



Fertilización biológica: técnicas de vanguardia para el desarrollo agrícola sostenible

Juan Sebastián Carvajal Muñoz¹
Adriana Consuelo Mera Benavides²

Fertilización biológica: técnicas de vanguardia para el desarrollo agrícola sostenible

***Biological fertilization: state of the art techniques for
a sustainable agricultural development***

***Fertilização biológica: técnicas de vanguarda para o
desenvolvimento agrícola sustentável***

RESUMEN

El empleo de fertilizantes biológicos ha crecido ostensiblemente en las últimas dos décadas. Tal utilización masiva surge como resultado de la amplia demanda de materia prima para los procesos productivos y abastecimiento de alimentos en el mundo. Los fertilizantes biológicos actúan como sustitutos de fertilizantes químicos tradicionales, brindan buenos rendimientos en las cosechas, favorecen el crecimiento de frutos sanos, resistentes al ataque de plagas y ofrecen facilidades para su aplicación. Además, los nutrientes esenciales, contenidos en los fertilizantes biológicos, poseen características fisicoquímicas y biológicas apropiadas para el suelo, lo cual implica incrementos de productividad en el sector agrícola global. En el presente artículo, se hace una

¹ Estudiante Ingeniería Ambiental y Sanitaria y de Ingeniería Civil. Grupo de Investigación en Residuos Peligrosos y Sólidos Urbanos-GIRPSU y Grupo Integrado de Investigación en Ingeniería Civil (GIIC). Universidad del Magdalena, Santa Marta, Colombia. ² Química. Especialista en Ingeniería Ambiental. Magíster en Ingeniería Ambiental. Máster en Química Sostenible. Directora del Grupo de Investigación en Residuos Peligrosos y Sólidos Urbanos (GIRPSU) Universidad del Magdalena, Santa Marta, Colombia.

Correspondencia: Adriana Consuelo Mera Benavides. adrymera@hotmail.com

Artículo recibido: 10/09/2010; Artículo aprobado: 17/12/2010

revisión de las principales técnicas de fertilización biológica utilizadas actualmente y se esboza su potencial para el desarrollo agrícola sostenible en el mundo.

Palabras clave: fertilizantes biológicos, desarrollo agrícola, sostenibilidad, nutrientes.

ABSTRACT

The use of biological fertilizers has grown significantly during the last two decades. Their massive use is a result of the high demand of raw material for food production and supply, worldwide. They act as traditional chemical fertilizers' substitutes, have a good performance in harvests, help to the growth of sane fruits that resist plagues and are easy to apply. Besides, essential nutrients contained in biological fertilizers have physical-chemical properties that are beneficial to the soil, helping to increase productivity in the global agricultural sector. In this article a revision to the main current techniques for the biological fertilization is made, and an outlook to its future potential for sustainable agricultural development is shown.

Key words: biological fertilizers, agricultural development, sustainability, nutrients.

RESUMO

O emprego de fertilizantes biológicos cresceu ostensivamente nas últimas duas décadas. Tal utilização em massa surge como resultado da ampla demanda de matéria prima para os processos produtivos e abastecimento de alimentos no mundo. Os fertilizantes biológicos atuam como substitutos de fertilizantes químicos tradicionais, brindam bons rendimentos nas colheitas, favorecem o crescimento de frutos sãos, resistentes ao ataque de pragas e oferecem facilidades para sua aplicação. Ademais, os nutrientes essenciais, contidos nos fertilizantes biológicos, possuem características físico-químicas e biológicas apropriadas para o solo, o qual implica incrementos de produtividade no setor agrícola global. No presente artigo, faz-se uma revisão das principais técnicas de fertilização biológica utilizadas atualmente e se esboça seu potencial para o desenvolvimento agrícola sustentável no mundo.

Palavras importantes: fertilizantes biológicos, desenvolvimento agrícola, sustentabilidade, nutrientes.

INTRODUCCIÓN

La creciente necesidad de abastecimiento de productos agrícolas para la alimentación y transformación en bienes de consumo por parte de la sociedad moderna ha suscitado un inmenso desarrollo de actividades agrícolas en las últimas décadas. Como resultado de ello, se ha percibido la necesidad de implementar métodos que permitan, entre otras cosas, mejorar la eficiencia de los cultivos, mitigar efectos adversos sobre

el suelo, disminuir la tasa de uso de fertilizantes químicos, aumentar las ganancias por área cultivada. Por esta razón, la implementación de modelos de Agricultura Conservativa (AC) ha sido un eje fundamental de las prácticas agrícolas en el ámbito global^{1,2}. La AC se enfoca en disminuir los impactos adversos causados sobre el ambiente por las actividades agrícolas, incrementar rendimientos de los cultivos e implementar técnicas e insumos sostenibles y sustentables.

La fertilización biológica se basa en la utilización de insumos naturales (e.g. abonos, restos de descomposición de materia orgánica, excesos de cosechas, aguas residuales domésticas, estiércol animal y microorganismos como hongos, bacterias)^{3,4} para mejorar la fijación de nutrientes en la rizosfera, producir estimulantes de crecimiento para las plantas, mejorar la estabilidad del suelo, facilitar el control biológico, biodegradar sustancias, reciclar nutrientes, favorecer la simbiosis micorrizal, desarrollar procesos de bioremediación en suelos contaminados con sustancias tóxicas, xenobióticas, recalcitrantes^{2,5,6,7}.

Adicionalmente, el uso de biofertilizantes permite mejorar la productividad por área cultivada en corto tiempo, consumir menores cantidades de energía, mitigar la contaminación del suelo y el agua, incrementar la fertilidad del suelo y favorecer el antagonismo y control biológico de organismos fitopatógenos^{3,5,8}. Lo anterior se ve traducido en beneficios económicos para los agricultores -por efecto de los menores costos asociados al proceso de fertilización y obtención de mayores rendimientos en los cultivos-^{9,10}. En este sentido, la aplicación de fertilizantes biológicos trae consigo beneficios desde las perspectivas económica, social y ambiental. No obstante, la implementación de las técnicas de fertilización requiere de estudios de factibilidad, seguimiento de las variables ambientales involucradas en los procesos biológicos, adquisición de insumos biológicos, inversión de capital, tiempo y personal capacitado^{11,12,13,14}. En lo anterior versan las principales dificultades enfrentadas por la sociedad actual para lograr sostenibilidad y sustentabilidad en las actividades agrícolas¹⁵.

