



El Colegio de la Frontera Sur

Evaluación del uso del estiércol bovino y micorriza en la producción de forraje de maíz (*Zea mays* L.) en Tabasco, México.

TESIS

Presentada como requisito parcial para optar al grado de
Doctor/a en Ciencias en Ecología y Desarrollo Sustentable
Con orientación en Ciencias de la Sustentabilidad

Por

Manuela Margarita Jiménez Ortiz

2019



El Colegio de la Frontera Sur

Villahermosa, Tabasco; 12 de diciembre de 2019.

Las personas abajo firmantes, integrantes del jurado examinador de:

Manuela Margarita Jiménez Ortiz

hacemos constar que hemos revisado y aprobado la tesis titulada:

“Evaluación del uso del estiércol bovino y micorriza en la producción de forraje de maíz (Zea mays L.) en Tabasco, México”

para obtener el grado de **Doctora en Ciencias en Ecología y Desarrollo Sustentable**.

	Nombre	Firma
Director	Dr. Regino Gómez Álvarez	_____
Asesor	Dr. Juan Manuel Pat Fernández	_____
Asesor	Dr. Jorge Oliva Hernández	_____
Asesor	Dr. Emilio Manuel Aranda Ibáñez	_____
Sinodal adicional	Dr. David Jesús Palma López	_____
Sinodal adicional	Dr. Manuel Jesús Cach Pérez	_____
Sinodal suplente	Dr. Rodimiro Ramos Reyes	_____

Existe una fuerza que me motiva

Una mano que me sustenta

Un amor que me alienta

Una gracia que me protege y no me abandona

Esto no es suerte, es bendición...

*Gracias **D**íos mío por estar siempre conmigo.*

Dedicatoria

A mí

Por llegar al final del camino emprendido en un jardín de niños

Por culminar una travesía inimaginable

Por lograr metas soñadas

Por el gran valor que tengo como persona y como mujer

Por todo esto y mucho más...

A mi familia

Por el amor que nos mantiene unidos en los momentos buenos y en los difíciles

Por su apoyo incondicional en todos los proyectos emprendidos

Por su motivación y por impulsarme a ser mejor cada día

Por los que están y por el que dejó un gran vacío...

Mi amor incondicional

A Lorenzo

Por comprender e impulsar mi desarrollo profesional

Por su apoyo total para la realización de este proyecto

Por ser parte en la travesía de mi vida...

Te amo, Gracias

Agradecimientos

A El Colegio de la Frontera Sur Unidad Villahermosa por la oportunidad de aceptarme en su programa de Doctorado en Ciencias en Ecología y Desarrollo Sustentable.

Al Consejo Nacional de Ciencia Y Tecnología (CONACYT), por la beca otorgada para el financiamiento de los estudios de postgrado.

Al Campo Experimental (C. E.) Huimanguillo del INIFAP, por facilitarme sus instalaciones para realizar el trabajo de gabinete, y por el uso de las estufas de aire forzado para el secado de las muestras vegetales.

Al C. E. General Terán del INIFAP, por la donación de la micorriza arbuscular empleada en el trabajo de investigación.

Al Ing. Sabel Barrón Freyre (C. E. Huimanguillo, INIFAP) por su valiosa asesoría en el establecimiento y desarrollo del cultivo de maíz.

Al MVZ. Juan Pablo Cruz Castañeda por su colaboración como productor cooperante en la realización del trabajo de investigación en su parcela.

Al M. en C. Aarón Jarquín Sánchez responsable del laboratorio de Biogeoquímica de El Colegio de la Frontera Sur Unidad Villahermosa, por las facilidades otorgadas para los análisis químicos requeridos.

A la M. en C. Lorena Reyes Sánchez responsable del Sistema de Información Bibliotecario de Ecosur (SIBE), a la Lic. Yadira G. Ramos G., responsable de servicios escolares y al M. en C. Oscar L. Santos G., responsable del área de informática, unidad Villahermosa por el apoyo brindado en el transcurso del programa.

A los investigadores del C. E. Huimanguillo: Dr. Jorge Quiroz Valiente, MC. Manuel Barrón Arredondo, MC. Mario Rodríguez Cuevas y MC. José Alfredo Jiménez Chong, por sus valiosas asesorías y consejos que me dieron en el desarrollo del trabajo de investigación. Especial agradecimiento a los investigadores Dr. Jorge Oliva Hernández y al MC. Lorenzo Granados Zurita, por su invaluable apoyo en el establecimiento del trabajo de investigación, en las arduas evaluaciones de campo, y en los análisis estadísticos de los datos.

A la Ing. Gabriela Hernández Granados y a los alumnos de zootecnia de la UPCH, por su apoyo en las evaluaciones de campo.

Al comité de tesis Dr. Regino Gómez Alvares, Dr. Jorge Oliva Hernández, Dr. Juan Manuel Pat Fernández y Dr. Emilio Manuel Aranda Ibáñez, por la dirección, asesoría y observaciones realizadas al trabajo de investigación.

A los amigos encontrados en este camino, Juan Carlos, Romeo, Matilde, Raysa, y Consuelo, por los pocos pero gratos momentos vividos. En especial a mi amiga Hakna, por su apoyo y su invaluable amistad que ha cruzado fronteras. Es grato tenerte aquí.

TABLA DE CONTENIDO

Resumen	1
Capítulo 1	2
Introducción general	2
Capítulo 2. Influencia del estiércol composteado y micorriza arbuscular sobre la composición química del suelo y el rendimiento productivo de forraje de maíz (<i>Zea mays</i> L.).	6
Resumen	6
Abstract	7
Introducción	8
Método	11
Resultados	17
Características y composición química del suelo	17
Porcentaje de infección de M en raíz y características agronómicas de la planta	20
Índice de crecimiento en el cultivo, acumulación de nutrientes y rendimiento productivo	21
Discusión	25
Composición química del suelo y número de esporas	26
Porcentaje de infección de M en raíz y características agronómicas de la planta	29
Tasa de crecimiento en el cultivo, acumulación de nutrientes y rendimiento productivo	30
Conclusiones	33
Agradecimientos	34
Referencias	34
Capítulo 3. Contenido nutricional y costo de producción del forraje de maíz (<i>Zea mays</i> L.) fertilizado con estiércol composteado y micorriza.	41
Resumen	41
Abstract	42
Introducción	43
Materiales y métodos	45

Resultados	49
Discusión.....	52
Conclusiones.....	57
Agradecimientos.....	57
Literatura citada.....	58
Capítulo 4. Conclusiones generales	71
Recomendaciones.....	72
Literatura citada.....	73

INDICE DE CRADRO Y TABLAS

Cuadro 1. Descripción de los tratamientos experimentales aplicados en el cultivo de maíz.....	13
Tabla 1. Costo de producción de estiércol composteado.....	67
Tabla 2. Costos de producción y cosecha de una hectárea de cultivo de forraje de maíz (<i>Zea mays</i>) empleando fertilización química.	68
Tabla 3. Costos de producción de una hectárea de cultivo de forraje de maíz (<i>Zea mays</i>) empleando fertilización orgánica	69
Tabla 4. Costo de la unidad de forraje de maíz (MS) (<i>Zea mays</i>) y ganancia del cultivo con diferente tipo de fertilización.	70

INDICE DE FIGURAS Y GRÁFICAS

Figura 1. Precipitación pluvial acumulada y promedio (mensual) de temperatura ambiente en el periodo de estudio de dos ciclos de cultivo del maíz: Primavera – Verano 2017 (junio, julio, agosto y septiembre) y Otoño – Invierno 2017/2018 (diciembre, enero, febrero y marzo).....	17
Figura 2. Efecto de la fertilización con estiércol composteado (E) y del hongo micorrízico arbuscular (M) <i>Glomus intraradices</i> en forraje de maíz sobre el pH, CE, MO y número de esporas en el suelo en dos ciclos de cultivo (PV y OI)..	18

Figura 3. Efecto de la fertilización con estiércol composteado (E) y micorriza (M) *Glomus intraradices* en forraje de maíz sobre los niveles de N, P, K y Ca en el suelo en dos ciclos de cultivo (PV y OI)..... 19

Figura 4. Efecto de la fertilización con estiércol composteado (E) y el hongo micorrízico arbuscular (M), *Glomus intraradices* en forraje de maíz sobre la capacidad de intercambio catiónico (CIC) en el suelo..... 20

Figura 5. Respuesta de la fertilización con estiércol composteado (E) y el hongo micorrízico arbuscular (M), *Glomus intraradices* en forraje de maíz sobre las variables agronómicas altura, número de hojas y MS en dos ciclos de cultivo (PV y OI)... .. 22

Figura 6. Comportamiento de la tasa de crecimiento del cultivo de maíz (TCC) a los 20, 40, 60 y 80 días después de la siembra (DDS), empleando estiércol composteado (E) y el hongo micorrízico arbuscular (M), *Glomus Intraradices* en dos ciclos de cultivo (PV y OI).. 23

Figura 7. Acumulación de nutrientes en el cultivo de forraje de maíz en respuesta a la fertilización con estiércol composteado (E) y el hongo micorrízico arbuscular (M), *Glomus intraradices* en dos ciclos de cultivo (PV y OI)..... 24

Figura 8. Efecto de la fertilización con estiércol composteado (E) y el hongo micorrízico arbuscular (M), *Glomus intraradice* en forraje de maíz sobre el rendimiento total en materia verde (MV) y materia seca (MS) en dos ciclos de cultivo (PV y OI)..... 25

Gráfica 1. Contenido de nutrientes (PB, P, K y Ca) y rendimiento en el cultivo de forraje de maíz (*Zea mays*) a la floración y a la cosecha en dos ciclos de producción (P-V y O-I).....66

Resumen

El objetivo de la presente investigación fue evaluar la influencia del estiércol bovino composteado y de la micorriza arbuscular sobre la composición química del suelo, el estado nutricional y rendimiento productivo del forraje de maíz (*Zea mays* L.). En un primer experimento se evaluaron seis niveles de fertilización orgánica: tres (15, 30 y 45 t ha⁻¹) con estiércol composteado (E) y tres (15, 30 y 45 t ha⁻¹) con E más el hongo micorrízico arbuscular *Glomus intraradices* (EM), uno de fertilización química (FQ) y un testigo (SF), en dos ciclos de cultivos: primavera-verano (PV) y otoño-invierno (OI). Se evaluaron la composición química del suelo, número de esporas; acumulación de nutrientes en la planta, porcentaje de infección en raíz, variables agronómicas, y respuesta del cultivo. El uso de 30EM representa una mejor opción de fertilización con relación SF y FQ debido a que la planta tuvo mayor producción de forraje en MS durante la PV y OI. El uso de *G. intraradices* en combinación con E contribuye a la utilización de nutrientes del suelo por la planta. Un segundo experimento tuvo como objetivo determinar la Influencia del estiércol bovino composteado y de la micorriza arbuscular sobre el contenido de nutrientes del forraje de maíz, su rendimiento productivo y costo del uso del E. Para ello, se evaluaron los mismos tratamientos y ciclos de cultivo descritos en el experimento uno. Las variables de respuestas se tomaron en dos etapas de fisiológicas del cultivo de maíz (floración y cosecha). Las variables de respuesta fueron: contenido de nutrientes en el cultivo, rendimiento (MS), costo del E, costo del cultivo de maíz y relación costo/beneficio. El costo de producción de E, bajo el esquema de mano de obra familiar, favorece que el E y EM puedan sustituir la fertilización inorgánica en el cultivo del forraje de maíz sin perder viabilidad económica y productiva.

Palabras claves

Abono orgánico, época del año, trópico, biofertilizante, gramínea

Capítulo 1

Introducción general

La acumulación de estiércol generado en los sistemas de producción ganaderos provoca impactos ambientales negativos como la generación de gases de efecto invernadero, eutrofización de cuerpos de agua por escorrentía, entre otros. Según el Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC 2006), los constituyentes inorgánicos de importancia ambiental contenidos en las excretas de origen animal son el nitrógeno y el fósforo. Otro componente importante en la producción de estiércol es el metano (60% de los gases producidos por la fermentación de los alimentos en el rumen), el cual es un gas que aunque no tóxico, sí es un biogás que contribuye significativamente al efecto invernadero y, por lo tanto al cambio climático global (Bonilla y Lemus 2012). Un recurso natural afectado por la contaminación del estiércol es el agua, tanto las aguas profundas como las aguas superficiales. Los nitratos presentes en el estiércol son lixiviados y llegan por infiltraciones y percolaciones al agua subterránea, en tanto que las aguas superficiales son afectadas por la presencia del fósforo contenido en el estiércol a través de las escorrentías (EPA 2006; Pinos et al. 2012).

En los sistemas de producción pecuarios, la acumulación de excretas sin un tratamiento genera efectos negativos al medioambiente, además de moscas y mal olor. Esta problemática requiere ser atendida a través de la aplicación de tecnologías para su manejo que permita disminuir su capacidad contaminante. Se han elaborado estudios sobre la utilización del estiércol como fertilizante orgánico en comparación con la fertilización química (López et al. 2010; López et al. 2015; Fortis et al. 2009), sin embargo en la mayoría de los casos se han realizado para evaluar el cultivo de maíz como grano para la alimentación humana. También se han realizado estudios del uso de las micorrizas en la producción de maíz en combinación con diferentes abonos orgánicos como vermicompostas, biocompost, abonos verdes, biofertilizantes entre otros (Miranda y Miranda 2006; Martín et al. 2015).

El uso de abonos orgánicos tiene una importancia significativa debido a que contribuyen a proteger la fertilidad de los ecosistemas agropecuarios. Pueden prevenir su degradación por la aportación de materia orgánica al suelo. Los abonos orgánicos son

parte primordial en una producción agropecuaria sustentable debido a su origen natural. Fomenta la presencia de una población de microorganismos en el suelo a lo largo del ciclo del cultivo e incluso aun después de terminado (Nieto et al. 2010). Dentro de los beneficios de los abonos orgánicos se encuentran: la aportación de nutrimentos al suelo permitiendo su liberación gradual para ser aprovechados por las plantas (aporte de carbono orgánico para el uso de microfauna benéfica del suelo y formación de complejos orgánicos), mejora las condiciones físicas, químicas y biológicas del suelo (mejora la estructura y textura del suelo, favoreciendo la retención de humedad, permeabilidad y porosidad del mismo, para un mejor desarrollo de la parte radical de las plantas), eleva la capacidad del intercambio catiónico favoreciendo la permanencia de nutrimentos en el suelo, entre otros (Félix et al. 2008), por lo que la adición de materia orgánica al suelo puede jugar un rol importante en el recurso suelo ya que representa un reservorio de nutrientes disponible para las plantas (Zech et al. 1997).

El compostaje es un proceso de descomposición aeróbico de la materia orgánica (MO) que se lleva a cabo en dos fases: fase de bio-oxidación (fases mesófila, termófila y mesófila de enfriamiento) y de maduración o humificación de la materia orgánica (Bernal et al. 2009). Los componentes químicos de un fertilizante orgánico deben pasar por un proceso de mineralización, debido a que nutrientes como el nitrógeno (N) está inicialmente presente en forma orgánica y necesita pasar a la forma inorgánica (NH_4^+ , NO_3^-) para ser utilizado por las plantas. Una de las características que se consideran para determinar la calidad de un abono orgánico es el contenido de materia orgánica humificada y estabilizada, lográndose éste con la madurez de la composta. La humificación se refiere a la producción de compuestos orgánicos complejos y polimerizados que prevalecen sobre la mineralización en la fase de maduración de la composta. Estos compuestos son ácidos húmicos como el C-orgánico álcali extraíble (C_{EX}) y el ácido húmico C-orgánico (C_{HA}) (Senesi 1989). Estos productos resultantes son estables y actúan como fertilizantes de lenta liberación (Bernal et al. 2009). Se han realizado diversos trabajos con la finalidad de evaluar diferentes dosis de aplicación (Figuroa et al. 2010; López-Calderón et al. 2015; Zhang et al. 2016; Agegnehu et al. 2016; Avalos et al. 2018; García et al. 2019). Conocer su efecto sobre los cultivos, así

como su respuesta a las características del suelo, podría permitir su implementación como alternativa al manejo de desechos.

La micorriza es la asociación simbiótica mutualista que se establece entre las raíces de la mayoría de las plantas con hongos simbióticos. Las micorrizas desempeñan un papel importante en la captura de nutrientes del suelo haciéndolos disponibles en la nutrición de las plantas (Smith y Read 2008). De esta manera se promueve un mejor crecimiento de las plantas especialmente en aquellos suelos donde nutrientes como el P, N, Zn y Cu son escasos. Cano (2011), menciona algunos de los benéficos que se obtienen de las micorrizas como: Incremento de la superficie de los pelos radiculares, para la absorción de agua y de nutrimentos; alarga la vida útil de las raíces absorbentes; mejoramiento de la absorción iónica y acumulación eficiente del fósforo; solubilización de minerales del suelo; aumento de la capacidad fotosintética de la planta incrementando la producción de biomasa; resistencia de raíces a infecciones causadas por patógenos; incremento de la tolerancia de las plantas a toxinas del suelo (orgánicas e inorgánicas); disminuye el estrés causado por factores ambientales; entre otros.

Por lo anterior se planteó la hipótesis de que el estado nutricional y la productividad del cultivo del forraje de maíz aumentan cuando se emplea estiércol composteado y micorriza arbuscular. Así como que el uso de abono orgánico a partir de la humificación del estiércol tiene una relación costo/beneficio positiva que favorece su adopción en el cultivo de forraje de maíz. Para determinar estas aseveraciones el presente trabajo tuvo como objetivo general evaluar la influencia del estiércol bovino composteado y de la micorriza arbuscular sobre la composición química del suelo, el estado nutricional y rendimiento productivo del forraje de maíz (*Zea mays* L.). Para llevarlo a cabo se trabajó sobre dos objetivos específicos: 1) Determinar la influencia del estiércol composteado y la efectividad de la micorriza arbuscular sobre la composición química del suelo, el contenido nutricional 2) Determinar el contenido de nutrientes del forraje de maíz en dos etapas de desarrollo del cultivo y, la relación costo/beneficio de la utilización del estiércol composteado en el proceso de producción de forraje de maíz.

El presente trabajo incluye dos artículos científicos generados del trabajo de investigación del programa de doctorado (capítulos 2 y 3), y los cuales cubren los objetivos planteados

en el mismo. Finalmente se presentan las conclusiones generales (capítulo 4) derivadas del trabajo de investigación.

Capítulo 2. Artículo publicado en la revista Nova Scientia, N° 23, Vol. 11 (2) 2019).

Influencia del estiércol composteado y micorriza arbuscular sobre la composición química del suelo y el rendimiento productivo de forraje de maíz (*Zea mays* L.).

*Manuela Margarita Jiménez-Ortiz¹, Regino Gómez-Alvarez¹, Jorge Oliva-Hernández², Lorenzo Granados-Zurita², Juan Manuel Pat-Fernández³, Emilio Manuel Aranda-Ibañez⁴.

Palabras clave: enmiendas orgánicas, biofertilizante, trópico, productividad.

Keywords: organic amendments, biofertilizer, tropic, productivity.

Resumen

Introducción: El estiércol composteado (E) es una alternativa al reciclaje de nutrientes, y puede mejorar o mantener la fertilidad del suelo sustituyendo a la fertilización convencional. El objetivo del estudio fue evaluar las características y composición química del suelo, porcentaje de infección del hongo micorrizico arbuscular *Glomus intraradices* (M) en raíz, características agronómicas de la planta, tasa de crecimiento en el cultivo, acumulación de nutrientes y rendimiento productivo, en respuesta del E y del M en forraje de maíz.

Método: Se evaluaron seis niveles de fertilización orgánica (15, 30 y 45 t ha⁻¹ de E, 15, 30 y 45 t ha⁻¹ de EM), uno de fertilización química (FQ: 160-60-30 kg ha⁻¹ de NPK), y un testigo (sin fertilizar: SF), en dos ciclos de cultivos (Ciclo, PV: primavera-verano y OI: otoño-invierno). Se utilizó E y *G. intraradices*. Las variables estudiadas en el suelo fueron: pH, conductividad eléctrica (CE), materia orgánica (MO), N, P, K, Ca, capacidad de intercambio catiónico (CIC), número de esporas; en la planta: acumulación de nutrientes (N, P, K, Ca), porcentaje de infección en raíz, altura, número de hojas y materia seca (MS); en el cultivo: tasa de crecimiento del cultivo (TCC), rendimiento de forraje de maíz en materia verde (MV t ha⁻¹) y materia seca (MS t ha⁻¹).

Resultados: Con excepción del K en suelo y la CIC, el Tratamiento, Ciclo y la interacción de ambos factores afectaron las variables que definieron la composición química del suelo (pH, CE, MO, N, P, Ca), la acumulación de nutrientes en planta (N, P, K, Ca) y el rendimiento de forraje de maíz en MV y MS.

En OI, FQ presentó el menor contenido de MO; en PV, un incremento en el E (de 15E a 45E) permitió aumentar la MO. El N del suelo fue mayor en OI con relación a PV en todos los tratamientos. En OI, 30EM presentó la mayor acumulación de nutrientes en planta (N, P, K y Ca)

con respecto al resto de los tratamientos. En ambos ciclos, PV y OI, 30EM tuvo el mayor rendimiento de forraje de maíz en MS.

Discusión o Conclusión: La composición química del suelo, planta y el rendimiento de forraje de maíz fueron afectados por el uso de E solo o en combinación con M durante los ciclos PV y OI. El uso de 30EM representa una mejor opción de fertilización con relación a los tratamientos SF y FQ debido a que la planta tuvo mayor producción de forraje de maíz en MS durante la PV y OI. El uso de *G. intraradices* en combinación con E contribuye a optimizar la utilización de nutrientes del suelo por la planta. Los resultados obtenidos son importantes para incrementar la calidad y cantidad de forraje de maíz.

¹El Colegio de la Frontera Sur. Unidad Villahermosa. Carretera Villahermosa-Reforma Km 15.5, Ranchería el Guineo, Sección II CP. 86280 Villahermosa, Tabasco-México. *E-mail: majimenez@ecosur.edu.mx

²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Huimanguillo. Carretera Federal Huimanguillo-Cárdenas Kilómetro 1, CP. 86400 Huimanguillo, Tabasco-México.

³El Colegio de la Frontera Sur. Unidad Campeche. Avenida Rancho Polígono 2-A, Ciudad Industrial Lerma CP. 24500. Campeche, Campeche-México.

