BENEMÉRITA
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

INSTITUTO DE CIENCIAS

CENTRO DE AGROECOLOGÍA

MAESTRÍA EN MANEJO SOSTENIBLE DE AGROECOSISTEMAS

TESIS

REHABILITACIÓN DE LA CAPACIDAD PRODUCTIVA DEL SUELO CON ENMIENDAS ORGÁNICAS Y MANEJO DE LA BIODIVERSIDAD DEL SUELO, EN SAN GABRIEL CHILAC,

PARA OBTENER EL TITULO DE

MAESTRO EN
MANEJO SOSTENIBLE DE AGROECOSISTEMAS

PRESENTA
BIÓL. MARIO MORENO MORALES

DIRECTOR DE TESIS
DR. DIONICIO JUÁREZ RAMÓN

Puebla, Pue. Diciembre 2015

.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la manutención realizada durante la investigación.

Al grupo de productores de amaranto orgánico Alternativas y Procesos de Participación Social, A.C., por el apoyo económico y de personal de campo otorgados durante el desarrollo del experimento.

Al Dr. Dionicio Juárez Ramón por la dirección de esta investigación, por todo su apoyo en campo, en la revisión y correcciones del documento y en mi formación profesional, además de ser un buen amigo con el que se puede confiar plenamente.

A mi comité tutoral formado por el Dr. Angel I. Ortiz Ceballos, el Dr. Antonio Trinidad Santos, el Dr. José Cinco Patrón Ibarra y el Dr. Daniel Jiménez García, les manifiesto mi reconocimiento y les agradezco sus constantes y acertadas revisiones y correcciones del trabajo de investigación y el tiempo dedicado a la atención de mi formación como maestrante.

Al Dr. Moisés Carcaño Montiel por proporcionar material biológico para la investigación.

A mi familia, amigos y mi novia por su apoyo y motivación constante para la culminación de un grado más.

A los profesores, amigos y compañeros de la maestría que me apoyaron en la realización de los muestreos de campo.

DEDICATORIA

A mis padres y hermanos por enseñarme el valor de las cosas, el no olvidar mis raíces y su invaluable apoyo en cada etapa de mi vida siendo motivo fundamental de superación personal.

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS ii
DEDICATORIA iii
CONTENIDO iv
ÍNDICE DE CUADROS vii
ÍNDICE DE FIGURAS viii
RESUMEN x
ABSTRACT xi
1. INTRODUCCIÓN 1
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 3
3. JUSTIFICACIÓN 4
4. OBJETIVOS 5
4.1. General 5
4.2. Específicos 5
5. HIPÓTESIS 6
6. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA 7
6.1. El cultivo de Amaranto en México 7
6.1.1. Taxonomía 7
6.1.2. Descripción botánica de *Amaranthus hypochondriacus* 8
6.1.3. Importancia del cultivo de amaranto 8
6.1.4. Valor nutritivo y composición química del amaranto 10
6.1.4.1. Hojas 10
6.1.4.2. Tallo 11
6.1.4.3. Semilla 11
6.1.6. Estados productores de amaranto en México 12
6.2. Deterioro de la capacidad productiva del suelo 13
6.2.1. Deterioro físico 14
6.2.2. Deterioro químico 14
6.2.3. Deterioro biológico 14
6.3. Agricultura sostenible 15

6.4. Mejoradores de la capacidad productiva del suelo 15
6.4.1. La materia orgánica 15
6.4.2. Enmiendas orgánicas 16
6.4.3. Estiércol 17
6.4.4. Compost 18
6.4.5. Residuos de cosecha 20
6.4.6. Respuesta de los cultivos al uso de enmiendas orgánicas 21
6.5. La fauna edáfica y su importancia ecológica y agronómica 21
6.5.1. Clasificación de la biota edáfica 22
6.5.1.1. Microfauna 22
6.5.1.2. Mesofauna 22
6.5.1.3. Macrofauna 22
6.6. Grupos funcionales 23
6.6.1. Geófagos 23
6.6.2. Detritívoros 23
6.6.3. Fitófagos y rizófagos 23
6.6.4. Depredadores 23
6.6.5. Omnívoros 24
6.6.6. Parásitos 24
6.7. Manejo de la biota edáfica 24
6.7.1. Bioestimulación 24
6.7.2. Bioaumentación 25
6.8. Estrategias para mejorar la calidad de enmiendas orgánicas 26
6.9. Estudios previos 28
7. MÉTODOS 30
7.1. Sitio de estudio 30
7.2. Edafología 30
7.3. Diseño experimental 32
7.4. Caracterización de los materiales orgánicos 33
7.5. Homogenización y enriquecimiento de enmiendas orgánicas 33
7.6. Inoculación de microorganismos edáficos 35

7.7. Labores agrícolas en el manejo del amaranto 35
7.8. Muestreos 35
7.8.1. Físicos 35
7.8.2. Químicos 36
7.8.3. Biológicos 36
7.8.3.1. Macrofauna 36
7.8.3.2. Mesofauna 36
7.8.4. Plantas de *Amaranthus hypochondriacus* 36
7.9 VARIABLES 37
7.10 ANÁLISIS ESTADÍSTICOS 37
8. RESULTADOS 38
8.1. Capacidad de retención de nutrientes de las enmiendas orgánicas. 38
8.2. Macrofauna 39
8.2.1. Densidad 39
8.2.2. Biomasa 41
8.2.3. Biodiversidad 42
8.3. Mesofauna 42
8.3.1. Densidad 42
8.4. Desarrollo y rendimiento de *Amaranthus hypochondriacus* 43
8.4.1. Altura 43
8.4.2. Diámetro de tallo 46
8.4.3. Rendimiento 48
9. DISCUSIÓN 51
9.1. Efectos del enriquecimiento de enmiendas orgánicas 51
9.2. Efectos sobre la biota edáfica 52
9.3. Efecto sobre el desarrollo y rendimiento del amaranto 55
10. CONCLUSIONES 56
11. RECOMENDACIONES 57
12. REFERENCIAS 58
13. ANEXOS 65
13.1. Lista de unidades, siglas y abreviaturas 65

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Balance nutrimental de hojas de *Amaranthus hypochondriacus* en relación con otras hortalizas. 10
Cuadro 2. Composición química de la semilla de *Amaranthus hypochondriacus* y otros cereales básicos. 11
Cuadro 3. Balance de aminoácidos esenciales en diferentes alimentos. 12
Cuadro 4. Principales estados productores de amaranto en México. 13
Cuadro 5. Composición química de enmiendas orgánicas utilizadas en la producción agrícola. 17
Cuadro 6. Grupos de organismos del suelo susceptibles de ser bioestimulados. . 24
Cuadro 7. Organismos potenciales de inoculación y sus efectos..... 25
Cuadro 8. Valores relativos de la composición media en NPK en materia seca de residuos de cosecha. 26
Cuadro 9. Análisis de las características físicas y químicas de la parcela experimental. 31
Cuadro 10. Factores de variación, niveles y tratamientos. 32
Cuadro 11. Caracterización física y química de las enmiendas orgánicas aplicadas en el experimento. 33
Cuadro 12. Dosis aplicadas de las enmiendas orgánicas, tanto naturales como enriquecidas (con el 5% de nutrientes de fertilizantes solubles por tonelada de enmienda). 34
Cuadro 13. Análisis químico de las enmiendas orgánicas naturales y enriquecidas. 38
Cuadro 14. Efecto de las enmiendas naturales y enriquecidas en los descriptores comunitarios de un suelo leptosol para la producción orgánica de amaranto. 39
Cuadro 15. Efecto de enmiendas orgánicas sobre el rendimiento de grano de amaranto de producción orgánica, en un suelo leptosol. 49

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación de la fauna edáfica en función de su tamaño (modificado de Swift et al., 1979). 22
Figura 2. Museo del Agua, San Gabriel Chilac, Puebla, México. 30
Figura 3. Efecto de las enmiendas naturales y enmiendas enriquecidas en la abundancia de las unidades taxonómicas en un suelo leptosol, para la producción orgánica de amaranto. 40
Figura 4. Efecto de las enmiendas naturales y enmiendas enriquecidas en la abundancia de organismo de macrofauna en un suelo leptosol; para la producción orgánica de amaranto. Letras diferentes indican diferencias significativas (Tukey $p < 0.05$, n= 22). 40
Figura 5. Efecto de las enmiendas naturales y enmiendas enriquecidas en la abundancia de los grupos funcionales en un suelo leptosol; para la producción orgánica de amaranto. 41
Figura 6. Efecto de las enmiendas naturales y enmiendas enriquecidas en la abundancia de ácaros en un suelo leptosol; para la producción orgánica de amaranto. Letras diferentes indican diferencias significativas (Tukey $p < 0.05$, n= 54). 42
Figura 7. Efecto de las enmiendas naturales y enmiendas enriquecidas sobre la abundancia de colémbolos en un suelo leptosol; para la producción orgánica de amaranto. Letras diferentes indican diferencias significativas (Tukey $p < 0.05$, n= 54). 43
Figura 8. Efecto de las enmiendas naturales y enriquecidas en la altura de las plantas de amaranto; para la producción orgánica de amaranto en un suelo leptosol. Letras diferentes indican diferencias significativas (Tukey $p<0.05$, n= 1728). 44
Figura 9. Efecto de los tratamientos con enmiendas naturales y enriquecidas en la altura de las plantas de amaranto; para la producción orgánica de amaranto en un suelo leptosol. Letras diferentes indican diferencias significativas (Tukey $p<0.05$, n= 1728). 44

Figura 10. Efecto de la inoculación de BFN BSP en la altura de las plantas de amaranto; para la producción orgánica de amaranto en un suelo leptosol. Letras diferentes indican diferencias significativas (Tukey p<0.05, n= 1728)..... 45
Figura 11. Efecto de los factores de variación en la altura de las plantas de amaranto; para la producción orgánica de amaranto en un suelo leptosol. Letras diferentes indican diferencias significativas (Tukey p<0.05, n= 1728)..... 46
Figura 12. Efecto de las enmiendas naturales y enriquecidas en el diámetro de las plantas de amaranto; para la producción orgánica de amaranto en un suelo leptosol. Letras diferentes indican diferencias significativas (Tukey p<0.05, n= 1728). 46
Figura 13. Efecto de los tratamientos con y sin fertilizante en el diámetro de las plantas de amaranto; para la producción orgánica de hoja de amaranto en un suelo leptosol. Letras diferentes indican diferencias significativas (Tukey p<0.05, n= 1728). 47
Figura 14. Efecto de los factores de variación en la altura de las plantas de amaranto; para la producción orgánica de amaranto en un suelo leptosol. Letras diferentes indican diferencias significativas (Tukey p<0.05, n= 1728)..... 48
Figura 15. Efecto del enriquecimiento de enmiendas orgánicas con fertilizantes solubles sobre la producción de grano de amaranto orgánico, en un suelo leptosol. Letras diferentes indican diferencias significativas (Tukey p<0.05, n= 96)..... 50

RESUMEN

La aplicación de enmiendas orgánicas es una estrategia indispensable para sostener la agricultura de los productores de amaranto (*Amaranthus hypochondriacus)* orgánico. Sin embargo éstos pueden aplicar anualmente hasta 18 ton ha^{-1} de composta, lo cual resulta insostenible y ecológicamente inequitativo. El enriquecimiento de enmiendas orgánicas, siguiendo la metodología de la amonificación de forrajes, puede ser una estrategia viable para la sostenibilidad productiva del suelo en el cultivo de esta especie. En San Gabriel Chilac, Puebla, México, en terrenos pertenecientes a Alternativas y Procesos de Participación Social, S. C. y sobre un suelo de leptosol, de origen sedimentario, mejorado con relleno de suelo transportado por erosión pluvial de otros sitios, se estableció un experimento de campo para probar cuatro materiales orgánicos (residuos de cosecha de *Zea mays*, residuos de cosecha de *A. hypochondriacus*, composta y estiércol), en su forma natural y enriquecidos, más la inoculación de bacterias fijadoras de nitrógeno y solubilizadoras de fósforo, y dos controles, uno de ellos con roca fosfórica, en un diseño completamente al azar, con seis repeticiones. Se realizaron ANOVAs y comparaciones de medias (Tukey, $p < 0.05$) para observar los efectos de los tratamientos sobre el desarrollo y rendimiento de las plantas de amaranto y sobre la biota edáfica, además el comportamiento de ésta se exploró mediante descriptores comunitarios: diversidad (índice Shannon-Wiener), densidad y biomasa de macrofauna y densidad de mesofauna. Los resultados mostraron que las enmiendas orgánicas naturales estimularon la densidad de organismos, especialmente el estiércol sobre los formícidos, en primer lugar y como segundo, los residuos de cosecha de amaranto sobre la biomasa de la macrofauna. La mesofauna fue más abundante en los residuos de cosecha de amaranto. Con la inoculación de bacterias nitrificantes y solubilizadoras se favoreció el desarrollo vegetal de las plantas de amaranto. Las enmiendas orgánicas enriquecidas disminuyeron a las comunidades macrofaunísticas en 45% en promedio, resaltando sus efectos positivos sobre la altura y rendimiento de grano del amaranto, especialmente el estiércol y los residuos de cosecha de maíz y amaranto.

ABSTRACT

The application of organic amendments is an essential strategy in order to maintain the production of organic amaranth. However, the producers applied annually up to 18 tons ha^{-1} compost, which is environmentally unsustainable and unfair. The enrichment of organic amendments, following the methodology of ammonification fodder, can be a viable strategy for the productive sustainability of this crop. In San Gabriel Chilac, Puebla, Mexico, on land belonging to Alternatives and Social Participation Processes, S.C. and on leptosol soil of sedimentary origin, this is improved with filler soil transported by water erosion from other sites, a field experiment was established to test four organic materials (maize crop residues, amaranth crop residues, compost and manure). The soil was teasted in its natural and enriched form, adding a control treatment in a completely randomized design, with six replications. ANOVA and Tukey's test ($p < 0.05$) were performed to observe the effects of treatments on the growth of amaranth plants and the soil biota analyzed by community descriptors: diversity (Shannon-Wiener index), macrofauna density and biomass, and mesofauna density. The results demonstrated that natural organic amendments stimulated the density of organisms, especially the manure on formicidae, and the crop amaranth residues on the macrofauna biomass. The mesofauna was more abundant in amaranth crop residues. Inoculating with nitrifying and solubilizing bacteria is favored vegetable development of amaranth plant. Enriched organic amendments decreased the macrofauna communities 45% on average, highlighting their positive effects on plant height, stem diameter and grain yield of amaranth, especially with manure and maize crop residue

1. INTRODUCCIÓN

El suelo se considera un recurso vivo y dinámico compuesto por partículas minerales (arena, arcilla y limo), materia orgánica, agua, gases y numerosas especies de macro, meso y microorganismos morfológica y fisiológicamente distintos como las lombrices, artrópodos y bacterias (Doran y Parkin, 1994). Es un sistema clave en el funcionamiento de los ecosistemas terrestres donde se llevan a cabo procesos vitales controlados principalmente por los organismos del suelo como la descomposición de materiales orgánicos y la disponibilidad de nutrimentos para las plantas (Fragoso *et al.*, 2001).

Anterior al pensamiento de intensificación agrícola, el ritmo pausado de las intervenciones durante las diferentes etapas de la agricultura permitían un buen acoplamiento entre las prácticas agrícolas y los ecosistemas seminaturales que se generaban (Sans, 2007). Sin embargo, éstas en los últimos años se han intensificado lo que ha provocado la sobreexplotación de los recursos naturales, el deterioro del suelo, la pérdida de su fertilidad y disminución de las cosechas (Gliessman, 2002).

Actualmente existen prácticas agrícolas que ofrecen alternativas de conservación de la fertilidad física, que contribuyen en la fertilidad química y promueven la fertilidad biológica (Labrador y Bello, 2001; Trinidad-Santos, 2013).

La aplicación de enmiendas orgánicas determina la productividad del suelo en forma sostenida y constituye una estrategia básica para darle vida al suelo, puesto que es fuente de alimenticia de una gran parte de los organismos que viven en él. Las enmiendas estimulan el inicio de las microcadenas alimenticias, mediante el incremento de las poblaciones de organismos descomponedores, que facilitan el reciclamiento de nutrientes en beneficio del crecimiento de las plantas y aumentando la sostenibilidad productiva del suelo (Brechelt, 2004; Juárez *et al*., 2011).

Sin embargo, el manejo de los residuos de cosecha y las aplicaciones de abonos orgánicos como el estiércol y compost pueden lograr características aceptables en el suelo agrícola, no obstante en su forma natural pueden ser

insuficientes para impactar en la disponibilidad de nutrimentos que las plantas requieren (Trinidad-Santos, 2013).

En suelos de origen sedimentario del sur del estado de Puebla se ha cultivado amaranto (*Amaranthus hypochondriacus*) de forma orgánica por más de 30 años. Para sostener ésta producción orgánica los productores han aplicado hasta 18 ton ha^{-1} de compost. No obstante, ésta dosis es insuficiente e insostenible para satisfacer los requerimientos nutrimentales del cultivo, manifestándose con la disminución paulatina de los rendimientos de grano bajo el mismo sistema.

Una solución a las bajas capacidades de sostener rendimientos agrícolas es el enriquecimiento de los materiales orgánicos sólidos con fuentes nutrimentales, tal como sucede en la técnica de la amonificación, que mejora la calidad nutritiva de los materiales orgánicos, es de fácil aplicación y no tiene efectos negativos en el ambiente (Conrad y Pastrana, 1990).

Aunado a ello, la aplicación de microorganismos fijadores de nitrógeno y solubilizadores de fósforo, potencian la disponibilidad de nutrimentos para las plantas (Ferrera y Alarcón, 2001; Loredo-Osti *et al*., 2004).

Con base a la información anterior, en el presente estudio se evaluaron los efectos que producen la aplicación de enmiendas orgánicas naturales y enriquecidas, más de la inoculación de microorganismos edáficos que participan en el incremento de la disponibilidad de nutrimentos sobre la biota edáfica y el crecimiento, desarrollo y rendimiento de amaranto (*Amaranthus hypochondriacus*), además de encontrar nuevos métodos para mejorar de la capacidad productiva del suelo aplicables al sistema de producción orgánica de alimentos.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los productores de Alternativas y Procesos de Participación Social S.C., ubicados en el sureste del estado de Puebla, México, cultivan sobre suelos que son provenientes de rocas de origen sedimentario (Leptosoles). Éstos suelos por naturaleza son pobres en nutrientes y sobre ellos se han aplicado hasta 18 ton ha^{-1} de compost anualmente durante más de 30 años para sostener una producción orgánica de amaranto (*Amaranthus hypochondriacus*).