Fijación biológica de nitrógeno (FBN)

La FBN es considerada como un proceso clave en la biosfera y constituyente fundamental de la agricultura sostenible. Esta permite la conversión de nitrógeno gaseoso a formas de nitrógeno mayormente disponibles (e.g. nitritos, nitratos, amonio) para el desarrollo de procesos metabólicos de las plantas¹⁶.

El proceso de conversión del nitrógeno gaseoso en productos mayormente disponibles y asimilables se desarrolla por la acción de microorganismos presentes en el suelo, como *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Beijerinckia* (i.e. microorganismos que establecen asociaciones rizocenóticas con plantas gramíneas), *Rhizobium*, *Bradyrhizobium*, *Azorhizobium* (i.e. bacterias que establecen simbiosis con leguminosas), *Frankia* (i.e. actinomicetos simbióticos con plantas leñosas), *Nostoc* (i.e. algas cianofíceas que establecen simbiosis con diversas plantas) o con *Anabahena* (i.e. helechos)¹⁷.

El desarrollo de la FBN depende de microorganismos especializados, es decir, aquellos que son portadores de la enzima nitrogenasa. Estos se encargan de producirla, a través de procesos biológicos y fisicoquímicos^{15,18}.

Adicionalmente, se ha demostrado que la FBN impacta el ambiente de forma mínima. También se ha reconocido su utilidad y eficiencia para el óptimo desarrollo físico de las plantas^{17,18}.

Sessitsch A.; et al, estiman que cerca del 80% del nitrógeno fijado en el planeta se debe a la actividad del género gram-negativo de bacterias *Rhizobium*¹⁸. La estrategia de captación de nitrógeno atmosférico para su reducción por la asociación *Rhizobium-leguminosa* es un proceso complejo. El *Rhizobium* induce a la leguminosa para que forme nódulos, estableciendo así cooperación metabólica, en la que las bacterias reducen el nitrógeno (N_2) a amonio (NH_4). Este último se exporta hacia el tejido vegetal para ser asimilado en proteínas y otros compuestos nitrogenados complejos. De manera simultánea, las hojas reducen el dióxido de carbono (CO_2) en azúcares a través de la fotosíntesis y lo transportan hacia las raíces. Es precisamente allí donde los *Rhizobium* proveen ATP al proceso de inmovilización de nitrógeno diatómico -sacando provecho de tal fuente de energía- y facilitan el desarrollo de procesos fotosintéticos y de crecimiento de plantas^{16,17,18}.

Adicionalmente, se estima que la asociación *Rhizobium-leguminosa* es responsable de la fijación anual de 35 millones de toneladas de nitrógeno¹⁸. Tal cuantía influye de manera significativa en la fertilización de suelos en el ámbito global y favorece el desarrollo de actividades de aprovechamiento agrícola y forestal en diversas zonas del planeta.

PRÁCTICAS DE FERTILIZACIÓN BIOLÓGICA

La sociedad actual debe satisfacer sus necesidades alimentarias por medio de los recursos agrícolas. Por ello, cada vez es más necesario emplear métodos que sean efectivos y viables para obtener buenos rendimientos y satisfacer la demanda global de insumos. De igual manera, surgen métodos alternativos para incrementar la fertilidad de los suelos. El principal objetivo de estos es brindar mayores eficiencias, incrementar la calidad de los productos agrícolas, minimizar tiempos de cultivo y disminuir costos de producción. De otro lado, la contaminación de los suelos, por uso extensivo y continuo de insumos químicos y el monocultivo, ha conducido a la necesidad de incorporar técnicas de fertilización menos agresivas con el ambiente. A continuación, se muestran algunas técnicas de fertilización que representan menores costos ambientales, costos de aplicación y eficiencias comparables con los sistemas convencionales de fertilización química utilizados en el mundo.

Micorrizas arbusculares (MA)

La mayoría de plantas de interés agrícola son las endomicorrizas, de las que forman parte las micorrizas arbusculares (MA)^{19,20}.

Las micorrizas son asociaciones mutualistas que se dan entre hongos y la mayoría de plantas terrestres. Este tipo de asociaciones son fáciles de localizar en diferentes lugares, desde ecosistemas acuáticos hasta desiertos, es decir, se presentan en diversas altitudes y latitudes^{21,22}. Por ello, se reconoce su valor en términos de disponibilidad y facilidad de aprovechamiento en condiciones geográficas diversas.

Los hongos que forman las asociaciones son simbioses biótrofos obligados, es decir, sólo pueden completar su ciclo de vida colonizando raíces de plantas hospedadoras²².

Este tipo de asociación simbiótica ha sido denominada como biofertilizante y bio-protector de cultivos. Asimismo, se considera eje fundamental de los programas de manejo integrado de suelos y cultivos^{21,22,23}.

Los hongos formadores de micorrizas arbusculares pertenecen a la división *Glomeromycota*. El más abundante y diverso es el género *Glomus*, que consta de inoculantes fúngicos, es decir, hongos micorrízicos ampliamente utilizados en actividades agrícolas. La aplicación de inoculantes micorrízicos en los suelos contempla ventajas para cultivos agrícolas y forestales como: incremento de la tasa de crecimiento y tolerancia de las plantas frente a sequías y salinidad del suelo^{21,22}.

Salinas; et al, consideran que las micorrizas *Glomus intraradices* (i.e. vesículo-arbusculares) pueden complementar o sustituir la fertilización química de cultivos variados, en condiciones ambientales variables²⁴.

La correcta selección y aplicación de hongos micorrízicos arbusculares mejora la nutrición vegetal, incrementa la resistencia de las plantas frente a microorganismos patógenos y condiciones de estrés, tanto biótico como abiótico. Además, la amplia gama de opciones y aplicabilidad de MA en diversas regiones hace que sea una técnica muy atractiva para sustituir, parcial o completamente, la fertilización química de los suelos.