⁴Colegio de Postgraduados Campus Tabasco. Periférico S/N, 86500 Heroica Cárdenas, Tabasco-México.
© Universidad De La Salle Bajío (México)

Abstract

Introduction: Composted manure (CM) is an alternative to nutrient recycling, and can improve or maintain soil fertility by replacing conventional fertilization. The objective of the study was to evaluate the characteristics and chemical composition of the soil, percentage of infection of the arbuscular mycorrhizal fungus (AMF) in the root, agronomic characteristics of the plant, growth rate in the crop, nutrient accumulation and productive yield, in response to the E and *Glomus intraradices* (CM) in forage corn.

Method: Six levels of organic fertilization were evaluated (15, 30 and 45 t ha⁻¹ of E, 15, 30 and 45 t ha⁻¹ of EM), one of chemical fertilization (QF: 160-60-30 kg ha⁻¹ of NPK), and a control (without fertilizing: WF), in two crop cycles (Cycle, SS: spring-summer and AW: autumn-winter). E and *G. intraradices* were used. The variables studied in the soil were: pH, electrical conductivity (EC), organic matter (OM), N, P, K, Ca, cation exchange capacity (CEC), number of spores; in the plant: accumulation of nutrients (N, P, K, Ca), percentage of infection in root, height, number of leaves and dry matter (DM); in the crop: growth rate of the crop (GRC), yield of forage in green matter (GM t ha⁻¹) and dry matter (DM t ha⁻¹).

Results: With the exception of the K in soil and the CEC, the Treatment, Cycle and the interaction of both factors affected ($P \leq 0.05$) the variables that defined the chemical composition of the soil

(pH, EC, OM, N, P, Ca), the accumulation of plant nutrients (N, P, K, Ca) and forage yield in GM and DM. In OI, QF presented the lowest OM content; in SS, an increase in E (from 15E to 45E) allowed to increase the OM ($P \leq 0.05$). The N of soil was higher in AW in relation to SS in all treatments ($P \leq 0.05$). In AW, 30EM presented the highest accumulation of plant nutrients (N, P, K and Ca) with respect to the rest of the treatments ($P \leq 0.05$). In both cycles, SS and AW, 30EM had the highest forage yield in DM ($P \leq 0.05$).

Discussion or Conclusion: The chemical composition of the soil, plant and forage maize yield were affected by the use of E alone or in combination with M during the SS and AW cycles. The use of 30EM represents a better fertilization option with relation WF and QF because the plant had more forage production in MS during the SS and AW. The use of *G. intraradices* in combination with E contributes to optimize the use of soil nutrients by the plant. The results obtained are important to increase the quality and quantity of feed corn.

Introducción

El cultivo de maíz se desarrolla en México mayormente bajo un agroecosistema convencional con paquetes tecnológicos que están basados en el uso de insumos externos (Damián *et al.*, 2010, 68). En la zona tropical húmeda de México, el cultivo del maíz para producción de forraje y su subsecuente ensilaje se ha incrementado en los últimos cinco años en un 20 % (SIAP, 2018). La conservación de follaje de la planta a través del ensilaje y su posterior uso en la alimentación del ganado bovino en regiones no tropicales es una práctica común (Garcés *et al.*, 2004, 67). Sin embargo, en la región tropical húmeda de México, el ensilaje de maíz es relativamente reciente, por lo que se debe generar tecnología orientada a optimizar su rendimiento productivo y calidad nutricional (Barrón *et al.*, 2014, 312). La elaboración de silo de maíz se considera como un reservorio en la alimentación de rumiantes en épocas de escasos forrajes como la sequía y nortes, o como complementación durante todo el año. Debido a esto, el cultivo de forraje de maíz en el trópico húmedo se realiza tanto en el ciclo Primavera – Verano, como en Otoño – Invierno para cubrir las necesidades de alimentación del ganado (Barrón *et al.*, 2014, 311). En el proceso de cosecha del forraje de maíz se remueve la planta completa y por consiguiente no hay residuos aéreos de la cosecha que pudieran reincorporarse al suelo, lo que reduce la disponibilidad de MO como sustrato para el desarrollo y funcionamiento de los microorganismos del suelo (Gliessman *et al.*, 2007, 16). Los nutrientes que requiere la planta de maíz bajo un manejo convencional del cultivo son aportados generalmente por fertilizantes inorgánicos. Con

ello se espera obtener un alto rendimiento de biomasa por ciclo de cultivo (Díaz *et al.*, 2014, 35). Sin embargo, es importante considerar que el uso excesivo de insumos agrícolas genera daños ecológicos por reducir la eficiencia del uso de nutrientes aplicados (Shanahan *et al.*, 2008, 52-53), así como, afectar la fertilidad del suelo por extracción de nutrientes, compactar el suelo y disminuir el contenido de materia orgánica, la cual es más rápida que su acumulación (Diacono y Montemurro, 2010, 403).

En la productividad del suelo, la MO es un reservorio importante de carbono (C) y fuente de nutrientes que requieren las plantas para su crecimiento como el Nitrógeno (N), con aproximadamente más del 90 % en sus formas orgánicas (Sparling *et al.*, 2006, 548). Sus componentes se encuentran en un estado dinámico debido a que por las diversas transformaciones constantemente pasan de un estado a otro. La descomposición de la MO está relacionada con la mineralización, la dinámica de la materia orgánica disuelta, la humificación y la estabilización de la MO. Esta dinámica de transformaciones se puede ver influenciada por factores climáticos, físicos, químicos y por la calidad del origen de la MO (Zech *et al.*, 1997, 118). La liberación de nutrientes aportados al suelo se da a través de la descomposición y mineralización de la MO. La mineralización es la transformación de los elementos orgánicos a compuestos inorgánicos, con la intervención de la actividad microbiana contenida en el suelo. Dichas transformaciones se dan a diferentes velocidades dependiendo de las fracciones de la MO, rápida en los componentes lábiles en una primera fase de descomposición y lenta en una segunda fase debido a moléculas refractarias (resistentes). La mineralización de la MO está influenciada por la temperatura y la humedad, entre otros factores como el pH, la calidad de los componentes primarios, etc., por lo que en regiones cálidas la acumulación de la MO se ve disminuida por una rápida mineralización y disponibilidad de nutrientes. Lo anterior es debido a que los microbios, quienes son los encargados de los procesos de degradación de la MO, son los directamente afectados por dichos factores (Zech *et al.*, 1997, 133; Gallardo, 2001, 146).

La preparación del suelo realizado para los cultivos disminuye las entradas de C y el bajo contenido de MO (por aumento de la tensión de Oxígeno que acelera la mineralización), no obstante, la aplicación de prácticas agroecológicas, tales como, el uso de abonos orgánicos (estiércol composteado), pueden evitar estos perjuicios (Gallardo, 2001, 146). Los abonos orgánicos son una alternativa para incorporar nutrientes al suelo y planta. Si bien una de las desventajas de estos, es la lenta disponibilidad de nutrientes a las plantas y la acumulación de sales

(Castro *et al.*, 2009, 32; Quiroga *et al.*, 2011, 202). Sin embargo, los beneficios por adicionar materia orgánica al suelo pueden ser mayores, destacando el aumento del contenido de carbono, una mayor capacidad de intercambio catiónico (la cual es importante para la disponibilidad de nutrientes de las plantas), una mejor relación C/N y mayor disponibilidad de potasio y fósforo (Diacono y Montemurro, 2010, 409, 410). El estiércol composteado contiene residuos fácilmente degradables, con efecto intenso y transitorio, y residuos más resistentes como la lignina y la celulosa, con un efecto menor pero duradero (Diacono y Montemurro, 2010, 411). Respecto al rendimiento en el cultivo, éste se ha relacionado con el contenido de carbono en el suelo, pero depende de factores como el contenido inicial de este elemento, manejo del suelo, uso de fertilizantes inorgánicos y orgánicos, entre otros (Martínez *et al.*, 2008, 86). El contenido de MO en el suelo, es un indicador que se relaciona con su calidad y productividad. El uso de abonos orgánicos de forma continua puede aumentar la MO significativamente en suelos con niveles bajos (Ramos y Terry, 2014, 53).

Otra práctica agroecológica que puede beneficiar la producción de un sistema es el uso de los hongos micorrízicos arbusculares (M), como el *Glomus intraradices*, que propicia una relación simbiótica con la mayoría de las plantas terrestres. Esta asociación entre hongo-planta, genera una extensión radical que propicia mayor absorción de nutrientes para la planta como el P, fijación del N₂, mejora la calidad del suelo y aumenta la diversidad y productividad de las plantas en diferentes ecosistemas. Se ha argumentado que las prácticas de la agricultura convencional han generado disminución en las poblaciones de M, influyendo también en la calidad del suelo y su productividad (Barrer, 2009, 124). En trabajos realizados con la aplicación de fertilización orgánica en el cultivo de forraje de maíz, se obtuvo una producción de forraje similar a la fertilización convencional y superior al testigo (Trejo *et al.*, 2013, 735; López *et al.*, 2010, 53) o superiores respecto a la fertilización convencional (Salazar *et al.*, 2009, 377). Si bien no siempre se obtienen rendimientos superiores con la fertilización orgánica, si pueden ser similares a los obtenidos con el uso de fertilizantes convencionales (Trejo *et al.*, 2013, 735). Estudios realizados con el M *Glomus intraradices* mostraron incrementos en los rendimientos en grano de maíz (17.6 %) al combinarse con humus de lombriz (Pérez, 2012, 56) y del 29.9 % respecto al testigo cuando se combina con *Azospirillum* (Uribe *et al.*, 2007, 13).

En la zona donde se realizó el presente estudio, (Vega del Río Mezcalapa en Tabasco, México) se desarrolla el sistema de producción (SP) bovinos de doble propósito (carne y leche)

tradicional. Estas unidades de producción cuentan con alrededor de 20 ± 9.01 vacas en producción en promedio. La alimentación del ganado es con base en forrajes con pastoreo extensivo y pocos complementan con ensilaje de maíz. Su sistema de ordeña es manual y su índice tecnológico es de 5 ± 3.89 , el cual hace referencia a que presentan una baja adopción de tecnologías en sus SP (Granados-Rivera *et al.*, 2018, 50-51). Una de las desventajas de este sistema es la generación y acumulación del estiércol en los corrales de ordeña ($52 \text{ t estiércol seco año}^{-1}$ aproximadamente). Esta situación representa un problema de manejo para el productor quien frecuentemente desconoce algunas alternativas para el manejo, procesamiento y reciclado del estiércol de los animales (Sánchez *et al.*, 2011, 377). Ante este escenario, es importante realizar prácticas de manejo que puedan mostrar al productor el beneficio del reciclaje del estiércol y su uso como fertilizante orgánico en la producción de forraje de maíz (el cual emplean para ensilar).

La implementación de prácticas agroecológicas como la fertilización orgánica (estiércol composteado) y el uso de microorganismos benéficos como el M, pueden beneficiar los sistemas de producción agropecuarios. Esto debido a que el uso del estiércol composteado es una alternativa al reciclaje de nutrientes, y puede mejorar o mantener la fertilidad del suelo al emplearlo como sustitución a la fertilización convencional. En base a lo anterior, el objetivo de la presente investigación fue evaluar la composición química del suelo, número de esporas de M en el suelo, variables agronómicas, porcentaje de infección del M en raíz, tasa de crecimiento del cultivo (TCC), nutrientes acumulados y productividad del cultivo, empleando estiércol composteado (E) y M en dos ciclos de cultivo de forraje de maíz bajo condiciones de trópico húmedo de Tabasco.

Método

Localización

El estudio se realizó en la parcela del Sr. Juan Pablo Cruz Castañeda ubicada en Huimanguillo, Tabasco, México (15Q 0456225; 1948685 UTM). El clima de la región es cálido húmedo con lluvias en verano $Am(w)''(i)g$ (García, 2004, 39), con influencia de nortes en invierno y ligera sequía en los meses de agosto y septiembre (llamada canícula). La época de lluvias se presenta de junio a septiembre, período en el cual se concentra el 71.5 % de la precipitación pluvial anual. Un periodo seco entre marzo y abril con 39 % de evaporación. La temporada regular de nortes se extiende de octubre a marzo (West *et al.*, 1985, 34). La temperatura ambiente media anual

es de 26.7 °C con máxima de 39.7 °C y mínima de 13.2 °C. El suelo corresponde a la denominación Fluvisol éutrico (Palma *et al.*, 2007, 26), de textura arcillo-arenoso, localmente conocido como suelo de vega de río, con pH de 6.3 a 6.7.

El estudio se realizó durante dos ciclos de cultivo Primavera-Verano (PV) 2017 (junio - septiembre) y Otoño-Invierno (OI) 2017/2018 (diciembre, enero - marzo) bajo condiciones exclusivamente de temporal. Los datos climatológicos de precipitación pluvial acumulada (mm día⁻¹) y temperatura ambiente (°C día⁻¹) que prevalecieron durante el periodo de estudio, se obtuvieron de la estación meteorológica del Campo Experimental Huimanguillo del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) (Figura 1).

Diseño experimental y Manejo del cultivo

Se utilizaron dos diseños experimentales. El primer diseño fue factorial con dos factores. El primer factor fue Tratamiento con ocho niveles; seis de fertilización orgánica (15, 30 y 45 t ha⁻¹ de E, 15, 30 y 45 t ha⁻¹ de E + M), uno de fertilización inorgánica (FQ: 160-60-30 kg ha⁻¹ de NPK), y un testigo (SF). El segundo factor fue el ciclo de cultivo (PV y OI). El segundo diseño experimental fue factorial con tres factores, en donde los factores: Tratamiento (ocho tratamientos de fertilización) y Ciclo (PV y OI) fueron similares a lo indicado en el primer diseño experimental. El tercer factor fueron los días después de la siembra (DDS), 20, 40, 60 y 80 días. Se utilizaron seis repeticiones por tratamiento, cada repetición correspondió a una parcela experimental. Las parcelas experimentales fueron de 20 m², las cuales contaron con seis surcos, desechando un surco de cada lateral, considerando los cuatro surcos centrales como área útil de cada parcela.

El cultivo de maíz se realizó en un área de 1, 140.8 m². Se utilizó el híbrido PAS-525 una distancia de 80 cm entre surcos y 15 cm entre plantas, con una densidad de siembra de 82, 500 plantas ha⁻¹. Se usó el paquete tecnológico del INIFAP (preparación del terreno, siembra, control de plagas, etc.) para la producción de maíz para la zona (Tinoco *et al.*, 2002, 13-61).

Cuadro 1. Descripción de los tratamientos experimentales aplicados en el cultivo de maíz.

Tratamiento	Descripción
SF	Testigo (sin fertilización)
15E	15 t ha ⁻¹ de estiércol composteado (E)
30E	30 t ha ⁻¹ de E
45E	45 t ha ⁻¹ de E
15EM	15 t ha ⁻¹ de E + hongo micorrízico arbuscular <i>G. intraradices</i> (M)
30EM	30 t ha ⁻¹ de estiércol composteado + M
45EM	45 t ha ⁻¹ de estiércol composteado + M
FQ	Fertilización química: 160-60-30 kg de NPK ha ⁻¹

Se empleó una dosis de fertilización química (160-60-30 kg de NPK ha⁻¹) recomendada para el cultivo del maíz en la zona de vega de río de Huimanguillo, Tabasco (Barrón *et al.*, 2014, 312). El fertilizante inorgánico estuvo compuesto por urea (46 % N), superfosfato triple de calcio (46 % P₂O₅) y cloruro de potasio (60 % K₂O). La mitad de la dosis de N y la dosis total del P y el K, se aplicaron en el momento de la siembra, de forma manual a chorrillo a lado de cada surco y cubriéndolo con tierra. Posteriormente a los 30 DDS se aplicó el resto de la dosis de N de igual manera. Se evaluaron tres dosis de fertilización orgánica con estiércol de bovino composteado (E). La dosis del fertilizante orgánico utilizada se determinó por regla de tres, calculando el aporte del 100 % del nivel de N recomendado para el cultivo (30E). Las dosis de 15E y 45E fueron considerados 50 % abajo y 50 % arriba del 100 % de la dosis recomendada para el cultivo (30E). Esta fertilización se realizó un día antes de la siembra de forma manual al voleo y posteriormente se dio un pase de rastra para incorporarlo al suelo. Para el cálculo de la dosis 30E se consideró un aporte de N del estiércol de 1.5 % y una tasa de liberación del 35 % (Trinidad, 2000, 5-6).

La fórmula utilizada para calcular la dosis de estiércol fue la siguiente (Figuroa *et al.*, 2010, 364):

$$D_{est} = (DN * t_{est}) / N_{lib}$$

Dónde:

D_{est} = dosis de estiércol (t ha⁻¹)

DN = dosis de N requerida

$t_{\text{est}} = 1$ tonelada de estiércol

$N_{\text{lib}} = N$ liberado en 1 tonelada de estiércol

Considerando que el N liberado en 1 tonelada de estiércol (con 1.5 % de N) es de 5.25 kg de N, la dosis estimada con la formula anterior fue de 30.4 t ha^{-1} ajustándose a 30 t ha^{-1} . El estiércol utilizado fue recolectado de una unidad de producción de bovinos de doble propósito localizado en la misma zona, el material se encontraba acumulado por varios meses por lo que ya presentaba un pre compostaje. Después de extraerlo del sitio donde se encontraba se trabajó en pila de compostaje. La composta fue trabajada cada tres días durante un mes y posteriormente se dejó en reposo durante 30 días.

Para el abono utilizado se determinó nitrógeno total (Nt) [Kjeldahl], fósforo total, potasio total y Ca total. El análisis de MO del E se realizó por el método de calcinación (Ball, 1964) a $500 \text{ }^{\circ}\text{C}$ por 12 horas. La composta de estiércol elaborada tuvo la siguiente composición química: pH: 6.21, conductividad eléctrica (CE): 1.32 dS m^{-1} , materia orgánica (MO): 83.6 %, Nt: 0.80 %, P: 0.36 %, K: 0.76 %, Ca: 0.73 % y capacidad de intercambio catiónico (CIC): 24.1 %. Respecto al contenido de nutrientes en el suelo inicial, este presentó un pH de 5.77, CE: 0.09 dS m^{-1} , Nt: 0.22 %, MO: 2.5 % y P: 29.78 mg kg^{-1} ; K disponible $0.36 \text{ cmol kg}^{-1}$, Ca $9.67 \text{ cmol kg}^{-1}$ y CIC con $15.3 \text{ cmol kg}^{-1}$.

Para los tratamientos con micorriza (M) se utilizó el biofertilizante del INIFAP, el cual contiene hongos formadores de micorrizas, con un mínimo de 40 esporas de *G. intraradices* por gramo de sustrato a base de suelo esterilizado y raíces molidas de gramíneas inoculadas con micorriza. Se utilizó la dosis recomendada a razón de 0.5 kg de biofertilizante ha^{-1} . Las semillas de maíz fueron inoculadas con el biofertilizante un día antes de la siembra. El procedimiento se realizó bajo sombra y consistió en mezclar un adherente en gel con agua, ésta mezcla fue agregada a las semillas para humedecerlas. Inmediatamente se les añadió el biofertilizante a las semillas y se mezcló bien a modo de que quedaran impregnadas de éste. Las semillas fueron puestas a secar sobre una lona para su posterior utilización.

Variables evaluadas

En el suelo se evaluó el Ph (potenciómetro 1:2), CE (Conductivímetro), MO (Walkley y Black), número de esporas, Nt (Kjeldahl), P (Olsen), K, Ca y CIC (Bray y Kurtz). En planta se evaluó concentración de Nt (Kjeldahl) y determinaciones totales de P, K y Ca, altura, número de hojas, materia seca (MS) y porcentaje de infección de M en raíz. En el cultivo se evaluó la tasa de crecimiento del cultivo (TCC), acumulación de Nt, P, K y Ca en la materia seca, rendimiento total en materia verde (MV) y MS. El conteo de esporas de M se realizó por el método de tamizado húmedo y decantación, posteriormente centrifugado en gradiente de sacarosa.

Las evaluaciones finales en la planta se realizaron a la etapa fisiológica de 1/3 de línea de leche (80 días de edad de la planta aproximadamente), edad recomendada para su cosecha y posterior ensilaje (Wiersma *et al.*, 1993, 24; Pigurina y Pérez, 1994, 7-8). Se seleccionaron dos plantas por parcela (12 por tratamiento) de los surcos centrales eliminando el efecto de orilla, a las cuales se les midió la altura con un estadal y el número de hojas, posteriormente fueron sacadas de raíz con todo y suelo a una profundidad de 20 cm con la ayuda de una pala recta, seguidamente se les cortó la parte aérea la cual fue pesada en verde para calcular el rendimiento total en MV, posteriormente fueron secadas (en estufa de aire forzado por 72 h a 70 °C) para determinar la MS y el rendimiento en MS. Finalmente fueron procesadas en un molino Thomas-Wiley con malla de 0.5 mm para la determinación de concentración de nutrientes. Las raíces fueron identificadas, lavadas y secadas para determinar el porcentaje de colonización por micorrizas mediante la técnica de tinción con azul tripano en lactoglicerol (Phillips y Hayman, 1970). Se empleó la planta completa debido a que es utilizada en su totalidad para la práctica del ensilaje. El suelo obtenido de las raíces de las dos plantas por parcela fue secado a la sombra y molido obteniendo una muestra compuesta de 350 g para analizar su composición química y el conteo de esporas de M. La acumulación de nutrientes en la MS se calculó a partir del rendimiento total en MS obtenido por unidad de superficie multiplicado por la concentración de nutrimentos determinado en la planta total. Las muestras de suelo y plantas se procesaron y analizaron en el laboratorio de Biogeoquímica de El Colegio de la Frontera Sur Unidad Villahermosa. Para la variable TCC se realizaron evaluaciones destructivas de plantas a los 20, 40, 60 y 80 DDS. Se colectaron dos plantas por parcela de los surcos centrales, fueron cortadas al ras del suelo, pesadas en verde y en seco (en estufa de aire forzado por 72 h a 70 °C). Para estimar la TCC se utilizó la formula (Aguilar *et al.*, 2015, 53):

$$TCC = [(PS_2 - PS_1) / A (T_2 - T_1)]$$

Donde:

TCC= tasa de crecimiento del cultivo

PS₂=peso seco final de la planta

PS₁= peso seco inicial de la planta

T₂= tiempo final

T₁= tiempo inicial

A= área ocupada por la planta.