No obstante, la tasa de extracción paulatina de nutrimentos a través de las cosechas ha provocado con el tiempo deficiencias en la capacidad productiva del suelo y la aplicación de grandes cantidades de compost resulta insostenible, además de que los nutrimentos aportados pueden ser insuficientes para el óptimo desarrollo y producción de la planta, manifestándose en la disminución de la fertilidad del suelo y los rendimientos.

Por ello es necesario observar cuidadosamente los contenidos nutrimentales de la enmienda orgánica para enriquecerlos, y garantizar la disponibilidad de nutrimentos que permitan obtener rendimientos sostenibles del cultivo.

Con base en lo mencionado en las líneas anteriores, surge la siguiente pregunta: ¿Se podrá rehabilitar la capacidad productiva de suelos degradados por la intensificación agrícola, si se aplican materiales orgánicos naturales y enriquecidos y además la inoculación de organismos edáficos que participen en el mejoramiento del suelo y en la disponibilidad de nutrimentos?

3. JUSTIFICACIÓN

Los productores de amaranto orgánico del sureste del estado de Puebla, obtienen después de cada cosecha anual cantidades considerables de materiales orgánicos de diversas fuentes como residuos de cosecha de amaranto y maíz, estiércol de ganado caprino, vacuno, gallinaza, que se pueden emplear como enmiendas orgánicas.

No obstante, cuando la enmienda orgánica no tiene la cantidad suficiente de nutrimentos para impactar en el desarrollo y producción óptima de la planta, ésta se puede enriquecer con los elementos en deficiencia mediante la aplicación de fertilizantes solubles en agua que los contenga. El uso de éste tipo de fertilizantes minimiza el daño ambiental por efectos residuales.

De ésta forma al obtener y aplicar enmiendas orgánicas con un balance nutricional óptimo para el desarrollo de la especie del cultivo se puede disminuir la aplicación de grandes cantidades de abonos que implica la agricultura orgánica y al mismo tiempo favorecer el medio para el establecimiento de organismos edáficos que incrementen la actividad biológica y la productividad agrícola.

Además, el uso de estrategias de enriquecimiento por ser de fácil aplicación permite que el productor utilice recursos que estén a su alcance y que haga uso mínimo de insumos externos sin generar contaminación ambiental.

4. OBJETIVOS

4.1. General

Evaluar los efectos de diferentes tipos de enmiendas orgánicas naturales y enriquecidas aplicadas en diferentes proporciones al suelo y la inoculación de microorganismos edáficos que participan en el incremento de la disponibilidad de nutrimentos para el mejoramiento de la capacidad productiva del suelo.

4.2. Específicos

Determinar los efectos de las enmiendas orgánicas naturales y enriquecidas sobre la densidad, biomasa y diversidad de la biota edáfica, el desarrollo vegetativo y el rendimiento en grano del cultivo de amaranto.

Evaluar el efecto de la inoculación de consorcios bacterianos, sobre la capacidad productiva del suelo, en el cultivo intensificado de amaranto orgánico.

5. HIPÓTESIS

La aplicación de enmiendas orgánicas enriquecidas potencia al doble la capacidad productiva de la enmienda orgánica natural aumentando la disponibilidad de nutrimentos en el suelo e incrementando la densidad y biomasa de organismos del suelo, el desarrollo y rendimiento de amaranto.

La inoculación de microorganismos incrementa la actividad microbiana del suelo por lo que se eleva la capacidad productiva del suelo y por ende los rendimientos en el cultivo de amaranto.

6. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

6.1. El cultivo de Amaranto en México

El continente Americano se considera como centro de origen del amaranto, y se ubica en el suroeste de Estados Unidos de América y norte de México, donde se cultiva desde hace más de 5000 años (Sánchez, 1980). En la época precolombina fue uno de los cuatro cultivos principales para la alimentación, junto con el maíz, frijol y calabaza (García *et al*., 2010).

La forma de aprovechamiento de ésta planta es en grano, para la preparación de diversos alimentos y dulces típicos y la parte vegetativa, en tierno como verdura (Sánchez, 1980; Alejandre y Gómez, 1986; García *et al*., 2010).

De las especies que se cultivan para grano las más importantes son *Amaranthus hypochondriacus* y *A. cruentus* que se cultivan en México y Guatemala; y *A. caudatus,* en Perú y otros países andinos (Alejandre y Gómez, 1986).

A pesar de su importancia alimentaria y económica para los pueblos prehispánicos de México, éste cultivo fue suprimido por la iglesia católica en su afán por erradicar ceremonias religiosas de los aztecas que se concentraban alrededor de ésta especie vegetal, con la consecuente disminución del cultivo a pequeñas zonas de Morelos, Puebla, Tlaxcala, Distrito Federal y Estado de México (García *et al*., 2010).

6.1.1. Taxonomía

El amaranto es una planta perteneciente a la familia *Amarantaceae* con 70 géneros y 850 especies. El género *Amaranthus* tiene más de 60 especies con importancia económica y alimenticia, destacan: *A. hypochondriacus, A. caudatus, A. cruentus, A. hybridus, A. tricolor, A. blitum, A. dubius, A. virides* (Sánchez, 1980, Alejandre y Gómez, 1986, García *et al*., 2010).

Su clasificación taxonómica es la siguiente:

Reino	**Vegetal**
División	**Embryophyta Siphonogama**
Subdivisión	***Angiospermae***
Clase	***Dicotyledonae***
Subclase	***Archiclomidae***
Serie	***Centrospermae***
Familia	***Amaranthaceae***
Género	***Amaranthus***
Especies cultivadas para grano	***A. hypochondriacus, A. cruentus, A. caudatus***

Las especies cultivadas para semilla comestibles se reducen a *Amaranthus hypochiondriacus, A. cruentus y A. caudatus* (García *et al*., 2010).

6.1.2. Descripción botánica de *Amaranthus hypochondriacus*

El amaranto es una planta herbácea anual de 1.5 a 2 m de altura, tallo ramificado desde la base y marcado con estrías longitudinales; hojas largamente pecioladas, ovaladas, de hasta 15 a 18 cm de largo, por 10 cm de ancho; inflorescencia en panículas terminales o axilares muy ramificadas de aproximadamente 50 cm de largo; flores en panículas terminales o axilares, rojas o púrpura de 4 a 5 mm, masculinas y femeninas. El fruto es una capsula pequeña que se abre transversalmente y contiene una sola semilla, lisa y brillante, ligeramente aplanada y del tamaño de un grano de mostaza (Sánchez, 1980).

6.1.3. Importancia del cultivo de amaranto

En la actualidad existe un interés creciente tanto en México como en diversos países del mundo, por encontrar cultivos que puedan constituir una alternativa de producción, tanto por su valor nutricional o industrial, como por la posibilidad de ampliar el horizonte agrícola de los campesinos y, el amaranto es un cultivo que puede reunir tales características (Alejandre y Gómez, 1986).

Sánchez (1980) y García *et al*., (2010) mencionan algunas de éstas características distintivas del amaranto:

a) Semilla.

- Es fuente de proteína vegetal.

- Supera a los cereales y aún algunas leguminosas en la calidad de su proteína, en el balance de aminoácidos, el valor de la eficiencia de la proteína y por tanto, en el valor nutricional.
- Son ricas en calcio, fósforo y magnesio y contienen aceptables cantidades de cobre y otros minerales. La proporción de vitaminas en la semilla es apreciable, contiene tiamina, rivoflamina, ácido ascórbico y niacina.
- Posee ácido oleico, ácido linoleico, además de palmítico y esteárico.
- El grano de amaranto es de una versatilidad alta, pues presenta una gran potencialidad agroindustrial para la elaboración de alimentos, cosméticos, colorantes, y hasta plásticos biodegradables.

b) Planta

- Las hojas pueden emplearse como verdura, con calidad nutritiva superiores a las espinacas, acelgas, lechuga y otras hortalizas.
- La planta entera puede destinarse a la obtención de forrajes para uso animal.
- Crece en un rango muy amplio de altitudes, desde el nivel del mar hasta los 3000 msnm.
- En condiciones ecológicas adecuadas, el rendimiento de grano y paja puede ser igual o mejor que el de los cereales básicos y otros, pero puede superar en rendimiento de proteína (ton ha^{-1}) en condiciones de 300-700 mm de precipitación anual y suelos de mediana y baja calidad.

- Su ciclo fotosintético es C4. Posee una alta plasticidad y un amplio rango de adaptación a diferentes tipos de clima y suelos, desde calcáreos hasta ácidos y con bajo contenido de materia orgánica.

- Su crecimiento normal ocurre en un intervalo de temperaturas entre los 14 y 34 °C, desarrollándose más rápidamente en temperaturas mayores a los 15 °C, las óptimas están entre los 18 y 24 °C en las cuales se obtienen los más altos rendimientos.

- Es tolerante a la sequía, y puede cultivarse en regiones semiáridas, requiere menos agua que el cultivo de maíz, con un promedio mínimo de 200 mm de lluvia al año.

6.1.4. Valor nutritivo y composición química del amaranto

La composición química de cada parte de la planta y en las diferentes especies de amaranto es distinta, por lo que es necesario delimitar la especie y la parte a las que se hace referencia (Sánchez, 1980).

En las siguientes secciones se divide cada parte morfológica de la planta de *Amaranthus hypochondriacus*.

6.1.4.1. Hojas

Son una fuente importante de vitaminas y minerales esenciales (calcio, fosforo y hierro) e incluso presentan mayores contenidos de nutrimentos que otras hortalizas de hoja como la acelga, col y espinaca (Cuadro 1).

Cuadro 1. Balance nutrimental de hojas de *Amaranthus hypochondriacus* en relación con otras hortalizas.

Determinación	*Amaranthus hypochondriacus*	Acelga	Col	Espinaca
Humedad (g)	86.9	91.1	87.5	90.7
Proteína (g)	3.5	2.4	4.2	3.2
Calcio (mg)	267	88	179	93
Fósforo (mg)	67	39	73	51
Hierro (mg)	3.9	3.2	2.2	3.1
Tiamina (mg)	0.08	0.06	-	0.10
Niacina (mg)	1.4	0.5	-	0.6
Rivoflavina (mg)	0.16	0.17	-	0.20
Vitamina C (mg)	80	32	125	51

Fuente: Sánchez, 1980; García *et al*., 2010.

Los productores aprovechan al amaranto desde el germinado de semillas, las hojas tiernas son utilizadas como verdura, o molidas para servirse en forma de sopa. La digestibilidad es muy alta, alcanzando entre el 80 y 92%; además la planta es utilizada como forraje para rumiantes (Barros y Buenrostro, 1997).

6.1.4.2. Tallo

Los tallos de algunas especies, de semilla oscura, son poco fibrosos y de gran digestibilidad. Normalmente contienen de 2.8 a 5.9% de proteína, 350 mg de calcio, 30 mg de fósforo y 2 mg de hierro, en 100 g de tallo. Estos datos señalan que los tallos poseen valor nutritivo importante (Sánchez, 1980). Además, con los tallos se elabora papel de textura artística (Hernández y Herrerías, 1998).

Sin embargo, después de la trilla el uso más común es el forraje para rumiantes, aunque también es utilizado para la elaboración de compost (Hernández y Herrerías, 1998). Por ello los tallos de amaranto son potenciales de ser utilizados como enmienda orgánica y/o complemento de compostas.

6.1.4.3. Semilla

Las principales características nutrimentales del amaranto (*Amaranthus hypochondriacus*) y otros cereales básicos se muestran en el Cuadro 2 (Sánchez, 1980; Alejandre y García, 1986; Barros y Buenrostro, 1996; García *et al*., 2010).

Cuadro 2. Composición química de la semilla de *Amaranthus hypochondriacus* y otros cereales básicos.

Propiedad química	Amaranto	Maíz	Arroz	Trigo
Proteína (g)	15.3	9.4	7.5	14 a 17
Grasa (g)	7.1	4.3	1.9	2.1
Carbohidratos	62.7	74.4	77.4	66.9
Humedad	9.4	10.6	12	12.5
Fibra (g)	2.9	1.8	0.9	2.6
Cenizas (g)	2.6	1.3	1.2	1.9
Energía (kcal)	391	361	360	390
	Minerales (mg %)			
Calcio	45.9	48.3	10	46
Fósforo	455	299.6	100	288
Hierro	11	4.8	0.5	3.19
	Vitaminas (mg %)			
Tiamina	0.26	0.43	0.34	0.38
Riboflavina	0.15	0.10	0.05	0.12
Niacina	1.15	1.9	4.7	5.46
Vitamina C	3.8	0	0	0

Fuente: Sánchez, 1980, García *et al*., 2010.

Diversos investigadores consideran que la estructura proteínica del amaranto está cerca al requerido por la nutrición humana, lo que la convierte en una excelente complementación alimenticia con otros cereales como el maíz, arroz y trigo.

Tiene proporciones discretas de tiamina, riboflavina, niacina y vitamina C. Asimismo, son muy ricas en minerales 45.9 mg de calcio, 455 mg de fósforo, 11 mg de hierro y otros. El contenido de fibra cruda, lípidos y cenizas, también es mayor en comparación a los cereales básicos (Cuadro 2).

El contenido de ácidos grasos en la semilla de amaranto es de 3.1 %, siendo los predominantes: el linoleico, oleico y el palmítico, los cuales son de buena calidad nutricional; el ácido linoleico es considerado esencial por ser insaturado.

Los carbohidratos en promedio ocupan el 60.7% de la semilla de amaranto, siendo el principal el almidón, el cual es fácilmente digerible. Además tiene una gran riqueza de aminoácidos esenciales, incluyendo un alto contenido de lisina y metionina. En el Cuadro 3 se muestra el balance de aminoácidos en la semilla de amaranto y otros alimentos básicos.

Cuadro 3. Balance de aminoácidos esenciales en diferentes alimentos.

Aminoácidos	Proteína ideal	Amaranto	Maíz	Trigo	Soya	Leche de vaca
	g/100g					
Treonina	11.1	11.4	10.8	8.9	9.8	9.4
Valina	13.9	10.6	14	13.5	12.2	12.3
Leucina	19.4	14.8	35.6	20.4	19.8	20.2
Isoleucina	11.1	10.2	12.2	10	11.6	10
Lisina	15.3	16.6	7.8	8.7	16.2	16.5
Metionina	9.7	11.2	5.2	12.3	6.6	7
Fenilalanina	16.7	23.1	12.7	22.9	20.6	21.5
Triptófano	2.8	2.1	1.7	3.3	3.3	3

Fuente: En: Sánchez, 1980, García *et al*., 2010.

6.1.6. Estados productores de amaranto en México

El cultivo de amaranto se realiza en reducidas regiones de México. Los estados de mayor tradición del cultivo son Morelos, Puebla, México, Tlaxcala y Oaxaca, pero también se conoce en Michoacán, Jalisco, Colima, Tamaulipas,

Sinaloa, San Luis Potosí, Nuevo León y Chihuahua (Sánchez-Marroquín, 1980, García *et al*., 2010).

Desde la década de los 80 se ha dado impulso a la producción del grano, mismo que se ha visto reflejado en el aumento de la superficie de hectáreas en cultivo, en 1983 era de 500 hectáreas y en 1997 paso a 817 (García *et al*., 2010).

Datos recientes del SIAP (2012) muestran que para el año 2012 se sembraron 3336 ha, con una producción de 4278 ton de semilla de amaranto. En el Cuadro 4 se muestra la producción de los principales estados productores de amaranto de México. Puebla es el estado que mayor cantidad de hectáreas siembra con 2228.30, Tlaxcala y Morelos ocupan el segundo y tercer lugar en superficie cosechada de amaranto con 428 y 240, respectivamente. Sin embargo, en el estado de México y Tlaxcala se tiene el mayor rendimiento de amaranto con 1.93 y 1.4 ton ha^{-1} respectivamente.

Cuadro 4. Principales estados productores de amaranto en México.

Estado	Sup. Sembrada (ha)	Sup. Cosechada (ha)	Producción (ton)	Rendimiento (ton/ha)	PMR ($/ton)	Valor Producción (Miles de Pesos)
D.F.	183	138	157.2	1.14	19,538.17	3,071.40
México	187.5	187.5	362.08	1.93	11,148.46	4,036.64
Morelos	240	240	336	1.4	15,000.00	5,040.00
Puebla	2,228.30	2,228.30	2,871.28	1.29	3,469.76	9,962.64
Tlaxcala	428	428	433.2	1.01	10,122.44	4,385.04
Totales	3,266.80	3,221.80	4,159.76	1.29	6,369.53	26,495.71

Fuente: SIAP, 2012.

6.2. Deterioro de la capacidad productiva del suelo

El deterioro de la capacidad productiva del suelo se entiende como la disminución acumulada de su potencial productivo, incluyendo sus usos (agricultura de temporal, suelo arable, agricultura de riego, pastizales, bosque), sus sistemas de cultivo y su valor como recurso económico (Stocking y Murnaghan, 2003).

En los últimos años las actividades agrícolas se han intensificado, provocando diferentes procesos de deterioro del recurso suelo, en sus propiedades físicas, químicas y biológicas, pérdida de su fertilidad y disminución de rendimientos (Gliessman, 2002; Sans *et al*., 2007).

6.2.1. Deterioro físico

Está ocasionado por mecanismos como la erosión hídrica y eólica y, la actividad antrópica en las diversas actividades llevadas en el manejo de los cultivos como; el uso excesivo de maquinaria agrícola que conlleva a la compactación del suelo, y a la vez provoca la pérdida de su estructura y la disminución de la porosidad y la permeabilidad (Gliessman, 2002; Stocking y Murnaghan, 2003).

6.2.2. Deterioro químico

El deterioro químico ocurre por la acumulación de sustancias tóxicas en el suelo, con el uso incorrecto de fertilizantes y otros agroquímicos utilizados en la agricultura; es decir; los cambios en el contenido de nutrimentos del suelo pueden conducir a deficiencias o a niveles tóxicos de elementos esenciales para el crecimiento sano de la planta (Gliessman, 2002; Stocking y Murnaghan, 2003).

