al.*, 1998, Palma *et al.*, 2000). Harinikumary and Bagyaraj (1989) compared the sequence of the rotation of different crops without chemical fertilization in arid conditions and demonstrated that in the absence of fertilizer-increased arbuscular mycorrhizal native activity was observed.



particulares entre suelo-planta-microorganismos, lo que da como resultado su capacidad amortiguadora de fertilidad en el tiempo (Baera, 1991; Mader *et al.*, 2000). En nuestro estudio, después de cada uno de los ciclos de cultivo del sorgo se involucró a un período de descanso (barbecho), por lo que este sistema provee materia orgánica al suelo. Según Alguacil *et al.* (2008), para el caso de sorgo en condiciones similares, los residuos se estiman en  $1 \text{ t ha}^{-1}$ . Al respecto, Radel *et al.* (2006) determinaron que la adición de residuos de trigo al suelo incrementó el rendimiento de materia seca y la adquisición mineral de las plantas de trigo.

Por otro lado, y en función al uso continuo del inoculante micorrízico, no están claras las consecuencias ecológicas en la diversidad de HMA nativos (por competencia o desplazamiento), debido al efecto de la introducción de cepas de HMA, particularmente de géneros fúngicos caracterizados por tener 'agresividad' para colonizar hospedantes (Schwartz *et al.*, 2006; Ferrera-Cerrato y Alarcón, 2008; Tapia *et al.*, 2008). Aunque Antunes *et al.* (2009) demostraron que la introducción de un inoculante comercial con base en *R. intraradices* interactuó directa o indirectamente de forma sinérgica en suelo perturbado o no, y sin impacto negativo en la competencia o estructura de las comunidades de HMA nativos.

El impacto que tuvo la inoculación de *R. intraradices* en sorgo en condiciones de secano, fue manifestado con el beneficio de la productividad y rentabilidad del sistema de producción, así como en el manejo de una biotecnología que promovió mayor actividad biológica en el suelo, como lo muestran las emisiones de  $\text{CO}_2$ . No obstante, en el futuro sería importante encontrar un punto de equilibrio económico de producción ya que con el tiempo se esperaría un decremento de la fertilidad en el suelo, tal como se reveló con el contenido de N en el suelo.

Las micorrizas no son substitutos de la fertilización, la inoculación con micorrizas no implica que se deje de fertilizar, sino que se incrementa el volumen de exploración del suelo, lo que favorece una mayor captación de agua y nutrimentos (Grageda y González, 2010). Por otro lado, los niveles de materia orgánica del suelo (MOS) declinan cuando los suelos son incorporados a la agricultura, hay que considerar que la MOS tiene un efecto tanto directo como indirecto sobre la disponibilidad de nutrimentos como N, P y S para el crecimiento vegetal. Cuando los suelos están sujetos a un laboreo intenso, el contenido de MOS desciende en un período de 10-30 años, hasta que se obtiene un nuevo nivel

Microorganisms also play an important role in fertility as they modify the chemical characteristics of the soil, which are subject to the specific interactions between soil-plant- microorganisms, which results in their buffering capacity fertility over time (Baera, 1991; Mader *et al.*, 2000). In our study, after each cycle sorghum is involved a period of rest (fallow), so this system provides organic matter to the soil. According to Sheriff *et al.* (2008), for the case of sorghum in similar conditions, the waste is estimated at  $1 \text{ t ha}^{-1}$  connection, Radel *et al.* (2006) found that the addition of wheat residue to the soil increased the dry matter yield and mineral acquisition by wheat plants.

Furthermore, and according to the continuous use of mycorrhizal inoculant are unclear ecological consequences on the diversity of native AMF (by competition or displacement) owing to the effect of introducing strains HMA, particularly of fungal genera characterized by have 'aggression' to colonize hosts (Schwartz *et al.*, 2006; Ferrera-Cerrato and Alarcón, 2008; Tapia *et al.*, 2008). Although, Antunes *et al.* (2009) demonstrated that the introduction of a commercial inoculant based on *R. intraradices* directly or indirectly interacted synergistically in disturbed soil or not, without negative impact on competition and community structure of native AMF.