Análisis estadísticos

Los análisis de datos se efectuaron con apoyo del paquete estadístico SAS (SAS, 2013). El modelo que describió las varianzas de las variables estudiadas en el suelo (pH, CE, MO, P, K, Ca, CIC, contenido de esporas de M; en la planta: porcentaje de infección de M en raíz, acumulación de nutrientes (N, P, K, Ca), altura, número de hojas, MS y rendimiento total de forraje en MV t ha⁻¹ y MS t ha⁻¹, consideró las variables independientes tratamiento, ciclo y su interacción. El modelo que describió la varianza del crecimiento del cultivo incluyó como variables independientes tratamiento, DDS, ciclo y todas las interacciones de primer y segundo orden. Los análisis de datos se efectuaron con el procedimiento GLM. Las medias se compararon con la prueba de “t” con las medias de cuadrados mínimos usando la opción pdiff de SAS.

Resultados

Durante el ciclo productivo PV la precipitación pluvial (PP) acumulada fue de 910.9 mm, y un promedio de temperatura registrado de 29.1 °C. Para el ciclo OI, la precipitación pluvial acumulada disminuyó en un 51.6% con relación a la registrada en PV, y el promedio de temperatura fue de 25°C (Figura 1).

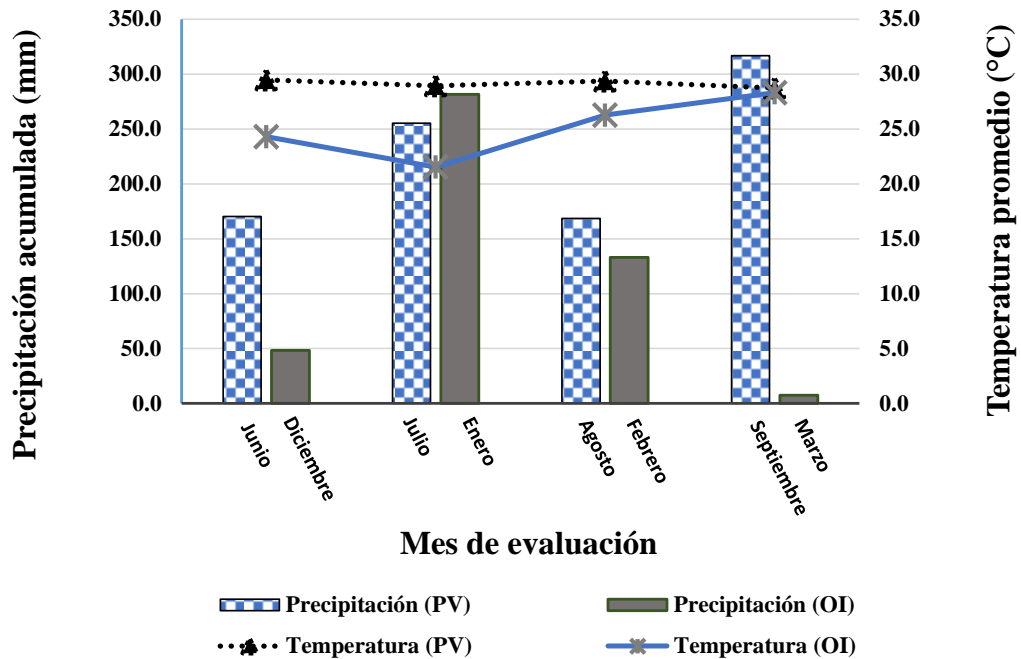


Figura 1 Precipitación pluvial acumulada y promedio (mensual) de temperatura ambiente en el periodo de estudio de dos ciclos de cultivo del maíz: Primavera – Verano 2017 (junio, julio, agosto y septiembre) y Otoño – Invierno 2017/2018 (diciembre, enero, febrero y marzo).

Características y composición química del suelo

Con excepción del K en suelo y la CIC, el Tratamiento, Ciclo y la interacción de ambos factores afectaron ($P \leq 0.05$) las variables que definieron las características y composición química del suelo (pH, CE, MO, N, P, Ca y contenido de esporas de M). Por tal motivo se pondrá énfasis en los resultados de la interacción tratamiento - ciclo (Figura 2).

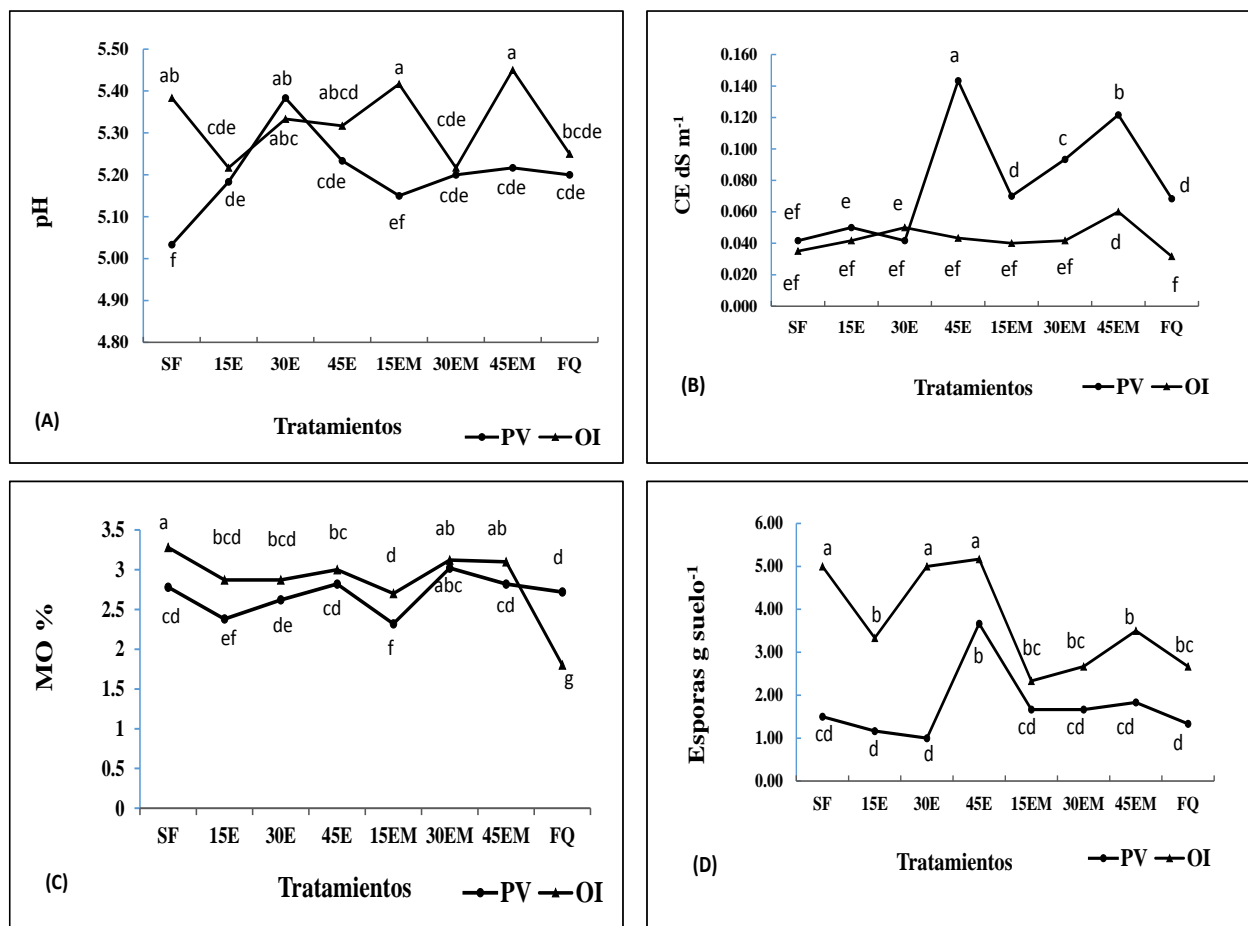


Figura 2. Efecto de la fertilización con estiércol composteado (E) y del hongo micorrízico arbuscular (M) *Glomus intraradices* en forraje de maíz sobre el pH, CE, MO y número de esporas en el suelo en dos ciclos de cultivo (PV y OI). Literales distintas entre ciclo y entre tratamientos indican diferencia ($P \leq 0.05$). CE= conductividad eléctrica, MO= materia orgánica, SF= sin fertilizar, 15E= 15 t de E ha⁻¹, 30E= 30 t de E ha⁻¹, 45E= 45 t de E ha⁻¹, EM= E más M, FQ= fertilización química (160-60-30 kg ha⁻¹ de NPK), PV= primavera-verano, OI= otoño-invierno.

El pH fue menor en SF durante PV con relación al resto de los tratamientos ($P \leq 0.05$). En PV el pH del suelo en 15E, 30E y 45E fue similar ($P \geq 0.05$) con respecto a estos mismos tratamientos en OI. Sin embargo, en 15EM y 45EM el pH se incrementó en OI con respecto a PV ($P \leq 0.05$) (Figura 2, A). Durante la PV, los tratamientos 45E y 45EM incrementaron la CE con respecto al resto de los tratamientos ($P \leq 0.05$). Durante el OI, la CE en los tratamientos 45E, 15EM, 30EM, 45EM y FQ fue mayor ($P \leq 0.05$) con respecto a estos mismos tratamientos en PV (Figura 2, B). En OI y FQ, se detectó el menor contenido de MO ($P \leq 0.05$); en PV, la MO fue menor en los tratamientos 15E,

15EM y 45EM ($P \leq 0.05$) con relación a estos mismos tratamientos en OI (Figura 2, C). En los tratamientos sin M, el número de esporas se incrementó en OI con relación a PV ($P \leq 0.05$). Con excepción de 45EM, el número de esporas en 15EM y 30EM fue similar durante PV y OI ($P \geq 0.05$) (Figura 2, D).

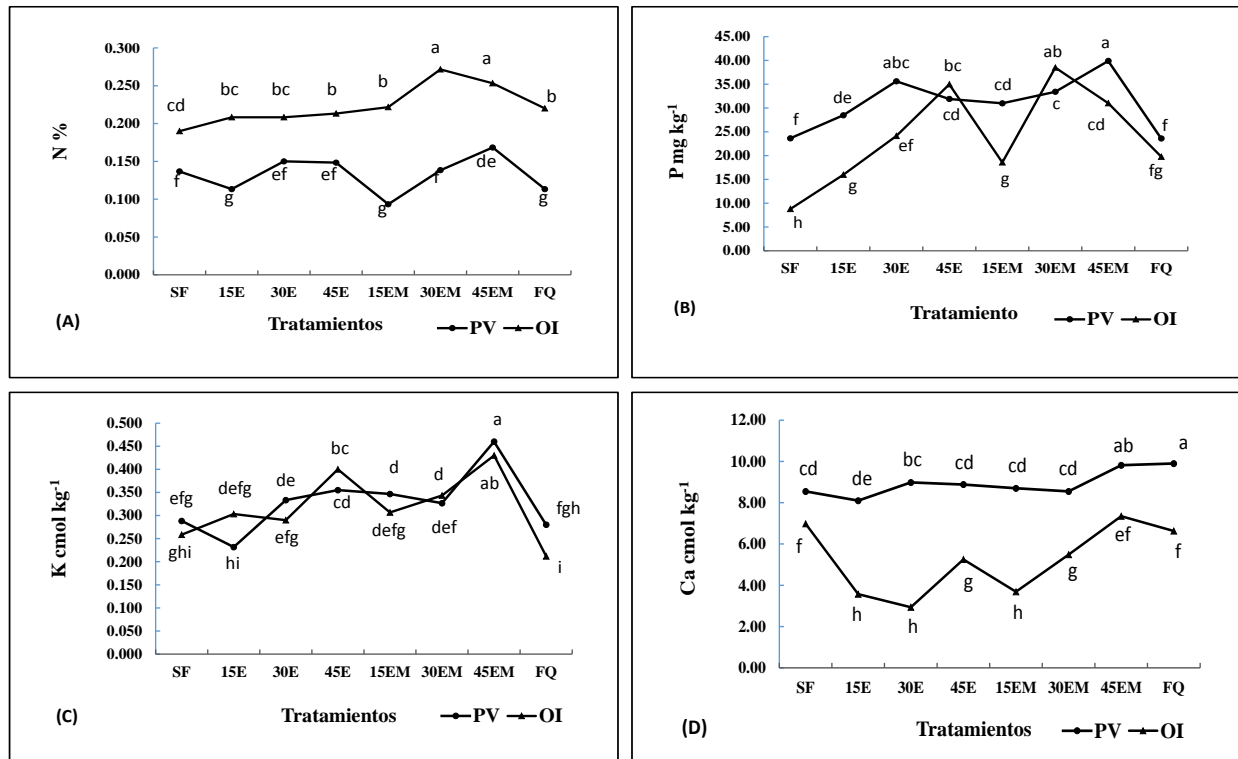


Figura 3. Efecto de la fertilización con estiércol composteado (E) y micorriza (M) *Glomus intraradices* en forraje de maíz sobre los niveles de N, P, K y Ca en el suelo en dos ciclos de cultivo (PV y OI). Literales distintas entre ciclo y entre tratamientos indican diferencia ($P \leq 0.05$). SF= sin fertilizar, 15E= 15 t de E ha⁻¹, 30E= 30 t de E ha⁻¹, 45E= 45 t de E ha⁻¹, EM= E más M, FQ= fertilización química (160-60-30 kg ha⁻¹ de NPK), PV= primavera-verano, OI= otoño-invierno.

En OI, se registró el mayor contenido de N en 15EM y 45EM con respecto al resto de los tratamientos ($P \leq 0.05$). El contenido de N en suelo fue mayor en todos los tratamientos durante el OI con relación a los mismos tratamientos en PV ($P \leq 0.05$) (Figura 3, A). El contenido de P en suelo durante el OI fue mayor en los tratamientos en donde se aplicó EC con o sin M con relación a SF y FQ ($P \leq 0.05$). En PV, 15E, 30E, 15EM y 45EM aumentaron ($P \leq 0.05$) el P en suelo con respecto a los mismos tratamientos en OI (Figura 2) (Figura 3, B). El K en suelo fue mayor en 45E

y 45 EM durante PV y OI con relación a SF y FQ en ambos ciclos ($P \leq 0.05$) (Figura 3, C). El Ca en suelo fue mayor en PV en los tratamientos estudiados con respecto a los mismos tratamientos en OI ($P \leq 0.05$) (Figura 3, D).

La CIC fue afectada por el tratamiento y el ciclo ($P \leq 0.05$). Las medias de cuadrados mínimos para los tratamientos se observan en la figura 4. Respecto al ciclo, en PV, la CIC fue mayor a la de OI, con 15.8^a y 14.1^b, respectivamente.

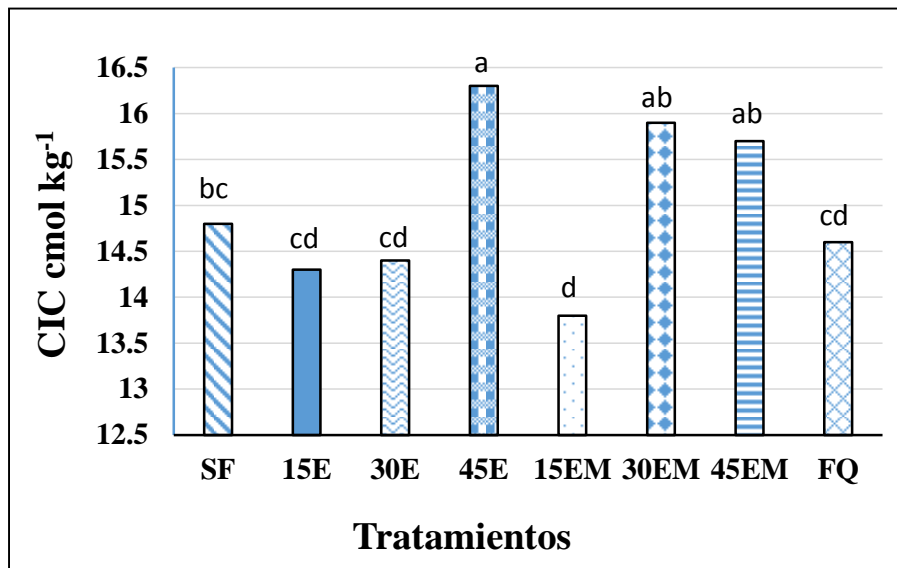


Figura 4. Efecto de la fertilización con estiércol composteado (E) y el hongo micorrízico arbuscular (M), *Glomus intraradices* en forraje de maíz sobre la capacidad de intercambio catiónico (CIC) en el suelo. Literales distintas entre tratamientos indican diferencia ($P \leq 0.05$). SF= sin fertilizar, 15 E= 15 t de E ha⁻¹, 30E= 30 t de E ha⁻¹, 45E= 45 t de E ha⁻¹, EM= E más M, FQ= fertilización química (160-60-30 kg ha⁻¹ de NPK).

Porcentaje de infección de M en raíz y características agronómicas de la planta

El porcentaje de infección de M en raíz no fue afectado por el tratamiento y ni por la interacción tratamiento x ciclo ($P \geq 0.05$). En el ciclo PV el porcentaje de infección de M en raíz fue mayor al de OI, 28.0^a±2.9 y 18.5^b±2.0, respectivamente. La altura y número de hojas de las plantas fueron mayores en todos los tratamientos del ciclo PV con respecto a OI ($P \leq 0.05$). En 30EM y FQ durante el ciclo PV se detectaron las mayores alturas de las plantas con relación al resto de los tratamientos ($P \leq 0.05$). La MS de la planta fue mayor ($P \leq 0.05$) en 15E, 15EM, 45EM y FQ durante el ciclo OI con respecto a PV (Figura 5).

Índice de crecimiento en el cultivo, acumulación de nutrientes y rendimiento productivo

A los 20 DDS y en PV, 30EM y FQ presentaron el mayor índice de crecimiento con relación al resto de los tratamientos ($P \leq 0.05$). En los 40 DDS y en PV, SF, 15E, 30E, 45E y 15EM presentaron el mayor índice de crecimiento con relación al resto de los tratamientos ($P \leq 0.05$). Sin embargo, en los 60 DDS y en OI, SF, 15E, 30E, 45E, 15EM y 30 EM tuvieron mayor índice de crecimiento con respecto al resto de los tratamientos ($P \leq 0.05$). A los 80 DDS y en OI se registró mayor índice de crecimiento con relación a los mismos tratamientos en PV ($P \leq 0.05$).

En OI, 30EM presentó la mayor acumulación de N en planta con respecto al resto de los tratamientos ($P \leq 0.05$). En PV y OI, el tratamiento SF registro la menor acumulación de P con relación a los tratamientos con E y EM ($P \leq 0.05$). En PV se detectó la mayor acumulación de K con 45EM ($P \leq 0.05$). En PV se tuvo mayor acumulación de Ca en planta en todos los tratamientos con respecto a los mismos tratamientos en OI ($P \leq 0.05$).

Con excepción de 45E, el rendimiento de forraje en MV fue mayor en PV en todos los tratamientos con relación a los mismos tratamientos en OI ($P \leq 0.05$). En ambos ciclos, PV y OI, 30EM tuvo el mayor rendimiento de forraje en MS ($P \leq 0.05$).

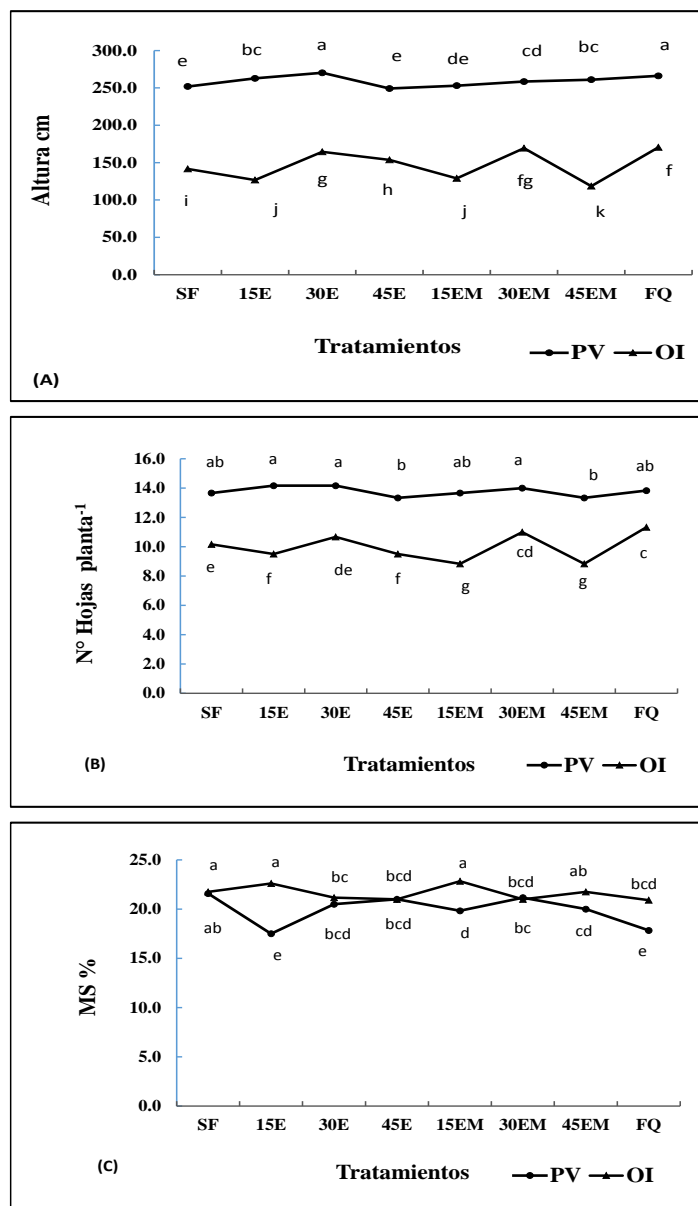


Figura 5. Respuesta de la fertilización con estiércol composteado (E) y el hongo micorrízico arbuscular (M), *Glomus intraradices* en forraje de maíz sobre las variables agronómicas altura, número de hojas y MS en dos ciclos de cultivo (PV y OI). Literales distintas entre ciclo y entre tratamientos indican diferencia ($P \leq 0.05$). MS= materia seca, SF= sin fertilizar, 15E= 15 t de E ha⁻¹, 30E= 30 t de E ha⁻¹, 45E= 45 t de E ha⁻¹, EM= E más M, FQ= fertilización química (160-60-30 kg ha⁻¹ de NPK), PV= primavera-verano, OI= otoño-invierno.