6.2.3. Deterioro biológico

Es ocasionado por la pérdida de la biodiversidad y de las poblaciones de organismos del suelo, la disminución de la cubierta vegetal y la consecuente disminución de la materia orgánica, fuente alimenticia principal de la biota edáfica (Labrador y Bello, 2001; Stocking y Murnaghan, 2003).

Ésta pérdida afecta las estructuras físicas biogénicas, el mantenimiento de la fertilidad de los suelos, y la producción agrícola (Lavelle, 2000), haciendo que el suelo no tenga capacidades productivas sostenibles, debido a que los procesos de transformación de los materiales orgánicos y el reciclamiento de nutrimentos se llevan a cabo mediante las interacciones biológicas en el suelo, cuyas afectaciones provienen principalmente de prácticas antrópicas.

6.3. Agricultura sostenible

Gliessman (2002) y Altieri y Nicholls (2000) mencionan que para preservar la productividad y sostenibilidad de espacios productivos es necesario seguir ciertos principios y prácticas agroecológicas basadas en el conocimiento adecuado y profundo de los procesos ecológicos que suceden tanto en las áreas naturales como en las parcelas de producción. Para lograr la sostenibilidad agrícola, las prácticas agrícolas deben:

- Tener el mínimo efecto negativo en el ambiente.
- Estimular el reciclado de biomasa y optimizar la disponibilidad y el flujo balanceado de nutrimentos.
- Asegurar condiciones del suelo favorables para el crecimiento de las plantas, particularmente a través de la adición y manejo de la materia orgánica y aumentando la actividad biótica del suelo.
- Minimizar las pérdidas debidas a flujos de radiación solar, aire y agua mediante el manejo del microclima, cosecha de agua y el manejo de suelo. a través del aumento en la cobertura vegetal.
- Diversificar específica y genéticamente el agroecosistema en el tiempo y el espacio.
- Aumentar las interacciones biológicas y los sinergismos entre los componentes de la biodiversidad para promover procesos y servicios ecológicos claves.
- Entender y valorar los procesos y relaciones ecológicas como el ciclaje de nutrimentos, interacción predador-presa, competencia, simbiosis y los cambios sucesionales.

6.4. Mejoradores de la capacidad productiva del suelo

6.4.1. La materia orgánica

Según Labrador (1996), la materia orgánica es el componente de origen biológico que procede de alteraciones bioquímicas de los restos de animales, plantas y microorganismos y de compuestos precedentes del metabolismo vegetal y microbiano; puede encontrarse en el interior del suelo, localizada inter e intra

agregados y en la solución; y/o en la superficie del suelo y que presenta distintos estados de transformación derivados de la dinámica del medio vivo, de las interacciones con el medio mineral, de los factores ambientales, del tipo de suelo y de las prácticas de manejo.

El interés agronómico sobre la materia orgánica está basado en la conservación y mantenimiento de la productividad y funcionalidad de los suelos, en un sentido agroecológico, es decir, por una parte tiene la capacidad de aportar nutrimentos esenciales para la planta y por la otra tiene capacidad para mantener un nivel de producción alto y sostenible en el tiempo, sin perder por ello su diversidad biológica ni su complejidad estructural dentro de un equilibrio dinámico mediado por la interacción de múltiples procesos físicos, químicos y biológicos (Labrador, 1996; Labrador y Bello, 2001; Salazar *et al*., 2003).

6.4.2. Enmiendas orgánicas

Son todos aquellos residuos de origen animal y vegetal que se aplican al suelo con fines de cultivo (Salazar *et al*., 2003) y al descomponerse el suelo se enriquece con carbono orgánico, suministra nutrientes disponibles para las plantas y mejora sus propiedades físicas, químicas y biológicas (Labrador y Bello, 2001; Jaramillo, 2002; Trinidad-Santos, 2013).

Las enmiendas orgánicas más comúnmente utilizadas como fertilizantes orgánicos son: estiércoles, compost, vermicompost, abonos verdes, residuos orgánicos industriales y residuos de cosecha. En el cuadro 5 se muestran las características químicas de algunas enmiendas orgánicas.

Cuadro 5. Composición química de enmiendas orgánicas utilizadas en la producción agrícola.

Característica química	Enmienda orgánica			
	Vacuno	Gallinaza	Caprino	Paja de arroz
Humedad (%)	36	30	18	--
pH	8	7,6	7.5	7.2
MO	70	70	55	7.7
N. total (%)	1.5	3.7	2.5	0.5
P (%)	0.6	1.8	0.6	0.05
K (%)	2.5	1.9	2.2	1.38
Ca (%)	3.2	5.6	8.0	0.22
Mg (%)	0.8	0.7	0.2	0.11
Zn (ppm)	130	575	--	--
Mn (ppm)	264	500	--	--
Fe (ppm)	6353	1125	--	--
Relación C/N	16	15	18	9.49
Tasa de Mineralización (%/año)	35	90	32	--

Fuente: Trinidad-Santos, 1987, 2013.

6.4.3. Estiércol

El estiércol animal es la mezcla de deyecciones (sólidas y líquidas); básicamente está formado por materiales hidrocarbonados, compuestos nitrogenados y una gran población microbiana (Labrador *et al*, 1996).

En el Cuadro 5 se observa su composición química, sin embargo ésta puede ser heterogénea, considerando la naturaleza de la cama, la raza y edad del ganado; la alimentación y el manejo de las deyecciones definen la composición, cantidad y la calidad del estiércol (Trinidad-Santos, 2010).

Éste aporte orgánico se ha utilizado desde hace mucho tiempo para aumentar la fertilidad de los suelos y modificar sus características físicas, químicas y biológicas en beneficio del desarrollo de las plantas y los procesos microbiológicos del suelo, como se menciona en las líneas siguientes (Labrador, 1996; Trinidad-Santos, 2010).

Efectos físicos: mejora la estructura del suelo (porosidad, aireación y capacidad de retención de agua); aumenta la infiltración del agua lo que permite

reducir el escurrimiento superficial y evitar la erosión de los suelos; favorece la estabilidad de los agregados del suelo.

Efectos químicos: contiene altos porcentajes de materia orgánica, en el primer año se mineraliza al menos el 60% (Whalen y Sampedro, 2009) y se traduce en un aporte gradual de nutrimentos para las plantas, el efecto residual es mayor que el de los fertilizantes químicos, forma complejos orgánicos con los nutrimentos manteniendo a estos retenidos y disponibles para las plantas, incrementa la capacidad de intercambio catiónico del suelo, libera bióxido de carbono (CO_2) durante su descomposición para formar ácido carbónico (H_2CO_3) el cual solubiliza nutrimentos de otras fuentes, contiene gran cantidad de oligoelementos y sustancias fisiológicamente activas como hormonas, vitaminas, y antibióticos.

Efectos biológicos: los materiales orgánicos son fuente de energía para organismos edáficos detritívoros, que varian el tipo y tamaño de los organismos (macrofauna, mesofauna y microbiológicos) que intervienen a diferentes niveles de descomposición; esto les permite incrementar sus poblaciones e intensificar las redes tróficas, así como la actividad biológica general.

6.4.4. Compost

Es un proceso bioxidativo (fermentación aerobia) controlado, donde intervienen una gran diversidad de microorganismos, que requieren una humedad adecuada y sustratos orgánicos sólidos heterogéneos en composición y homogéneos en tamaño (residuos de cosecha, restos de podas, restos de limpias, estiércoles), dando como producto una mezcla de dióxido de carbono, agua, minerales y materia orgánica estabilizada, sustancias húmicas y bioactivadores de la fisiología vegetal. En un principio el compost se enriquece de organismos de macrofauna y mesofauna y en su estado intermedio y avanzado, rica en bacterias, hongos, actinomicetes y otros microorganismos benéficos para el hombre (Labrador, 1996, Labrador y Bello, 2001).

Al igual que el estiércol el uso de compost en la agricultura, ha sido empleado desde tiempos remotos como un medio para reutilizar los residuos orgánicos procedentes de la actividad agraria y de la doméstica (Labrador, 1996;

Labrador y Bello, 2001). Además actualmente, el uso de compost es indispensable para el sostenimiento de la agricultura orgánica, especialmente en especies de ciclo corto (Salazar, 2003).

De ésta forma el compostaje de materiales orgánicos trae consigo una serie de beneficios físicos, químicos y biológicos (Labrador, 1996; Labrador y Bello, 2001; Trinidad-Santos, 1987; Salazar, 2003) de efectos de corto plazo en el suelo que se traducen en los siguientes aspectos:

Físicos: estabilizan la estructura de los agregados del suelo, aumentan la capacidad de retención de agua; y mejoran la porosidad e infiltración del agua.

Químicos: mejoran el valor fertilizante orgánico y mineral manifestándose por su capacidad de intercambio catiónico superior a la de cualquier arcilla, suministran macronutrientes (N, P, K, Ca) a las plantas y hacen una importante aportación de oligoelementos (Fe, Mn, Zn, B, Cu). Además, por efecto de su oxidación lenta, producen gas carbónico, que contribuye a solubilizar algunos elementos minerales del suelo, facilitando su asimilación por las plantas.

Biológicos: la actividad biológica del suelo se ve favorecida por el aporte de un número importante de bacterias que se encuentran en el compost, pero es sobre todo su riqueza en materia orgánica lo que favorece el desarrollo de los microorganismos del suelo, que con su actividad estimulan el crecimiento vegetal (sintetizan enzimas, vitaminas y hormonas) especialmente para las raíces.

Mediante la actividad de microorganismos se favorece la solubilidad de componentes minerales insolubles, como los fosfatos, que son uno de los tres macroelementos necesarios para el desarrollo de las plantas; y el nitrógeno soluble, que puede desaparecer fácilmente por lixiviación, al ser absorbido es transformado en nitrógeno orgánico fijado en el cuerpo de los organismos, de forma tal, que cuando éstos mueren, queda de nuevo disponible para las plantas, también mediante reacciones de amonificación el nitrógeno puede ser retenido en el suelo; el amonio puede producir amoniaco por efecto de la temperatura y evaporación que se escapa hacia la atmosfera.

6.4.5. Residuos de cosecha

Los residuos de cosecha o rastrojos son la parte que queda de un cultivo luego de haberse extraído las partes aprovechables (Jiménez *et al*, 2010). Al igual que el compost y el estiércol, el uso de los residuos de cosecha como aportador de materia orgánica al suelo está ligado desde los inicios de la agricultura (Trinidad-Santos, 2013). En ésta práctica agrícola destacan dos funciones: la protección y la fertilización orgánica del suelo (Labrador y Bello, 2001).

Los residuos de cosecha depositados sobre el suelo protegen al terreno de la erosión eólica e hídrica y en consecuencia, de la pérdida de nutrimentos. Al descomponerse esta materia mediante los organismos del suelo estabilizan los agregados superficiales y al incorporarse mejoran la estructura del suelo. También su presencia determina una temperatura aceptable para la vida en el suelo, amortiguando los efectos de los cambios climáticos y de los extremosos, especialmente en ambientes semiáridos, tropicales y fríos (Labrador y Bello, 2001; Jaramillo, 2002).

Por otra parte, la aplicación de residuos de cosecha intervienen en la gestión del nitrógeno orgánico, por la descomposición del propio residuo, por permitir un mejor hábitat para los microorganismos diazotróficos fijadores del nitrógeno atmosférico o impidiendo su lixiviación en épocas de lluvia, por la disminución de la velocidad del movimiento del agua. Además de actuar indirectamente en la dinámica del fósforo, ya que al disminuir los fenómenos erosivos se reducen las pérdidas del mismo fijándose en la fracción coloidal, mejorando e incrementando la actividad microbiana de organismos relacionados con la optimización de su dinámica. (Labrador, 1996; Labrador y Bello, 2001).

Los residuos de cosecha también ejercen un papel importante en el control de malezas, por la misma cobertura sobre el suelo, con el que disminuye la cantidad de energía luminosa a las herbáceas. Además actúa sobre determinados fitopatógenos por el incremento de la diversidad biológica y de las poblaciones de organismos, activando la diversidad de relaciones intra e interespecíficas en el suelo, conformando microcadenas tróficas y estabilizando la relación entre

descomponedores, chupadores y depredadores (Trinidad-Santos, 2013; Jaramillo, 2002).

6.4.6. Respuesta de los cultivos al uso de enmiendas orgánicas

Las enmiendas orgánicas influyen sobre los parámetros que definen la fertilidad global de los suelos agrícolas (física, química y biológica) y por ende, sobre el óptimo desarrollo de la mayoría de los cultivos (Trinidad-Santos, 2013).

Las diferentes enmiendas orgánicas aportan nutrimentos que las plantas necesitan para su desarrollo de manera constante durante el desarrollo del cultivo por la mineralización gradual a que están sometidas (Trinidad-Santos, 1987, Labrador, 1996; Labrador y Bello, 2001; Trinidad-Santos, 2013). Ésta constancia permite que las plantas no sufran “hambre” nutrimental en ningún momento de su ciclo vital, lo que garantiza la obtención de rendimientos aceptables, convirtiendo la aplicación de enmiendas como la mejor opción para la sostenibilidad del recurso suelo (Trinidad-Santos, 2013).

6.5. La fauna edáfica y su importancia ecológica y agronómica

La fauna edáfica la forman organismos que pasan toda o una parte de su ciclo biológico sobre la superficie del suelo, sobre la hojarasca y bajo la superficie de la tierra, incluye organismos micro y macroscópicos (Brown *et al*., 2001).

Además de su rol ecológico en los sistemas naturales, los organismos del suelo tienen un papel relevante en la productividad de los agroecosistemas, debido a que tienen la capacidad de alterar el ambiente edáfico en el cual se desarrollan las plantas (Lavelle *et al*., 1997), ya que regulan la descomposición y el flujo de nutrimentos en el suelo haciéndolos disponibles; consolidan estructuras físicas biogénicas que ejercen un efecto regulador sobre los organismos menores a través de la competencia por los recursos (microcadenas tróficas); activan interacciones benéficas (mutualismo, simbiosis); influyen en el ciclo del carbono (Brown *et al*, 2001; Fragoso *et al*., 2001).

De esta forma se comprueba el segundo paradigma de la fertilidad del suelo, que reconoce que ésta puede obtenerse con el manejo de la biota edáfica (Fragoso *et al.*, 2001).

6.5.1. Clasificación de la biota edáfica

Swift *et al*., (1979) clasificaron a la biota edáfica según su tamaño (diámetro del cuerpo) en estado adulto como se muestra en la Figura 1.

6.5.1.1. Microfauna

Está compuesta por animales que miden menos de 0.2 mm. Incluye a protozoarios, rotíferos, nematodos y bacterias.

6.5.1.2. Mesofauna

Está formada por organismos cuyo tamaño oscila entre los 0.2 y 2 mm y forman parte de ella los microartrópodos: ácaros, colémbolos, proturos, dipluros, sínfilos y enquitreidos.

6.5.1.3. Macrofauna

Está compuesta por organismos de más de 2 mm de longitud, que se mueven activamente a través del suelo y pueden elaborar galerías en las cuales viven. Forman parte de este grupo los isópodos, quilópodos, diplópodos, arácnidos, gasterópodos, formícidos, isópteros, coleópteros y oligoquetos.

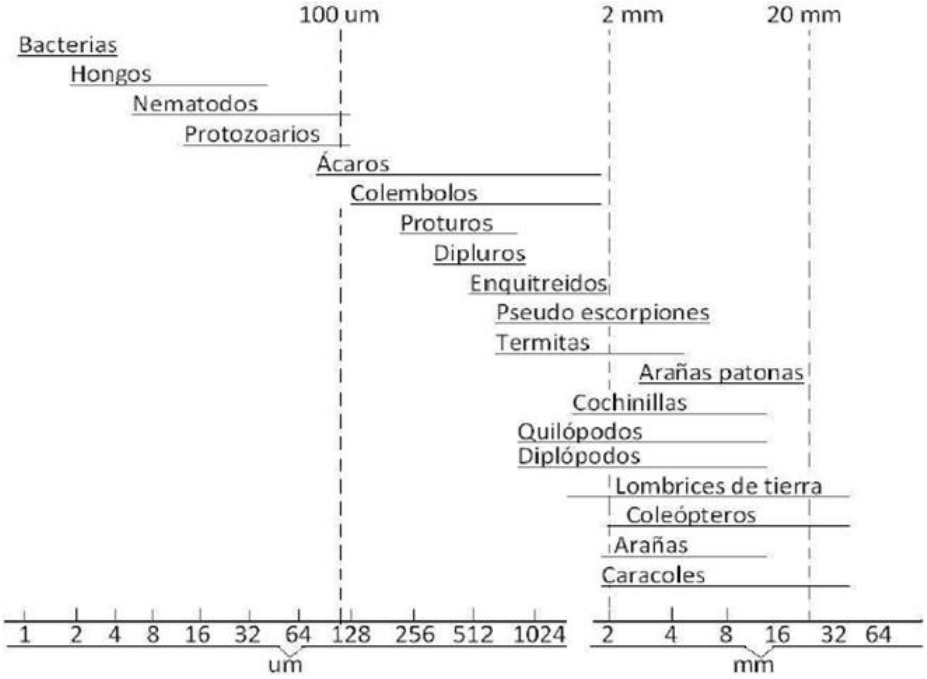


Figura 1. Clasificación de la fauna edáfica en función de su tamaño (modificado de Swift et al., 1979).

Los coleópteros sueles ser los más diversos, aunque en climas tropicales lluviosos los isópteros y los formícidos son los más abundantes y en biomasa, las lombrices de tierra (Lavelle *et al*., 1997). En los climas templados, los formícidos, coleópteros y lombrices, los más abundantes y en biomasa, las dominantes son las lombrices de tierra (Juárez *et al*., 2012).

La abundancia de toda la macrofauna puede alcanzar varios millones de individuos por hectárea y su biomasa varias ton ha^{-1}, la diversidad podría llegar a superar el millar de especies en ecosistemas complejos como la selva tropical (Brown *et al*., 2001).