Compostaje

El compostaje es una de las técnicas más antiguas utilizadas para la estabilización de desechos orgánicos y fertilización orgánica del suelo. El objetivo principal de esta práctica es obtener un producto estable, química y biológicamente, con alto contenido de micro y macro nutrientes^{25,26,27}.

El proceso de compostaje se desarrolla de la siguiente forma: inicialmente, las cepas de microorganismos descomponen los residuos orgánicos generando diferenciales de temperatura²⁸. De forma simultánea, el pH del medio disminuye por la producción de ácidos orgánicos. Una vez se alcanza una temperatura cercana a 40 °C, las bacterias termofílicas inician procesos de degradación, haciendo que la temperatura alcance 65 °C – en estas condiciones se inactiva el metabolismo de ciertos hongos-. Durante esta etapa, las reacciones de transformación biológica son desarrolladas por hongos actinomicetos y bacterias formadoras de esporas. Estos consumen rápidamente compuestos de fácil degradación como azúcares, proteínas, almidón y grasas. Además, el pH tiende a ser alcalino por efecto de la liberación de ion amonio.

Una vez degradado el material orgánico, la velocidad de las reacciones disminuye, al igual que la temperatura. Esta etapa se conoce como enfriamiento. Los hongos termofílicos y bacterias mesofílicas capaces de degradar celulosa actúan en esta etapa. Finalmente comienza el proceso de maduración, que requiere de varios meses. Esta etapa permite culminar con la degradación de compuestos orgánicos.

Con el proceso antes descrito, se obtiene humus estable, ácidos húmicos y fúlvicos -de alto poder nutritivo y potencial de fertilización de suelos con carencia nutrimental-^{11,27}.

Los beneficios que brinda el compost son muy amplios y pueden ser del ámbito físico, químico, biológico y ambiental. Las aplicaciones del compost dependen de las condiciones de la materia orgánica, humedad, temperatura, pH y presencia de microorganismos en la pila. Por ejemplo, el compost incrementa el drenaje y la absorción de humedad en suelos que presentan deficiencias estructurales o carencia de nutrientes. Además, permite incrementar la productividad de los cultivos –al promover el crecimiento de las plantas por incorporación de nutrientes esenciales-, facilita la aplicación en diferentes tipos de suelos, reduce la escorrentía y hace que los beneficios económicos para el cultivador sean ostensibles, dado el aprovechamiento progresivo de residuos^{27,29}.

Vermicompostaje o lombricompostaje

El vermicompostaje es una técnica de fertilización biológica que consiste en aprovechar la actividad metabólica de lombrices de tierra para producir humus con alto contenido de nutrientes. Para aplicarla, se requieren residuos orgánicos, (e.g. abonos orgánicos, cachaza, residuos de cosecha). El material orgánico pasa a través del tracto digestivo de la lombriz, donde es transformado en un material rico en microorganismos, macronutrientes y micronutrientes. De esta forma se obtiene un fertilizante orgánico estable química y biológicamente^{30,31,32}.

La utilización, almacenamiento, transporte, y aplicación del vermicompost en suelos reviste especial interés para aquellos con deficiencias nutrimentales. Este tipo de actividad puede desarrollarse satisfactoriamente tanto en pequeña como gran escala, en condiciones ambientales variadas o bajo condiciones controladas de laboratorio.

Las especies de lombriz más empleados en la vermicultura son: *Eisenia foetida* (i.e. Californiana Roja) y *Eudrilus eugeniae* (i.e. Africana Roja)^{30,31}. La primera exhibe ventajas por su rápida tasa de reproducción en condiciones de alta temperatura ambiente –superior a 40°C-, tolerar altas densidades poblacionales (10.000 a 50.000 lombrices/m²), resistir amplias fluctuaciones de temperatura, potencial de hidrógeno (pH), humedad y prosperar en diferentes sustratos. Por ello, *Eisenia foetida* es la especie más utilizada en lombricultura³³.

Por otra parte, *Eudrilus eugeniae* es una lombriz que crece muy rápido, es muy prolífica, pero de difícil manejo, dado que su extracción del sustrato es tanto más compleja que la de *Eisenia foetida*³¹.

Recientemente, se ha comprobado la efectividad del vermicompostaje en La Habana, Cuba^{34,35}. Con la investigación desarrollada por Berc; et al, se vislumbró la necesidad de incrementar la productividad y disminuir los impactos ambientales adversos ocasionados por el uso indiscriminado de fertilizantes y pesticidas químicos. Los autores hacen énfasis sobre la necesidad de aprovechar las condiciones climáticas (e.g. radiación solar, pluviosidad, temperatura media multianual), económicas (e.g. gran potencial agrícola) y sociales (e.g. disponibilidad de mano de obra barata) para lograr incorporar las técnicas de lombricultura e identificar las ventajas, desventajas y limitaciones de estas. De esta forma, los autores obtuvieron rendimientos superiores a 1,5 toneladas de humus en un año, en zonas tropicales, a partir de tres toneladas de sustrato orgánico y 1 m² de suelo tratado. El humus obtenido presentó propiedades físicas,

químicas y microbiológicas apropiadas para la aplicación en suelos con deficiencias de nutrientes como el fósforo, nitrógeno, potasio^{34,36}.

Inoculantes microbianos (IM)

Los inoculantes microbianos son sustancias o agregados biológicos que contienen poblaciones microbianas variadas, como hongos de fermentación, bacterias, lactobacilos^{37,38}. Su alto contenido nutrimental de sales permite que, al reaccionar con la materia orgánica del suelo, se produzcan sustancias benéficas para la nutrición de las plantas (e.g. vitaminas, ácidos orgánicos, minerales quelatos y antioxidantes)^{39,40,41,42}.

Los inoculantes microbianos son capaces de modificar características de la micro y macro flora del suelo y mejorar el equilibrio biológico del suelo^{34,43}. Además, sus propiedades antioxidantes facilitan la descomposición de materia orgánica e incrementan el contenido de humus en la matriz del suelo^{33,44}. Todo ello incide favorablemente sobre el crecimiento de las plantas, la calidad de las cosechas y el mejoramiento de la estabilidad química, física y biológica del suelo.