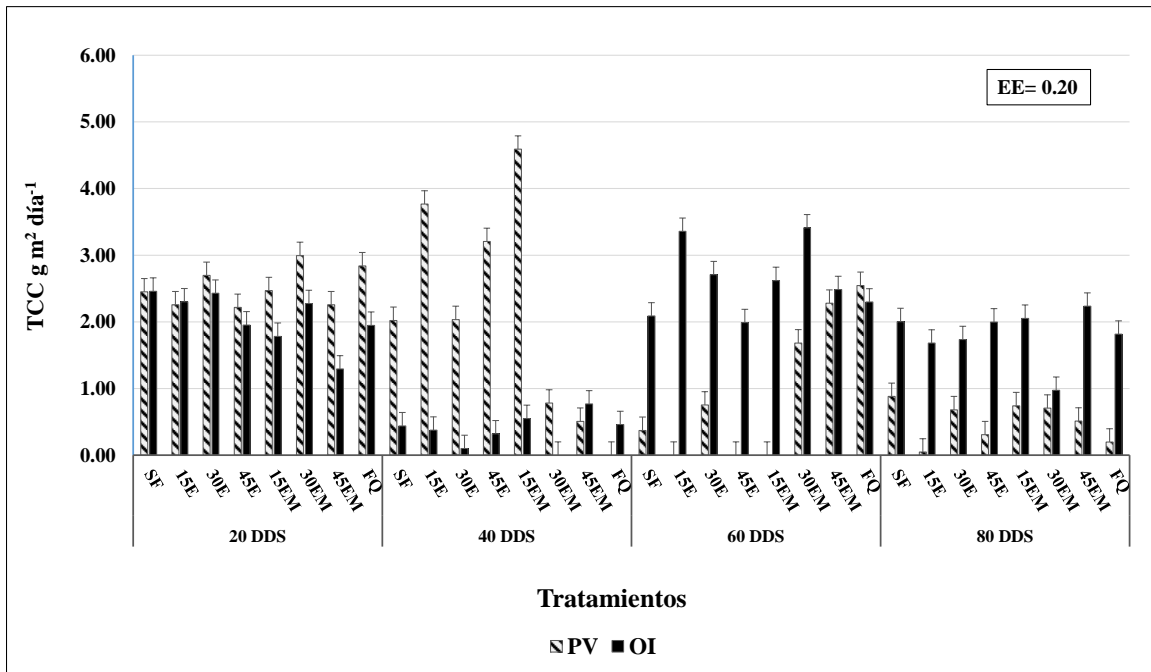


Figura 6. Comportamiento de la tasa de crecimiento del cultivo de maíz (TCC) a los 20, 40, 60 y 80 días después de la siembra (DDS), empleando estiércol compostado (E) y el hongo micorrízico arbuscular (M), *Glomus Intraradices* en dos ciclos de cultivo (PV y OI). EE= Error estándar, SF= sin fertilizar, 15E= 15 t de E ha⁻¹, 30E= 30 t de E ha⁻¹, 45E= 45 t de E ha⁻¹, EM= E más M, FQ= fertilización química (160-60-30 kg ha⁻¹ de NPK), PV= primavera-verano, OI= otoño-invierno.

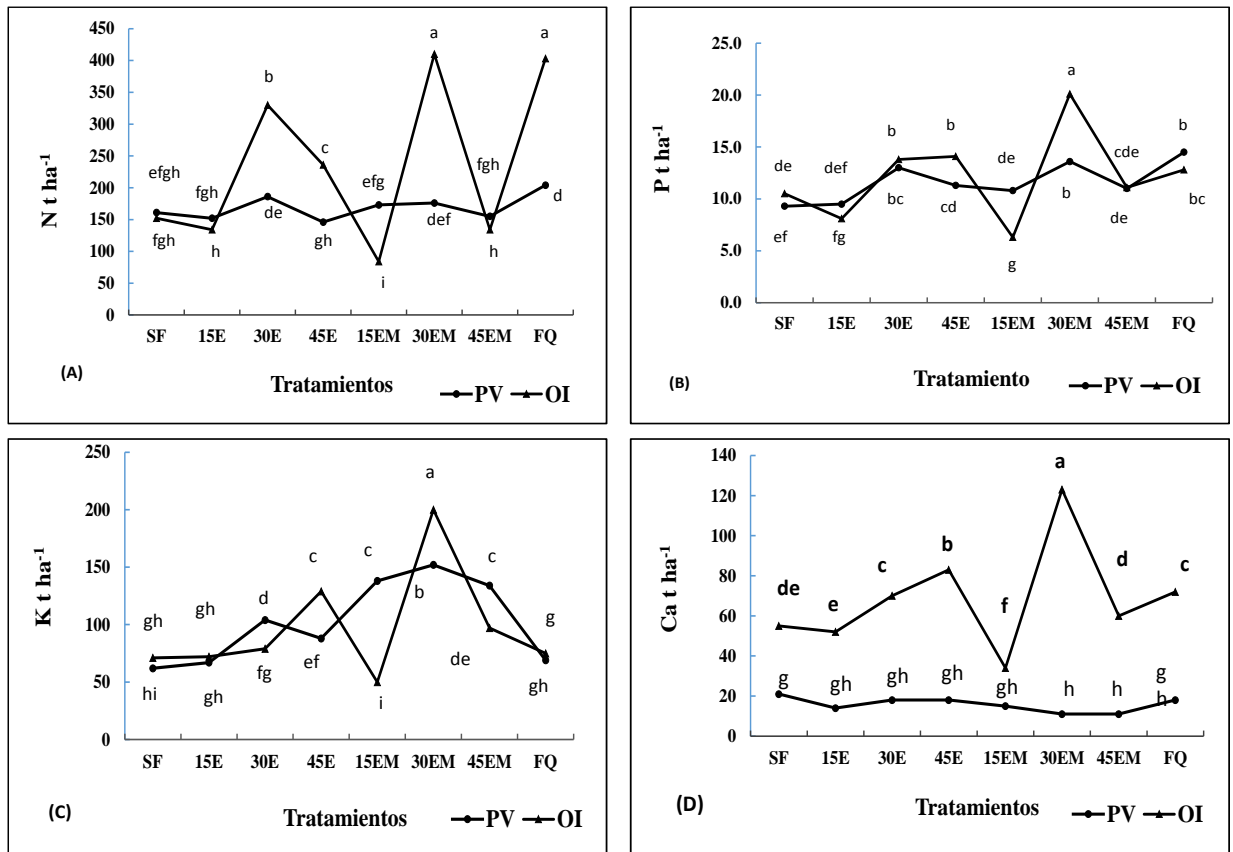


Figura 7. Acumulación de nutrientes en el cultivo de forraje de maíz en respuesta a la fertilización con estiércol composteado (E) y el hongo micorrízico arbuscular (M), *Glomus intraradices* en dos ciclos de cultivo (PV y OI). Literales distintas entre ciclo y entre tratamientos indican diferencia ($P \leq 0.05$). SF= sin fertilizar, 15E= 15 t de E ha^{-1} , 30E= 30 t de E ha^{-1} , 45E= 45 t de E ha^{-1} , EM= E más M, FQ= fertilización química (160-60-30 $kg\ ha^{-1}$ de NPK), PV= primavera-verano, OI= otoño-invierno.

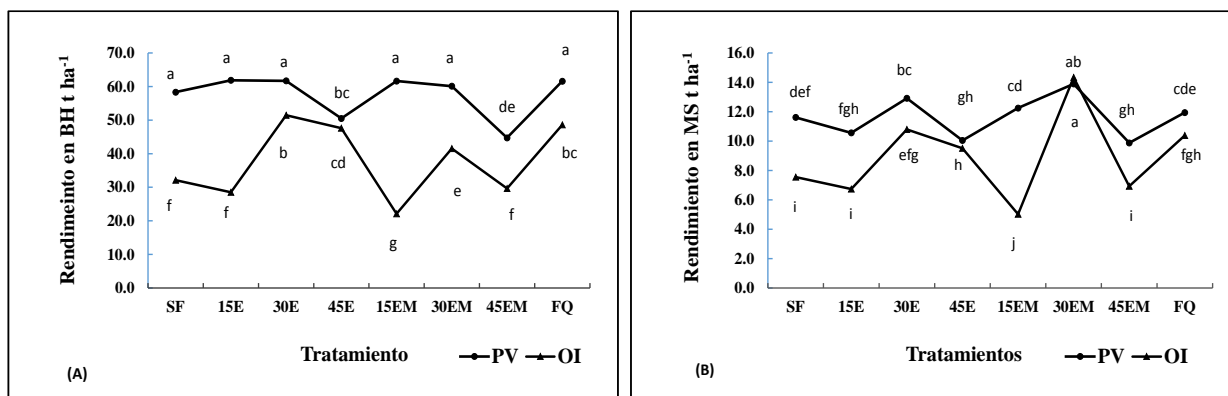


Figura 8. Efecto de la fertilización con estiércol composteado (E) y el hongo micorrízico arbuscular (M), *Glomus intraradice* en forraje de maíz sobre el rendimiento total en materia verde (MV) y materia seca (MS) en dos ciclos de cultivo (PV y OI). Literales distintas entre ciclo y entre tratamientos indican diferencia ($P \leq 0.05$). SF= sin fertilizar, 15E= 15 t de E ha⁻¹, 30E= 30 t de E ha⁻¹, 45E= 45 t de E ha⁻¹, EM= E más M, FQ= fertilización química (160-60-30 kg ha⁻¹ de NPK), PV= primavera-verano, OI= otoño-invierno.

Discusión

La PP acumulada y la temperatura ambiente registradas durante el ciclo PV fueron mayores a la registrada en OI. En ambos ciclos, la PP y la temperatura ambiente permitieron el crecimiento adecuado del cultivo de maíz, debido a que una PP acumulada entre 500 y 1000 mm es considerada como óptima para el desarrollo del cultivo, así como temperaturas entre 20 y 30 °C (Tinoco *et al.*, 2002, 8). La mayor PP y temperatura ambiente que se presentó en PV contribuyó a explicar los resultados obtenidos a favor de la altura, número de hojas y rendimiento forrajero en MS de las plantas que crecieron durante este ciclo con respecto a las de OI. Respecto a los nutrientes reportados en el E se observó un elevado nivel de MO, lo cual puede atribuirse al origen del material composteado (100 % estiércol de bovinos en pastoreo). El Nt se encuentra dentro de los límites reportados, ya que los contenidos de este nutriente en las compostas pueden oscilar entre 0.3 a 1.5 % dependiendo del material de origen (FAO, 2013, 36). Incluso se ha mencionado que el Nt en un abono orgánico no debe de exceder del 2 % (Castro *et al.*, 2009, 35). El suelo presentó 0.22 % de Nt, valores medios de P y Ca, y de acuerdo a su CIC se le puede considerar como un suelo con una reserva nutrimental media (SEMARNAT, 2002, 29).

Composición química del suelo y número de esporas

En el primer ciclo PV, la aplicación de E con o sin M aumento el pH en suelo con relación al tratamiento SF. Sin embargo, en el ciclo OI, el pH no vario en la misma magnitud como en el primer ciclo. De acuerdo con Osorio (2012, 3), el pH puede indicar disponibilidad o limitación de nutrientes en el suelo. A pH menores de 5.5 se restringe la solubilidad y/o disponibilidad de algunos nutrientes. Esto debido a la presencia de iones de aluminio, los cuales determinan la solubilidad del fosfato, hierro, manganeso, entre otros, o escasez de calcio, magnesio, potasio, sodio en sus formas disponibles. Al parecer, la aplicación de E con o sin M durante el primer ciclo favoreció la disponibilidad de los nutrientes por un aumento en el pH del suelo respecto al testigo, lo que contribuye a explicar el mayor rendimiento forrajero en MS que se presentó durante la PV. Por otro lado, cuando se aplica composta de estiércol combinado con un fertilizante mineral en suelos franco-arcilloso-arenoso, el pH del suelo puede aumentar significativamente (Gil *et al.*, 2008, 1438). En el segundo ciclo OI, no se detectaron cambios a favor del uso de E con o sin M. Al respecto, una disminución del pH en el suelo puede deberse a más factores como la descomposición de la MO. En el proceso de descomposición de la MO, la respiración de los microorganismos produce ácidos orgánicos y CO₂, el cual forma ácido carbónico (Osorio, 2012, 3). Además, el contenido de N en la MO inicial también modifica el pH aumentándolo inicialmente por el consumo de protones para la producción de amonio (NH₄⁺), y disminuyéndolo seguidamente por la liberación de protones a la solución del suelo debido a la nitrificación del amonio (NH₄⁺) a nitrato (NO₃⁻) (Martínez *et al.*, 2008, 73). Este tipo de cambios en la MO y en el N de la MO pueden explicar la ausencia de cambios favorables en el pH atribuible al uso de E con o sin M.

Con respecto a la FQ, la fertilización mineral influye en la disminución del pH del suelo después de continuas aplicaciones (Gil *et al.*, 2008, 1438; Adebayo *et al.*, 2018, 71) y en un manejo convencional con monocultivos se propicia una disminución del 8.4 % del valor del pH (Palma-López *et al.*, 2007, 95). Sin embargo, los resultados del presente estudio no corroboran la disminución del pH en el tipo de suelo estudiado durante dos ciclos de cultivo subsecuentes.

Una de las desventajas que pudieran tener los abonos orgánicos es la cantidad de sales que pueden contener, las cuales se van acumulando en el suelo a través de la constante aplicación de éstos (Quiroga, *et al.*, 2011, 202). La aplicación de 45E y EM incremento la CE durante el primer ciclo PV. Sin embargo, en el segundo ciclo OI, se redujo la influencia del E con o sin M sobre la CE. Lo anterior puede atribuirse a la eliminación de sales por lavado natural del suelo debido a las

PP presentadas en ambos ciclos de cultivo (Figura1). En apoyo a lo detectado en el presente estudio, la aplicación de diferentes dosis de estiércol para la producción de forraje de maíz en una zona seca desértica, no afectó la CE en el primer año de aplicación, la cual tuvo valores menores a 2 dS m^{-1} (Trejo *et al.*, 2013, 734). Sin embargo, en otros estudios, la aplicación de estiércol de borrego en suelos con enmiendas orgánicas comerciales, se incrementó la CE desde 0.5 hasta $1.6 \text{ dS m}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (Alvarez *et al.*, 2006, 267). En el primer ciclo PV, el número de esporas fue mayor en 45E con relación al resto de los tratamientos. En el segundo ciclo OI, se incrementó el número de esporas en suelo en SF, 30E y 45E con relación a lo detectado en el primer ciclo PV. Al respecto, se reporta que un incremento de la CE aumenta la concentración de sales en el suelo, y disminuye su contenido de agua. Esta condición se refleja en una disminución del potencial osmótico (concentración real de sal en el suelo) afectando a los microorganismos del suelo y por consecuencia la mineralización de la MO (Setia *et al.* 2011, 1909). En este sentido, la ausencia de cambio y una disminución de la CE en suelo durante el segundo ciclo OI pudo favorecer el incremento en el número de esporas en SF, FQ y E sin M.

En investigaciones realizados por Setia *et al.* (2011, 1912), quienes manejaron diferentes niveles de CE, encontraron que con niveles de 5 dS m^{-1} , disminuye el C-CO₂ acumulado, así como también la descomposición del carbono orgánico particulado a través del tiempo; esto debido a que los microorganismos que intervienen en la descomposición temprana de la MO se ven afectados por la salinidad. Yan *et al.* (2015, 319), también documentó que la respiración del suelo disminuye más del 50 % cuando la CE es $\geq 5 \text{ dS m}^{-1}$, debido a que la acumulación de sales en el suelo disminuye la biomasa microbiana primariamente porque el estrés osmótico induce el secado y la lisis de las células.

Aunque la CE fue afectada por los diferentes tratamientos y entre ciclo en el presente estudio, los valores detectados al final del estudio fueron entre 0.032 y 0.143 dS m^{-1} , lo cual indica una baja concentración salina en el suelo. Los bajos valores de CE en los tratamientos orgánicos empleados garantizan que los niveles de sales en el suelo ($\geq 4 \text{ dS m}^{-1}$) no afecte el crecimiento adecuado de las plantas en el cultivo; La acumulación de osmolitos en el suelo (sales inorgánicas), deriva en un pobre crecimiento de las plantas y microorganismos. Por un lado, el alto potencial osmótico en la solución del suelo genera sequedad fisiológica en la planta ocasionando su muerte. Las plantas que puedan adaptarse a un bajo potencial osmótico, demeritan en su desarrollo debido

a que la síntesis de osmolitos demanda grandes cantidades de energía no siendo suficiente ésta para el cultivo (Yan *et al.* 2015, 318).

Con relación al tratamiento FQ, la aplicación de E con o sin M incremento la MO en suelo, pero, este aumento en MO no se detectó con relación al tratamiento SF. La incorporación al suelo de estiércol composteado combinado con fertilizante mineral incrementa la MO en suelo (Gil *et al.*, 2008, 1438), lo que apoya lo registrado en el presente estudio. A diferencia de los resultados indicados en este estudio, evaluaciones realizadas con diferentes dosis de estiércol indican un aumento en la MO desde el primer año de aplicación respecto al nivel inicial (Trejo *et al.*, 2013, 731). Sin embargo, en zonas áridas el aumento de la MO puede implicar la aplicación de estiércol por periodos de tiempo más largos, como lo reporta Salazar *et al.* (2010, 384), con un trabajo de seis años de aplicación de 40 t estiércol ha⁻¹ el contenido de MO aumento de 0.99 a 2.7 %.

Aunque, existen evidencias que indican que la aplicación de composta tiene un efecto positivo sobre el contenido de MO en el suelo como se mencionó previamente, también se ha indicado ausencia de influencia del uso de composta en un periodo corto, por lo que es necesario evaluar el uso de esta enmienda orgánica después de un año de aplicación continua bajo estas condiciones como lo sugieren Gil *et al.* (2008, 1438). La ausencia de influencia de la aplicación de E con o sin M sobre la MO en suelo puede ser atribuida a la humedad y temperatura del suelo, factores que influyen en la rápida mineralización de la MO (Zech *et al.*, 1997, 133).

Los resultados encontrados coinciden con lo indicado en un estudio realizado en una zona seca desértica de suelos francos y arcillosos, en donde la aplicación de 30 t de estiércol bovino ha⁻¹ incrementó los niveles de N y P en 185 y 310 %, respectivamente. Sin embargo, se reporta poca influencia sobre el contenido de Ca, Mg, Na y K (López *et al.*, 2001, 299). Las enmiendas orgánicas en combinación con fertilizantes químicos permiten también el incremento en la calidad del suelo a través del tiempo. En suelo de llanura de río la aplicación de 40 t ha⁻¹ de estiércol de granja año⁻¹ más 100 kg N ha⁻¹ año⁻¹ a suelo cultivado con maíz para ensilaje, el nivel de Nt aumento en 46.7 % en 11 años bajo este manejo (Monaco *et al.*, 2008, 611). Bajo diferentes condiciones de suelo y ambiental la incorporación de enmiendas orgánicas solas o combinadas con fertilizantes sintéticos, logran cambiar los niveles de nutrientes en el suelo en diferentes proporciones.

La incorporación del M en el presente estudio no refleja un aumento de esporas en los tratamientos EM respecto a SF y a los tratamientos sin M, tanto en PV como en OI, esto puede indicar la presencia de poblaciones de esporas de M en la zona de estudio. Entre ciclos, se observa

más esporas en OI que en PV, probablemente a que una menor temperatura ambiente en OI con relación a PV influye en la actividad fisiológica de algunas especies de M, propiciando la esporulación (Barrer, 2009, 128). Sin embargo, el uso de biofertilizante en los sistemas agroecológicos permite la permanencia de estos organismos benéficos, quienes movilizan y reciclan nutrientes que son aprovechados por las plantas, además que ayudan a la estructura del suelo a través de sus hifas que permiten una mejor aireación y distribución de la humedad (Barrer, 2009, 124). Aunque la influencia del M empleado no se reflejó en un incremento en el número de esporas, su incorporación en el nivel 30EM permitió mayor acumulación de N, P, K en planta, así como mayor rendimiento productivo de forraje en BS con relación a los tratamientos SF y FQ.

Porcentaje de infección de M en raíz y características agronómicas de la planta

A pesar de que el número de esporas se favoreció en OI, el mayor porcentaje de infección en raíz se registró para las plantas crecidas durante el ciclo PV. Estos resultados coinciden con el reportado por Pérez (2012, 56), quien evaluó el uso de vermicomposta en el cultivo de maíz, no encontrando diferencia estadística en el porcentaje de infección de raíz entre vermicomposta y cuando lo combinó con M *Glomus*. La ausencia de influencia de los tratamientos evaluados sobre el porcentaje de infección en la raíz puede deberse a que la evaluación del cultivo se realizó en la etapa de la cosecha, y se han reportado mayores valores de infección al inicio de fructificación de las plantas que en la etapa de cosecha (Montaño *et al.*, 2001, 341; Martín y Rivera, 2015, 41).

La aplicación de E con y sin M tuvo una respuesta variable en la altura, número de hojas y MS de la planta. Al respecto, existen evidencias que indican que el uso del estiércol en el cultivo de forraje de maíz, no afecta la altura y MS respecto a la fertilización inorgánica y al testigo (López-Calderón *et al.*, 2015, 11). Sin embargo, el uso de 40 t de estiércol ha⁻¹ durante seis años, incrementó la altura del maíz respecto a la fertilización química con valores de 262.8 y 255.1 cm, respectivamente (Salazar *et al.*, 2010, 384). Las mayores alturas de la planta y número de hojas de las plantas se presentaron en PV, periodo en que se presentaron condiciones climáticas favorables para el crecimiento de las plantas. Se observa también que la altura, número de hojas y MS registradas con las dosis de EC tuvieron respuesta similar a la fertilización química en ambos ciclos de cultivo. Estos valores concuerdan con los obtenidos por Barrón *et al.* (2014, 314) reportando promedios de 264 cm y 22.7 % para altura y MS, respectivamente, para la misma zona de estudio,

pero con fertilización química. Los resultados obtenidos con E con y sin M indican que el aporte de nutrientes por parte del E permite obtener una altura y número de hojas similar a la obtenida con FQ desde la primera aplicación y que puede sustituir el uso de fertilizante químico.