6.6. Grupos funcionales

De acuerdo al rol que juegan los organismos en el sistema suelo, éstos se dividen en (Lavelle, 1997; Brown *et al*., 2001):

6.6.1. Geófagos

Organismos que ingieren suelo y se alimentan principalmente de la materia orgánica del suelo, a diferentes niveles de humificación y/o raíces muertas. Lombrices de tierra endogeas, termitas humívoras, larvas de coleóptero están incluidas en este grupo.

6.6.2. Detritívoros

Organismos descomponedores o desintegradores que se alimentan de material vegetal o animal en distintos grados de descomposición. Incluyen micro, meso y macroartrópodos: lombrices de tierra epigeas y anécicas, diplópodos, isópodos, isópteros, gasterópodos, larvas de díptero, larvas de coleóptero, ácaros, colémbolos.

6.6.3. Fitófagos y rizófagos

Organismos que se alimentan de plantas vivas (raíces y/o partes aéreas). Los hemípteros, melolontidos, micro y macroartrópodos están incluidos en este grupo.

6.6.4. Depredadores

Se alimentan de otros organismos, están incluidas varias familias de coleópteros, formícidos, quilópodos, arácnidos, pseudoescorpiones.

6.6.5. Omnívoros

Organismos que se alimentan de restos de origen tanto vegetal como animal.

6.6.6. Parásitos

Son organismos que dependen de otros organismos para sobrevivir, e incluyen algunas especies de dípteros, himenópteros y nematodos.

6.7. Manejo de la biota edáfica

6.7.1. Bioestimulación

Está definida como el manejo antropógeno consciente de los factores de regulación de las poblaciones de la biota edáfica en los agroecosistemas, que pueden influir positivamente en la estabilidad o en el incremento de las poblaciones de los organismos del suelo (Juárez *et al*., 2011).

En el Cuadro 6 se mencionan ejemplos de organismos edáficos potenciales de estimulación biológica mediante diferentes materiales estimulantes:

Cuadro 6. Grupos de organismos del suelo susceptibles de ser bioestimulados.

Material estimulante	Grupo funcional	Organismos del suelo
Materiales orgánicos	Detritívoros, Bioperturbadores	Isópodos, diplópodos, lombrices de tierra
Polisacáridos	Organismos simbióticos	Bacterias fijadoras de nitrógeno
Azúcares	Altos consumidores de energía	Hormigas
Materiales fibrosos		Bacterias celulíticas
Compuestos xenobióticos		Microorganismos desintegradores reorientados
Compuestos del petróleo		Bacterias y hongos especializados
Cultivo de leguminosas	Bacterias simbióticas nitrificantes	*Rizobium* *Azotobacter*
Cultivo de plantas perennes		Micorrizas
Materiales orgánicos residuales	Procesadores de MO recalcitrante	Actinomicetos
Hierro	Bacterias promotoras de crecimiento vegetal	Rizobacterias-Pseudomonas

Fuente: Juárez *et al*., 2011.

La estimulación biológica es susceptible en suelos donde el organismo se encuentra presente, sólo que por restricciones o factores de regulación biológica no alcanza a incrementar su población (materia orgánica, humedad, temperatura). Por lo tanto, las aplicaciones de materiales orgánicos pueden ser la actividad principal para estimular a organismos bioperturbadores responsables del reciclamiento de nutrimentos, con el que incrementan la fertilidad del suelo, y en consecuencia, de los rendimientos agrícolas (Juárez *et al*., 2011).

6.7.2. Bioaumentación

Es la aplicación directa de organismos y/o microorganismos con una actividad específica en el suelo (Juárez *et al*., 2011). Si en un sistema agrícola el organismo con la función específica requerida no se encuentra presente, se pueden realizar monitoreos en áreas circundantes menos perturbadas para aislar aquellos organismos que realicen funciones similares al que se requiere impactar, para reproducirlos en los medios adecuados y posteriormente inocularlos (Juárez *et al*., 2011). Se destacan grupos de organismos que han respondido positivamente a la inoculación: lombrices de tierra (Senapati *et al*., 2002); bacterias simbióticas o asociativas fijadoras de nitrógeno (Ferrera y Alarcón, 2001; Loredo-Osti *et al*., 2004).

En el Cuadro 7 se observan organismos que son potenciales inoculantes y sus efectos en el suelo:

Cuadro 7. Organismos potenciales de inoculación y sus efectos.

Biota edáfica	Efectos en el suelo
Lombrices de tierra	Infiltración del agua al suelo a través de sus galerías Redistribución de materiales orgánicos y Moos Enriquecimiento de nutrientes por defecaciones Producción de humus
Pseudomonas	Disponibilidad de fósforo por procesos de solubilización Protección vegetal
Bacterias celulolíticas	Descomposición de MO fibrosa
Rizobium, Azotobacter	Fijación de N atmosférico Incremento de la fertilidad nitrogenada Micorrizas Incremento del espacio rizosférico para la absorción de nutrimentos

Fuente: Juárez *et al*., 2011.

6.8. Estrategias para mejorar la calidad de enmiendas orgánicas

En el Cuadro 8 se muestra que los residuos de cosecha o rastrojos tienen una baja calidad nutritiva, ya que antes de caer las hojas, ocurre una migración de nutrimentos hacia otras partes de la planta y en la época reproductiva, pasan de las hojas y tallos hacia las flores y los frutos, quedando las estructuras vegetales con no más del 10% de la proteína total y con una alta proporción de carbohidratos estructurales lignificados que derivan en un bajo aporte de energía metabolizable (Florez, 1990).

Cuadro 8. Valores relativos de la composición media en NPK en materia seca de residuos de cosecha.

Material	C/N	N	P	K
Trigo	105	0.49	0.11	1.06
Arroz	105	0.58	0.10	1.38
Maíz	55	0.59	0.31	1.31
Algodón		0.88	0.15	1.45
Papa	27	1.60		
Lechuga		3.70		
Cebolla	15	2.60		
Jitomate	12	2.10	0.30	0.20

Fuente: Martínez y Leyva, 2014.

No obstante, es en la época seca en donde hay alta disponibilidad de residuos de cosecha y para su uso como mejoradores de las características de los suelos, puede hacerse como se obtienen del campo, en su forma natural. Sin embargo, en una agricultura de mayor intensificación, en donde se requiere que los materiales orgánicos a incorporar al suelo tengan mayores niveles de calidad nutricional se pueden aplicar otros métodos: el compostaje, el lombricompostaje, la amonificación, etc.

El compostaje es una descomposición de los materiales orgánicos, que más que un enriquecimiento, el producto final descompuesto corresponde al 45% aproximadamente de su volumen inicial, por lo que en varios casos se considera un producto final más rico en nutrimentos.

En el proceso de lombricompostaje, parte de los contenidos nutricionales de los materiales orgánicos ingeridos y fijados en el cuerpo de la lombriz de tierra, deyectando un estiércol de lombriz rico en flora microbiana que contribuye en una diversidad de sustancias y materiales nutrimentales de fácil disposición para las plantas. El producto final deyectado por las lombrices también corresponde a un 40-45% del volumen inicial ingerido (Juárez *et al*., 2011).

Pero el enriquecimiento de materiales orgánicos, puede hacerse mediante adiciones químicas de dosis controladas de elementos esenciales, utilizando fuentes nutricionales con contenidos indeseables negligibles y con oportunidades de elaborar compuestos orgánicos de mayor valor nutricional (Jiménez *et al*., 2010), por ejemplo, semejantes a los estiércoles de contenidos más ricos como los de aves.

El proceso técnico podría ser similar al proceso de Amonificación propuesto por Conrad y Pastrana (1990), que aumenta los contenidos nutrimentales de materiales sólidos destinados a la alimentación de rumiantes. Originalmente este proceso consiste en:

1. Aplicar urea a razón del 4 a 5% de la cantidad de materia seca del rastrojo. Una tonelada de rastrojo seco requiere de 40 a 50 kg de urea.
2. El contenido de humedad del rastrojo tratado debe ser elevado a 30%, para ello 50 kg de urea a aplicar se disuelven en 200 litros de agua (Conrad y Pastrana, 1990).
3. El rastrojo se debe acomodar en capas y compactado.
4. La urea disuelta en agua se debe agregar a las capas de rastrojo para para que este se humedezca en forma completa y uniforme.
5. El rastrojo se debe apilar tratada en tal forma que se pueda tapar herméticamente con un plástico.
6. Para lograr una buena amonificación en el proceso de ensilaje, se recomiendan temperaturas por encima de 20 °C, y un periodo de una a tres semanas.

Este proceso de enriquecimiento presenta los siguientes beneficios (Conrad y Pastrana, 1990; Barrios *et al*., 2002; Barrios y Ventura, 2005; Jiménez *et al*., 2010):

- Mejora la calidad nutritiva de los rastrojos, incrementando el contenido de proteína de los materiales tratados.
- Mejora la digestibilidad de los forrajes tratados y por tanto aumenta el consumo.
- El tratamiento es práctico, de fácil aplicación en la finca de pequeños y medianos productores.
- No tiene efectos negativos en el ambiente.

6.9. Estudios previos

La comunidad científica ha reportado tecnologías que permiten mejorar el valor nutritivo de diferentes materiales orgánicos, una de estas tecnologías es la amonificación, la cual aumenta el contenido nutrimental de rastrojos para la alimentación de rumiantes, en especial de nitrógeno (Conrad y Pastrana, 1990). Sin embargo, no existen ensayos realizados sobre el enriquecimiento de materiales orgánicos sólidos para ser utilizados como aportes nutrimentales orgánicos a los cultivos que a la vez funcione como reserva energética a los organismos del suelo.

No obstante, existen reportes científicos amplios sobre la metodología de enriquecimiento de materiales orgánicos sólidos, de los cuales se pone énfasis en las dosis.

Conrad y Pastrana (1990) mencionan la importancia de la amonificación de materiales fibrosos utilizando urea como fuente de nitrógeno que es una forma recomendada para reforzar el valor nutritivo de los residuos de cosecha y otros piensos fibrosos, detallando el uso de la urea en el proceso de ensilaje húmedo. La aplicación de esta tecnología tiene muchas ventajas en comparación con la utilización de otros tratamientos químicos utilizados en países desarrollados, como el amoniaco anhidro, que es mucho más difícil y peligroso de usar.

Jiménez *et al*. (2010) evaluaron el efecto del tamaño de partícula y tipo de amonificación-conservación sobre la digestibilidad y consumo de rastrojos de maíz

en ovinos. Se usaron partículas del rastrojo de maíz de 1, 2, 3 y 4 cm. No se encontraron diferencias en la capacidad de absorción del nutrimento aportado pero sí hubo respuesta positiva en el mejoramiento de la digestibilidad de proteína y fibra.

7. MÉTODOS

7.1. Sitio de estudio

La investigación se realizó entre marzo y agosto de 2014, en una parcela ubicada en el Museo del Agua, perteneciente al grupo de productores de amaranto orgánico Alternativas y Procesos de Participación Social A.C. Cuyas coordenadas geográficas son 18°18’57” N y 97° 21’34”O a 1256 msnm en el municipio de San Gabriel Chilac, Puebla, México (Figura 2). El clima es semiárido con lluvias en verano (BS_0 (h') w (w)), con una temperatura promedio de 22°C y una precipitación de 450 mm (INEGI, 2015).

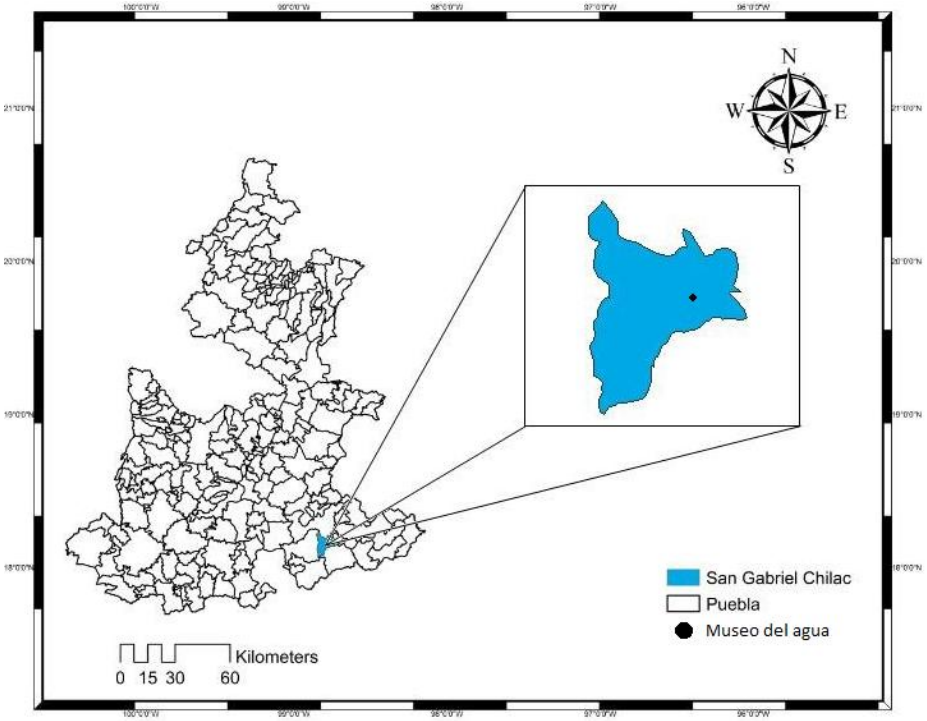


Figura 2. Museo del Agua, San Gabriel Chilac, Puebla, México.

7.2. Edafología

El tipo de suelos predominante en San Gabriel Chilac, son los Leptosol (del griego *leptos* que significa delgado), que se caracterizan por ser suelos delgados, pedregosos y poco desarrollados, pueden contener una gran cantidad de material calcáreo. Éste tipo de suelos son de amplia distribución a nivel mundial, regularmente están asociados a sitios de compleja orografía, lo que explica su amplia distribución en México.

Se encuentran en todos los tipos climáticos (secos, templados, húmedos), y son particularmente comunes en las zonas montañosas y en regiones altamente erosionadas. Su potencial agrícola está limitado por su poca profundidad y alta pedregosidad. Aunado a ello, el calcio que contienen puede inmovilizar los nutrientes minerales, por lo que es recomendable utilizar técnicas agrícolas apropiadas para estas condiciones.

La parcela experimental (688 m^2) se estableció sobre un suelo leptosol (IUSS-WRB, 2007) donde se construyó una terraza rellenada con suelo aluvial. Las características físicas y químicas de la parcela experimental se muestran en el Cuadro 9).

Cuadro 9. Análisis de las características físicas y químicas de la parcela experimental.

Propiedad	Unidad	Método	Valor	Interpretación
Ph		Potenciométrico	8.3	Ligeramente alcalino
MO	%	Walkley y Black	3.73	Alta
N. Total	%	Micro Kjeldahl	0.24	Alto
P	mg kg^{-1}	Olsen	199.3	Alto
K	cmol kg^{-1}	Flamometría	6.23	Muy alto
Ca**	cmol kg^{-1}	EDTA	31.1	Muy alto
CIC	cmol kg^{-1}	Acetato de amonio	19.4	Medio
CE	dS m^{-1}	Conductímétrico	14.4	Fuertemente salino
DA	g/cm^3	Terrón parafinado	1.09	Franco
Arena	%	Bouyoucos	41.5	
Limo			39.6	Franco
Arcilla			18.9	

**CIC= capacidad de intercambio catiónico; CE= conductividad eléctrica; MO= materia orgánica; DA= densidad aparente.

Según las especificaciones sobre fertilidad del suelo de la NOM-021-SEMARNAT (2000), este suelo presenta un pH medianamente alcalino, mantiene una alta cantidad de materia orgánica, los macronutrientes (N, P, K, Ca) están presentes en altas cantidades especialmente las bases intercambiables (Ca y K), mismo que se ve reflejado en la conductividad eléctrica que indica que el suelo es fuertemente salino, la capacidad de intercambio catiónico se mantiene en un nivel medio, en cuanto a la proporción de arena, limo y arcilla hay una distribución

proporcional que da como resultado una textura franca, misma que coincide con los valores de densidad aparente.

7.3. Diseño experimental

El estudio se estableció bajo un diseño experimental completamente al azar donde se evaluaron cuatro enmiendas orgánicas: dos tipos de residuos de cosecha, composta y estiércol de cabra en su forma natural y enriquecida. Además se inocularon bacterias nitrificantes y solubilizadoras de fósforo. Los controles usados fueron unidades experimentales sin enmiendas, pero con y sin aplicación de roca fosfórica (Cuadro 10). A todos los tratamientos se les agregó 2 gramos de roca fosfórica, excepto el control sin roca. Cada tratamiento tuvo 6 repeticiones, con lo que se obtuvieron 18 tratamientos y 108 unidades experimentales (UE). En cada UE (1.5 x 2.4 m) se establecieron 8 matas (dos plantas de amaranto por mata) simulando una densidad de siembra utilizada tradicionalmente por los productores (80 x 50 cm) de 35000 plantas por hectárea.

Cuadro 10. Factores de variación, niveles y tratamientos.

F1. Enmiendas orgánicas	F2. Condición nutrimental	F3. Inoculación con BFN y BSP	Tratamientos
RM	Natural	Sin BFN y BSP	RMNS
RA			RANS
C			CNS
E			ENS
RM		Con BFN y BSP	RMNI
RA			RANI
C			CNI
E			ENI
RM	Enriquecida	Sin BFN y BSP	RMES
RA			RAES
C			CES
E			EES
RM		Con BFN y BSP	RMEI
RA			RAEI
C			CEI
E			EEI
TRF	Control		TRF
TSRF			TSFF

**RM= residuos de cosecha de maíz; RA= residuos de cosecha de amaranto; C= compost; E= estiércol; TRF= control con roca fosfórica; TSRF= control sin roca fosfórica; BFN= bacterias fijadoras de nitrógeno; BSP= bacterias solubilizadoras de fósforo.

7.4. Caracterización de los materiales orgánicos

Los cuatro tipos de materiales orgánicos utilizados en el experimento están disponibles para los productores de la región; su caracterización física y química se puede observar en el Cuadro 11.

Cuadro 11. Caracterización física y química de las enmiendas orgánicas aplicadas en el experimento.