Con el uso racional de IM se pueden mejorar ciertas características físicas, químicas y biológicas, y suprimir enfermedades biológicas del suelo^{11,32,33}. En este sentido:

- *Sobre las condiciones físicas:* mejorar la estructura y agregación de las partículas del suelo, reducir su compactación, incrementar los espacios porosos y mejorar la infiltración del agua.
- *Sobre las condiciones químicas:* mejorar la disponibilidad de nutrientes en el suelo, dejar elementos libres para facilitar su absorción por el sistema radicular.
- *Sobre la microbiología del suelo:* suprimir o controlar –por medio de competencia– las poblaciones de microorganismos patógenos que se desarrollan en el suelo. Incrementar la biodiversidad microbiana, generando las condiciones necesarias para que los microorganismos benéficos nativos prosperen.

Extractos de algas marinas

Las algas marinas están constituidas mayoritariamente por elementos traza, elementos mayores y elementos menores. También pueden encontrarse otras sustancias naturales, cuyos efectos son similares a los de ciertos reguladores de crecimiento plantar, como *vitaminas, carbohidratos, proteínas, sustancias biocidas que actúan contra algunas plagas y enfermedades, y agentes quelantes como ácidos orgánicos y manitol*⁴⁵. Las bondades de uso de algas marinas en la agricultura –eficiencias mayores y buena calidad de frutos– pueden evidenciarse a partir de aplicación directa o de sus derivados^{45,46,47}.

Especies como el *Ascophyllum nodosum* contiene macronutrientes y micronutrientes requeridos para la nutrición celular. La compañía norteamericana Acadian Seaplants Limited demostró que los suplementos vitamínicos que provienen de esta especie incrementan la productividad agrícola y las ganancias –en términos de tiempo y dinero–. De igual forma, favorecen la disponibilidad de azúcares, incremento de talla de frutos, minimización del tiempo de cultivo, mejores formas y tonalidades de los productos agrícolas^{45,47}.

De otro lado, las cianobacterias (i.e. algas verde-azules) son hábiles para obtener fosfatos y micronutrientes de medios con presencia de minerales insolubles⁴⁷. Esta capacidad les confiere un nivel de superioridad con respecto a otras especies, dado el aporte de nutrientes esenciales para la fertilización de suelos y de otros sustratos⁴⁷. La Universidad Estatal de Oregón evaluó los resultados de aplicar extractos de algas marinas en cultivos de manzanos (i.e. árboles de manzana). Se manejaron dos tratamientos, en áreas de 1 acre: el primero consistió en aplicar media libra de fungicidas y herbicidas; el segundo, en aplicar media libra de extractos de alga marina de la marca Acadian Seaplant Soluble ®. Los autores concluyeron que un 80% de los manzanos tratados con el extracto de alga produjeron frutos con mejores características organolépticas. Además, evidenciaron un incremento del 4% en el rendimiento por acre cultivado⁴⁸.

Estiércol animal

El estiércol animal ha sido ampliamente utilizado por los agricultores desde hace varias décadas para la fertilización de los suelos, dados los bajos costos asociados a su obtención, transporte y procesamiento. La gran disponibilidad de este y el aporte nutricional y de oligoelementos hacen que sea una alternativa atractiva para el desarrollo de actividades de fertilización de suelos con deficiencias nutrimentales.

El estiércol presenta múltiples beneficios^{11,49}:

- Es un fertilizante biológico con altas proporciones de nitrógeno y potasio, medianas de calcio y fósforo, y menores de magnesio y azufre. Permite obtener efectos favorables sobre la estabilidad fisicoquímica del suelo, el crecimiento de las plantas y el desarrollo de poblaciones microbianas benéficas.
- El estiércol aporta materia orgánica al suelo. La composición de sólidos orgánicos oscila entre el 20% y el 40%. Debido al alto contenido de nitrógeno los procesos de descomposición de materia orgánica se desarrollan de forma más rápida.
- A pesar de tener un bajo contenido de fósforo, el estiércol evita el bloqueo de este elemento, haciendo que sea más disponible para su uso por las plantas.

Aspectos como el tipo, edad y estado de salud del animal del que proviene el estiércol inciden en la proporción de nutrientes del estiércol. Por ejemplo, el estiércol de ovinos y aves contiene altos niveles de nitrógeno, el de porcinos, vacunos y equinos presenta menores proporciones de nitrógeno. El tipo de cama (i.e. mullido de paja, helechos u otras plantas que sirven para el descanso del ganado y eliminación de orina y excretas) influye también sobre la calidad del estiércol⁴. Asimismo, la utilidad y manejabilidad del producto depende de la proporción de trazas de metales pesados y oligoelementos.

La aplicación de estiércol en los suelos debe realizarse en cantidades o concentraciones permisibles por las normas y reglamentos de las autoridades ambientales y sanitarias competentes. En la mayoría de los casos, se recomienda que el estiércol se rocíe en una capa fina sobre amplias extensiones de suelo, en lugar de ser apilado sobre una pequeña porción de terreno⁴⁹. El propósito de la técnica es favorecer la

aireación del suelo, maximizar la eficiencia de la producción agrícola y facilitar el desarrollo de actividades biológicas –capaces de crear un medio rico en nutrientes disponibles para las plantas-.

A pesar que el estiércol animal brinda mejoras en la disponibilidad de nutrientes y facilita el crecimiento de las plantas, también presenta desventajas y limitaciones de especial interés, capaces de comprometer la seguridad de los consumidores de productos agrícolas, la estabilidad fisicoquímica y biológica del suelo. En este orden de ideas, el alto contenido de amoníaco del estiércol podría quemar el follaje y las raíces de las plantas; la presencia de estiércol podría incrementar la cantidad de flora arvense y; los costos asociados al transporte y aplicación del estiércol superan los de otras técnicas. Además, la presencia de metales pesados (e.g. mercurio, cromo, plomo) constituye una amenaza por su potencial carcinogénico, bioacumulativo y biomagnificable en la cadena alimenticia. Por esta razón, se debe considerar el uso del estiércol para la fertilización de suelos, evaluando las relaciones costo-beneficio y realizando pruebas técnicas que verifiquen la inocuidad de este¹¹. Finalmente, la aplicación excesiva de estiércol puede generar una reducción significativa en el crecimiento de las plantas, por efecto de niveles excesivos de nitrógeno, amoníaco y sales.