Tasa de crecimiento en el cultivo, acumulación de nutrientes y rendimiento productivo

El uso de la fertilización con E y M favoreció el desarrollo del cultivo de forraje de maíz. En general el crecimiento del cultivo fue superior en al menos un tratamiento orgánico respecto al tratamiento FQ en las cuatro edades de evaluación. El desarrollo del cultivo en su etapa inicial, los primeros 20 DDS tuvo menor variación por influencia de los tratamientos y ciclos estudiados con relación a los otros DDS. Este tipo de respuesta puede atribuirse a la ausencia de condiciones extremas en PP y temperatura ambiente, situación que favoreció el uso de los nutrientes disponibles para cada uno de los tratamientos estudiados. Sin embargo, a los 40 DDS del ciclo OI la TCC fue bajo, lo que puede deberse a la reducción de temperatura ambiente que se presentó en esta etapa de desarrollo de la planta (Figura 1). Además, parte del ciclo OI se desarrolló durante la época de nortes, la cual se caracteriza por días nublados y lluvias intermitentes. El crecimiento a los 60 y 80 DDS en PV fue menor al detectado en OI, este tipo de respuesta puede atribuirse a ocurrencia del periodo canicular. La canícula se caracteriza por altas temperaturas y baja precipitación pluvial, presentándose entre julio y agosto. Aunado a las condiciones ambientales, el crecimiento del cultivo se da en forma acelerada al inicio, con la formación de hojas, y antes de la floración. Posteriormente, los nutrientes se utilizan para el desarrollo de espigas y fructificación, por lo que el aumento en la biomasa disminuye.

La mayor TCC se presentó en PV durante los dos primeros periodos de crecimiento. El aprovechamiento de los nutrientes proporcionados en los diferentes niveles de E se reflejó con la mayor producción de hojas y las mayores alturas registradas en ese ciclo. En ese mismo ciclo, PV, la TCC disminuyó a los 80 DDS ya que el destino de los nutrientes disponibles en el suelo se orienta hacia el desarrollo del fruto más que al aumento de la biomasa.

En los sistemas de producción de rumiantes domésticos, es importante obtener forrajes con alto valor nutritivo, con el fin de cubrir el mayor porcentaje de nutrimentos que demandan los animales en cada una de sus etapas fisiológicas y productivas (Enríquez *et al.* 2011, 277). En este sentido, la incorporación de E y M al suelo permitió que las plantas acumularan una mayor cantidad de nutrientes. Un mayor acumulamiento de Nt, al encontrado en el presente trabajo, se reporta con

la aplicación de 80 t de estiércol ha^{-1} , estiércol + fertilizante mineral y composta de estiércol + fertilizante mineral; la acumulación de N por el cultivo fue de 253, 223 y 249 kg ha^{-1} en el año de aplicación respectivamente, sin embargo, no encontraron diferencias significativas entre los tratamientos evaluados (Figueroa *et al.*, 2010, 366). Los resultados del presente estudio indican que los beneficios en la acumulación de Nt en planta como consecuencia de aplicar E con y sin M se manifiestan con mayor énfasis en el segundo ciclo, OI, y la acumulación de Nt en planta es mayor en estos tratamientos con relación SF, pero, similar a FQ. Sin embargo, en otros estudios efectuados con diferentes niveles de estiércol aplicados al cultivo de maíz, los tratamientos orgánicos permitieron una mayor extracción de N, P, K y Ca por las plantas en comparación a la fertilización mineral y al testigo (Salazar *et al.*, 2007, 181). Mientras que, en forraje de maíz, se tuvo una extracción menor a 200 kg de N ha^{-1} cuando se incorporó al suelo estiércol y composta de estiércol, comparada con fertilización mineral (Ferguson *et al.*, 2005, 1676).

Una de las desventajas del uso abonos orgánicos es la lenta mineralización que puede ir de semanas a meses, por lo que la disponibilidad de nutrientes en el suelo no suele ser rápida (Castro *et al.*, 2009, 32). Lo que explica, en parte, la mayor acumulación de N y Ca en planta en el segundo ciclo con respecto al primer ciclo. Además, en su conjunto se pueden presentar pérdidas de nutrientes de los agroecosistemas a través de la desnitrificación del suelo, escorrentía superficial, volatilización y lixiviación (Shanahan *et al.*, 2008, 52). Por lo demás, es importante considerar que el uso del E más M no favoreció una mayor cantidad de esporas en suelo ni aumento el porcentaje de infección en raíz. Sin embargo, permitió una mayor acumulación de nutrientes, lo que confirma el papel que desempeñan las micorrizas en la captura de nutrientes del suelo a través de sus hifas que abarcan mayor superficie. Si bien se ha puntualizado que los M favorecen la extracción de P en suelos deficientes, también benefician la fijación de N, la absorción de agua y mejora la eficiencia de uso de la planta de los nutrientes (Barrer, 2009, 124).

Los datos obtenidos respecto a la acumulación de P en el presente trabajo, son mayores (20 t ha^{-1} en 30EM) comparados con datos reportados en otros trabajos donde obtuvieron solo 0.512 t P ha^{-1} al aplicar 40 t de estiércol ha^{-1} (Salazar *et al.*, 2007, 182). Las evaluaciones realizadas por Ferguson *et al.* (2005, 1677) muestran que la absorción de P por el cultivo no presentó diferencia significativa entre los tratamientos orgánicos evaluados en años individuales; sin embargo, el valor promedio registrado al primer año con la fertilización inorgánica (33 kg de P ha^{-1}) fue significativamente menor a la fertilización orgánica (37.5 kg de P ha^{-1}). Valores similares a los

obtenidos en el presente trabajo, son los reportados por Pérez (2012, 56) cuando evaluó el uso del humus de lombriz con *Glomus* y *Azospirillum* en el cultivo de maíz; valores de 9.8 y 11.8 kg de P ha⁻¹ en el forraje de maíz fueron obtenidos en los tratamientos de Humus + *Glomus*, y Humus + *Glomus* + *Azospirillum*, respectivamente, los cuales no mostraron diferencia significativa entre ellos, pero si la combinación de Humus + *Glomus* + *Azospirillum* ($P \leq 0.05$) con respecto al testigo con 4.7 kg de P ha⁻¹ en el forraje de maíz. De acuerdo los valores obtenidos en la acumulación de nutrientes por el cultivo, se observó que el nutriente que más se acumuló fue el N en comparación al resto de los nutrientes. Esto es debido a que el N es el nutriente más demandado por la planta para su desarrollo (Trejo *et al.*, 2013, 728). Debido a esto, generalmente la aplicación de un abono orgánico se estima más por las necesidades de N, no considerando la cantidad de P que aporta el abono el cual resulta luego en un excedente en el suelo (Diacono y Montemurro, 2010, 414).

El E es una fuente de MO que proporciona elementos como sustancias húmicas, su aplicación al suelo junto con el uso del M proporciona una respuesta positiva tanto en el crecimiento como en la calidad nutritiva del forraje. Los componentes principales de la MO la cual es aportada por el E son: carbohidratos, proteínas, lípidos y lignina, este último componente y sus productos de la degradación, son precursores de los compuestos aromáticos de carbono a sustancias húmicas (García *et al.*, 2005, 127). Los ácidos húmicos estimulan la síntesis de H⁺-ATPasa, la cual es necesaria para las membranas plasmáticas de las hifas de la micorriza. La micorriza interviene en algunos aspectos fisiológicos de las plantas como la fotosíntesis debido a un aumento en la asimilación de CO₂, consecuencia de una mayor absorción de agua y nutrientes. También interviene en la producción de hormonas aumentando la citosina en la raíz, lo que induce a la división celular y por ende el crecimiento de la planta (Pimienta *et al.*, 2009, 71). Un mayor crecimiento de hojas es mayor disponibilidad de área fotosintéticamente activa. La captación de nutrientes en la micorriza se da a través de la absorción de nutrientes por el micelio fúngico, la translocación de los nutrientes de las estructuras del hongo hacia la raíz de la planta, y por último la transferencia de nutrientes a las células de la planta vía interfaces simbiótica. De igual forma la transferencia de las hexosas de la planta al hongo es por medio de interfaces. Las interfaces pueden ser intercelulares (las hifas crecen en los espacios intercelulares de la superficie de la raíz) o intracelulares (los arbusculos crecen dentro de la célula) (Smith y Read, 2008, 122).

Lo anterior puede verse reflejado tanto en la acumulación de nutrientes como en el rendimiento total del cultivo, ya que los valores más altos fueron para el tratamiento 30EM. El

rendimiento de forraje en MV de 15EM y 30EM durante PV fue fueron iguales a FQ, y 30E igual a FQ en OI, y el mayor rendimiento total en MS se obtuvo con 30EM en ambos ciclos. En estudios realizados con híbridos de maíz para forraje y fertilización química bajo condiciones agroclimáticas similares a las del presente estudio, los rendimientos promedio de MV y MS fueron de 45.5 t ha⁻¹ y 10.2 t ha⁻¹, respectivamente (Barrón *et al.*, 2014, 314). Los resultados obtenidos con fertilización orgánica en este estudio, sugieren que se pueden obtener los mismos rendimientos sustituyendo la fertilización química, pero, se debe considerar la concentración de E, el uso de M y el ciclo de cultivo. El rendimiento y composición química del forraje en MS son las variables más importantes al momento de considerar el número de animales que se pueden alimentar con este tipo de forraje (fresco o conservado) puesto que los minerales y la MO presentes en el forraje contribuyen a cubrir los requerimientos de nutrientes para el animal (Enríquez *et al.*, 2011, 116).

Conclusiones

En las condiciones de suelo y clima que se desarrolló el estudio, la composición química del suelo, acumulación de nutrientes en planta y el rendimiento de forraje de maíz fueron influenciados de forma favorable por el uso de estiércol composteado solo o en combinación con *G. intraradices* durante los ciclos PV y OI. La aplicación de 30 t ha⁻¹ de estiércol composteado más *G. intraradices* fue la mejor opción de fertilización orgánica con relación a sin fertilización y fertilización química debido a que la planta tuvo mayor producción de forraje en MS durante dos ciclos de cultivo sucesivos. El uso de estiércol composteado en combinación de *G. intraradices* optimizan la utilización de los nutrientes disponibles en el suelo por la planta, situación que favorece la tasa de crecimiento de la planta en sus primeros 20 días de desarrollo y una mayor producción de forraje. La dosis de estiércol composteado con o sin *G. intraradices*, así como el número de ciclo condicionan la magnitud de la respuesta de tasa de crecimiento, acumulación de nutrientes y rendimiento de MS en la planta. El empleo de estiércol composteado con o sin *G. intraradices* representan una opción para reciclar el estiércol que se genera en las unidades de producción bovina de doble propósito y favorece la sustitución de fertilizantes químicos, así como, el aumento de la calidad química y rendimiento de forraje de maíz, lo que facilita su empleo como alimento para rumiantes sin procesar o para ensilar.

Agradecimientos

La autora principal agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el financiamiento para los estudios de Doctorado en el Programa de Ciencias en Ecología y Desarrollo Sustentable. Al MVZ. Juan Pablo Cruz Castañeda por su colaboración con la parcela para el trabajo de campo. Al Campo Experimental General Terán, INIFAP, por la donación de la micorriza arbuscular empleada en el trabajo de investigación. Al Ing. Sabel Barrón Freyre (Campo Experimental Huimanguillo, INIFAP) por su asesoría en el establecimiento y desarrollo del cultivo de maíz. Al M en C. Aarón Jarquín Sánchez responsable del laboratorio de Biogeoquímica de El Colegio de la Frontera Sur Unidad Villahermosa, por las facilidades otorgadas para los análisis químicos requeridos.

Referencias

- Adebayo, A. O., S. O. Oluremi, y A. O. James, (2018). Influence of compost supplemented with jatropha cake on soil fertility , growth , and yield of maize (*Zea mays L .*) in a degraded soil of Ilorin , Nigeria. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 7 (1), 67–73.
- Aguilar, C. C., E. J. A. S. Escalante, y M. I. Aguilar (2015). Análisis de crecimiento y rendimiento de maíz en clima cálido en función del genotipo, biofertilizante y nitrógeno. *Terra Latinoamericana*, 33 (1), 51–62.
- Álvarez-Sánchez. E., A. Vázquez- Alarcón, J. Z. Castellanos, y J. Cueto-Wong. (2006). Efectividad biológica de abonos orgánicos en el crecimiento de trigo. *Terra Latinoamericana*, 24 (2), 261–268.
- Averill, C., B. L. Turner, y A. C. Finzi. (2014). Mycorrhiza-mediated competition between plants and decomposers drives soil carbon storage. *Nature*, 505 (7484), 543–545.
- Ball DF (1964) Loss-on-ignition as an estimate of organic matter and organic carbon in non-calcareous soil. *Journal Soil Science*, (15), 84-92.
- Barrer, S. E. (2009). El uso de hongos micorrizicos arbusculares como una alternativa para la agricultura. *Facultad de Ciencias Agropecuarias*, 7 (1), 124–132.
- Barrón, F. S., A. M. Barrón, y C. A. Palafox. (2014). Potencial productivo de nueve híbridos de

- maíz para forraje en condiciones de temporal en la Chontalpa Tabasco. In XXVI Reunión Científica-Tecnológica Forestal y Agropecuaria Tabasco y III Simposio Internacional en Producción Agroalimentaria Tropical (pp. 311–316). Villahermosa, Tabasco: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- Castro, A., C. Henríquez, y F. Bertsch. (2009). Capacidad de suministro de N, P y K de cuatro abonos orgánicos. *Agronomía Costarricense*, 33 (1), 31–43.
- Damián-Huato, M. A., B. Ramírez-Valverde, A. Aragón-García, M. Huerta-Lara, D. M de J. Sangerman-Jarquín, y O. Romero-Arenas. (2010). Manejo del maíz en el estado de Tlaxcala, México: entre lo convencional y lo agroecológico. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 6 (2), 67–76.
- Diacono, M., y F. Montemurro. (2010). Long-term effects of organic amendments on soil fertility. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 30 (2), 401–422.
- Díaz, V. T., R. L. Partidas, F. Y. E. Suárez, J. R. Lizárraga, y L. Á. López. (2014). Uso eficiente del agua y producción óptima en maíz, con el uso de cuatro dosis de nitrógeno. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 23 (1), 32–36.
- Enríquez, Q. J. F., N. F. Meléndez, A. E. D. Bolaños, y E. V. A. Esqueda. (2011). Producción y manejo de forrajes tropicales. (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Ed.) (1ra ed.). Medellín de Bravo, Veracruz, México: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- FAO (Food and Agriculture Organization). (2013). Manual de compostaje del agricultor, Experiencias en América Latina. Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe. <http://www.fao.org/3/a-i3388s.pdf> (31 de marzo de 2017).
- Ferguson, R. B., J. A. Nienaber, R. A. Eigenberg, y B. L. Woodbury. (2005). Long-term effects of sustained beef feedlot manure application on soil nutrients, corn silage yield, and nutrient uptake. *Journal of Environmental Quality*, 34 (sep-oct), 1672–1681.
- Figueroa, V. U., W. J. A. Cueto, J. A. Delgado, H. G. Nuñez, S. D. G. Reta, G. H. M. Quiroga, C. R. Faz, y R. J. L. Marquez. (2010). Estiercol de bovino lechero sobre el rendimiento y recuperación aparente de nitrógeno en maíz forrajero. *Terra Latinoamericana*, 28 (4), 361–

- Gallardo Lancho, J. F. (2001). Mineralización y humificación de la materia orgánica del suelo: consecuencias sobre la contaminación. En Pérez, J. C. C., L. Alvarez, y N. W. Osorio (Eds.), X Congreso de la sociedad colombiana de la ciencia del suelo (pp. 141–153). Medellín, Colombia: Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo.
- Garcés, M. A. M., R. L. Berrio, A. S. Ruíz, J. G. Serna de León, y A. A. F. Builes. (2004). Ensilaje como fuente de alimentación para el ganado. *Revista Lasallista de Investigación*, 1 (1), 66–71.
- García, G. A., M. P. Bernal, A. Roig. (2005). Organic matter fractions involved in degradation and humification processes during composting. *Compost Science Utilization*, 13, 127-135.
- García, E. (2004). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (5a ed.). México: Instituto de geografía- Universidad Nacional Autónoma de México.
- Gil, M. V., M. T. Carballo, y L. F. Calvo. (2008). Fertilization of maize with compost from cattle manure supplemented with additional mineral nutrients. *Waste Management*, 28 (8), 1432–1440.
- Gliessman, S. R., M. F. J. Rosado, Z. C. Guadarrama, J. Jedlicka, V. E. Mendez, R. Cohen, L. Trujillo, C. Bacon, A. Cohn y R. Jaffe. (2007). Agroecología : promoviendo una transición hacia la sostenibilidad. *Ecosistemas*, 16 (1), 13–23.
- Granados-Rivera, L. D., J. Quiroz-Valiente, J. A. Maldonado-Járquez, L. Granados-Zurita, P. Díaz-Rivera, y J. Oliva-Hernández, (2018). Caracterización y tipificación del sistema doble propósito en la ganadería bovina del Distrito de Desarrollo Rural 151, Tabasco, México. *Acta Universita*, 28 (6), 47–57.
- López, M. J. D., E. A. Díaz, R. E. Martínez, y C. R. D. Valdez. (2001). Abonos orgánicos y su efecto en propiedades físicas y químicas del suelo y rendimiento en maíz. *Terra Latinoamericana*, 19 (4), 293–299.
- López-Calderon, M. J., U. Figueroa-Viramontes, M. Fortis-Hernández, G. Núñez-Hernández, E. Ochoa-Martínez, y J. I. Sanchez-Duarte. (2015). Evaluación de dosis equivalentes de fertilizante y estiércol en la producción de forraje de maíz (*Zea mays*). *Phyton*, 84 (1), 8–13.

- López-Martínez, J. D., C. Vázquez-Vázquez, E. Salazar-Sosa, R. Zúñiga-Tarango, y H. I. Trejo-Escareño. (2010). Sistemas de labranza y fertilización en la producción de forraje de maíz. *Phyton-International Journal of Experimental Botany*, 79 (871), 47–54.
- Martín, G. M., y R. Rivera. (2015). Influencia de la inoculación micorrízica en los abonos verdes. Efecto sobre el cultivo principal. Estudio de caso: el maíz. *Cultivos Tropicales*, 36(especial), 34–50.
- Martínez, H. E., E. J. P. Fuentes, y H. E. Acevedo. (2008). Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal*, 8 (1), 68–96.
- Monaco, S., D. J. Hatch, D. Sacco, C. Bertora, y C. Grignani. (2008). Changes in chemical and biochemical soil properties induced by 11-yr repeated additions of different organic materials in maize-based forage systems. *Soil Biology and Biochemistry*, 40, 608–615.
- Montaño, A. N. M., G. V. Quiroz, y F. G. Cruz. (2001). Colonización micorrízica arbuscular y fertilización mineral de genotipos de maíz y trigo cultivados en un Andisol. *Terra Latinoamericana*, 19 (4), 337–344.
- Osorio, N. W. (2012). pH del suelo y disponibilidad de nutrientes. *Manejo Integral del Suelo y Nutrición Vegetal*, 1 (4), 1-4.
- Palma, L. D. J., D. J. Cisneros, C. E. Moreno, y R. J. A. Rincon. (2007). *Suelos de Tabasco: Su Uso y Manejo Sustentable*. (Colegio de Postgraduados, Ed.) (1ra ed.). Villahermosa, Tabasco: Colegio de Postgraduados, Instituto para el Desarrollo de Sistemas de Producción del Trópico Húmedo de Tabasco, Fundación Produce Tabasco A. C.
- Pérez, L. Y. del C. (2012). Impacto de la biofertilización y aplicación de abonos orgánicos en la productividad de maíz (*Zea mays* L.) en Chiapas. Tesis de doctorado, El Colegio de la Frontera Sur, San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, México. 125 p.
- Phillips, J. M. y D. J. Hayman. 1970. Improved procedures for clearing and staining.
- Pigurina, G. y G. E. Pérez. (1994). Momento de cosecha de maíz para ensilar. Montevideo, Uruguay: Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria - URUGUAY.
- Pimienta, B. E., H. J. Zañudo, y A. E. López. (2009). Efecto de las micorrizas arbusculares en el

- crecimiento, fotosíntesis y anatomía foliar de plantas jóvenes de *Agave tequiliana*. *Acta Botánica Mexicana*, 89, 63-78.
- Quiroga-Garza, H. M., J. A. Cueto-Wong, y U. Figueroa-Viramontes. (2011). Efecto del estiércol y fertilizante sobre la recuperación de 15N y conductividad eléctrica. *Terra Latinoamericana*, 29 (2), 201–209.
- Ramos, A. D. y A. E. Terry. (2014). Generalidades de los abonos orgánicos: importancia del bocashi como alternativa nutricional para suelos y plantas. *Cultivos Tropicales*, 35 (4), 52–59.
- Salazar, S. E., E. H. I. Trejo, M. J. D. López, V. C. Vázquez, C. J. S. Serrato, I. Orona Castillo, y M. J. P. Flores. (2010). Efecto residual de estiércol bovino sobre el rendimiento de forraje de maíz y propiedades del suelo. *Terra Latinoamericana*, 28 (4), 381–390.
- Salazar-Sosa, E., H. I. Trejo-Escareño, C. Vázquez-Vázquez, y J. D. López-Martínez. (2007). Producción de maíz bajo riego por cintilla, con aplicación de estiércol bovino. *Phyton*, 76, 169–185.
- Salazar-Sosa, E., H. I. Trejo-Escareño, C. Vázquez-Vázquez, J. D. López-Martínez, M. Fortis-Hernández, R. Zuñiga-Tarango, y J. P. Amado-Álvarez. (2009). Distribución de nitrógeno disponible en suelo abonado con estiércol bovino en forraje de maíz. *Terra Latinoamericana*, 27 (4), 373–382.
- Sánchez, S., M. Hernández, y F. Ruz. (2011). Alternativas de manejo de la fertilidad del suelo en ecosistemas agropecuarios. *Pastos y Forrajes*, 34 (4), 375–392.
- SAS (Statistical Analysis Software). 2013. Institute Inc. User's guide. Statistics. Versión 8. Sixth edition. SAS Inc. Cary North Carolina, USA.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) NOM-021-RECNAT-2000. (Norma Oficial Mexicana) (2002). Especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudio, muestreo y análisis. México. <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2009/DO2280n.pdf> (22 de noviembre de 2018).
- Setia, R., P. Marschner, J. Baldock, D. Chittleborough, P. Smith, y J. Smith. (2011). Salinity effects

- on carbon mineralization in soils of varying texture. *Soil Biology and Biochemistry*, 43 (9), 1908–1916.
- Shanahan, J. F., N. R. Kitchen, W. R. Raun, y J. S. Schepers. (2008). Responsive in-season nitrogen management for cereals. *Computers and Electronics in Agriculture*, 61 (1), 51–62.
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). (2018). Estadística de producción agrícola. <http://infosiap.siap.gob.mx/gobmx/datosAbiertos.php> (27 de noviembre de 2018).
- Smith S. E., y D. Read. (2008). Growth and carbon economy of arbuscular mycorrhizal symbionts. En: Press A, editor. *Mycorrhizal symbiosis*. Third Edit. London, UK: Elsevier B.V. p. 787.
- Sparling, G. P., D. Wheeler, E. T. Vesely, y L. A. Schipper. (2006). What is soil organic matter worth? *Journal of Environmental Quality*, 35, 548–557.
- Tinoco, A. C. A., M. F. A. Rodriguez, R. J. A. Sandoval, F. S. Barrón, C. A. Palafox, E. V. A. Esqueda, M. M. Sierra, y M. J. Romero. (2002). *Manual de Produccion de Maiz para los Estados de Veracruz y Tabasco*. 1ª edición. Veracruz, México: Instituto Nacional de Investigación Forestal, Agrícola y Pecuaria - Campo Experimental Papaloapan.
- Trejo-Escareño, H. I., E. Salazar-Sosa, J. D. López-Martínez, y C. Vázquez-Vázquez. (2013). Impacto del estiércol bovino en el suelo y producción de forraje de maíz. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 4 (5), 727.
- Trinidad, S. A. (2000). Utilización de estiércoles. Ficha Técnica. Montecillo, Edo de México.
- Uribe, V. G., J. Petit, y E. R. Dzib. (2007). Respuesta del cultivo de maíz a la aplicación de biofertilizantes en el sistema roza, tumba y quema en suelo Alfisol (Chac-Lu ' Um, nomenclatura Maya), en Yucatán, México. *Agricultura Andina*, 13, 3–18.
- West, R. C., N. P. Psuty, y B. G. Thom. (1985). *Las tierras bajas de Tabasco* (2da ed.). Villahermosa, Tabasco. Gobierno del estado de Tabasco.
- Wiersma, D. W., P. R. Carter, K. A. Albrecht, y J. G. Coors. (1993). Kernel milkline stage and corn forage yield, quality, and dry matter content. *Journal of Production Agriculture*, 6 (1), 94–99.
- Yan, N., P. Marschner, W. Cao, C. Zuo, y W. Qin. (2015). Influence of salinity and water content

on soil microorganisms. *International Soil and Water Conservation Research*, 3, 316–323.