Enmienda orgánica	Origen	Contenidos			Relación C/N
		N	P	K	
			%		
Rastrojo de maíz	De maíz criollo picado, de tres meses después de haberse cosechado.	0.7	0.17	1.9	60:1
Rastrojo de amaranto	De cultivos de amaranto orgánico, de dos meses de haber sido trillado.	0.7	0.17	1.9	80:1
Composta	Mezcla de estiércol de ganado caprino, hojarasca de *Ficus sp,* rastrojo de amaranto y desechos de cocina. De 4 meses.	1.8	0.8	1.2	15:1
Estiércol	De ganado caprino, acumulado en el trascurso del año.	2	0.8	2	18:1

Fuente: Trinidad S.A., 1987, Jaramillo, 2002.

7.5. Homogenización y enriquecimiento de enmiendas orgánicas

Se tomó como base el contenido de 1.8% de N total del compost, se homogeneizó con las demás enmiendas orgánicas aplicadas, por lo que se procedió a conjuntar 300 Kg de residuos de cosecha de maíz, 300 Kg de residuos de cosecha de amaranto, 117 Kg de compost y 105 Kg de estiércol de ganado caprino. De cada una de éstas enmiendas se tomó la tercera parte (100 Kg) para integrarlas a un proceso de enriquecimiento de contenidos nutrimentales, aplicando una fórmula de fertilizante de 66-58-34 (N-P-K) de los fertilizantes

fosfonitrato y fosfato monopotásico, bajo el proceso de la amonificación de forrajes, el cual consistió en:

1. Aplicar fosfonitrato y fosfato monopotásico, en proporción 2:1 respectivamente.
2. La mezcla de fertilizantes se solubilizó en agua, para aplicarla como solución nutritiva a una relación del 5% respecto al peso total de los materiales orgánicos para tratar de alcanzar una humedad del 30% en la enmienda.
3. La aplicación se hizo mojando la enmienda por capas, a fin de lograr un humedecimiento uniforme.
4. Cada enmienda enriquecida fue cubierta con un plástico negro, para fermentar durante 28 días.

Tomando como base la dosis de aplicación de 18 ton ha^{-1} de composta que hacen los productores de amaranto orgánico y el contenido de N de la misma composta, se hicieron las estimaciones para determinar la dosis de cada una de las otras enmiendas a aplicar, a fin de conformar dosis equivalentes y homogéneas en contenidos de Nitrógeno. En el cuadro 12 se muestran las dosis aplicadas de las enmiendas orgánicas.

Cuadro 12. Dosis aplicadas de las enmiendas orgánicas, tanto naturales como enriquecidas (con el 5% de nutrientes de fertilizantes solubles por tonelada de enmienda).

Enmienda orgánica	Natural ton ha^{-1}	Enriquecida ton ha^{-1}
Residuos de cosecha de maíz	46	23
Residuos de cosecha de amaranto	46	23
Compost	18	9
Estiércol caprino	16	8

La enmienda en su forma natural (EON) se aplicó a cada mata a una dosis de 2.08 kg de residuos de maíz (RMN) y amaranto (RAN), 0.81 kg de compost (CN) y 0.73 kg de estiércol (EN). Los tratamientos con enmiendas enriquecidas (EOE) se aplicaron al 50% de las dosis de las enmiendas naturales; esta decisión fue tomada considerando la posibilidad de disminuir la cantidad de enmiendas a

aplicar, por cuanto éstas tendrían contenidos más elevados de nutrimentos, buscando obtener los mismos rendimientos que las enmiendas naturales y no afectar a la biota del suelo con exceso de nutrimentos.

7.6. Inoculación de microorganismos edáficos

Se inocularon bacterias fijadoras de nitrógeno (BFN) y bacterias solubilizadoras de fósforo (BSP) en el sistema radical de las plantas de amaranto. Se siguió la experiencia del Centro de Investigaciones en Ciencias Microbiológicas, del Instituto de Ciencias de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla que consistió en mezclar los biofertilizantes líquidos en agua potable, e inmediatamente se aplicó a cada planta 20 ml de la mezcla inoculante directamente en el sistema radical de las plantas de amaranto.

7.7. Labores agrícolas en el manejo del amaranto

Se realizaron las actividades agrícolas que utilizan los productores para el cultivo de amaranto desde la siembra hasta la cosecha apoyadas con personal del Museo del agua. Éstas consistieron en un barbecho previo al establecimiento del experimento, el trasplante de plantas de 20 días de edad germinadas en bolsas para vivero de 0.25 kg realizándose después de haber preparado cada unidad experimental con su respectivo tratamiento. Desde el trasplante se acondicionó un sistema de riego por goteo, misma que humedecía el suelo cada tercer día.

Las labores de deshierbe se realizaron dos veces durante el ciclo y el control preventivo de plagas mediante la aplicación mensual de insecticida biológico (Spinosad) para el control de la larva cristalina (*Herpetogramma bipunctalis*) y la hormiga arriera (*Atta mexicana*).

7.8. Muestreos

7.8.1. Físicos

En el laboratorio se determinó la textura del suelo del sitio de estudio mediante la técnica de Bouyoucos y la densidad aparente (DA) por el terrón parafinado.

7.8.2. Químicos

En el laboratorio de suelos del Centro de edafología del Colegio de Postgraduados, siguiendo la Norma Oficial Mexicana (NOM-021-RECNAT-2000), se determinaron los macronutrimentos N, P, K y Ca, la capacidad de intercambio catiónico (CIC), la conductividad eléctrica (CE), e pH, y la materia orgánica (MO), de una muestra compuesta del suelo de la parcela experimental como de las enmiendas orgánicas naturales y de las enriquecidas.

7.8.3. Biológicos

7.8.3.1. Macrofauna

El muestreo de la macrofauna se realizó al final del experimento, entre las matas centrales, sobre uno de los surcos de plantas de amaranto de cada tratamiento, aplicando el método TSBF (Anderson e Ingram, 1993) que consiste en la construcción de un monolito de 25 x 25 x 30 cm, en cada una de las réplicas de los tratamientos. Los organismos se extrajeron manualmente y se fijaron en frascos de plástico con solución de etanol al 85% y las larvas de coleópteros de la familia Melolonthidae se fijaron en solución pampel.

Todo el material biológico fue procesado en el laboratorio de biología de suelos del Centro de Agroecología (CENAGRO), del Instituto de Ciencias de la BUAP. La macrofauna se separó, contabilizó y pesó por unidades taxonómicas (TU), siguiendo la clasificación de Borror (1970) y Brusca y Brusca (2002).

7.8.3.2. Mesofauna

Con base en el método señalado por Rodríguez (1998), se estimó la densidad de mesofauna (ácaros y colémbolos) que consistió en tomar, junto al monolito de macrofauna, una muestra de suelo (5 x 5 x 15 cm) depositándola en bolsas de polietileno y trasladadas a laboratorio, en donde se colocaron las muestras en embudos de Berlese-Tullgren para recolectar la mesofauna. Los organismos se fijaron en solución de etanol al 85%.

7.8.4. Plantas de *Amaranthus hypochondriacus*

A partir del trasplante en la parcela experimental, a intervalos de 20 a 30 días hasta el final de la antesis, se estimaron la altura total de la planta, de la base

a la parte apical y el diámetro de tallo a 10 cm por encima del nivel suelo de 6 plantas centrales (parcela útil) evitando el efecto orilla, para estimar el desarrollo del amaranto.

El rendimiento de grano se obtuvo manualmente de las mismas plantas monitoreadas en su desarrollo. El grano se pesó en una balanza de precisión digital.

7.9 VARIABLES

Se determinaron las siguientes variables físicas, químicas y biológicas en: Suelo:

1. Físicas: Textura y Densidad Aparente.
2. Químicas: MO, pH, N, P, K, Ca, CIC y CE.
3. Biológicas: Densidad, biomasa y diversidad de macrofauna y densidad de mesofauna (ácaros y colémbolos).

Planta:

Altura total, diámetro de tallo y rendimiento de amaranto.

7.10 ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

Los datos fueron analizados mediante análisis de varianza (ANOVA) factoriales (Zar, 2009), previa prueba de homogeneidad de varianzas de cada variable. El ANOVA permitió detectar diferencias entre los efectos de los tratamientos (nivel nutricional, tipo de enmienda e inoculación) sobre el crecimiento, desarrollo y producción de las plantas de amaranto y sobre la biota edáfica macro y mesofauna; las pruebas de Tukey ($p \leq 0.05$) identificaron tratamientos con mejor respuesta. Para detectar la diversidad de organismos de macrofauna por tratamientos se analizaron los valores del índice de diversidad de Shannon-Wiener.

8. RESULTADOS

8.1. Capacidad de retención de nutrientes de las enmiendas orgánicas.

En el cuadro 13 se observa que las condiciones nutrimentales de las enmiendas enriquecidas, después de los 28 días de incubación, presentaron mayores valores de macronutrimentos (N, P, K, Ca) respecto a las enmiendas naturales. El nitrógeno y potasio fueron fijados en casi el doble, mientras que el fósforo aumento hasta 16 veces en los residuos de maíz enriquecido (RME), 21 veces en los residuos de amaranto enriquecido (RAE), el triple en el compost enriquecido (CE) y casi el doble en el estiércol caprino enriquecido(EE).

Respecto a la CIC y CE, también existieron importantes incrementos, especialmente en las enmiendas orgánicas con menor nivel de descomposición (RME y RAE) y en la composta; en el estiércol hubo un decremento de la CIC. El pH presentó una tendencia a la neutralización en todos los materiales. Solamente el Calcio no tuvo cambios notorios (Cuadro 13).

Cuadro 13. Análisis químico de las enmiendas orgánicas naturales y enriquecidas.

EO	Condición de la EO	pH	MO %	N %	P mg kg^{-1}	K cmol kg^{-1}	Ca cmol kg^{-1}	CIC meq/100g	CE dS m^{-1}
RM	Natural	4.8	92.8	X	389.6	7.48	3.01	24.0	2.83
RA		6.25	86.7	1.75	83.5	20.4	3.76	53.4	5.48
C		7.87	43.4	1.48	475.6	23.7	20.8	44.4	10.9
E		8.38	65.3	1.83	1382	66.5	14.8	43.6	22.4
RM	Enriquecida	6.69	84.0	3.14	6302.6	13.7	2.26	33.5	10.0
RA		7.78	82.4	2.51	1776.1	29.1	2.01	72.2	10.6
C		7.14	41.0	2.35	1776.1	49.9	20.6	59.8	38.8
E		8.19	65.1	2.44	2662.8	74.9	6.02	21.0	37.0

**EO= enmienda orgánica, RM= residuos de cosecha de maíz, RA= residuos de cosecha de amaranto C= composta, E= estiércol.

8.2. Macrofauna

8.2.1. Densidad

La densidad de unidades taxonómicas (UT) de macrofauna (individuos m^{-2}) así como la biomasa (g m^{-2}) y la diversidad de individuos (H') se resumen en el Cuadro 14.

Cuadro 14. Efecto de las enmiendas naturales y enriquecidas en los descriptores comunitarios de un suelo leptosol para la producción orgánica de amaranto.

Descriptores Comunitarios	Enmiendas orgánicas (EO)								Control
	Naturales (N)				Enriquecidas (E)				
	RM	RA	C	E	RM	RA	C	E	T
Número de UT	12	8	11	10	10	7	8	8	9
Densidad (ind m^{-2}) ***	1632	1432	1312	2408	776	304	720	1400	646
Biomasa (g m^{-2})	49.06	12.35	2.94	2.41	7.71	11.04	15.34	8.66	4.42
Shannon-Wiener H'	2.55	2.16	2.08	2.39	2.73	2.14	2.58	2.66	2.51

UT= Unidad taxonómica, ind= individuos * indican diferencias significativas.

Se encontraron 17 UT, las enmiendas orgánicas naturales (EON) presentaron la mayor cantidad específicamente en el RMN y la CN con 12 y 11 UT respectivamente. Las enmiendas orgánicas enriquecidas (EOE) presentaron la menor cantidad de UT incluso menores que las encontradas en el control con 7, 8, 8 y 9 UT respectivamente (Cuadro 14).

Respecto a la densidad de organismos, la mayoría tuvo una preferencia por las enmiendas naturales. El EN se presentó el valor más alto con 2408 individuos m^{-2}y las UT más abundantes fueron los formícidos y larvas de formícidos con el 45 y 33% respectivamente, en el RMN se registraron 1632 individuos m^{-2} los isópteros y dermápteros ocuparon el 25 y 24% respectivamente (Figura 3).

En las enmiendas enriquecidas se observó una tendencia inversa puesto que en el RAE se registró la menor densidad con 304 individuos m^{-2} los formícidos y coleópteros presentaron los valores mayores con 21 y 18% respectivamente. En el caso del EE se encontraron valores equiparables al obtenido en las EON con 1 400 individuos m^{-2} siendo los isópodos y las larvas de coleópteros los que tuvieron el 20 y 19% respectivamente (Figura 3).

En el control se encontraron 646 individuos m^{-2} los formícidos y dermápteros representaron el 19% cada uno (Figura 3).

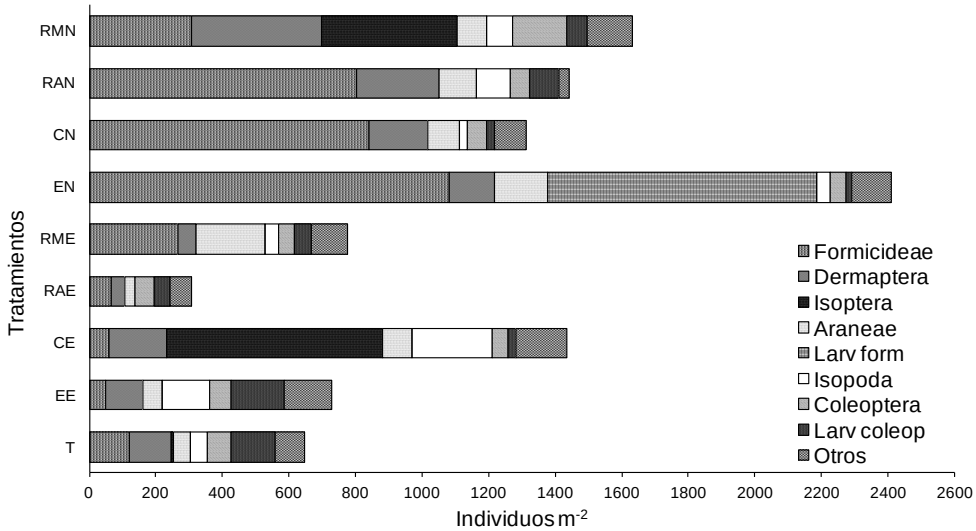


Figura 3. Efecto de las enmiendas naturales y enmiendas enriquecidas en la abundancia de las unidades taxonómicas en un suelo leptosol, para la producción orgánica de amaranto.

En la figura 4 se muestra la comparación de la densidad de organismos en las enmiendas orgánicas naturales, enriquecidas y control en donde se pueden observar diferencias significativas con F calculada (F 2, 21= 4.07, p= 0.037), siendo mayoritaria la biota edáfica en las EON con una densidad promedio de 1702 individuos m^{-2} en comparación con la obtenida en las EOE y la del control con 810 y 646 individuos m^{-2} respectivamente.

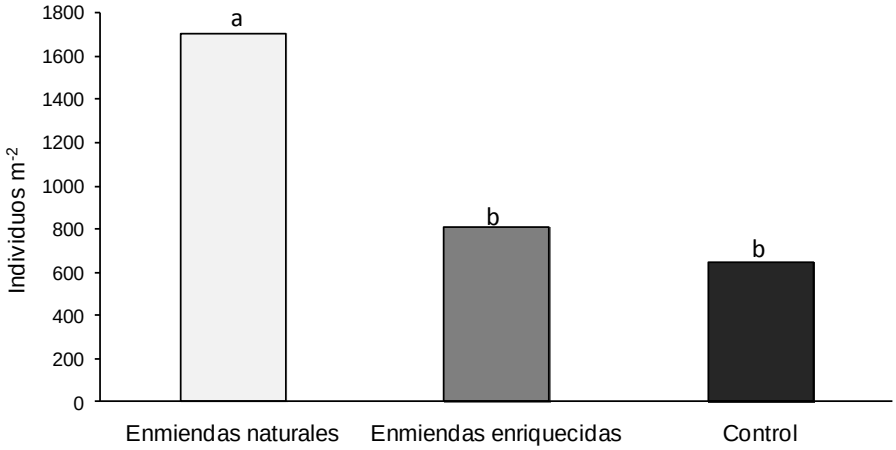


Figura 4. Efecto de las enmiendas naturales y enmiendas enriquecidas en la abundancia de organismo de macrofauna en un suelo leptosol; para la producción

orgánica de amaranto. Letras diferentes indican diferencias significativas (Tukey $p < 0.05$, n= 22).

En la Figura 5 se muestra la proporción de grupos funcionales en cada tratamiento. Los detritívoros son mayoritarios en RMN, CE, EE, C, RAE. En el RME los depredadores fueron los más abundantes y los fitófagos en CN, RAN y EN.

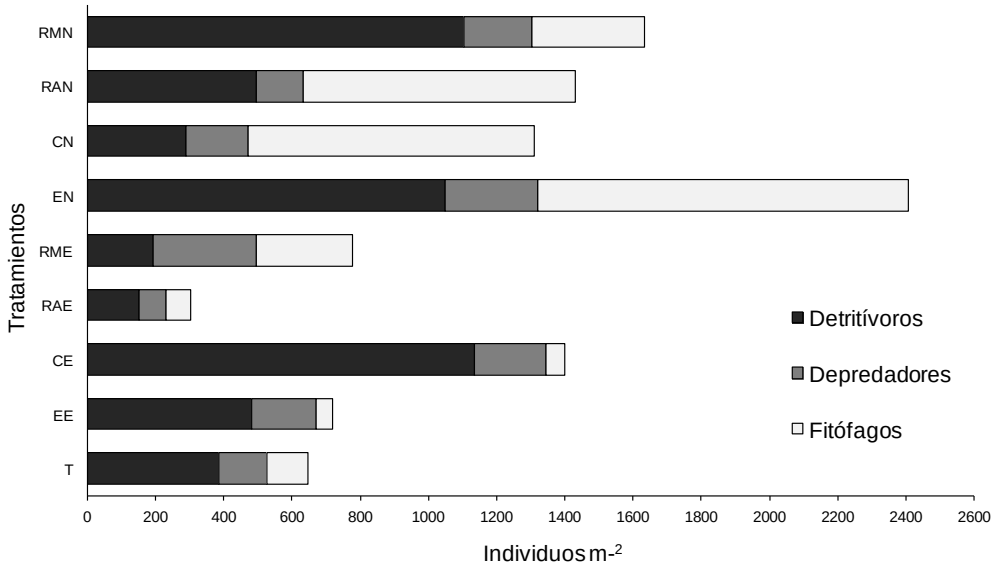


Figura 5. Efecto de las enmiendas naturales y enmiendas enriquecidas en la abundancia de los grupos funcionales en un suelo leptosol; para la producción orgánica de amaranto.