Biosólidos

El vertimiento de desechos humanos tratados en plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) sobre el suelo tiene una trayectoria histórica bastante amplia. A principios de los años setenta, en Estados Unidos, se comenzó a aplicar lodo residual o de sedimentación en suelos con fines de aprovechamiento agrícola y forestal. De hecho, la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA) estima que la mitad del lodo residual producido en los Estados Unidos es diseminado en el suelo, es decir, aplicado como fertilizante en grandes extensiones de terreno^{50,51}.

Los biosólidos pueden ser aplicados sobre el suelo a través de técnicas como el vertido, la inyección, irrigado, entre otras. Estas permiten disminuir la propagación de malos olores, la influencia de insectos sobre los cultivos, minimizar las pérdidas por escorrentía y pérdida de amoníaco en el aire⁵⁰.

Existen varias opciones para emplear el lodo residual proveniente de las PTAR, como disposición en rellenos sanitarios, incineración y aplicación directa sobre el suelo. La última consiste en disolver el lodo residual, para luego ser aplicado en el suelo, donde es descompuesto por microorganismos y filtrado por la matriz del suelo. Por lo anterior, es la alternativa más prometedora desde la perspectiva económica-ambiental. Además, la composición del biosólido es útil para la nutrición del suelo, lo cual explica el incremento en la tasa de uso como corrector o enmienda en varios países del mundo^{11,52}.

La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos clasifica los biosólidos de acuerdo con el contenido de metales pesados. Así, las concentraciones más bajas pueden ser aplicadas bajo controles de seguridad más flexibles. Las concentraciones más altas no son susceptibles de uso; por ello, los biosólidos con tales características deben ser incinerados o dispuestos en rellenos sanitarios^{4,48,49}. La aceptación o negación del empleo de biosólidos como fertilizantes se basa en parámetros de seguridad,

como las características CRETIB (i.e. corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad, y riesgo biológico). En caso de que el biosólido no presente alguna de estas características, puede certificarse como inocuo para el suelo⁵². Las regulaciones sanitarias de este tipo tienen como objetivo primordial reducir el riesgo para la salud humana y el ambiente, con base en probabilidades de contaminación de recursos hídricos, cultivos y ecosistemas⁵⁰.

Abonos verdes

Los abonos verdes consisten en tejido vegetal verde incorporado en el suelo para corregir o mejorar características o propiedades físicas de este. Principalmente, se emplean cultivos de crecimiento rápido, como avena, vicia, trébol alejandrino, centeno o arvejas.^{53,54}

Los abonos verdes incrementan la cantidad de materia orgánica disponible en el suelo para el desarrollo de procesos metabólicos de la flora autóctona y otras especies vegetales. Al estar en contacto directo con la matriz del suelo, el material vegetal es susceptible de descomposición microbiana, que produce compuestos húmicos capaces de incrementar la capacidad de adsorción de nutrientes, promover el drenaje, la aireación y la granulación del suelo. Además, los productos de la descomposición sirven como sustrato para aquellos microorganismos encargados de procesos de transformación biológica. Estos procesos inciden positivamente sobre la producción de dióxido de carbono, amonio, nitritos, nitratos y otros compuestos simples, fácilmente asimilables por las plantas para su crecimiento y desarrollo^{8,11,13,54}.

La utilización de abonos verdes influye positivamente sobre ciertas características del suelo. Por ejemplo, conservan elementos nutritivos del suelo susceptibles de pérdida por drenaje de aguas. De otro lado, ciertos abonos verdes de raíces largas capturan nutrientes desde horizontes bajos del suelo y tienen la capacidad de transportarlos hacia la superficie, donde se incrementa su disponibilidad para el desarrollo de procesos metabólicos de las plantas⁸.

Finalmente, pueden realizarse aplicaciones combinadas de abonos verdes con insumos naturales para mejorar la estructura del suelo, minimizar procesos de erosión, incrementar la disponibilidad de agua en el suelo -minimizando la evaporación-. Por ejemplo, la fertilización mineral junto con abonos verdes incrementa los rendimientos por hectárea cultivada, impulsa el desarrollo de asociaciones micorrízicas, es fuente de nutrientes esenciales y constituye una vía para potenciar el desarrollo de propágulos de cepas de HMA (Hongos Micorrízicos Arbusculares)⁵³.

VENTAJAS DE USO DE FERTILIZANTES BIOLÓGICOS⁵⁵

- La movilización de nutrientes es favorecida por el desarrollo de actividad biológica en los suelos.
- El mantenimiento de la salud de las plantas se ve favorecido por la adición balanceada de nutrientes.

- Suministran alimento e impulsan el crecimiento de microorganismos y gusanos benéficos para el suelo.
- Debido a que brindan buena estructura al suelo, favorecen el crecimiento de raíces.
- El contenido de materia orgánica en el suelo es superior a los niveles normales.
- Se favorece el desarrollo de asociaciones de micorrizas, lo que incrementa la disponibilidad de fósforo (P) en el suelo.
- Ayudan a suprimir ciertas enfermedades plantulares y pueden brindar suministro continuo de micronutrientes al suelo.
- Contribuyen al mantenimiento de concentraciones de nitrógeno (N₂) y fósforo (P) estables, minimizando la lixiviación.
- Mejoran la capacidad de intercambio de nutrientes en el suelo, incrementan la retención de agua y promueven la agregación del suelo.