Zech, W., N. Senesi, G. Guggenberger, K. Kaiser, J. Lehmann, T. M. Miano, A. Miltner, y G. Schroth. (1997). Factors controlling humification and mineralization of soil organic matter in the tropics. *Geoderma*, 79 (1–4), 117–161.

Capítulo 3. Artículo enviado a la revista ITEA (en revisión).

Contenido nutricional y costo de producción del forraje de maíz (*Zea mays* L.) fertilizado con estiércol composteado y micorriza.

M.M. Jiménez-Ortiz^{1*}, R. Gómez-Álvarez¹, J. Oliva-Hernández², L. Granados-Zurita², J.M. Pat-Fernández³, E.M. Aranda-Ibáñez⁴.

¹ El Colegio de la Frontera Sur. Unidad Villahermosa. Villahermosa, Tabasco-México.

² Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Huimanguillo. Huimanguillo, Tabasco-México.

³ El Colegio de la Frontera Sur. Unidad Campeche. Campeche, Campeche-México.

⁴ Colegio de Postgraduados Campus Tabasco. Cárdenas, Tabasco-México.

*Autor de correspondencia e-mail: majimenez@ecosur.edu.mx

Resumen

El objetivo del estudio fue determinar la Influencia del estiércol bovino composteado y de la micorriza arbuscular sobre el contenido de nutrientes del forraje de maíz y su rendimiento productivo en dos etapas de desarrollo durante dos ciclos de cultivo sucesivos en condiciones de trópico húmedo. Se determinó el costo de producción del estiércol composteado (E) y del cultivo con fertilización orgánica. Se evaluaron seis tratamientos de fertilización orgánica (15, 30 y 45 t ha⁻¹ de E, 15, 30 y 45 t ha⁻¹ de E más micorriza [EM]); una dosis de fertilización química (FQ: 160-60-30 kg de NPK ha⁻¹) y un testigo (SF), en dos etapas de fisiológicas del cultivo de maíz (floración y a la cosecha). Las variables de respuesta fueron: contenido de nutrientes en el cultivo, rendimiento (MS), costo del E, costo del cultivo de maíz y relación costo/beneficio. Los datos se analizaron con el procedimiento GLM y comparación de medias con la prueba de “t”. El tratamiento, ciclo y la interacción tratamiento*ciclo afectaron ($p \leq 0.01$) las variables proteína bruta (PB), P, K, Ca y rendimiento de MS a la floración. En la etapa de cosecha tratamiento, ciclo y la interacción tratamiento*ciclo influyeron ($p \leq 0.01$) las variables PB, K, Ca y rendimiento de MS. El costo de producción de E, bajo el esquema de mano de obra familiar, favorece que el E y EM

puedan sustituir la fertilización inorgánica en el cultivo del forraje de maíz sin perder viabilidad económica y productiva.

Palabras claves

Composta, *Glomus intraradices*, análisis foliar, rendimiento, análisis económico.

NUTRITIONAL CONTENT AND PRODUCTION COST OF FORAGE CORN (*Zea mays*) FERTILIZED WITH COMPOSTED MANURE AND MYCORRHIZA

Abstract

The objective of the study was to determine the Influence of composted bovine manure and arbuscular mycorrhiza on the nutrient content of forage corn and its productive yield in two stages of development during two successive crop cycles under humid tropic conditions. The production cost of composted manure (E) and of the crop with organic fertilization was determined. Six organic fertilization treatments (15, 30 and 45 t ha⁻¹ of E, 15, 30 and 45 t ha⁻¹ of E plus mycorrhizae (EM) were evaluated; a dose of chemical fertilization (CF: 160-60-30 kg of NPK ha⁻¹) and a control (SF), in two stages of physiological corn cultivation (flowering and harvest) The response variables were: nutrient content in the crop, yield (DM), cost of E, cost of corn cultivation and cost/benefit ratio. The data were analyzed with the GLM procedure and comparison of means with the “t” test. The variables crude protein (CP), P, K, Ca and yield of DM at flowering were affected ($p \leq 0.01$) by the treatment, the cycle and the treatment*cycle interaction. In the harvest stage treatment, cycle and interaction treatment*cycle influenced the variables PB, K, Ca and yield of DM. The cost of production of E, under the family labor scheme, favors that E and EM can replace inorganic fertilization in the c corn fodder without losing economic and productive viability.

Key words (Compost, *Glomus intraradices*, foliar analysis, yield, economic analysis).

Introducción

El continuo manejo convencional de los suelos para los cultivos, conlleva a una reducción de la materia orgánica del suelo, y como consecuencia, la disminución de nutrientes afectando su fertilidad (Montgomery, 2007). El uso de enmiendas orgánicas como la composta de estiércol bovino, beneficia la producción agrícola ya que es una fuente importante de nutrientes como son el N, P, K, Ca y Mg; Su aplicación ayuda a conservar el equilibrio de nutrientes del suelo, incrementa la población de microorganismos y de la macrofauna, la cual ayuda a mejorar o mantener su estructura y capacidad de retención de humedad, regulación de la aireación, mejora la penetración de raíces, aumenta la MO, estabiliza el pH, aumenta la capacidad de intercambio catiónico, y otros beneficios (Hernández *et al.*, 2010; Mbau *et al.*, 2014; Ramos y Terry, 2014). El desconocimiento del manejo adecuado del estiércol impide su aprovechamiento como producto reciclado de buena calidad. La práctica del compostaje es una alternativa en el reciclaje de residuos orgánicos para transformarlos en materiales estables y ricos en nutrientes (Mbau *et al.*, 2014). El proceso de compostaje es importante en el reciclaje del estiércol de animales debido a que las temperaturas alcanzadas en la etapa termofílica (60 – 65 °C) permiten la eliminación de organismos nocivos de los sustratos orgánicos, así como su pasteurización, resultando un material seguro para su utilización como enmienda orgánica (Lekasi *et al.*, 2003; Sepúlveda *et al.*, 2013). Las enmiendas orgánicas brindan beneficios al medioambiente en comparación con el uso exclusivo de fertilizantes sintéticos (Wen *et al.*, 2016; Jiménez *et al.*, 2019). Dentro de las prácticas agroecológicas se incluye el uso del hongo micorrízico arbuscular *Glomus intraradices*, el cual en asociación con la planta produce una extensión radical favoreciendo una mejor absorción de nutrientes para la planta (Barrer, 2009; Jiménez-Ortiz *et al.*, 2019). Tanto el N como el fósforo (P) tienen gran importancia en la nutrición de las plantas, ya que influyen en el rendimiento y calidad del forraje verde. En este sentido, el cultivo de forraje de maíz es una alternativa de alimentación

para rumiantes debido a que proporciona gran cantidad de materia seca (MS), carbohidratos estructurales y proteína bruta (Boivin *et al.*, 2013; Moreno *et al.*, 2017). El maíz se cosecha como forraje para su ensilaje cuando la línea de leche se encuentra a 2/3 del grano. En esta fase de desarrollo, el cultivo presenta el mayor rendimiento de MS ha⁻¹, contenido de grano y una humedad entre 25 y 30 % MS (Pigurina y Pérez, 1994). El ensilado de maíz se considera una fuente de energía (incluye la planta completa), y es empleado con frecuencia como complemento alimenticio en la dieta de hembras bovinas en lactación, especialmente en la etapa inicial de la lactancia (Boivin *et al.*, 2013). Sin embargo, su contenido de proteína bruta puede incrementarse cuando es cosechado al inicio de la floración (Amador y Boschini, 2000). Es importante considerar el rendimiento de MS en esa etapa del cultivo para lograr su mejor aprovechamiento. El rendimiento de los cultivos tiene una relación directa con la dosis de fertilización nitrogenada (Díaz *et al.*, 2014). Sin embargo, el costo y aplicación de los fertilizantes pueden representar entre 20 y 40 % del costo de producción en los cultivos forrajeros (López-Calderón *et al.*, 2015). Por ejemplo, la tonelada de urea en algunos estados del sureste de México (Campeche, Quintana Roo y Yucatán) oscilaba los MXN 8, 433.00 en el 2008, mostrando un incremento de 17.4 % para el 2018 (SNIIM, 2019). El alto valor económico de los fertilizantes inorgánicos limita su uso, y tan solo el 45 % de la superficie de cultivo es fertilizada, realizándose esta práctica, principalmente, en el ciclo primavera-verano (Fortis *et al.*, 2009). Ante este escenario el uso del estiércol como fertilizante puede generar una significativa disminución en los costos de producción y en los daños ambientales. Por lo anterior, el objetivo del presente estudio fue evaluar la Influencia del estiércol bovino composteado y de la micorriza arbuscular sobre el contenido de nutrientes del forraje de maíz, en dos etapas de desarrollo del cultivo, y su rendimiento productivo durante dos ciclos de cultivo sucesivos en el trópico húmedo de Tabasco. También se determinó el costo de producción del estiércol composteado, del cultivo por tipo de fertilización y la relación costo/beneficio.

Materiales y métodos

Localización

El estudio se llevó a cabo en la parcela del Sr. Juan Pablo Cruz Castañeda ubicada en Huimanguillo, Tabasco, México (15Q 0456225; 1948685 UTM). La zona presenta un clima cálido húmedo con lluvias en verano Am(w)''(i) g (García, 2004). Temperatura ambiente media anual de 26.7 °C con máxima de 39.7 °C y mínima de 13.2 °C. El suelo es un Fluvisol éutrico de textura arcillo-arenoso, localmente conocido como suelo de vega de río (Palma-López *et al.*, 2007). El estudio se realizó durante dos ciclos de cultivo Primavera-Verano (P-V) 2017 (junio-septiembre) y Otoño-Invierno (O-I) 2017/2018 (diciembre, enero, febrero y marzo) bajo condiciones de temporal. Los datos de la precipitación pluvial (PP) acumulada (mm día⁻¹) y temperatura ambiente (°C día⁻¹) provienen de la estación meteorológica del Campo Experimental Huimanguillo, del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP).

Diseño experimental y manejo del cultivo

Se utilizó un diseño factorial con dos factores. El primer factor fue Tratamiento con ocho niveles de fertilización con seis repeticiones: seis de fertilización orgánica (15, 30 y 45 t ha⁻¹ de estiércol composteado (E), 15, 30 y 45 t ha⁻¹ de estiércol composteado más micorriza (EM); uno de fertilización química (FQ: 160-60-30 kg de NPK ha⁻¹) y un testigo sin fertilizar (SF); el segundo factor fue ciclo de cultivo: P-V y O-I. Las parcelas experimentales fueron de 20 m², con cuatro surcos centrales como área útil de cada parcela. Se cultivó el maíz híbrido PAS-525 en 1, 140.8 m², a densidad de siembra de 82, 500 plantas ha⁻¹. La dosis de fertilización química empleada (160-60-30 kg de NPK ha⁻¹) fue la recomendada para el cultivo del maíz en la zona de vega de río de Huimanguillo, Tabasco (Tinoco *et al.*, 2002). La fuente de fertilización química fue urea (46 % N), superfosfato triple de calcio (46 % P₂O₅) y cloruro de potasio (60 % K₂O). La mitad de la dosis de

N y la dosis total del P y K, se aplicaron al momento de la siembra. Posteriormente a los 30 días después de la siembra (DDS) se aplicó el resto de la dosis de N. La dosis del fertilizante orgánico se determinó calculando el aporte del 100 % del nivel de N recomendado para el cultivo (30E). Las dosis 15E y 45E fueron considerados 50 % debajo y 50 % arriba del 100 % de la dosis recomendada para el cultivo (30E). La fertilización orgánica se realizó un día antes de la siembra de forma manual al voleo y posteriormente se dio un pase de rastra para incorporarlo al suelo. Para el cálculo de la dosis 30E se consideró un aporte de N del estiércol de 1.5 % y una tasa de liberación del 35 % (Trinidad, 2000). La fórmula utilizada para calcular la dosis de estiércol fue la siguiente:

$$D_{est} = (DN * t_{est}) / N_{lib}$$

Dónde: D_{est} = dosis de estiércol ($t\ ha^{-1}$); DN = dosis de N requerida; t_{est} = 1 t de estiércol; N_{lib} = N liberado en 1 t de estiércol. Considerando que el N liberado en 1 t de estiércol (1.5 % de N) es de 5.25 kg de N, la dosis estimada con la formula anterior fue de $30.4\ t\ ha^{-1}$ en peso fresco ajustándose a $30\ t\ ha^{-1}$. El estiércol utilizado fue recolectado de una unidad de producción de bovinos de doble propósito localizado en la misma zona, el material se encontraba acumulado por varios meses por lo que ya presentaba un precompostaje. La composta se trabajó en pila y fue volteada cada tres días durante un mes y posteriormente se dejó en reposo por 30 días. Se le determinó nitrógeno total (Nt) [Kjeldahl], totales de P, K y Ca. El análisis de MO del E se realizó por el método de calcinación (Ball, 1964) a $500\ ^\circ C$ por 12 horas. La composta de estiércol tuvo la siguiente composición química: pH: 6.21, conductividad eléctrica (CE): $1.32\ dS\ m^{-1}$, materia orgánica (MO): 83.6 %, nitrógeno total (Nt): 0.80 %, P: 0.36 %, K: 0.76 %, Ca: 0.73 % y capacidad de intercambio catiónico (CIC): 24.1 %. El suelo presentó un pH de 5.77, CE $0.07\ dS\ m^{-1}$, Nt: 0.22 %, MO: 2.5 % y P disponible: $29.78\ mg\ kg^{-1}$; contenido medio en K ($0.36\ cmol\ kg^{-1}$) y Ca ($9.67\ cmol\ kg^{-1}$) y CIC con $15.3\ cmol\ kg^{-1}$. Para los tratamientos con micorriza se utilizó el biofertilizante del INIFAP, el cual

contiene un mínimo de 40 esporas del hongo micorrízico arbuscular *Glomus intraradices* por gramo de sustrato. Se utilizó la dosis de 0.5 kg de biofertilizante ha⁻¹. Las semillas de maíz fueron inoculadas con el biofertilizante un día antes de la siembra.

Variables evaluadas

Las evaluaciones se realizaron en dos etapas de fisiológicas del cultivo de maíz: 1.- a la floración (75 % de floración - emisión de estigmas - estambres) y 2.- a la cosecha (2/3 de línea de leche). Las variables de respuesta fueron: contenido de nutrientes en el cultivo, rendimiento de MS, costo del estiércol composteado, costo del cultivo con fertilización orgánica y la relación costo/beneficio. Para la variable contenido de nutrientes a la floración, se realizó una evaluación foliar para la determinación de concentración de los nutrientes Nt (reportado como proteína total) (Kjeldahl), y totales de P, K y Ca. Se seleccionando dos plantas por parcela (12 por tratamiento) de los surcos centrales eliminando el efecto de orilla, a las cuales se les corto la primera hoja opuesta por debajo de la mazorca principal. El manejo de la muestra fue la recomendada por el manual de muestreo foliar (Suárez, 2012). Para el rendimiento del cultivo en MS se seleccionaron dos plantas por parcela (12 por tratamiento) del 2° y 5° surco, eliminando el efecto de orilla, las cuales fueron cortadas a 10 cm del suelo. Fueron pesadas en campo, posteriormente fueron molidas individualmente homogeneizando el material para tomar una muestra de 200 g la cual fue colocada en bolsa de papel y secadas a 70 °C por 72 h en estufa de aire forzado. Una vez secas las muestras a peso constante fueron pesadas nuevamente para determinar la MS y estimar el rendimiento del cultivo. Para las variables de contenido de nutrientes y rendimiento de MS a la cosecha, se muestrearon dos plantas completas por parcela, y fueron manejadas de la misma forma que las plantas seleccionadas para el rendimiento en la etapa de floración. En el ciclo P-V el rendimiento de MS a la floración y cosecha (para ensilar) se determinó a los 51 y 73 DDS, respectivamente, y

a los 68 y 80 DDS a la floración y cosecha, respectivamente en el ciclo O-I. Las evaluaciones a la cosecha se realizaron a la etapa fisiológica de 2/3 de línea de leche, estado recomendado para su cosecha y posterior ensilaje (Wiersma *et al.*, 1993; Pigurina y Pérez, 1994). Para la determinación del costo del estiércol compostado como fertilizante orgánico, se consideraron los precios y cantidades de insumos empleados para su elaboración. Para estimar el costo de producción del cultivo de forraje de maíz en MS se consideró el costo por tipo de fertilizante como parte de los insumos empleados en el cultivo. También se calculó la ganancia del cultivo por tipo de fertilización empleando la fórmula:

$$G = IT - CT.$$

Donde

G = Ganancia

IT (ingreso total) = $P_p \times Q_p$ (P_p = Precio del producto; Q_p = Cantidad del Producto [rendimiento en materia verde (MV)])

CT = Costo total de producción).

Finalmente se calculó la relación beneficio/costo (R B/C) por tipo de fertilización con la fórmula:

$$R B/C = (G / CT) \times 100 \text{ (Espinosa } et al., 2010).$$

Análisis estadísticos

Los análisis de datos se efectuaron con apoyo del paquete estadístico SAS (SAS, 2002) y se probó la normalidad y homocedasticidad de los datos con las pruebas de Shapiro-Wilk's y Brown-Forsythe, respectivamente. Las variables dependientes contenido de PB y Ca en hojas a la floración, rendimiento de MS a la floración, contenido de K en planta a la cosecha tuvieron

normalidad y varianzas homogéneas. Las variables dependientes contenido de K y P en hojas a la floración, contenido de PB y Ca en planta a la cosecha y rendimiento de MS a la cosecha, no tuvieron normalidad y varianzas homogéneas, por lo que se transformaron a la potencia 2, inversa, potencia 2, logaritmo natural y raíz cuadrada, respectivamente. Las variables dependientes sin transformar y las transformadas con normalidad y homocedasticidad se analizaron con el procedimiento de modelo lineal general (GLM). Las medias se compararon con la prueba de “t” con las medias de cuadrados mínimos usando la opción pdiff de SAS. Las transformaciones utilizadas no permitieron que la variable dependiente contenido de P en planta a la cosecha tuviera normalidad y homocedasticidad, por lo que se analizó con el test Kruskal Wallis considerando el ciclo de manera independiente. Cuando se detectó influencia del tratamiento sobre la variable de respuesta, se aplicó el test exacto de la suma de rangos de Wilcoxon para datos no pareados (Milton, 2007).

Resultados

El tratamiento, ciclo y la interacción de ambos factores incidieron significativamente ($P \leq 0.01$) los contenido de PB, P, K y Ca en hoja, así como en el rendimiento de MS a la floración. En la FQ durante O-I se detectó el mayor contenido de PB en hoja con relación al resto de los tratamientos ($P \leq 0.05$). El tratamiento 30E en O-I tuvo mayor PB en hoja con respecto a SF en O-I y P-V ($P \leq 0.05$). Sin embargo, fue similar a FQ en P-V ($P \geq 0.05$). El menor contenido de PB en hoja se presentó en 15EM durante el O-I (Gráfica 1a). En términos generales durante la P-V las hojas tuvieron mayor contenido de P con relación a O-I ($P \leq 0.05$), los mayores y menores contenido de P en hoja se registró en 45EM P-V y 15EM P-V, respectivamente ($P \leq 0.05$) (Gráfica 1c). En el tratamiento 45E P-V se detectó el mayor contenido de K en hoja ($P \leq 0.05$) con respecto al resto de los tratamientos. Los tratamientos 15E y 30E durante O-I y P-V permitieron un mayor contenido

de K en hoja con relación a SF y FQ en ambos ciclos ($P \leq 0.05$) (Gráfica 1e). Los ocho tratamientos estudiados en O-I tuvieron mayores contenidos de Ca en hoja con relación a P-V, destacando 45EM O-I por el mayor contenido de Ca en hoja ($P \leq 0.05$). Los tratamientos 45E y 45EM durante O-I permitieron que las hojas tuvieran mayor contenido de Ca con relación a SF y FQ en O-I y P-V ($P \leq 0.05$) (Gráfica 1g). Con excepción de 30EM O-I, durante la P-V el rendimiento de MS en los ocho tratamientos fue mayor al de O-I ($P \leq 0.05$). Los mayores y menores rendimientos de MS se detectaron en 30E, 15EM, 30EM y FQ durante P-V, y 45E, 15EM y 45EM durante O-I, respectivamente ($P \leq 0.05$) (Gráfica 1i).