8.2.2. Biomasa

En biomasa, el valor más alto lo presentó el RMN con 49.06 g m^{-2}, las larvas de coleóptero representaron el 84%. La biomasa más baja estuvo en la CN y EN con 2.94 y 2.41 g m^{-2} respectivamente (Cuadro 14).

En las enmiendas enriquecidas se observaron valores de biomasa equilibrados entre 7.71 y 15.34 g m^{-2}. El control presentó una biomasa de 4.42 g m^{-2} (Cuadro 14). Sin embargo no se encontraron diferencias significativas en la comparación de las biomasas de las enmiendas naturales, enriquecidas y el control ($F_{2, 21}= 0.77$, $p = 0.47$).

8.2.3. Biodiversidad

El índice de diversidad de Shannon-Wiener indicó que el mayor valor lo presentaron el RME y EE con valores de H'= 2.73 y 2.66 respectivamente (Cuadro 14). No obstante no se presentaron diferencias significativas al compararlos con la diversidad de las EON y el control ($F_{2,21}= 1.74$, $p < 0.20$).

8.3. Mesofauna

8.3.1. Densidad

La densidad de ácaros en las diferentes enmiendas tuvo diferencias significativas ($F_{8, 45}= 3.43$, $p= 0.004$). En el RAN se encontró la mayor densidad (90467 individuos m^{-2}). Caso contrario a CE, EN, EE y C que presentaron la menor cantidad de ácaros con 10400, 6800, 5400, 4667 individuos m^{-2} respectivamente (Figura 6). Sin embargo, no hubo diferencia estadística entre la densidad conjunta de ácaros de las enmiendas naturales y las enriquecidas ($F_{1, 53}= 1.92$, $p= 0.17$).

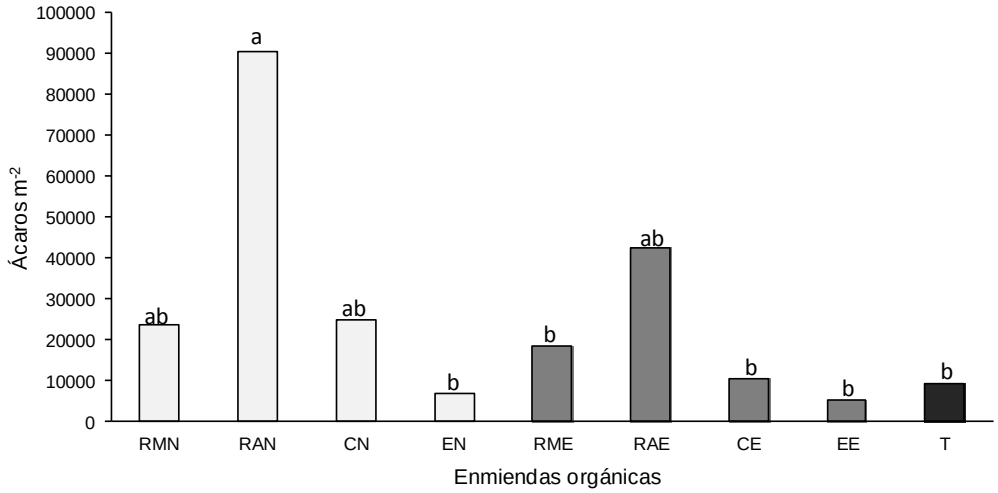


Figura 6. Efecto de las enmiendas naturales y enmiendas enriquecidas en la abundancia de ácaros en un suelo leptosol; para la producción orgánica de amaranto. Letras diferentes indican diferencias significativas (Tukey $p < 0.05$, n= 54).

En la figura 7 se muestran la diferencias significativas de la densidad de colémbolos entre las enmiendas naturales y enriquecidas ($F_{8, 45}= 3.07$, $p= 0.003$), las comparaciones de medias indicó que RAN y RMN presentaron mayor abundancia de colémbolos con 5824 y 4707 individuos m^{-2} respectivamente. Los

tratamientos que presentaron las menores densidades fueron CN, EN, CE, EE y el control con 216, 235, 264, 104, 144 individuos m^{-2} respectivamente. No hubo diferencias significativas entre la abundancia de colémbolos de las enmiendas orgánicas naturales y enriquecidas en conjunto (F 1, 53= 2.59, p= 0.11).

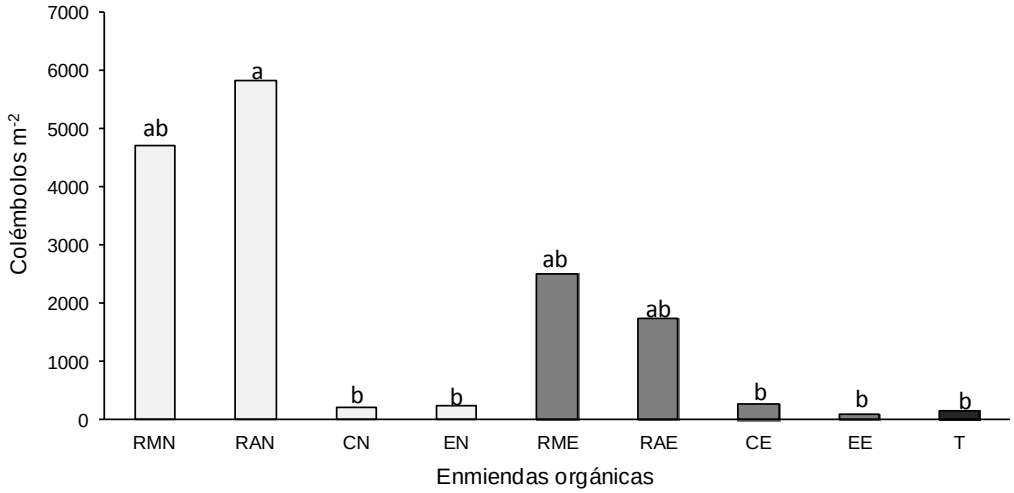


Figura 7. Efecto de las enmiendas naturales y enmiendas enriquecidas sobre la abundancia de colémbolos en un suelo leptosol; para la producción orgánica de amaranto. Letras diferentes indican diferencias significativas (Tukey $p < 0.05$, n= 54).

8.4. Desarrollo y rendimiento de *Amaranthus hypochondriacus*

8.4.1. Altura

El crecimiento promedio de las plantas de amaranto en las enmiendas enriquecidas fue 12% mayor respecto al de las enmiendas naturales (Figura 8) con 69.66 y 61.93 cm de altura respectivamente observándose diferencias significativas (F 1, 1726= 32.64, p= 0.00), aún cuando la dosis de las enmiendas orgánicas enriquecidas fue del 50% menor a la cantidad de las enmiendas orgánicas naturales.

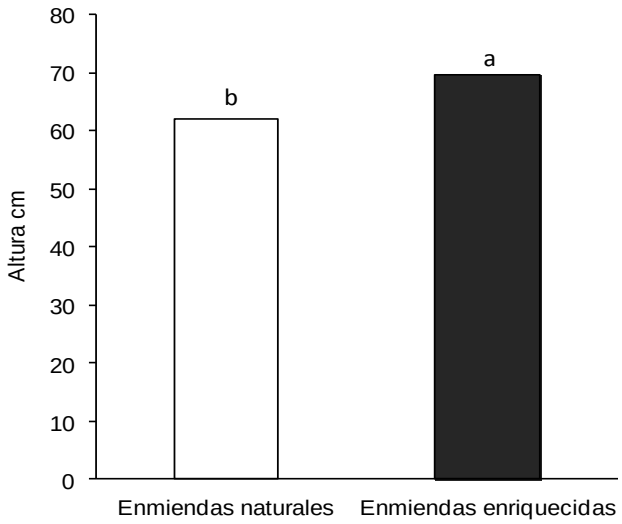


Figura 8. Efecto de las enmiendas naturales y enriquecidas en la altura de las plantas de amaranto, para la producción orgánica de amaranto en un suelo leptosol. Letras diferentes indican diferencias significativas (Tukey $p<0.05$, n= 1728).

En crecimiento de las plantas fue mayor en las enmiendas enriquecidas presentando diferencias significativas (F 7, 1720= 3.41, p= 0.016) en RME y EE las plantas de amaranto lograron un buen desarrollo con 71.6 y 71.7 cm respectivamente. En el RMN y el RAN se presentaron las plantas de menor porte con 60.4 y 58 cm respectivamente (Figura 9).

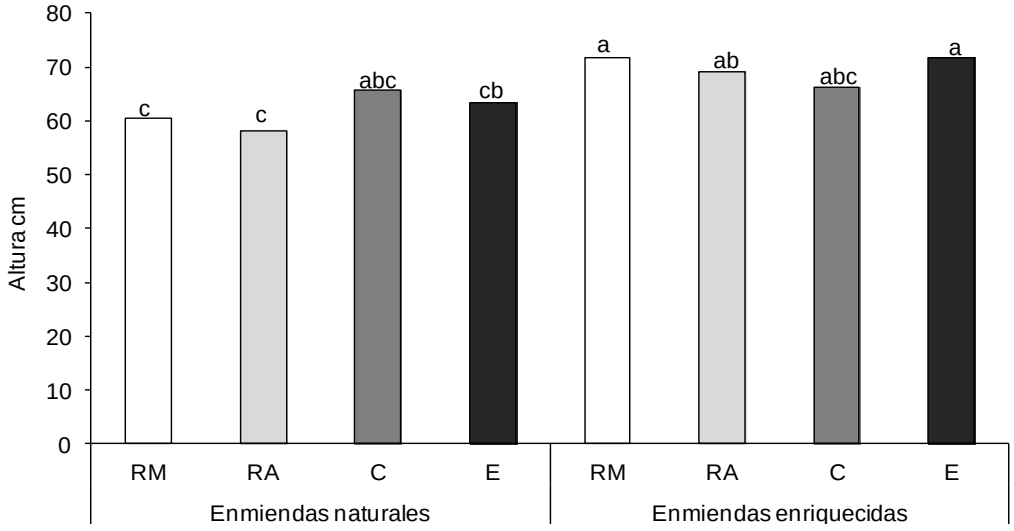


Figura 9. Efecto de los tratamientos con enmiendas naturales y enriquecidas en la altura de las plantas de amaranto; para la producción orgánica de amaranto en un

suelo leptosol. Letras diferentes indican diferencias significativas (Tukey p<0.05, n= 1728).

Los efectos de la inoculación de microorganismos con las enmiendas orgánicas en el crecimiento de las plantas, indican que hubo diferencias significativas (F 7, 1720= 3.88, p= 0.008) como se muestra en la figura 10. La prueba de comparaciones de medias señala que en la composta inoculada se alcanzaron una de las mayores alturas con 69.26 cm. En contraparte, la composta sin inocular y el rastrojo de amaranto inoculado presentaron las plantas con alturas más bajas, con 62.74 y 61.14 cm, respectivamente (Figura 10).

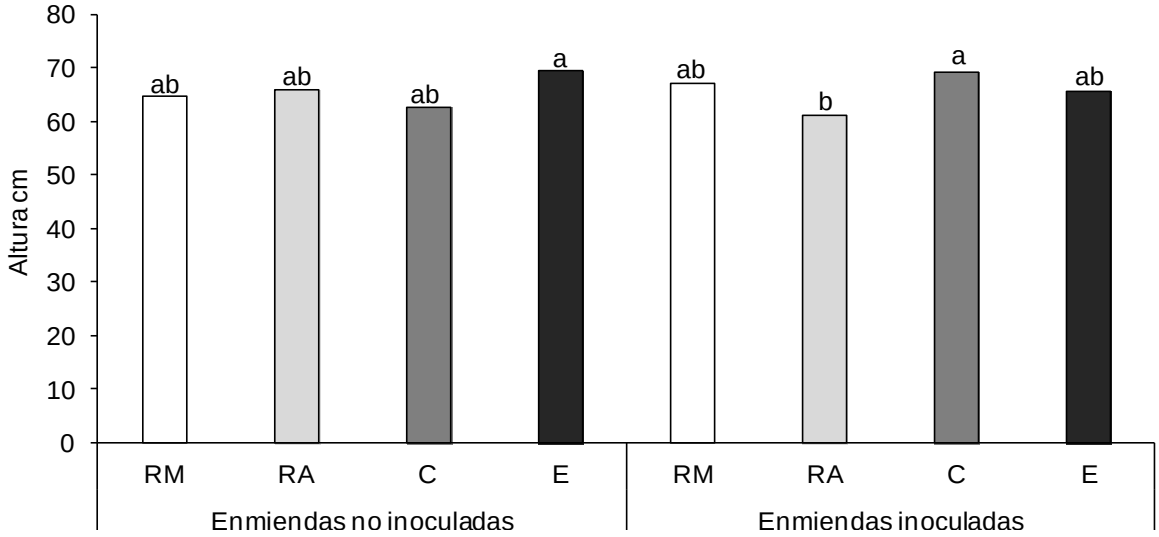


Figura 10. Efecto de la inoculación de BFN BSP en la altura de las plantas de amaranto; para la producción orgánica de amaranto en un suelo leptosol. Letras diferentes indican diferencias significativas (Tukey p<0.05, n= 1728).

Los efectos de la combinación de los tres factores de variación se muestran en la figura 11. Se tuvieron diferencias significativas (F 15, 1712= 8.63, p= 0.00). Las plantas más altas se localizaron en los tratamientos RMEC, RAEC, RMES y EES y en CNI, con alturas de 74.13, 71.11, 69.09, 76.79 y 72.98 cm respectivamente. Por otra parte, las plantas con alturas bajas se localizaron en RANI y CNS con 51.18 y 58.51 cm, respectivamente.

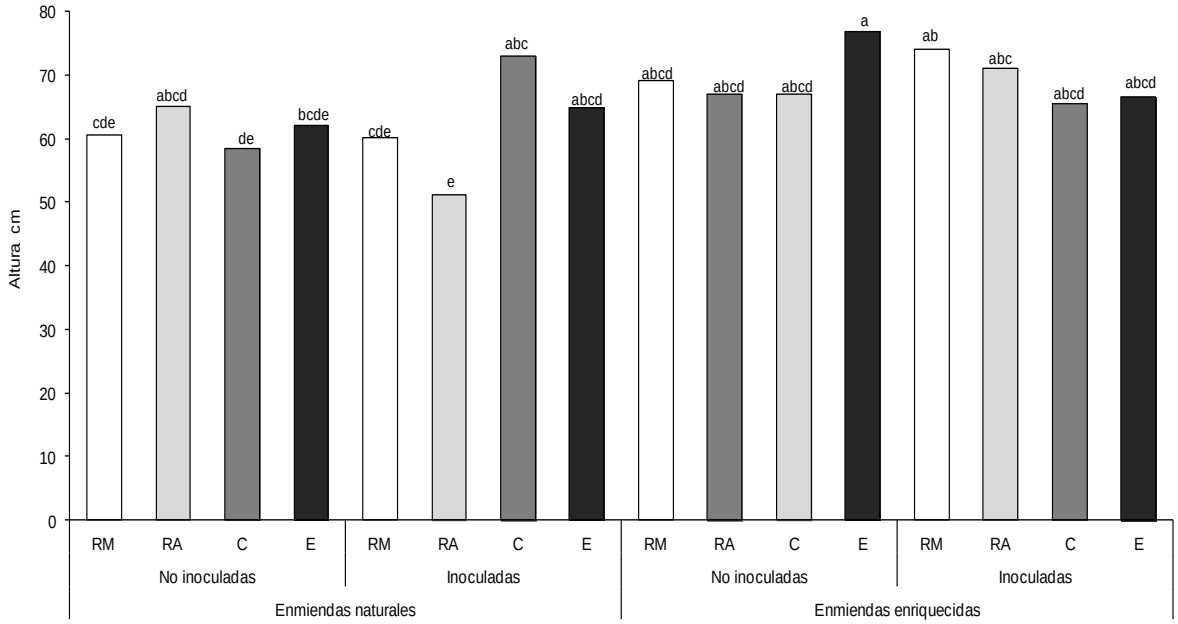


Figura 11. Efecto de los factores de variación en la altura de las plantas de amaranto; para la producción orgánica de amaranto en un suelo leptosol. Letras diferentes indican diferencias significativas (Tukey $p<0.05$, n= 1728).

8.4.2. Diámetro de tallo

Las plantas de amaranto que presentaron un mayor desarrollo se situaron en las enmiendas enriquecidas ($F_{1, 1726}= 15.24$, $p= 0.00$), con un 9% más de desarrollo respecto a las naturales (Figura 12).

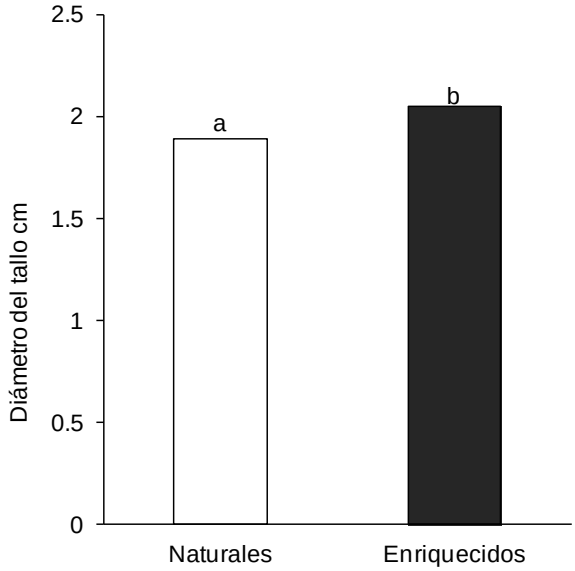


Figura 12. Efecto de las enmiendas naturales y enriquecidas en el diámetro de las plantas de amaranto; para la producción orgánica de amaranto en un suelo

leptosol. Letras diferentes indican diferencias significativas (Tukey p<0.05, n= 1728).