LIMITACIONES DE USO LOS FERTILIZANTES BIOLÓGICOS⁵⁵

- El compost presenta concentraciones altamente variables de nutrientes. Además, los costos de aplicación son superiores a los de algunos fertilizantes químicos.
- La aplicación extensiva o a largo plazo puede resultar en acumulación de sales, nutrientes o metales pesados que podrían causar efectos adversos sobre el crecimiento de las plantas, el desarrollo de organismos propios del suelo, la calidad de los recursos hídricos y la salud humana.
- Se requieren grandes volúmenes para su aplicación en el suelo, debido a los bajos contenidos de nutrientes, en comparación con fertilizantes químicos.
- Los principales macronutrientes podrían no estar disponibles en cantidades suficientes para el crecimiento y desarrollo de las plantas.
- Podrían presentarse deficiencias nutrimentales, causadas por la baja tasa de transferencia de los micronutrientes y macronutrientes.

RESULTADOS OBTENIDOS CON FERTILIZACIÓN BIOLÓGICA

En las últimas dos décadas, las actividades agrícolas basadas en la Agricultura de la Conservación (AC) se han hecho mayormente visibles en el mundo entero. Estas han permitido obtener resultados favorables sobre la productividad agrícola y la sostenibilidad de la agricultura, tanto en países tradicionalmente agrícolas como en aquellos que desarrollan la agricultura extensiva desde hace poco, o de manera aislada de otras actividades productivas.

El desarrollo de investigaciones enfocadas en la fertilización biológica ha incrementado en los últimos diez o quince años. La gran cantidad de publicaciones anuales de este tipo en revistas internacionales (e.g. *Scientia Horticulturae*, *Crop Production*, *Ciencia*

y *Tecnología Alimentaria, Bioresource Technology*) indica que hay un interés generalizado sobre el tema. Además, permite inferir que la formación de profesionales en este campo está en auge.

A continuación se presentan resultados de investigaciones nacionales e internacionales basadas en el uso de fertilizantes biológicos para la producción agrícola.

Morales y Alegre realizaron una investigación en la costa este de Perú, en la que se evaluó la influencia de abonos verdes (frijol Castilla y *Crotalaria sp.*), dosis variables de estiércol vacuno y compost a base de rastrojo de frijol, sobre el rendimiento de un cultivo de papa. Se obtuvieron rendimientos de 55 t/ha (i.e. toneladas por hectárea), 53 t/ha, 47.7 t/ha, 43.3 t/ha y 33.3 t/ha. Tales valores de productividad no se habían reportado con anterioridad para el cultivo de papa en el área de estudio. Ello verifica la eficiencia de los fertilizantes biológicos en la producción agrícola. De otro lado, algunas propiedades fisicoquímicas del suelo mejoraron y los impactos ambientales ocasionados por el uso continuo de fertilizantes químicos fueron mitigados progresivamente¹³.

Singh y Sharma evaluaron el crecimiento de judías en parcelas fertilizadas con vermicompost proveniente de la degradación de residuos sólidos municipales. Los autores emplearon lombrices del género *Eisenia Foetida*. El estudio fue realizado en Nueva Delhi por parte del Indian Institute of Technology (IIT). Los resultados obtenidos sugieren que la combinación de inoculantes microbiales (i.e. *P. sajor-caju*; *T. Haezianum* y *A. Chrocoocum*) con vermicompostaje tiene un efecto positivo sobre el proceso de crecimiento de los cultivos de judías. Se logró evidenciar el papel significativo que juegan los hongos sobre la velocidad de degradación de los residuos sólidos y la importante intervención de las bacterias en la fijación de nitrógeno atmosférico y consecuente transformación en formas nitrogenadas mayormente disponibles⁵⁶.

Rajendran y Devaraj, reportaron incrementos cercanos al 40% en los niveles de nutrientes fósforo y nitrógeno con el uso de las especies microbiales *Azospirillum*, *Phosphobacterion*, *AM* y *Frankia*, durante el crecimiento de pino Australiano (*Casuarina equisetifolia*). Los autores concluyeron que la fase de crecimiento del pino se ve afectada de forma positiva al incorporar inoculantes microbianos en el sustrato⁵⁷.

Por su parte, Berc, et al; identificaron que la utilización de lombrices del género *Eisenia Foetida* (i.e. Californiana Roja) en fertilización de cultivos de tabaco, cacao, café y arroz tiene un alto potencial para el desarrollo agrícola de zonas tropicales. En este sentido, los autores reportaron que el uso de la especie mencionada mejoró, en un 30%, el rendimiento de cultivos de papá, banano, tomate, ajo, café y cacao. De igual forma, la cantidad de fertilizantes químicos demandada fue reducida un 40%³⁰.

Alfonso, et al; emplearon fertilizantes minerales en un cultivo de tomate. Los autores reportaron ahorros de agua cercanos al 25%, 40% de ahorro en el uso de fitosanitarios, 25-30% de reducción del uso de fertilizantes minerales. Además, obtuvieron incrementos del 10% en el rendimiento por hectárea de cultivos tratados con micorrizas arbusculares (MA). La resistencia de las plantas frente a la acción de microorganismos patógenos fue superior con el empleo de MA³⁹.

El tratamiento de heces fecales vacunas por medio de digestión anaeróbica y aeróbica ha sido empleado como estrategia para el control biológico de especies de hongos, tal como lo reportan Kupper, et al. Los autores utilizaron el fertilizante biológico obtenido de la digestión biológica para controlar el crecimiento de la especie *Guignardia citricarpa*, que, durante años, incorporó manchas negras en las cáscaras de cítricos como la naranja, mandarina y limón. Se concluyó que el abono a base de estiércol es útil para el control biológico y para brindar mejores frutos, aptos para la comercialización y consumo⁵⁸.

Padilla, et al; reportaron incrementos cercanos al 36% en la producción de melón, a partir de la incorporación de micorrizas arbusculares en los cultivos. Obtuvieron, además, un ahorro del 100% en el uso de fertilizantes fosfóricos, 20% de ahorro en la fertilización potásica y nitrogenada, 25% de ahorro de agua y 100% de reducción del uso de fungicidas.

En este sentido, los autores concluyeron que las técnicas de acolchado de polietileno, junto con los inoculantes microbianos (i.e. probióticos) en el cultivo de melón, incrementan la proporción de micorrizas en el suelo e influyen favorablemente en la eliminación de hongos patógenos (e.g. *Alternaria*, *Fusarium* y *Rhizoctonia*)²³.