The impact of the inoculation of *R. intraradices* in sorghum under rainfed conditions was demonstrated with the benefit of productivity and profitability of the production system, as well as managing a biotechnology promoted increased biological activity in the soil, as shown by  $\text{CO}_2$  emissions. However, in the future it would be important to find an economic balance of yield with time as a decrease in fertility would be expected on the ground, as revealed by the content of N in the soil.

Mycorrhizae are not substitutes for fertilization, inoculation with mycorrhizal not imply not fertilize, but the volume of soil exploration increases, which favors a greater uptake of water and nutrients (Grageda and González, 2010). On the other hand, the levels of soil organic matter (SOM) decline when soils are incorporated into agriculture, consider the MOS has a direct and indirect effect on the availability of nutrients such as N, P and S for plant growth. When soils are subject to intensive tillage, the contents of MOS drops over a period of 10-30 years, until a new equilibrium level is obtained. This was observed in an analysis over 60 years in the corn belt soils

de equilibrio. Así se observó en un análisis hecho durante 60 años en suelos del cinturón del maíz (Cornbelt) en EE.UU., se encontró que cerca del 25% del N se perdió en los primeros 20 años, 10% en los segundos 20 años y 7% durante los terceros 20 años (Stevenson, 1982).

La productividad del sorgo a través de la inoculación micorrízica durante el período de evaluación fue constante; sin embargo, si la inoculación no se complementa con un programa efectivo de manejo sostenible (fertilización, labranza, rotación de cultivos, entre otros), el contenido de MOS y por consiguiente los rendimientos pueden decrecer en los próximos años, ya que durante el período de estudio se extrajo un promedio de 334 kg N ha<sup>-1</sup> y 86 kg P ha<sup>-1</sup> en ambos tratamientos.

## Conclusiones

Durante cinco años consecutivos, el rendimiento de grano de sorgo fue similar entre el manejo testigo (con fertilización inorgánica en presiembra) y el que llevó fertilizante químico e inoculación del HMA *R. intraradices*. Sin embargo, con el HMA se obtuvo consistentemente el mayor beneficio-coste de la producción, que en promedio fue \$ 216.00 ha<sup>-1</sup> comparado con la fertilización química.

En el quinto año, las variables como índice de clorofila, altura de planta y biomasa foliar fresca y seca, mostraron similitud entre el tratamiento fertilizado y el inoculado con el HMA. Aunque la inoculación con el HMA acrecentó significativamente la biomasa radical (10.2 g) en comparación con la fertilización química.

Los valores de pH, MOS, conductividad eléctrica, P y K en el suelo, fueron iguales estadísticamente entre los tratamientos fertilizado e inoculado con el HMA. Por el contrario, el contenido de N fue significativamente superior (6.7 mg kg<sup>-1</sup>) con la fertilización inorgánica, en relación con la inoculación micorrízica. Las variables biológicas como el número de esporas de HMA y la emisión de CO<sub>2</sub> en el suelo, se incrementaron significativamente en 10 y 77% con la inoculación del HMA, respectivamente.

La producción de sorgo con la inoculación micorrízica se debe complementar con un programa de manejo sostenible para evitar la pérdida de fertilidad del suelo.

(Cornbelt) in the U.S. , found that about 25% of N was lost in the first 20 years, 10% in the second 20 years and 7% in the third 20 (Stevenson, 1982) .

Productivity of sorghum through mycorrhizal inoculation during the evaluation period was constant, but if the inoculation is not complemented by an effective program of sustainable management (fertilization, tillage, crop rotation, etc.), the content of MOS and therefore yields are likely to decrease in the coming years, as during the study period, an average of 334 kg N ha<sup>-1</sup> extracted and 86 kg P ha<sup>-1</sup> in both treatments.