Entre las enmiendas orgánicas naturales y enriquecidas también hubo diferencias significativas (F 7, 1720= 4.06, p= 0.006). En la figura 13 se puede observar que en RME, RAE y EE se localizaron plantas con un mayor desarrollo de tallo con valores de 2.13, 2.01 y 2.10 cm, respectivamente; mientras que en las enmiendas naturales, el RMN presentó el más bajo desarrollo (1.78 cm).

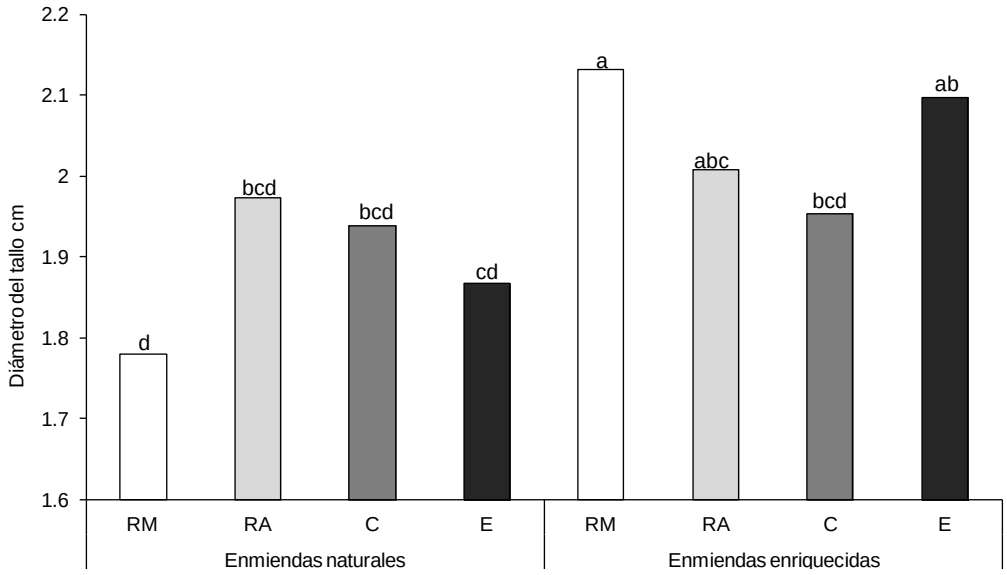


Figura 13. Efecto de los tratamientos con y sin fertilizante en el diámetro de las plantas de amaranto; para la producción orgánica de hoja de amaranto en un suelo leptosol. Letras diferentes indican diferencias significativas (Tukey p<0.05, n= 1728).

No hubo efectos significativos en la interacción entre las enmiendas orgánicas y la inoculación de microorganismos nitrificantes y solubilizadores de fósforo sobre el desarrollo del diámetro del tallo de las plantas de amaranto (F 7, 1720= 2.5, p= 0.57).

La combinación de los tres factores de variación resultaron significativos (F 15, 1712= 8.44, p= 0.00). La prueba de medias indicó que los tratamientos que tuvieron plantas de amaranto con diámetros más desarrollados fueron: el RANS, RMES, EES, RMEC y RAEC con 2.14, 2.13, 2.12, 2.14 y 2.13 cm respectivamente. Por el contrario en RANI, RMNI y CNS se localizaron las plantas

con los tallos menos desarrollados con valores de 1.69, 1.76 y 1.79 cm respectivamente (Figura 14).

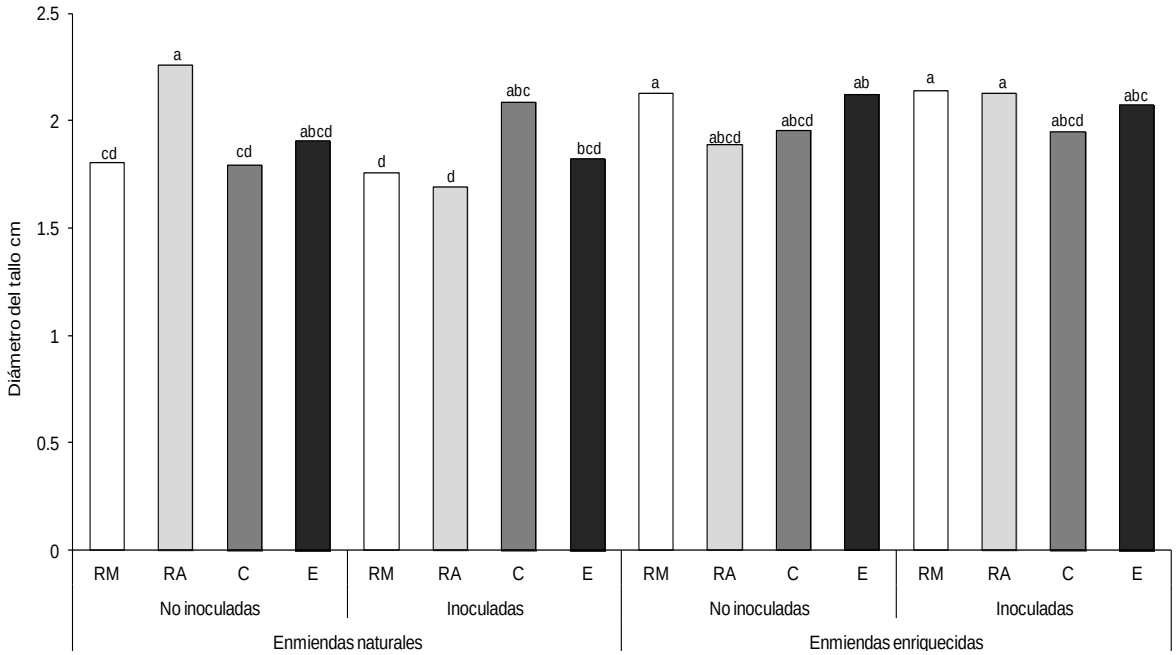


Figura 14. Efecto de los factores de variación en la altura de las plantas de amaranto; para la producción orgánica de amaranto en un suelo leptosol. Letras diferentes indican diferencias significativas (Tukey $p<0.05$, n= 1728).

8.4.3. Rendimiento

En el Cuadro 15 se puede observar la diferencia de rendimientos entre los tratamientos naturales, enriquecidos y los controles. La producción conjunta de los tratamientos con enmiendas enriquecidas fue 12% mayor que los tratamientos con enmiendas naturales y un 34% respecto a los controles. EE, RME y RAEI fueron los tratamientos que presentaron un mayor rendimiento, cada uno obtuvo 8.19, 7.38 y 7.77 g respectivamente. Por otra parte el RMNI junto con los controles presentaron la menor producción de grano con 3.52, 3.21 y 3.45 g respectivamente.

Cuadro 15. Efecto de enmiendas orgánicas sobre el rendimiento de grano de amaranto de producción orgánica, en un suelo leptosol.

Enmiendas orgánicas	Condición nutrimental	Inoculación	Media (g) ± ES
RM	Natural	Sin	5.12 ± 0.93
RA			5.19 ± 0.79
C			5.76 ± 0.76
E			5.49 ± 1.03
RM		Con	3.52 ± 1.62
RA			4.34 ± 0.28
C			5.79 ± 1.10
E			6.86 ± 1.17
RM	Enriquecida	Sin	**7.38 ± 1.82**
RA			5.65 ± 0.64
C			6.19 ± 0.65
E			**8.19 ± 1.77**
RM		Con	6.64 ± 1.30
RA			**7.77 ± 1.11**
C			5.51 ± 2.05
E			6.37 ± 1.29
TRF	Control		3.21 ± 0.45
TSRF			3.45 ± 0-49

**ES= error estándar; RM= rastrojo de maíz, RA= rastrojo de amaranto, C= composta, E= estiércol, TRF= control con roca fosfórica, TSF= control sin roca fosfórica.

Sin embargo, no se encontraron diferencias significativas entre los rendimientos de las diferentes enmiendas orgánicas ($F_{3, 90} = 1.48$, $p = 0.60$), tampoco en el caso de la inoculación ($F_{1, 90} = 0.20$, $p = 0.65$). Sólo en el caso de la condición nutrimental fue donde se encontró diferencia significativa ($F_{1, 94} = 5.84$, $p = 0.018$) siendo los tratamientos enriquecidos en su conjunto los mayoritarios en la producción de grano (Figura 15).

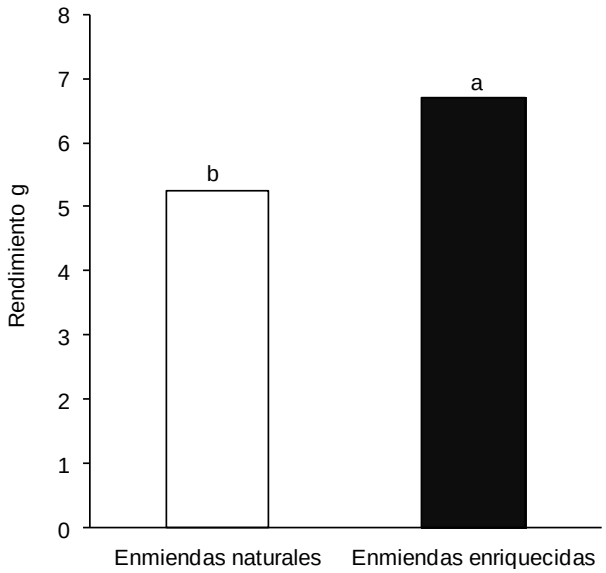


Figura 15. Efecto del enriquecimiento de enmiendas orgánicas con fertilizantes solubles sobre la producción de grano de amaranto orgánico, en un suelo leptosol. Letras diferentes indican diferencias significativas (Tukey $p<0.05$, $n= 96$).

9. DISCUSIÓN

9.1. Efectos del enriquecimiento de enmiendas orgánicas

La aplicación de fertilizantes solubles a las enmiendas orgánicas bajo las técnicas de amonificación puede considerarse exitoso, especialmente en los residuos de cosecha, en donde se logran incrementos de contenidos nutrimentales de un 43 al 83%, en nitrógeno y potasio. En fósforo aprovechable, el enriquecimiento logrado fue mayor de 16 a 21 veces más que la cantidad que contiene la enmienda sin enriquecer.

Esto posiblemente se debe a que los fertilizantes utilizados fueron solubles e impactan con mayor facilidad en la disponibilidad de fósforo, considerando no rebasar los límites máximos que citan Whalen y Sampedro (2009) de 0.15%, o el de Stevenson y Cole (1999) de 0.2% (2 000 mg kg^{-1}), como mencionan para el suelo del medio natural y el cultivado respectivamente.

El enriquecimiento pudiera ser susceptible de corrección en próximas evaluaciones, tal vez a la tercera parte de fósforo de la fórmula 66-58-34 a 66-19-34 para residuos de maíz por ejemplo y ajustarlo para las otras enmiendas en función de la capacidad de fijación observada.

El uso de fertilizantes como fuente de enriquecimiento crea discrepancias entre productores orgánicos que siguen lineamientos de organismos certificadores, que basados en las normas permiten o restringen el uso de productos permitidos y no permitidos. Sin embargo, debe tomarse en cuenta que el uso de un producto tiene su base en el conocimiento y éste en la ciencia en donde se determinan los efectos que producen en el ambiente y en los productos destinados para su consumo a partir de las aportaciones que hagan por sus contenidos.

En este sentido Vitoria *et al*. (2004) y Otero *et al.* (2005) indican que los fertilizantes solubles contienen cantidades negligibles de metales pesados, elementos menores, elementos traza, isótopos y tierras raras, lo que permite descifrar que su uso en enmiendas orgánicas no afectarían considerablemente al ambiente ni a los organismos del suelo. Esto mismo alejaría de los compuestos que aún tomados de la naturaleza (de la minería), como la roca fosfórica, pueden

contener isótopos radiactivos y si son de fuentes orgánicas, como los desechos de animales, pueden estar contaminados por el tipo de ingredientes con que se alimentaron esos animales.

Los fertilizantes solubles generalmente son utilizados en las técnicas de producción por sistemas de fertirrigación y aplicaciones foliares para corrección de deficiencias en las plantas, que en este estudio, se utilizaron a una dosis que pudiera elevar sus contenidos nutrimentales al doble de sus contenidos originales, que al menos en nitrógeno, no se alcanzó a igualar al de la gallinaza (Trinidad, 2013).

9.2. Efectos sobre la biota edáfica

Está documentado que todo material orgánico depositado sobre el suelo es estimulante para las poblaciones de organismos descomponedores (Granados y Barrera, 2007; Cabrera *et al*., 2011), con los correspondientes efectos sobre las propiedades físicas y químicas del suelo (Labrador y Bello, 2001). En éste estudio las enmiendas orgánicas en su forma natural tuvieron mejores efectos estimulantes respecto a las enmiendas enriquecidas las cuales disminuyeron las poblaciones de organismos del suelo al 47%.

Aún con ello las densidades de biota edáfica encontrada en este trabajo son mayores a lo reportado por Juárez *et al*., (2011) y Villalobos *et al*., (2000), quienes registraron 206 y 246 ind m^{-2} respectivamente en cultivos de maíz. En éste mismo cultivo en Perú Pashanasi (2001) encontró 362 ind m^{-2}, en Brasil Barros *et al*., (2002) reportaron 851 y en Cuba Cabrera *et al*., (2011) colectaron 249 ind m^{-2}.

En otros estudios los poblaciones de organismos edáficos son similares a las encontradas en los trabajos de Brown *et al*., (2001) quienes obtuvieron 1121 y 3000 ind m^{-2} en cultivos de maíz y cañaverales de México en la región tropical lluviosa. No obstante, en cultivos donde se fertilizó con abonos orgánicos, más rotación de cultivos y asociación de especies se reportan altas densidades de organismos edáficos, 2 016 ind m^{-2} (Cabrera *et al*., 2007).

Respecto a la biomasa, en los mismos cultivos y países citados, Pashanasi (2001) reportó 5.10 g $m^{-2,}$ Barros *et al*. (2002) encontraron 32.4 g m^{-2}; Cabrera *et al*. (2011) colectaron 7.71 g m^{-2}; Brown *et al*. (2001) reportaron 10 y 60 g m^{-2}.

De ésta forma, cuando el sistema de cultivo cambia de un manejo convencional a un manejo agroecológico, la biomasa se incrementa, como lo registran Cabrera *et al*., (2007) en Cuba con 63 g m^{-2}.

Todo ello muestra que existe una mayor estimulación de poblaciones cuando se incrementa la abundancia de materiales orgánicos en campo que favorezcan un manejo agroecológico, donde la humedad no representa una limitante. A la fecha no se han encontrado referencias de investigaciones respecto al efecto del enriquecimiento de enmiendas sobre los organismos del suelo.

Cuando se compara la cantidad de Unidades Taxonómicas y el índice de diversidad Shanon-Wiener, éstas no son afectadas por las enmiendas orgánicas enriquecidas en el suelo, el índice de diversidad permanece constante en la mayor parte de los tratamientos, aunque haya ligeras reducciones de las Unidades taxonómicas: se reduce al 83% en los residuos de maíz, al 88% en residuos de amaranto, al 80% en estiércol y al 73% en composta.

Al agregar enmiendas orgánicas enriquecidas al suelo las densidades poblacionales de biota edáfica disminuyeron 48% en residuos de maíz, 21% en residuos de amaranto, 58% en estiércol y 55% en compost. Esto puede ser una consecuencia de las alteraciones realizadas sobre las enmiendas naturales, que aunque no es posible estimar el grado de alteración por no haber incluido un tratamiento de uso convencional de fertilizantes en el experimento, sus efectos pudieran ser semejantes a las que suceden sobre las poblaciones de organismos del suelo cuando se aplican fertilizantes inorgánicos (Lavelle *et al*., 1998). Puede afirmarse que las enmiendas orgánicas enriquecidas afectaron a la densidad, más no la diversidad.

La biomasa de organismos del suelo presentó otras variantes, mientras se redujo 16 y 89% en los residuos de maíz y amaranto, respectivamente, en el estiércol se incrementó 359% y en la composta enriquecida 522%, respecto de los contenidos en las enmiendas naturales. Sin embargo, si se considera el efecto total de las enmiendas enriquecidas sobre la biomasa, ésta disminuyó 64%. Éste resultado puede estar relacionado con el incremento sustancial de fósforo disponible en la enmienda de residuos de maíz donde la reducción fue más alta.

No se conocen los efectos de aplicaciones excesivas de fósforo aprovechable sobre la biota edáfica, pero si se sabe que cualquier aportación de N, P y K redunda en beneficios. Un ejemplo es el caso de nitrógeno, el cual aún aplicado en forma inorgánica y en cantidades moderadas, ayuda a cubrir las necesidades de fijación en estructuras y funciones fisiológicas y corporales de los organismos (incremento de biomasa) tanto en lombrices de tierra (Lavelle *et al*., 1998) como en el resto de la biota (Whalen y Sampedro, 2009). Solamente si las cantidades fueran excesivas pueden convertirse en sustancias tóxicas y provocar su deceso y se romperían microcadenas alimenticias en el suelo.

Los ácaros y colémbolos aumentaron sus poblaciones en las enmiendas que presentaron características de bajo nivel de descomposición como los residuos de maíz y de amaranto. Ésta respuesta coincide con la presencia de altas densidades de mesofauna en los suelos de áreas boscosas en donde existe mayor cantidad de hojarasca (Rodríguez, 1998).

No obstante, en áreas cultivadas disminuyen sus poblaciones (Socarras y Rodríguez, 2007; Gómez-Anaya *et al*., 2010) principalmente cuando la cantidad de materiales orgánicos susceptibles a descomposición es escasa (Gómez-Anaya *et al*., 2010; Socarrás, 2013), es por eso que la cantidad de aportes de materiales orgánicos es un factor de regulación de poblaciones de los organismos del suelo (Juárez *et al*., 2011).