Con excepción del contenido de P en planta a la cosecha, el tratamiento, ciclo y la interacción de ambos factores influyeron ($P \leq 0.01$) el contenido de PB, K y Ca en planta y el rendimiento de MS a la cosecha. Se discutirán los resultados de la interacción tratamiento x ciclo. Con excepción del tratamiento 15EM en O-I, el contenido de PB en planta fue mayor durante el O-I en los siete tratamientos restantes con referencia a lo detectado en P-V ($P \leq 0.05$). El mayor contenido de PB en planta se presentó en FQ durante el O-I con respecto al resto de los tratamientos ($P \leq 0.05$). La incorporación de E y EM al suelo, en los diferentes niveles, no incrementó el contenido de PB en planta con respecto a SF ($P \geq 0.05$). Sin embargo, el EM en P-V, en sus tres niveles, fue similar a FQ en P-V ($P \geq 0.05$) (Gráfica 1b). Durante el O-I el contenido de P en planta fue afectado por el tratamiento ($P \leq 0.01$). No obstante, durante la P-V el tratamiento no afectó el contenido de P en planta ($P \geq 0.05$). En O-I, el contenido de P en planta fue similar entre 45E y 45EM, pero, mayor a 30E, 15EM y FQ ($P \leq 0.05$) (Gráfica 1d). El contenido de K en planta en los tratamientos 45E O-I, 15EM O-I, 30EM y 45EM en O-I y P-V fue mayor a SF y FQ en O-I y P-V ($P \leq 0.05$). En P-V el contenido de K en planta se incrementó conforme aumento la dosis de E y EM, detectándose la mayor concentración de K en planta en 45 EM ($P \leq 0.05$) (Gráfica 1f). En O-I el contenido de

Ca en planta fue mayor en los ocho tratamientos con relación a lo registrado en P-V ($P \leq 0.05$). Durante el O-I, la mayor concentración de Ca en planta se tuvo en 45EM ($P \leq 0.05$), aunque esta fue similar a 45E ($P \geq 0.05$). En P-V, la inclusión de E y EM no permitió incrementar el contenido de Ca en planta con respecto a SF y FQ ($P \geq 0.05$) (Gráfica 1h). En 15EM durante la P-V se detectó un mayor rendimiento de MS con respecto a SF en O-I y P-V y FQ P-V ($P \geq 0.05$). Sin embargo, en 15EM P-V se obtuvo una respuesta similar a FQ O-I ($P \geq 0.05$) (Gráfica 1j).

De acuerdo a los montos considerados y a los kilogramos de E obtenidos al final del proceso, el costo del E fue de MXN 0,71 kg⁻¹. El rubro de mano de obra es el más importante de los componentes que determinan el costo de producción de un kilogramo de E, ya que representa el 64.8 %. Los datos reportados de costos de producción del cultivo con fertilización convencional corresponden a precios actualizados al año 2019. Bajo este sistema, el costo por fertilizantes corresponde al 15.5 % del costo total (Tabla 2). Cuando el cultivo se realiza con fertilización orgánica el costo para este rubro se eleva considerablemente, abarcando el 61.4 % del costo total (Tabla 3). Para determinar el costo del forraje de maíz en ambos sistemas, se consideraron los rendimientos a la cosecha en MS obtenidos en el ciclo P-V. El rendimiento con la fertilización orgánica corresponde al tratamiento 15EM. El rendimiento con fertilización convencional fue 37.7 % menor que el obtenido con la fertilización orgánica. No obstante, el alto valor económico del EM favoreció que el cultivo de maíz con fertilización orgánica tenga un mayor costo de producción respecto al costo con fertilización convencional (37.8 %) (Tabla 4). De acuerdo a la ganancia del cultivo estimada por tipo de fertilización, se observa que la fertilización orgánica fue 33.74 % menor respecto a la fertilización química. Sin embargo, la ganancia del cultivo con fertilización orgánica puede superar a la fertilización química en un 80.25 % disminuyendo el costo del EC (Tabla 4).

Discusión

La temperatura ambiente promedio y PP acumulada registradas durante el ciclo P-V fueron mayores (29.1 °C y 910.9 mm, respectivamente) a la registrada en O-I (25.1 °C y 470.6 mm, respectivamente). Sin embargo, en ambos ciclos, estas condiciones climáticas permitieron el crecimiento del cultivo de maíz. Una mayor temperatura ambiente y PP en P-V favoreció la acumulación de biomasa en P-V con relación a OI, ya que la presencia de agua y energía son importantes en el proceso de fotosíntesis. Por otro lado, la disminución de la temperatura y la presencia de lluvias intermitentes en el ciclo O-I, favoreció un mayor contenido de PB, P y Ca en la planta al momento de la cosecha del cultivo. Probablemente se deba a que las plantas tienen una mayor tasa de crecimiento entre los 60 y 80 días después de la siembra bajo esas condiciones climáticas (Jiménez *et al.*, 2019).

En la etapa de floración el contenido de PB tuvo una media de 17 y 16.5 % en P-V y I-O, respectivamente. Sin embargo, en la etapa de cosecha se observó una disminución del 46.5 y 10.9 % en P-V y O-I, respectivamente. Estas disminuciones pueden deberse a que el contenido de la PB se encuentra en mayor concentración en las hojas durante la etapa de floración, no así en la cosecha donde la PB se concentra en la mazorca. Además, los nutrientes se distribuyen principalmente en el fruto, por lo que al considerarse la planta completa el contenido de PB se diluye en todo el material. Resultados similares en el contenido de PB en forraje de maíz se obtuvieron con la aplicación de estiércol (80 t ha⁻¹) y con la aplicación de composta (25 t ha⁻¹) + fertilizante, durante el ciclo de cultivo P-V, reportando un contenido de 8.8 % de PB para ambos tratamientos en planta completa, y sin diferencia significativa respecto a la fertilización inorgánica (9.5 %) (Figuroa *et al.*, 2010). En evaluaciones realizadas en China durante el verano, se reportan valores de 7.8 y 9.6 % de PB en la etapa V12 (12 hojas emergidas) para la fertilización con composta (sustitución del

30 % de la fertilización convencional) y para la fertilización convencional, respectivamente; y 16.5 % de PB para ambos tratamientos en la etapa R3 (etapa de leche); sin embargo, no se detectó diferencia significativa entre ambos tratamientos en las dos etapas fisiológicas (Zhang *et al.*, 2016). Caso contrario se obtuvo en el presente trabajo, donde los valores más altos se encontraron durante la etapa de floración (V12) y descendieron en la etapa de cosecha (R3). Los valores registrados de PB en el presente trabajo son similares a los reportados en trabajos donde se utiliza estiércol bovino como opción en la fertilización del cultivo de maíz. Además, la PB en planta en los tratamientos con la fertilización orgánica se encuentra dentro de los rangos óptimos de N (2-5 %) para el cultivo de maíz (Motsara y Roy, 2008). El mayor contenido de P se presentó con el tratamiento 45EM tanto en floración como en la cosecha, corroborando el beneficio de M en la planta, al mejorar la absorción de este nutriente por la extensión radical que generan sus micelios (Barrer, 2009). Pérez (2012), obtuvo valores de P en follaje de maíz más altos a los obtenidos en el presente estudio, con la aplicación de humus de lombriz solo y en combinación con *G. intraradices* con 0.62 y 0.71 g planta⁻¹, respectivamente, no encontrando diferencia significativa entre tratamientos. Otras evaluaciones que reportan valores superiores en P a los obtenidos en el presente trabajo, son las realizadas por Salazar *et al.* (2007), quienes aplicaron las dosis de 80, 120 y 160 t estiércol ha⁻¹ al cultivo de maíz, obteniendo los mayores valores para P (0.54 %), K (0.26 %) y Ca (0.61 %) con las dosis de 80, 120 y 120 t estiércol ha⁻¹, respectivamente. El uso de enmiendas orgánicas permite aumentar la cantidad de nutrientes al suelo lo cual tiene un beneficio en la nutrición de las plantas (Ramos y Terry, 2014), no así, el uso de fertilizante inorgánico que puede aportar entre uno y tres nutrientes (N, P, K). Respecto al rendimiento del cultivo del forraje de maíz, Salazar *et al.* (2009), reportan 14.2 t MS ha⁻¹, valor superior al obtenido en el presente trabajo, y no encontraron diferencias significativas en los tratamientos de aplicación de estiércol respecto a la fertilización química. Mientras que Figueroa *et al.* (2010), obtuvieron rendimientos de 17.8 t MS ha⁻¹ con la

aplicación de 80 t de estiércol ha⁻¹, no encontrando diferencia significativa respecto a la fertilización inorgánica (15.9 t MS ha⁻¹). López-Calderón *et al.* (2015), y García *et al.* (2019), obtuvieron comportamientos similares en el rendimiento de MS con el uso de estiércol y fertilización inorgánica. Aunque en los estudios señalados previamente se reportan valores superiores en el rendimiento de MS ha⁻¹ con relación a los obtenidos en el presente estudio, se corrobora que el uso del E permite obtener rendimientos similares a los obtenidos con la fertilización inorgánica aun desde el primer año de aplicación. Un beneficio importante que genera el uso de enmiendas orgánicas es la incorporación de MO al suelo, la cual es portadora de nutrientes y microorganismos que intervienen en el proceso de mineralización (Ramos y Terry, 2014). El principal componente de la MO son las sustancias húmicas (SH) las cuales pueden comprender del 50 al 80 % de la MO (Pérez *et al.*, 2018; Veobides *et al.*, 2018). Debido a los beneficios físicos, químicos y biológicos que aportan al suelo, las SH son consideradas importantes en el crecimiento de las plantas (Canellas y Olivares, 2014), debido a que promueven el crecimiento de las plantas estimulando el sistema radical mediante procesos metabólicos, favoreciendo la retención de agua y nutrientes, y por ende el crecimiento de las plantas (Canellas y Olivares, 2014; Veobides *et al.*, 2018). Las SH se clasifican en ácidos fúlvico (AF), ácidos húmicos (AH) y huminas (Pérez *et al.*, 2018). El E y su combinación con M generaron una respuesta positiva en las variables evaluadas en el presente trabajo, lo cual puede atribuirse a la presencia de SH en el E. La relación E4/E6 (determinación frecuentemente utilizada para saber la presencia de SH) del E utilizado mostro un valor de 1.36, considerándose la presencia de AH, ya que valores superiores a 5 considera la presencia de AF, y mientras menor sea el valor, es considerada la presencia de moléculas de mayor peso molecular, de estructuras aromáticas y altamente conjugadas como los AH (Jaramillo, 2011). Las SH intervienen en la estimulación de enzimas como la H⁺-ATPasa de la membrana plasmática, la cual está involucrada en el transporte primario de iones, y estimula también un gradiente que da

energía para el transporte de otros iones que contribuyen al elongamiento celular y a la absorción de nutrientes (Veobides *et al.*, 2018). Por otro lado, el M es definido como “un órgano de absorción doble que se forma cuando un hongo simbionte vive dentro de algún órgano de absorción de una planta. Su estructura se compone de: vesícula, arbusculo, hifa y micelio externo. Fisiológicamente el arbusculo es de gran importancia puesto que es donde se lleva a cabo el intercambio de nutrientes entre ambas partes. Las membranas plasmáticas de las hifas del M requiere la presencia de H⁺-ATPasa la cual es promovida por las SH de la MO (Smith y Read, 2008). El M interviene en algunos aspectos fisiológicos de las plantas como la fotosíntesis debido a un aumento en la asimilación de CO₂, consecuencia de una mayor absorción de agua y nutrientes (Pimienta-Barrios *et al.*, 2009). Las SH al igual que el M modifican el sistema radical de las plantas, aumentando su eficiencia en la absorción de nutrientes (Veobides *et al.*, 2018).

El costo de un kilogramo de E es menor comparado con el kilogramo de fertilizantes inorgánicos comúnmente usados en el cultivo de forraje de maíz (MXN 8,20; 11,50 y 8,90 para urea, fosfato diamónico y cloruro de potasio, respectivamente). Sin embargo, el E tiene baja concentración de N (0.80 %), P (0.36 %) y K (0.76 %) en comparación con los fertilizantes inorgánicos (Jiménez *et al.*, 2019). Mientras que, en la urea, el fosfato diamónico y en el cloruro de potasio el contenido de N, P y K es de 46, 46 y 60 %, respectivamente. Esta diferencia de contenido de nutrientes hace que el costo por nutriente en el E (MXN 88,75; 197,16 y 93,36 para N, P y K, respectivamente) sea alto en comparación al fertilizante inorgánico (MXN 17,8; 24,9 y 14,8 para N, P y K, respectivamente), lo que concuerda con lo indicado por Román *et al.* (2013).

Una menor concentración de N, P y K en el E implica utilizar una mayor cantidad de E ha⁻¹ con el propósito de alcanzar una dosis similar de nutrientes cuando se aplica fertilización inorgánica. La situación anterior, aumenta el costo en un 120.04 % como se observa en la tabla 3. Sin embargo,

el costo de producción de E puede ser menor en sucesivas producciones, ya que algunos insumos pueden ser reutilizados, como, por ejemplo, cubetas, pala y el plástico para taparlo, este último puede ser sustituido por materiales de la zona como palma de guano (*Sabal japa* y *Sabal mexicana*) o no requerirlo si la composta se elabora bajo techo. La elaboración de E puede ser realizada por miembros de la familia como una actividad adicional dentro del sistema de producción. Bajo este esquema de participación familiar, el costo de la tonelada de E se reduce a MXN 79,36 y el kilogramo de forraje de maíz a MXN 1,38 valor por debajo del costo de producción con fertilización inorgánica. El costo de producción del E no difiere mucho del costo estimado en la elaboración de composta de cama de porcinos, el cual es elaborado cada seis meses con un costo de USD 34.28 t⁻¹ (Román *et al.*, 2013). La R C/B obtenida en el cultivo de forraje de maíz fue de 105 y 31.7 % para fertilización química y fertilización orgánica respectivamente, es decir el productor gana MXN 1,05 y 0,31 por peso invertido. No obstante, el valor de la R C/B con la fertilización orgánica puede aumentar a MXN 1,89 cuando el costo del EC disminuye.

Debido a la preocupación que existe sobre los impactos y consecuencias negativas que generan los sistemas de producción pecuarios sobre el cambio climático, es necesario reducir la dependencia de insumos elaborados a base de petróleo y con altos costos energéticos que generan contaminación ambiental agotamiento desmedido de muchos servicios ecosistémicos (Stavi *et al.*, 2016). La agroecología es una opción factible que nos brinda prácticas ecológicas que benefician al ambiente y que puede aumentar la resiliencia en los sistemas de producción que las implementa (Nicholls y Altieri, 2011). La elaboración y uso de las compostas brindan múltiples beneficios al ambiente, principalmente al suelo tanto física como químicamente (Ramos y Terry, 2014). La captura de carbono es uno de los servicios ecosistémicos de regulación que se puede obtener mediante la aplicación de compostas en el suelo, debido a que la incorporación de compostas posibilita el

aumento de las reservas de carbono. Evaluaciones del efecto de la fertilización nitrogenada con enmiendas orgánicas (estiércol bovino: 269 kg N ha⁻¹) sobre los contenidos de carbono orgánico del suelo (COS) en el cultivo de trigo, reportó aumentos de 19.5 % de COS en un periodo de diez años y un 53.2 % más respecto a cuándo no se fertiliza (Aula *et al.*, 2016). La incorporación de compostas al suelo, permite contribuir a mantener la fertilidad del suelo y mejorar el secuestro de carbono, además de sostener la producción del cultivo mediante el reciclado de N contenido en los desechos orgánicos (Forte *et al.*, 2017).

Conclusiones

El costo de producción de E, bajo el esquema de mano de obra familiar, favorece que el E y EM puedan sustituir la fertilización inorgánica en el cultivo del forraje de maíz sin perder viabilidad económica y productiva. El contenido de nutrientes, PB y rendimiento de MS fueron afectados por el tratamiento y ciclo de cultivo durante las etapas de floración y cosecha del cultivo. La magnitud de la influencia de E y EM sobre el contenido de nutrientes, PB y rendimiento de MS varió de acuerdo a la dosis de E y ciclo de cultivo. Tanto en P-V como en O-I 30E destaco por su alto rendimiento de MS ha⁻¹, el cual fue equiparable a FQ en O-I y superior a FQ en P-V. En ambos ciclos, P-V y O-I, la aplicación de FQ generó altos valores de PB en planta. Sin embargo, en P-V la combinación E con M permitió obtener un contenido de PB en planta similar al de FQ.

Agradecimientos

La autora principal agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el financiamiento para los estudios de Doctorado en el Programa de Ciencias en Ecología y Desarrollo Sustentable. Al MVZ. Juan Pablo Cruz Castañeda por su colaboración con la parcela para el trabajo de campo. Al Campo Experimental General Terán, INIFAP, por la donación de la micorriza arbuscular empleada en el trabajo de investigación. Al Ing. Sabel Barrón Freyre (Campo

Experimental Huimanguillo, INIFAP) por su asesoría en el establecimiento y desarrollo del cultivo de maíz. Al M. en C. Aarón Jarquín Sánchez responsable del laboratorio de Biogeoquímica de El Colegio de la Frontera Sur Unidad Villahermosa, por las facilidades otorgadas para los análisis químicos requeridos.

Literatura citada

Amador RAL, Boschini FC (2000). Fenología productiva y nutricional de maíz para producción de forraje. *Agronomía Mesoamericana* 11,1: 171–177.

Aula L, Macnack N, Omara P, Mullock J, Raun W (2016). Effect of fertilizer nitrogen (N) on soil organic carbon, total N, and soil pH in long-term continuous winter wheat (*Triticum Aestivum* L.). *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 47,7: 863–874.
<https://doi.org/10.1080/00103624.2016.1147047>

Barrer SE (2009). El Uso De Hongos Micorrizicos Arbusculares Como Una Alternativa Para La Agricultura. *Facultad de Ciencias Agropecuarias* 7,1: 124–132.
[https://doi.org/10.1016/S0007-1536\(83\)80219-8](https://doi.org/10.1016/S0007-1536(83)80219-8)

Boivin M, Gervais R, Chouinard PY (2013). Effect of grain and forage fractions of corn silage on milk production and composition in dairy cows. *Animal* 7,2: 245–254.
<https://doi.org/10.1017/S1751731112001486>

Canellas LP, Olivares FL (2014). Physiological responses to humic substances as plant growth promoter. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture* 1,3: 1–11.
<https://link.springer.com/article/10.1186/2196-5641-1-3>

Dan PNM (2016). Estado mundial del recurso suelo. Organización de las Naciones Unidad para la

Alimentación y la Agricultura; Grupo Técnico Intergubernamental del Suelo Roma, Italia.
<http://www.fao.org/3/a-i5126s.pdf> Fecha de consulta 05 de agosto de 2019.

Díaz VT, Partidas RL, Suárez FYE, Lizárraga JR, López LÁ (2014). Uso eficiente del agua y producción óptima en maíz, con el uso de cuatro dosis de nitrógeno. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias* 23,1: 32–36.

Espinosa GJA, González OTA, Luna EAA, Cuevas RV, Moctezuma LG, Góngora GSF, *et al.* (2010). Administración de ranchos pecuarios con base en el uso de registros técnicos y económicos. 1ra Edición. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias-SAGARPA Cuajimalpa, D. F. México: 217p.
<file:///C:/Users/Usuario/Downloads/5.MANUAL-ADMINISTRACION-RANCHOS-GANADEROS.pdf>

Figuroa VU, Cueto WJA, Delgado JA, Nuñez HG, Reta SDG, Quiroga GHM, *et al.* (2010). Estiercol de bovino lechero sobre el rendimiento y recuperacion aparente de nitrogeno en maiz forrajero. *Terra Latinoamericana* 28,4: 361–369.

Forte A, Fagnano M, Fierro A (2017). Potential role of compost and green manure amendment to mitigate soilGHGs emissions in Mediterranean drip irrigated maize production systems. *Journal of Environmental Management* 192: 68–78.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.01.037>

Fortis-Hernández M, Leos-Rodríguez JA, Orona-Castillo I, García-Hernández JL, Salazar-Sosa E, Preciado-Rangel P, *et al.* (2009). Uso de estiércol bovino en la comarca lagunera. En: Orona-Castillo I, Salazar-Sosa E, Fortis-Hernández M, Trejo-Escareño HI, Vázquez-Vázquez C, López-Martínez JD *et al.* (Eds.) *Agricultura Orgánica*. 2da Edición. Consejo de Ciencia y

Tecnología Gómez Palacio, Durango México. pp: 104–127.

García E (2004). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. 5a Edición. Instituto de geografía- Universidad Nacional Autónoma de México. México. http://www.igeograf.unam.mx/sigg/utilidades/docs/pdfs/publicaciones/geo_siglo21/serie_lib/modific_al_sis.pdf Fecha de consulta 18 de septiembre de 2018.

García GO, Uriel FV, Cueto WJA, Núñez HG, Gallegos RMÁ, López MJD (2019). Disponibilidad de nitrógeno usando dos tipos de estiércol de bovino lechero en cultivos de forraje de maíz y triticale. *Nova Scientia* 11-1, 22: 124–141.

Hernández ROA, Ojeda BDL, López DJC, Arras VAM (2010). Abonos organicos y su efecto en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. *Tecnociencia Chihuahua* IV, 1: 1–6.

Jaramillo JDF (2011). Caracterización de la materia orgánica del horizonte superficial de un Andisol hidromórfico del oriente Antioqueño (Colombia). *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales* 35, 134: 23–33.

Jiménez OMM, Gómez AR, Oliva HJ, Granados ZL, Pat FJM, Aranda IEM (2019). Influencia del estiércol composteado y micorriza arbuscular sobre la composición química del suelo y el rendimiento productivo de maíz forrajero (*Zea mays* L.). *Nova Scientia* 23, 11 (2): 165 – 197 <https://doi.org/10.21640/ns.v11i23.1957>

Lekasi JK, Ndung’u KW, Kifuko MN (2003). A scientific perspective on composting. In: Savala CEN, Omare MN, y Woomer PL (ed), *Organic Resource Management in Kenya Perspectives and Guidelines* p. 184. Nairobi, Kenya: Organic resource management and agricultural technologies. Retrieved from <http://erepository.uonbi.ac.ke/bitstream/handle/11295/39161/Organic%20Resource%20man>

[agement.pdf?sequence=1](#) Fecha de consulta 30 de marzo de 2017.

López-Calderón MJ, Figueroa-Viramontes U, Fortis-Hernández M, Núñez-Hernández G, Ochoa-Martínez E, Sanchez-Duarte JI (2015). Evaluación de dosis equivalentes de fertilizante y estiércol en la producción de forraje de maíz (*Zea mays*). *Phyton* 84,1: 8–13.