## Conclusions

For five consecutive years, the sorghum grain yield was similar between the control management (with inorganic fertilizer pre-sowing) and led chemical fertilizer and inoculation of HMA *R. intraradices*. However, with the HMA consistently had the highest benefit-cost production, which on average was \$ 216.00 ha<sup>-1</sup> compared with chemical fertilization.

In the fifth year, the variables such as chlorophyll index, plant height and fresh and dry leaf biomass showed similarity between the fertilized treatment and inoculated with the AMF. Although inoculation with HMA significantly increased the root biomass (10.2 g) compared to chemical fertilizers.

PH values, MOS, electrical conductivity, P and K in the soil were statistically equal between the fertilized and inoculated with HMA treatments. By contrast, the N content was significantly higher (6.7 mg kg<sup>-1</sup>) with the inorganic fertilizer in relation to mycorrhizal inoculation. The biological variables as the number of AMF spores and CO<sub>2</sub> emissions on the soil were significantly increased in 10 and 77 % with AMF inoculation, respectively.

A program of sustainable management to prevent loss of soil fertility should complement production of sorghum with mycorrhizal inoculation.

*End of the English version*



## Agradecimientos

Se agradece el apoyo de la Fundación Produce Tamaulipas, A. C., al Patronato para la Investigación, Fomento y Sanidad Vegetal de Tamaulipas, al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, y a la Universidad Autónoma de Tamaulipas. También a Rosalío Navarro Cervantes y Juan Olvera Martínez, por su colaboración en los trabajos de campo.