Las disminuciones de poblaciones de mesofauna en los materiales más procesados (estiércol y compost) tuvieron un rango amplio (entre 6 y 29%). El efecto del enriquecimiento de enmiendas provocó una disminución de 53 a 54%. Ello indica que la mesofauna fue más sensible a mayores niveles de descomposición de las enmiendas orgánicas que a los efectos tóxicos que posiblemente se hayan creado con el uso de fertilizantes inorgánicos para el enriquecimiento nutrimental (Cabrera *et al*., 2011; Contreras y Adriazola, 2011).

La relación C/N es otro aspecto que ha sido estudiado, Lok (2005) planteó que los organismos de la macrofauna prefieren los restos vegetales con una relación C/N baja, por ser de más fácil acceso y descomposición, sin embargo, en el presente estudio no se distingue un patrón definido, solamente los residuos de

cosecha de maíz produjeron la mayor biomasa de organismos, el resto de las enmiendas pueden estar limitadas por el nivel de descomposición, palatabilidad o presencia de alguna otra sustancia que limite el buen desarrollo de los organismos.

9.3. Efecto sobre el desarrollo y rendimiento del amaranto

Las enmiendas naturales aplicadas al suelo que tienen mayores niveles de transformación (estiércol y compost) presentaron efectos positivos sobre la altura y diámetro del tallo de las plantas de amaranto. Aunado a ello, las enmiendas enriquecidas aplicadas en proporción media respecto a la cantidad de las enmiendas naturales mostraron mayores efectos. Seguramente por el aporte nutrimental de fertilizantes solubles como fuentes de enriquecimiento, los cuales aportan nutrimentos de mayor disponibilidad para las plantas (Contreras y Adriazola, 2011).

Sin embargo, si se considera que la aplicación conjunta de materiales orgánicos y fertilizantes (en este caso bajo la forma de enriquecimiento) puede modificar eventualmente la velocidad de degradación de los materiales orgánicos; la adición de nitratos en forma conjunta con los residuos estimula su mineralización y deprime la mineralización de la materia orgánica estable del suelo al disminuir la relación C/N. Es decir, que ante la suplencia inmediata de nitrógeno proveniente del fertilizante se induce al crecimiento rápido de las poblaciones microbianas, las cuales degradan los materiales más lábiles que se encuentran en los residuos orgánicos recién incorporados, quedando aquellos de mayor recalcitrancia que constituyen la materia orgánica estable del suelo (Rivero, 1999).

En el caso de la inoculación conjunta de bacterias fijadoras de nitrógeno y solubilizadoras de fósforo, ésta actividad resultó favorecedora para el desarrollo y rendimiento de grano del amaranto, ya que estos microorganismos tienen la capacidad de estimular directamente el crecimiento de las plantas, por la producción de sustancias reguladoras del crecimiento para una mayor exploración del sistemas radical de la planta y la solubilización de minerales (fósforo), y la posible interacción sinérgica con la demás biota edáfica (Ferrera y Alarcón, 2001; Loredo-Osti *et al*., 2004).

10. CONCLUSIONES

- La aplicación de abonos orgánicos estimuló a las poblaciones de organismos edáficos principalmente a los detritívoros los cuales participan activamente en el ciclaje de nutrimentos. Los formícidos fueron los más abundantes localizándose en el los tratamientos con estiércol. La biomasa fue más elevada en los tratamientos con residuos de cosecha de amaranto.
- La Bioestimulación favoreció a la mesofauna que se estableció en las enmiendas de bajo nivel de descomposición, en el rastrojo de amaranto se encontró la mayor densidad de ácaros y colémbolos.
- La Bioaumentación de microorganismos nitrificantes y solubilizadores de fósforo contribuyó a un mayor desarrollo y rendimiento de *Amaranthus hypochondriacus*.
- El enriquecimiento de enmiendas orgánicas provocó la disminución de poblaciones de organismos del suelo pero la diversidad no fue afectada.
- Hubo un efecto positivo sobre la altura, diámetro de tallo y rendimiento del amaranto cuando se aplicaron residuos de cosecha de maíz y amaranto y estiércol de caprino enriquecidos.
- El enriquecimiento en los contenidos nutrimentales de materiales orgánicos puede ser una opción tecnológica viable cuando se utilicen como fertilizantes orgánicos, especialmente cuando éstos no contengan el balance nutrimental necesario para el óptimo desarrollo de las plantas.

- El enriquecimiento de las enmiendas puede favorecer la disminución de la cantidad de enmienda que se aplica en la agricultura orgánica.

11. RECOMENDACIONES

De éste trabajo surgen aspectos por investigar, como el estimar con mayor precisión la dosis de fertilizantes solubles a aplicar para enriquecimiento de enmiendas orgánicas con énfasis en fósforo, que responda a los requerimientos del cultivo para corregir deficiencias nutrimentales en el suelo y sostenga la producción de amaranto así como estimar el grado de afectación a la biota edáfica a diferentes niveles de aplicación de fertilizantes partiendo de cero a las cantidades aplicadas normalmente en la agricultura convencional.

12. REFERENCIAS

Alejandre I.J. y L.F. Gómez. 1986. Cultivo del amaranto en México. Universidad Autónoma Chapingo. Dirección de difusión cultural. Departamento de Zonas Áridas. México. 245 p.

Anderson J.M. & J.S.I. Ingram. 1993. Tropical soil biology and fertility: a handbook methods. C.A.B. International. Wallingford, Oxford, U.K.

Altieri M. & C.I. Nicholls. 2000. Agroecología: Teoría y práctica para una agricultura sustentable. 1ºedición. Programa de las Naciones Unidas, México. 250 p.

Barros C. y M. Buenrrostro. 1997. Amaranto fuente maravillosa de sabor y salud. Ed. Grijalbo. México. 158 p.

Barros E., P. Pashanasi, R. Constantino y P. Lavelle. 2002. Effects of land-use system on the soil macrofauna in western Brazilian Amazonia. *Biology and Fertility of Soils*. 35 (5): 338.

Barrios A., M. Ventura, M. Fondevila. 2002. Estrategias para mejorar la utilización digestiva de forrajes tropicales de baja calidad. En: Avances en la Ganadería Doble Propósito. C González-Stagnaro, E Soto Belloso, LN Ramírez Iglesia (eds.). Ediciones Astro Data SA, Maracaibo, Venezuela. Cap. XX: 299-314.

Barrios A. y M. Ventura. 2005. Uso de la amonificación seca para mejorar la calidad del heno. En: González Stagnaro, C., E. Soto Belloso e I. Iglesia (Eds.). Avances en la Ganadería Doble Propósito. Ediciones Astro Data S.A. Maracaibo, Venezuela. pp. 251-255.

Borror D.J. y R.E. White. 1970. A field guide to insects, America north of Mexico, Houghton Mifflin Company. New York.

Brechelt A. 2004. Manejo Ecológico del Suelo. Fundación Agricultura y Medio Ambiente, Santo Domingo, República Dominicana. 29 p.

Brown G., C. Fragoso, I. Barois, P. Rojas, J. C. Patrón, J. Bueno, A. G. Moreno, P. Lavelle & V. Ordaz. 2001. Diversidad y Rol Funcional de la Macrofauna Edáfica en los Ecosistemas Tropicales Mexicanos. Acta Zool. Mex. (n.s.) 1:79-110.

Brusca R y G. Brusca. 2002. Invertebrates. Second ed. Sinauer Associates. México.

Cabrera G., M.A. Martínez, y C. Rodríguez. 2007. La macrofauna del suelo en sistemas agroecológicos en Cuba. *Brenesia*. 67:45.

Cabrera G., N. Robaina y D. Ponce de León. 2011. Riqueza y abundancia de la macrofauna edáfica en cuatro usos de la tierra en las provincias de Artemisa y Mayabeque, Cuba. Pastos y Forrajes. 34(3): 313-330.

Conrad J.H. y B.R. Pastrana. 1990. Amonificación usando urea para mejorar el valor nutritivo de materiales fibrosos. ICA-Informa. Colombia. 24 (2). P. 5-11.

Contreras P.E. y D.A.J. Adriazola. 2011. Efecto de la pulpa de café y la fertilización química en el rendimiento y en la macrofauna edáfica del cultivo de café (*Coffea arabica* L.). Investigación y Amazonía .1 (2): 53- 58.

Doran J.W. & T.B. Parkin. 1994. Defining and Assessing Soil Quality. Special publication no. 35. In. Doran H.W. D.C. Coleman, D.F. Bezdicek, and VB.A. Stewart. Defining soil quality for a sustainable environment. Soil Science Society of America, Inc. USA. pp 3-22.

Ferrera C.R. y A. Alarcón. 2001. La microbiología del suelo en la agricultura sostenible. Ciencia Ergo Sum. 8: 175-183.

Florez J.A. 1990. Bromatología animal. Tercera edición. Editorial Limusa. México. p. 524-554.

Fragoso C., P. Reyes-Castillo, P. Rojas. 2001 La importancia de la biota edáfica en México. Acta Zool. Mex. (n.s.) Número especial 1:1-10.

García P.J., I.J. Alejandre, L.C.G.S. Valdés, R.H. Medrano. 2010. El amaranto. Investigación agronómica en el Norte de México. Instituto Tecnológico del Valle del Guadiana, Durango, México. 133 p.

Gliessman S.R. 2002. Agroecología: Procesos ecológicos en agricultura sostenible. Turrialba, Costa Rica. CATIE. 359 p.

Gómez-Anaya J.A., J.G. Palacios-Vargas, y G. Castaño-Meneses. 2010. Abundancia de colémbolos (Hexápoda: Collembola) y parámetros edáficos de una selva baja caducifolia. Revista Colombiana de Entomología 36 (1): 96-105.

Granados A. y Barrera J.I. 2007. Efecto de la aplicación de biosólidos sobre el repoblamiento de la macrofauna edáfica en la cantera Soratama, Bogotá, DC. Universitas Scientiarum, Revista de la Facultad de Ciencias. 12:73.

Hernández R. y G. Herrerías. 1998. Patrimonio Histórico de Tehuacán A. C. México. Horizonte del Tiempo Vol. 1. 529 p.

INEGI 2015. Mapa digital de México en línea, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.

IUSS Working Group WRB, 2007. World Reference Base for Soil Resources, World Soil Resources Reports, FAO, Rome.

Jaramillo D.F. 2002. Introducción a las Ciencias del Suelo. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias, Medellín, Colombia. 619 p.

Jiménez R.A., F. San Martin, H. Huamán, M.G. Ara. T.F. Arbaiza, A.C. Huamán. 2010. Efectos del tamaño de partícula y tipo de amonificación-conservación sobre la digestibilidad y consumo del rastrojo de maíz en ovinos. Rev. Inv. Vet. Perú; 21 (1): 19-25.

Juárez-Ramón D., C. Fragoso, A. Aragón, A.D. Hernández, M. Salgado. 2011. Manejo Agroecológico de la Biodiversidad del Suelo. En: Aragón A., Jiménez D., Huerta M (Eds.). Manejo Agroecológico de Sistemas. Vol. 2. Publicación

especial de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla. México. pp. 29-44.

Juárez-Ramón D., C. Fragoso G., A. Turrent F., E. Sandoval., R. Ferrera., I. Ocampo., J. Ocampo. 2012. Soil macro and mesofauna in alley cropping systems from two regions of central Mexico. Scientific Research and Essays 7(41): 3502-3514.

Labrador J. 1996. La materia orgánica y su interés agronómico. En: *La materia orgánica en los agrosistemas*. Ed. Mundi-Prensa). pp. 67-86.

Labrador J. y A. Bello. 2001. La materia orgánica en los agrosistemas. Aproximación al conocimiento de la dinámica, la gestión y la reutilización de la materia orgánica en los agrosistemas. 2ª. Ed. Corregida y ampliada. Madrid: Ed. Mundi-Prensa. 293 p.

Lavelle P. 1997. Faunal activities and soil processes: Adaptive strategies that determine ecosystem function. Adv. Ecol. Res. 24: 93-132.

Lavelle P., I. Barois, E. Blanchart, G. Brown, L. Brusssaard, T. Decaëns, C. Fragoso, J.J. Jiménez, J. Kanyonyo, M. Martínez, A. Moreno, B. Pashanasi, B. Senepati y C. Villenave. 1998. Las lombrices como recurso en los agrosistemas tropicales. Nat. Resour. 34(1): 28-44.

Lavelle P. 2000. Ecological challenges for soil science. Soil Science: 73-86.

Look S. 2005. Determinación y selección de indicadores del sistema suelo-pasto en pastizales dedicados a la producción de ganado vacuno. Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Agrícolas. Instituto de Ciencia Animal. La Habana Cuba. 98 p.

Loredo-Osti C., L. López-Reyes, D. Espinosa-Victoria. 2004. Bacterias promotoras del crecimiento vegetal asociadas con gramíneas: Una revisión. Terra Latinoamericana. 2: 225-239.

Martínez R., y A.G. Leyva. 2014. La biomasa de los cultivos en el agroecosistema. Sus beneficios agroecológicos. Cultivos Tropicales 35 (1): 11-20.

Otero N., L. Vitoria, A. Soler, A. Canals 2005. Fertilizer characterization: Major, trace and rare earth elements. Applied Geochemistry 20: 1473–1488.

Pashanasi B. 2001. Estudio cuantitativo de la macrofauna del suelo en diferentes sistemas de uso de la tierra en la amazonia peruana. Fol. Amazon. 12 (1-2): 75-97.

Rivero C. 1999. Materia Orgánica del Suelo. Revista Alcance 57. Facultad de Agronomía. Universidad Central de Venezuela. Maracay. 211 p.

Rodríguez A., M.C. 1998. Evaluación y diagnóstico de la macrofauna y la mesofauna edáficas de los suelos restaurados por industrias APASCO en el cerro Buenavista, Ver. Tesis de maestría. Instituto de Ecología A. C., Xalapa, Ver.

Salazar S.E., H.M Fortis, A.A. Vázquez, V.C. Vázquez. 2003. Abonos orgánicos y plasticultura. México: Facultad de Agricultura y Zootecnia de la UJED. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, COCyTED, 2003. 233 p.

Sánchez M.A. 1980. Potencialidad agroindustrial del amaranto. Centro de Económicos y Sociales del Tercer Mundo. México. 238 p.

Sans F.X. 2007. La diversidad de los agroecosistemas. Departamento de Biología Vegetal. Facultad de Biología. Universidad de Barcelona. Avda. Diagonal 645. Barcelona 08028. Ecosistemas 16 (1): 44-49.

SEMARNAT. 2000. Norma Oficial Mexicana NOM-021, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México D.F.

Senapati B.K., P. Lavelle, P.K. Panigrahi, S. Giri & G. Brown. 2002. Restoring soil fertility and enhancing productivity in Indian tea plantations with earthworm and organic fertilizers. International Technical Workshop on Biological Management of Soil Ecosystems for Sustainable Agriculture. Brazilian Agriculture Research Corporation, Brazil. 182: 172-190.

SIAP .2012. Información de las Delegaciones de la SAGARPA. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. www.siap.gob.mx. Consultado en Julio de 2014.

Socarrás A. y M.E Rodríguez. 2007. Evaluación de la mesofauna del suelo en áreas rehabilitadas con casuarina y marañón de la zona minera de Moa. Cuba. Centro Agrícola. 34 (2): 69-74.

Socarrás A. 2013. Mesofauna edáfica: indicador biológico de la calidad del suelo. Pastos y Forrajes. 36 (1): 5-13.

Stevenson F.J. & M.A. Cole. 1999. Cycles of soil. Carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients. John Wiley & Sons, Inc. USA.

Stocking M. & N. Murnaghan. 2003. Manual para la evaluación de campo de la degradación de la tierra. España. Ed. Mundi-Prensa. 173 p.

Swift M.J., O.W. Heal & M.J. Anderson. 1979. Descomposition in Terrestrial Ecosystems. Blackwell Scientific. Oxford, UK. 5: p.372.

Trinidad S.A. 1987. El uso de abonos orgánicos en la producción de agrícola. Serie Cuadernos de Edafología 10. Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.

Trinidad S.A. 2010. Utilización de estiércoles. SAGARPA. Consultado en mayo de 2014 En: http:// www. sagarpa.gob.mx/desarrollorural/Documents/fichasaapt/utilizaci%F3n%20de%20esti%E9rcoles.pdf.

Trinidad S.A. 2013. Abonos orgánicos. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. México. 8 p.

Villalobos F.J., R. Ortíz-Pulido, C. Moreno, N.P. Pavón-Hernández, H. Hernández-Trejo, J. Bello y S. Montiel. 2000. Patrones de la macrofauna edáfica en un cultivo de *Zea mays* durante la fase postcosecha en la Mancha, Veracruz, México. Acta Zool. Mex. (n.s.) 80: 167-183.

Vitoria R., L., N. Otero, A. Soler y A. Ngels C. 2004. Fertilizer Characterization: Isotopic Data (N, S, O, C, and Sr). Environ. Sci. Technol. 38: 3254-3262.

Whalen J. K. & L. Sampedro 2009. Soil ecology and management. CABI International, Cambridge, MA.

Zar J.H. 2009. *Biostatistical analysis*. Prentice & Hall. USA. p. 929.

13. ANEXOS

13.1. Lista de unidades, siglas y abreviaturas

BFN= bacterias fijadoras de nitrógeno

BSP= bacterias solubilizadoras de fósforo

C= control

CE= conductividad eléctrica

CE= composta enriquecida

CEI= composta enriquecida e inoculada

CIC= capacidad de intercambio catiónico

cm= centímetros

CN= composta natural

CNI= composta natural inoculada

CRF= control con roca fosfórica

DA= densidad aparente.

EE= estiércol enriquecido

EEI= estiércol enriquecido e inoculado

EN= estiércol natural

ENI= estiércol natural inoculado

EOE= enmiendas orgánicas enriquecidas

EON= enmiendas orgánicas naturales

ha= Hectárea

K= potasio

kg= kilogramos

m= metros

mm= milímetros

MO= materia orgánica

N= nitrógeno

P= fósforo

RAE= residuos de cosecha de amaranto enriquecidos

RAEI= residuos de cosecha de amaranto enriquecidos e inoculados

RAN= residuos de cosecha de amaranto natural

RANI= residuos de cosecha de amaranto inoculados

RME= residuos de cosecha de maíz enriquecidos

RMEI= residuos de cosecha de maíz enriquecidos e inoculados

RMN= residuos de cosecha de maíz natural

RMNI= residuos de cosecha de maíz natural inoculado

ton= Tonelada