Classen, et al; cuantificaron el efecto del vermicompostaje –a base de excretas porcinas- sobre el crecimiento de nabos. Los investigadores tuvieron en cuenta la influencia de los regímenes pluviométricos y la cantidad de biofertilizante aplicada sobre el rendimiento por área cultivada. De esta forma, se identificaron incrementos en el tamaño de las hojas de los nabos y una mayor tasa de crecimiento de estos. El tamaño de fruto fresco obtenido con la técnica fue superior al promedio sin el tratamiento. Los autores concluyeron que el incremento en la productividad se multiplicó por un factor entre 2 y 5, que sugiere bondades de la aplicación en cultivos de zonas tropicales⁵⁹.

La respuesta del proceso fotosintético de plantas de café frente a la adición de fertilizantes biológicos ha sido evaluada por Gordillo, et al. Los autores emplearon técnicas fotoacústicas para comparar la actividad fotosintética de plantas tratadas con fertilizantes químicos y plantas tratadas con biofertilizantes de tipo microbial. El procedimiento consistió en aplicar luz blanca, de una lámpara artificial de xenón, sobre dos tratamientos de plantas de cafeto de 7 meses de edad, para evaluar la producción de oxígeno y energía almacenada. Para la valoración y seguimiento, se emplearon detectores fotoacústicos y fotobáricos. Al primer tratamiento se le aplicaron fertilizantes químicos, mientras que al segundo se le adicionaron fertilizantes biológicos. Los resultados indicaron que los fertilizantes biológicos favorecen el desarrollo de la actividad fotosintética, permitiendo que esta sea más rápida y minimizando el estrés en las plantas. Los autores concluyeron que los productos biológicos para la fertilización de cafeto son una alternativa sostenible y limpia, que puede ser replicada en otras zonas dedicadas al cultivo de café⁶⁰.

Gharib F, et al.; evaluaron el potencial de aplicación de compost y biofertilizantes en cultivos de orégano (*Majorana hortensis L.*). Los investigadores crearon un inóculo microbial con una mezcla *Azospirillum brasilienses*, *Azotobacter chroococcum*, *Bacillus polymyxa* y *B. circulans*. Los resultados indicaron que la utilización combinada de bio-

fertilizante en los cultivos brinda mejores rendimientos –superiores por un factor de dos- y mejores características físicas de las plantas que la utilización individual de bacterias fijadoras de nitrógeno o extractos de compost. Gharib F. *et al.* Concluyeron que la inoculación del orégano con 15% y 30% de extractos de compost y la mezcla de biofertilizantes tiene efectos benéficos sobre el crecimiento de las plantas, contenido de grasas y producción de materia seca, por efecto de estimulación hormonal y adición de nitrógeno combinado⁶¹.

Sierra y Moreno investigaron la viabilidad de crear prototipos de biofertilizantes a partir de bacterias nativas de un cultivo de arroz (*Oryza sativa*). La investigación se basó en la utilización de mezclas complejas de bacterias fijadoras de nitrógeno con sustancias húmicas (Polietilenglicol, Carbopol®) y quelatos. Se consideró la dosis de aplicación de las formulaciones y un tiempo cercano a tres meses de tratamiento. Los autores reportaron incrementos del 10% en la producción de una de las mezclas, pasando de 7625 kg/ha a 8500 kg/ha. La principal conclusión de la investigación versa sobre la importancia de aplicar biofertilizantes para obtener beneficios económicos e incrementos productivos y permitir, progresivamente, el desarrollo de la agricultura sostenible⁶².

El efecto de aplicar biofertilizantes comerciales de tipo microbial, fosfórico y cerealien® en cultivos de mandarina fue evaluado por Mohamedy y Ahmed. La investigación consistió en aplicar dosis variables de biofertilizantes individuales o combinaciones de estos en cultivos de mandarina. Las variables de respuesta evaluadas fueron el tipo y tamaño de los frutos, al igual que la presencia de enfermedades radiculares (i.e. pudrición de las raíces). De acuerdo con los autores, el empleo de fertilizantes biológicos, en combinación con ácidos húmicos, permite reducir la incidencia de enfermedades sobre las raíces en un 20%, al igual que incrementar la productividad en 15% y mejorar las características físicas de los frutos en cultivos de mandarina⁶³.

Bocchi y Malgioglio emplearon la cianobacteria acuática *Azolla-Anabaena* como fertilizante en cultivos de arroz del norte de Italia. Esta especie ha sido empleada con frecuencia en cultivos de arroz en diferentes regiones del mundo, especialmente en Asia. Para hacer seguimiento del proceso, se evaluó la dinámica de crecimiento de las plantas, la resistencia/tolerancia frente a bajas temperaturas y presencia de herbicidas en el sustrato. La investigación permitió obtener producciones de nitrógeno cercanas a 40 kg/ha, en un período de tres meses, y verificar incrementos en la tasa de crecimiento del arroz. Además, se evidenció la mayor resistencia de una de las especies –denominada Milán por los autores- frente a la presencia del herbicida propanil⁶⁴.

Thenmozhi, et al; cuantificaron el incremento en la producción de biomasa y crecimiento de las especies de arveja *Amaranthus* y *Hard*, al emplear biofertilizantes (i.e. mezcla de biogás, vermicompostaje, inóculos microbiales *Azospirillum* y *Pseudomonas* y combinación de estos). Se manejaron adiciones individuales o combinadas de los fertilizantes biológicos, y se obtuvieron resultados como: la aplicación de los fertilizantes biológicos en forma combinada es mucho más eficiente que de manera individual en términos de crecimiento de las especies vegetales. Además, el empleo de biogás y vermicompost permitió identificar mejor crecimiento de las plantas, con hojas y raíces grandes y saludables, y producción de biomasa, en un período de 20 días⁶⁵.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los fertilizantes biológicos brindan una amplia gama de posibilidades para el desarrollo de la agricultura conservativa (AC), en condiciones geográficas, económicas y culturales diversas. De esta manera, se pueden implementar técnicas de fertilización biológica de forma individual o combinada en cultivos de frutas, hortalizas, árboles maderables, etc. De forma paralela, es posible reducir el uso de insumos químicos para obtener buenos rendimientos en los cultivos.