## Literatura citada

- Abdel, F. G. y Mohamedin, A. H. 2000. Interactions between a vesicular-arbuscular mycorrhizal fungus and *Streptomyces* and their effects on sorghum plant. *Biology and Fertility Soils*. 32:401-409.
- Alguacil, M., Lumini, E., Roldán, A., Salinas-Gracia, J., Bonfante, P., and Bianciotto, V. 2008. The impact of tillage practices on arbuscular mycorrhizal fungal diversity in subtropical crops. *Ecological Applications*. 18:527-536.
- Anderson, J. P. 1982. Soil respiration. Pp. 837-871. *In*: Miller, A. L. and Keeney, D. R. (ed). *Methods of Soil Analysis, Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. 2nd ed. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA.
- Antunes, M. P., Koch, A., Dunfield, K., Hart, M., Downing, A., Rilling, M., and Klironomos J. 2009. Influence of commercial inoculation with *Glomus intraradices* on the structure and functioning of an AM fungal community from an agricultural site. *Plant and Soil*. 317:257-266.
- Baera, J. M. 1991. Vesicular-arbuscular mycorrhizae as modifiers of soil fertility. *Advanced Soil Science*. 15:1-40.
- Boire, F., Rubio, R., Rouanet, J., Morales, A., Boire, G., and Rojas, C. 2006. Effects of tillage systems on soil characteristics, glomalin and mycorrhizal propagules in a Chilean Ultisol. *Soil Tillage Research*. 88:253-261.
- Bressan, W., Siqueira, J., Vasconcellos, C., and Purcino, A. 2001. Mycorrhizal fungi and phosphorus on growth, yield and nutrition of intercropped grain sorghum and soybean. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 36:315-323.
- Caris, C., Hordt, W., Hawking, H., Romheld, V., and George, E. 1998. Studies of iron transport by arbuscular mycorrhizal hyphae from soil to peanut and sorghum plants. *Mycorrhiza*. 8:35-39.
- Díaz, F. A. y Garza, C. I. 2007. Crecimiento de genotipos de sorgo y cártamo asociados a la colonización micorrizica arbuscular en suelo con baja fertilidad. *Universidad y Ciencia*. 23: 15-20.
- Díaz, F. A., Jacques, C. H. y Peña del Río, M. 2008b. Productividad de sorgo en campo asociada con micorriza arbuscular y *Azospirillum brasilense*. *Universidad y Ciencia*. 24: 229-237.
- Díaz, F. A., Garza, C. I., Pecina, Q. V. y Montes, G. N. 2008a. Respuesta del sorgo a micorriza arbuscular y *Azospirillum* en estrés hídrico. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 31:35-42.
- Díaz, F. A., Pecina, Q. V., Montes, G. N., Jacques, H. C. y Garza, C. I. 2011. Impacto de inoculantes microbianos en sorgo cultivado bajo déficit de humedad en el suelo. *In*: Oswald, U. (ed). *Retos de la Investigación del Agua en México*. CRIM-UNAM, CONACYT. México.
- Díaz, F. A., Salinas, G. J., Garza, C. I. y Mayek, P. N. 2008c. Impacto de labranza e inoculación micorrizica arbuscular sobre la pudrición carbonosa y rendimiento de maíz en condiciones semiáridas. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 31:257-263.
- Díaz, F. A., Salinas, J. G., Peña del Río, M. y Montes, G. N. 2007a. Productividad del sorgo con inoculación de micorriza arbuscular. *Campo Experimental Río Bravo, INIFAP. Folleto No. 18. Río Bravo, Tam. México*. 21 p.
- Díaz, M. R., Díaz, F. A., Garza, C. I. y Ramírez, L. A. 2007b. Brassinoesteroides e inoculación con *Glomus intraradices* en el crecimiento y la producción de sorgo en campo. *Terra Latinoamericana*. 25:77-83.
- FAO. 1999. *Soil Map of the World: Reference Base the Revised Legend*. Food Agriculture Organization of the United Nations. 19 p.
- Ferrera-Cerrato, R. y Alarcón, A. 2008. Biotecnología de los hongos micorrizicos arbusculares. pp 25-38. *In*: Díaz, F. A.; Mayek, P. N. (ed). *La Biofertilización como Tecnología Sostenible*. Plaza y Valdés-CONACYT. México.
- Gerderman, J. W. and Nicolson, T. H. 1963. Spores of mycorrhizal endogene species extracted from soil by wet sieving and decanting. *Transactions of the British Mycological Society*. 46:235-244.
- González, C. M. 2002. Producción y control de calidad de inoculantes de hongos micorrizicos arbusculares. pp 36-46. *In*: Pérez, M. J., Alvarado L. J. y Ferrera-Cerrato, R. (Eds). *Producción y Control de Calidad de Inoculantes Agrícolas y Forestales*. CMIAF, CP, INIFAP, SMCS. México.
- González, C. M., Gutiérrez, M. C. y Wright, S. 2004. Hongos micorrizicos arbusculares en la agregación del suelo y su estabilidad. *Terra Latinoamericana*. 22:507-514.
- Grageda-Cabrera, O. A. y González-Figueroa, S. S. 2010. *Micorriza INIFAP<sup>MR</sup>. Todo lo que usted desea saber*. Desplegable para productores No. 21. INIFAP. Celaya, Gto., México.
- Harinikumar, K. M. and Bagyaraj, D. J. 1989. Effect of cropping sequence, fertilizers and farmyard manure on vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi in different crops over three consecutive seasons. *Biology and Fertility Soils*. 7:173-175.
- Ibrahim, M. A., Campbell, W. F., Rupp, L. A., and Allen, E. B. 1990. Effects of mycorrhizae on sorghum growth, photosynthesis and stomatal conductance under drought conditions. *Arid Soil Research Rehabilitation*. 4:99-107.
- Jeffries, P. S., Gianinazzi, K. S., Perotto, K., Turnau, M., and Baera, J. M. 2003. The contribution of arbuscular mycorrhizal fungi in sustainable maintenance of plant health and soil fertility. *Biology and Fertility Soils*. 37:1-16.
- Lupwayi, N. Z., Rice, W., and Clayton, G. 1998. Soil microbial diversity and community structure under wheat as influenced by tillage and crop rotation. *Soil Biology and Biochemistry*. 30:1733-1741.
- Mader, P., Endenhofer, S., Boller, T., Wienken, A., and Niggli, U. 2000. Arbuscular mycorrhizae in long-term field trial comparing low-input (organic, biological) and high-input (conventional) farming systems in a crop rotation. *Biology and Fertility Soils*. 31:150-156.
- Manugistic, Inc. 1997. *Statgraphics Plus. Version 3.1* Rockville, MD.
- Montes, G. N. y Aguirre, R. J. 1992. La producción de sorgo de temporal en el norte de Tamaulipas. pp 54-63. *In*: Hess, L. M., Pérez, D. (ed). *Manual de Cultivos del Norte de Tamaulipas*. SARH, PIFSV, INIFAP. México.