Mbau SK, Karanja N, Ayuke F (2014). Short-term influence of compost application on maize yield, soil macrofauna diversity and abundance in nutrient deficient soils of Kakamega county, Kenya. *Plant and soil* 387,1–2: 379–394. <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2305-4>

Montgomery DR (2007). Soil erosion and agricultural sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104, 33: 13268–13272.

Moreno RA, Cantú BJE, Reyes CJL, Contreras VV (2017). Forage maize nutritional quality according to organic and inorganic. *Scientia Agropecuaria* 8, 2: 127–235. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2017.02.05>

Motsara MR, Roy RN (2008). Guide to laboratory establishment for plant nutrient analysis. Roma, Italia: FAO Fertilizer and plant nutrition bulletin 19. from <http://www.fao.org/3/i0131e/i0131e.pdf> Fecha de consulta 12 de octubre de 2019.

Nicholls CI, Altieri MA (2011). Modelos ecológicos y resilientes de producción agrícola para el siglo XXI. *Agroecología* 6: 28–737.

Palma LDJ, Cisneros DJ, Moreno CE, Rincon RJA (2007). Suelos de Tabasco : Su uso y manejo sustentable. Colegio de Postgraduados (ed) 1ra Edición. Colegio de Postgraduados, Instituto para el Desarrollo de Sistemas de Producción del Trópico Húmedo de Tabasco, Fundación Produce Tabasco A. C. Villahermosa, Tabasco.199p.

- Pérez EN, Jaramillo JD, Ruiz VO, Parra SL (2018). Caracterización óptica de la materia orgánica de un andisol del oriente de Antioqueño, Colombia. *Revista de La Facultad de Ciencias Universidad Nacional de Colombia* 7,1: 40–55. <https://doi.org//10.15446>
- Pérez LYDeIC (2012). Impacto de la biofertilización y aplicación de abonos orgánicos en la productividad de maíz (*Zea mays* L.) en Chiapas. El Colegio de la Frontera Sur. Retrieved from <http://bibliotecasibe.ecosur.mx/sibe/book/000051154> Fecha de consulta 31 de marzo de 2017.
- Pigurina G, Pérez GE (1994). Momento de cosecha de maíz para ensilar. Unidad de difusión e información tecnológica del INIA (ed) Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria-URUGUAY. Montevideo, Uruguay 12p.
- Pimienta-Barrios E, Zañudo-Hernández J, López-Alcocer E (2009). Efecto de las micorrizas arbusculares en el crecimiento, fotosíntesis y anatomía foliar de plantas jóvenes de *Agave tequiliana*. *Acta Botanica Mexicana* 89: 63–78.
- Ramos AD, Terry AE (2014). Generalidades de los abonos orgánicos: importancia del bocashi como alternativa nutricional para suelos y plantas. *Cultivos Tropicales* 35,4: 52–59.
- Román P, Martínez MM, Pantoja A (2013). Manual de compostaje del agricultor, Experiencias en América Latina. FAO (ed). Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe (2013th ed). Santiago de Chile, Chile: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Retrieved from <http://www.fao.org/3/a-i3388s.pdf> Fecha de consulta 31 de marzo de 2017.
- Salazar SE, Trejo EHI, Vázquez VC, López MJD (2007). Producción de maíz bajo riego por cintilla, con aplicación de estiércol bovino. *Phyton* 76: 169–185.

Salazar SE, Trejo EHI, Vázquez VC, López MJD, Fortis HM, Zuñiga TR, *et al.* (2009).

Distribución de nitrógeno disponible en suelo abonado con estiércol bovino en forraje de maíz.

Terra Latinoamericana 27,4: 373–382.

SAS (2002). SAS/STAT User's guide (Release 9.3). Cary, North Carolina, USA: SAS Institute.

SEMARNAT (2002). Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales Norma Oficial

Mexicana NOM-021-RECNAT-2000 Especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación

de suelos. Estudio, muestreo y análisis. México.

<http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2009/DO2280n.pdf> Fecha

de consulta 20 de noviembre de 2018.

Sepúlveda VLA, Alvarado TJA (2013). Manual de compostaje doméstico. Manual de

aprovechamiento de residuos orgánicos a través de sistemas de compostaje y lombricultura en

el Valle de Aburrá. Medellín, Colombia: Asociación Colombiana de ingeniería sanitaria y

ambiental. Seccional Noroccidente. Retrieved from

http://www.metropol.gov.co/Residuos/Documents/Cartillas/Manual_Compostaje.pdf Fecha

de consulta 31 de marzo de 2017.

Smith SE, Read D (2008). Mineral nutrition, toxic element accumulation and water relations of

arbuscular mycorrhizal plants. In: Press A (ed). Mycorrhizal symbiosis. London, UK: Elsevier

Ltd. p. 787. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-370526-6.50007-6>

SNIIM (2019). Sistema nacional de información e integración de mercados. from

<http://www.economia->

[sniim.gob.mx/nuevo/Home.aspx?oPBion=Consultas/MercadosNacionales/PreciosDeMercado/Agricolas/ConsultaInsumos.aspx?SubOPBion=9%7C0](http://www.economia-sniim.gob.mx/nuevo/Home.aspx?oPBion=Consultas/MercadosNacionales/PreciosDeMercado/Agricolas/ConsultaInsumos.aspx?SubOPBion=9%7C0)

. Fecha de consulta 02 de

septiembre de 2019.

Sosa-Rodrigues BA, García-Vivas YS (2018). Eficiencia de uso del nitrógeno en maíz fertilizado de forma orgánica y mineral. *Agronomía Mesoamericana* 29, 1: 2215-3608. <https://doi.org/10.15517/ma.v29i1.27127>

Stavi I, Bel G, Zaady E (2016). Soilfunctions and ecosystem services in conventional, conservation, and integrated agricultural systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 36, 2: 12. <https://doi.org/10.1007/s13593-016-0368-8>

Suárez, A. (2012). Manual de Muestreo Foliar para Recomendación de Fertilización. La Lima, Cortés, Honduras: FHIA, CARE, PROCORREDOR.

Tinoco ACA, Rodriguez MFA, Sandoval RJA, Barrón FS, Palafox CA, Esqueda EVA, *et al.* (2002). Manual de Produccion de Maiz para los Estados de Veracruz y Tabasco. INIFAP (ed) 1a Edición. INIFAP-CIRGOC Campo Experimental Papaloapan. Veracruz, México 113p.

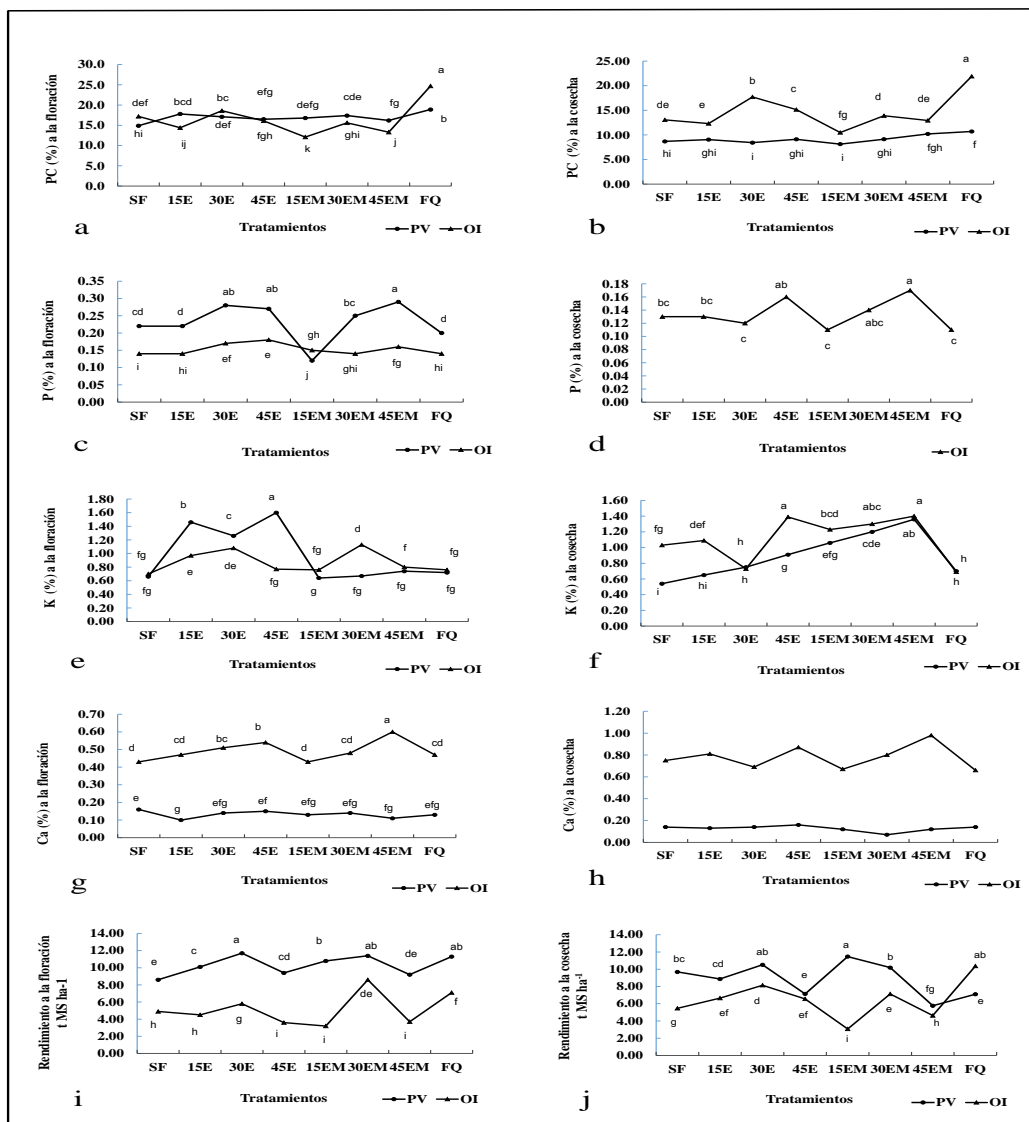
Trinidad SA (2000). Utilización de estiércoles. Colegio de Postgraduados-SAGARPA Montecillo, Edo de México. from [http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/Documents/fichasaapt/Utilización de estiércoles.pdf](http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/Documents/fichasaapt/Utilización_de_estiércoles.pdf) Fecha de consulta 13 de junio de 2017.

Veobides AH, Guridi IF, Vázquez P-V (2018). Las sustancias húmicas como bioestimulantes de plantas bajo condiciones de estrés ambiental. *Cultivos Tropicales* 38, 4: 102–109.

Wen Z, Shen J, Blackwell M, Li H, Zhao B, Yuan H (2016). Combined applications of nitrogen and phosphorus fertilizers with manure increase maize yield and nutrient uptake via stimulating root growth in a long-term experiment. *Pedosphere* 26, 1: 62–73. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(15\)60023-6](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(15)60023-6)

Wiersma DW, Carter PR, Albrecht KA, Coors JG (1993). Kernel milkline stage and corn forage yield, quality, and dry matter content. *Journal of Production Agriculture* 6, 1: 94–99. <https://doi.org/10.2134/jpa1993.0094>

Zhang Y, Li C, Wang Y, Hu Y, Christie P, Zhang J, *et al.* (2016). Maize yield and soil fertility with combined use of compost and inorganic fertilizers on a calcareous soil on the North China Plain. *Soil and Tillage Research* 155: 85–94. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.08.006>



Gráfica 1. Contenido de nutrientes (PB, P, K y Ca) y rendimiento en el cultivo de forraje de maíz (*Zea mays*) a la floración y a la cosecha en dos ciclos de producción (P-V y O-I).

Graph 1. Nutrient content (PB, P, K and Ca) and yield in the cultivation of forage corn (*Zea mays*) at flowering and harvest in two production cycles (P-V and O-I).

Literales distintas entre ciclo y entre tratamientos indican diferencia ($P \leq 0.05$). PB= proteína bruta, SF= sin fertilizar, E= estiércol compostado, M= micorriza (*Glomus intraradices*), 15E= 15 t de E ha⁻¹, 30E= 30 t de E ha⁻¹, 45E= 45 t de E ha⁻¹, EM= E más M, FQ= fertilización química (160-60-30 kg ha⁻¹ de NPK), P-V= primavera-verano, O-I= otoño-invierno.

Tabla 1. Costo de producción de estiércol composteado

Table 1. Cost of composted manure production

Insumo	Cantidad	Medida	Costo unitario (MXN)	Costo total (MXN)
Estiércol	6090	Kilogramo		
Agua	180	Litro	0.5	90
Plástico	1	Pieza	400	400
Pala	2	Pieza	120	240
Cubetas	4	Pieza	25	100
Costales	80	Pieza	1	80
Mano de obra	14	Jornal	120	1680
Total (MXN)				2 590,00
Composta producida	3654	kg		
Costo kilogramo (MXN)				0,70
Costo tonelada (MXN)				708,81

Nota: No se incluye el costo del estiércol ya que es un excedente del sistema de producción.

Tabla 2. Costos de producción y cosecha de una hectárea de cultivo de forraje de maíz (*Zea mays*) empleando fertilización química.

Table 2. Production and harvest costs of one hectare of forage corn crop (*Zea mays*) using chemical fertilization.

Concepto	Unidad	Cantidad	Precio unitario (MXN)	Precio total (MXN)
Mecanización				
Barbecho	Servicio	1	800	800
Rastra	Servicio	2	600	1200
Surcado y siembra	Servicio	1	700	700
Cosecha	Servicio	1	5500	5500
Insumos				
Semilla	Saco	1	1500	1500
Pre-emergente	Bote	1	450	450
Post-emergente	Bote	1	240	240
Palgus	Bote	2	260	520
Insecticida	Bote	1	430	430
Foliar	Bote	4	180	720
DAP	Saco	3	575	1725
Operación				
Mano de obra	Jornal	13	150	1950
Costo total [CT] (MXN)				15 735,00

Tabla 3. Costos de producción de una hectárea de cultivo de forraje de maíz (*Zea mays*) empleando fertilización orgánica

Table 3. Production costs of one hectare of forage corn crop (*Zea mays*) using organic fertilization.

Concepto	Unidad	Cantidad	Precio unitario (MXN)	Precio total 1 (MXN)	Precio total 2 (MXN) ¹
Mecanización	Servicio			8 200	8 200
Insumos	Varios			3 140	3 140
Composta	Tonelada	30	708.8	21 264	2 380,9
Micorriza	Bolsa	1	70	70	70
Operación	Jornal			1 950	1 950
Costo total [CT] (MXN)				34 624,00	15 740,90

¹Considerando la tonelada de EC a \$ 79.36

Tabla 4. Costo de la unidad de forraje de maíz (MS) (*Zea mays*) y ganancia del cultivo con diferente tipo de fertilización.

Table 4. Cost of the feed corn unit (MS) (*Zea mays*) and crop gain with different types of fertilization.

Concepto	Fertilización química	Fertilización Orgánica
Rendimiento del cultivo (t MS ha ⁻¹) ¹	7.1	11.4
Costo tonelada (MXN)	2 216,19	3 037,19
Costo kilogramo (MXN)	2,20	3,03
Rendimiento (MV) (t ha ⁻¹) ¹	32.3	45.6
Ingreso total (IT) ² (MXN)	32 300,00	45 600,00
Ganancia 1 (MXN)	16 565,00	10 976,00
Ganancia 2 ³ (MXN)		29 859,10
R C/B (%)	105,27	0,317
R C/B (%) ⁴		189,7

¹Se consideró el rendimiento a la cosecha del ciclo P-V y el tratamiento orgánico 15EM, así como un 18 y 20 % de MS para fertilización química y orgánica, respectivamente, para calcular el rendimiento en MV.

²Precio de venta del kilogramo de forraje de maíz en MV = MXN 1,00.

³Se consideró el costo de producción con precio total 2 (Tabla 3).

⁴Se consideró la ganancia 2.

R C/B= Relación costo/beneficio.

Capítulo 4. Conclusiones generales

El uso del estiércol composteado como fertilizante orgánico y su combinación con *G. intraradices* durante los ciclos PV y OI afectó positivamente la composición química del suelo aumentando o manteniendo el contenido de nutrientes, la acumulación de nutrientes en la planta y el rendimiento de forraje de maíz. La aplicación de 30 t ha⁻¹ de estiércol composteado más *G. intraradices* fue la mejor opción de fertilización orgánica con relación al testigo sin fertilización y la fertilización química en el primer experimento (capítulo dos) debido a que la planta tuvo mayor producción de forraje en MS durante dos ciclos de cultivo sucesivos. La combinación de estiércol con el biofertilizante *G. intraradices* mostró la utilización de los nutrientes disponibles en el suelo por la planta, situación que favorece la tasa de crecimiento de la planta en sus primeros 20 días de desarrollo y una mayor producción de forraje.

El E y EM puedan sustituir la fertilización inorgánica en el cultivo del forraje de maíz sin perder viabilidad económica y productiva. El contenido de nutrientes y rendimiento de MS en cada etapa fisiológica del cultivo fueron afectados por el tratamiento y ciclo de cultivo. La capacidad de la influencia de E y EM sobre el contenido de nutrientes, PB y rendimiento de MS varió de acuerdo a la dosis de E y ciclo de cultivo. En ambos ciclos de cultivo evaluados la aplicación de FQ generó altos valores de PB en la planta. Sin embargo, en el ciclo primavera - verano la combinación E con M permitió obtener un contenido de PB en planta similar al de FQ.

El empleo de estiércol composteado con o sin *G. intraradices* representan una opción para reciclar el estiércol que se genera en las unidades de producción bovina de doble propósito y favorece la sustitución de fertilizantes químicos. Ante estos resultados se acepta la hipótesis de que el estado nutricional y la productividad del cultivo del forraje de maíz aumentan cuando se emplea estiércol humificado y micorriza arbuscular. El proceso de producción de abono orgánico a partir de la humificación del estiércol tiene una relación costo/beneficio positiva que favorece su adopción en el cultivo de forraje de maíz cuando se realiza bajo el esquema de participación familiar. La investigación realizada tiene gran aporte en el reciclaje de desechos pecuarios y su uso como enmienda orgánica en el cultivo de forraje de maíz en el trópico húmedo de México. Sin embargo, es necesario continuar con estudios que muestren y retroalimenten su

factibilidad, así como su efecto residual a largo plazo bajo estas condiciones agroclimáticas de trópico húmedo.

Recomendaciones

La adquisición del biofertilizante empleado en el presente estudio, puede realizarse (se realizan envíos) en el Campo Experimental General Terán del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Monterrey, Nuevo León – México.

http://inifap.gob.mx/cirne/SitePages/Contenido/Personal_Investigador/Personal_CE_GTeran.aspx

Literatura citada

- Bernal MP, Alburquerque JA, Moral R. 2009. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review. *Bioresource Technology*. 100(22): 5444–5453.
- Bonilla CJA, Lemus FC. 2012. Emisión de metano entérico por rumiantes y su contribución al calentamiento global y al cambio climático. *Revisión Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*. 3(2): 215 – 246.
- Cano MA. 2011. Interacción de microorganismos benéficos en plantas: Micorrizas, *Trichoderma spp.* y *Pseudomonas spp.* Una revisión. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica* 14(2): 15 – 31.
- [EPA] Environmental Protection Agency. 2006. Global Anthropogenic Non-CO2 greenhouse gas emissions: 1990-2020. United States Environment Protection Agency, USA. pp: 274.
- Félix HJA, Sañudo TRR, Rojo MGE, Martínez RR, Olalde PV. 2008. Importancia de los abonos orgánicos. *Ra Ximhai*. 4(1): 57-67.
- Fortis HM, Rodríguez JAL, Rangel PP, Castillo IO, Salazar JAG, Hernández JLG, Vidal JAO. 2009. Aplicación de abonos orgánicos en la producción de forraje de maíz con riego por goteo. *Terra latinoamericana*. 27(4): 329-336.
- [IPCC] Intergovernmental Panel on Climate Change. 2006. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston, H. S., L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, and K. Tanabe (eds). Published: IGES, Japan. 4(10): 87.
- López CMJ, Figueroa VU, Fortis HM, Núñez HG, Ochoa ME, Sánchez DJI. 2015. Evaluación de dosis equivalentes de fertilizante y estiércol en la producción de forraje de maíz (*Zea mays*). *PHYTON Revista internacional de botánica experimental*. 84: 8-13.

- López MJD, Vázquez VC, Salazar SE, Zúñiga TR, Trejo EHI. 2010. Sistemas de labranza y fertilización en la producción de forraje de maíz. *PHYTON Revista internacional de botánica experimental*. 79: 47-54.
- Martín GM, Rivera R. 2015. Reseña bibliográfica Influencia de la inoculación micorrízica en los abonos verdes. Efecto sobre el cultivo principal. Estudio de caso: el maíz. *Cultivos Tropicales*. 36: 34-50.
- Miranda JCC de y Miranda LN de. 2006. Micorriza arbuscular e uso de adubos verdes em solos de Cerrado. En: de Carvalho A. M. y Amabile R. F., Cerrado: adubação verde, edit. Embrapa, Planaltina, DF, pp. 211-236, ISBN 85-7075-027-8.
- Nieto GA, Murillo AB, Diéguez ET, Morales AB, Espinoza FHR, Hernández JLG. 2010. Aprovechamiento de residuos orgánicos de origen animal, vegetal y doméstico para la elaboración y uso de composta en la agricultura orgánica. Capítulo IV, Libro Agricultura orgánica. Tercera parte. ISBN: 978-607-00-3411-4.
- Pinos RJM, García LJC, Peña ALY, Rendón HJA, González GC, Tristán PF. 2012. Impactos y regulaciones ambientales del estiércol generado por los sistemas ganaderos de algunos países de América. *Agrociencia*. 46(4): 359-370.
- Ramos AD, Terry AE. 2014. Revisión bibliográfica. Generalidades de los abonos orgánicos: importancia del bocashi como alternativa nutricional para suelos y plantas. *Cultivos Tropicales*. 35(4): 52-59.
- Senesi N. 1989. Composted materials as organic fertilisers. *Science of The Total Environment*. 81(82): 521-542.
- Smith SE, Read DJ. 2008. Mycorrhizal symbiosis. Ed. Amsterdam: Academic Press. 3th ed. ISBN-13 978-0-1237-0526-6.
- Zech W, Senesi N, Guggenberger G, Kaiser K, Lehmann J, Miano TM, Miltner A, Schroth G. 1997. Factors controlling humification and mineralization of soil organic matter in the tropics. *Geoderma* 79:117-161.