- Ndiaye, E. L., Sandeno, J. M., McGrath, D., and Dick, P. 2000. Integrative biological indicators for detecting change in soil quality. *American Journal of Alternative Agriculture*. 15:26-36.
- Palma, R. M., Arrigo, N. M., Saubidet, M., and Conti, M. E. 2000. Chemical and biochemical properties as potential indicators of disturbances. *Biology and Fertility Soils*. 32:381-384.
- Radel, Y., Rubio, R. y Boire, F. 2006. Efecto 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. *Agricultura Técnica (Chile)*. 66: 172-184.
- Robles, C. J. y Baera, M. 2004. Respuesta de la planta y del suelo a inoculación con *Glomus intraradices* y rizobacterias en maíz en cultivo intensivo. *Terra Latinoamericana*. 22:59-69.
- Roldán, A., Salinas-García, J., Alguacil, M. M., and Caravaca, F. 2006. Soil sustainability indicators following conservation tillage practices under subtropical maize and bean crops. *Soil Tillage Research*. 93:273-282.
- Rosales, R. E. y Montes, G. N. 2005. Tecnología para la producción de sorgo en el norte de Tamaulipas. *Memoria Técnica No. 1. Campo Experimental Río Bravo, INIFAP. México*. 74 p.
- Salinas, G. J., Alvarado, C. M. y Sánchez, C. R. 2006. Suelo y agua. pp 147-162. *In: Rodríguez del Bosque, L. (ed). Campo Experimental Río Bravo: 50 Años de Investigación Agropecuaria en el Norte de Tamaulipas. Campo Experimental Río Bravo, INIFAP. Libro Técnico Núm. 1. México*.
- Salinas, G. J.; Díaz, F.A.; Garza, C. E. y Garza, C. I. 2005. Efectos de labranza y biofertilización en propiedades del suelo que afectan a la sostenibilidad de la producción de frijol. *Ciencia y Tecnología Alimentaria*. 5:30-34.
- Schwartz, M. W., Hoeksema, D. J., Gehring, C. A., Johnson, M., Klironomos, L. K., Abbott, L. and Pringle, A. 2006. The promise and the potential consequences of the global transport of mycorrhizal fungal inoculum. *Ecology Letters*. 9: 501-515.
- Smith, S. E. and Read, D. J. 2008. *Mycorrhizal Symbiosis*. 3<sup>th</sup> Edition. Academic Press, New York, USA. 605 pp.
- Stevenson, F. 1982. *Humus chemistry: genesis, composition, reactions*. New York: Wiley. 442 p.
- Tapia, G. J., Ferrera, C. R., Varela, F. L., Rodríguez, O. J., Lara, M. J., Soria, C. J., Cuellar, T. H., Tiscareño, I. M. A. y Cisneros, A. R. 2008. Caracterización e identificación morfológica de hongos formadores de micorriza arbuscular en cinco suelos salinos del estado de San Luis Potosí. *Rev. Mex. Micología*. 26:1-7.
- Van Loon, J. C. 1980. *Analytical Atomic Absorption Spectroscopy*. Academic Press, New York.
- Williams, A. H., Montes, G. N. y Pecina, Q. V. 2006. Sorgo. pp 32-35. *In: Rodríguez del Bosque, L. (Ed). Campo Experimental Río Bravo: 50 Años de Investigación Agropecuaria en el Norte de Tamaulipas. Campo Experimental Río Bravo, INIFAP. Libro Técnico No. 1. México*.