Además, las técnicas de fertilización biológica constituyen importantes estrategias para el aprovechamiento eficiente y racional de los recursos agrícolas, sin necesidad de generar impactos ambientales adversos que puedan deteriorar los recursos hídricos, ecosistemas o la calidad de vida del ser humano.

De otro lado, los costos de producción y aplicación de fertilizantes biológicos son menores que los de fertilizantes químicos; por ello, se ha suscitado la aceptación de gremios de agricultores y particulares dedicados al aprovechamiento forestal y agrícola en diferentes regiones del mundo.

Se espera que se desarrollen más investigaciones enfocadas en identificar las ventajas y limitaciones de la fertilización biológica, a fin de reconocer las potencialidades, oportunidades y debilidades que las actividades agrícolas ostentan en el mundo.

De igual forma, se espera que las regulaciones normativas locales e internacionales controlen y verifiquen el uso y comercialización de compuestos químicos, como pesticidas, fertilizantes y plaguicidas, con el fin de mitigar los impactos ambientales asociados a las actividades de producción agrícola.

Para cumplir con los anteriores objetivos, se deberán desarrollar e implementar -en el mediano y largo plazo- proyectos, políticas y programas enfocados en el desarrollo sostenible de la agricultura.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al ingeniero Ambiental y Sanitario Marcos Antonio Carvajalino Fernández, egresado de la Universidad del Magdalena, por su colaboración en la revisión técnica y de estilo del presente artículo. Igualmente, agradecen al Grupo de Investigación en Residuos peligrosos y Sólidos Urbanos (GIRPSU), de la Universidad del Magdalena, por permitir el acceso a las bases de datos científicas Scielo®, Science Direct®, Proquest® y Ebrary®.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BENITEZ, José; VANEPI, Sandrine y BOT, Alexandra. Plantando conceptos y cosechando buenos resultados. *En: Leisa Revista de Agroecología*. Diciembre 2002. Vol. 18, no. 3, p. 6-9.

2. MORTE, Asunción; et al. Biofertilizantes de última generación. [En línea]. España: Universidad de Murcia, 2003. [Citado 27 de abril 2008]. URL disponible en: <[http://www.carm.es/neweb2/servlet/integra.servlets.Blob/AsuncionMorte.pdf?archivo=AsuncionMorte.pdf&tabla=archivos&campoclave=idarchivo&valorclave=20940&campoimagen=archivo&idtipo=60&rastro=c503\\$m4632](http://www.carm.es/neweb2/servlet/integra.servlets.Blob/AsuncionMorte.pdf?archivo=AsuncionMorte.pdf&tabla=archivos&campoclave=idarchivo&valorclave=20940&campoimagen=archivo&idtipo=60&rastro=c503$m4632)>
3. CHIRINOS, Jenny; LEAL, Ángel y MONTILLA, Joan. Uso de insumos biológicos como alternativa para la agricultura sostenible en la zona sur del Estado Anzoátegui. En: Revista Digital Ceniap Hoy. Mayo-agosto 2006. N° 11, p. 1-7.
4. RED CARREFOUR DE INFORMACIÓN Y ANIMACIÓN RURAL DE LA COMISIÓN EUROPEA. ¿Cómo se hace agricultura ecológica? Diseño de la finca y del cultivo. [En línea]. Valencia: CRIE, 2008. [Citado 26 de abril 2008] URL disponible en: <<http://www.crie.uji.es/agric/como.htm>>
5. CORPOICA; GOBERNACIÓN DE ANTIOQUIA y FAO. Manual de buenas prácticas agrícolas en la producción de frijol voluble. Medellín: FAO, 2007. 168 p.
6. RIVERA-CRUZ, María del Carmen. et al. Poultry manure and banana waste are effective biofertilizer carriers for promoting plant growth and soil sustainability in banana crops. En: Soil Biology & Biochemistry. December 2008. Vol. 40, no. 12, p. 3092-3095.
7. ÁLVAREZ, Cristian; et al. Impacto de fertilizantes biológicos sobre la productividad del cultivo de girasol. Córdoba, Argentina: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, 2007. 6 p.
8. PORCUNA, José Luis; et al. Agroecología y agricultura ecológica. Valencia, España: Servicio de Sanidad Vegetal, 2002. 3 p.
9. FUNDASES y ASOCOLFLORES. Biofertilizantes como alternativa nutricional en ornamentales. Santa Fé de Bogotá: FUNDASES, 2005. 16 p.
10. GONZÁLEZ MORENO, Fidel; ESCAMILLA PRADO, Esteban y LUNA, Antonio Crisóstomo. Una estrategia para lograr la sustentabilidad campesina. La recuperación del suelo. En: Leisa Revista de Agroecología. Diciembre 2002. Vol. 18, no. 3, p.17-19.
11. PLASTER, Edward. La ciencia del suelo y su manejo. Madrid: Thomson Editores, 2000, p. 248.
12. VANEGAS, Raúl. La transición: la búsqueda del cambio hacia sistemas sustentables de producción agropecuaria. En: Foro Agrario «Sistemas Agrícolas Sustentables». Quito: Universidad Central del Ecuador, 2003. p. 18-19.
13. ALEGRE, C. y MORALES, Felipe. Concepción y manejo del suelo en agroecología. Lima, Perú: [s.n], 2000.
14. FRESCO, Louise. Fertilize the plant, not the soil. En: UN Chronicle. Sept-Nov 2003. Vol. 40, no. 3, p. 62
15. ASERI, K. G.; et al. Biofertilizers improve plant growth, fruit yield, nutrition, metabolism and rhizosphere enzyme activities of Pomegranate (*Punica granatum* L.) in Indian Thar Desert. En: Scientia Horticulturae. 2008. Vol. 117, no. 2, p.130-135.

16. KOWALCHUK, George A.; et al. Molecular Analysis of Ammonia-Oxidizing Bacteria of the β -Subdivision of the Class Proteobacteria in Compost and Composted Materials. En: *Applied and Environmental Microbiology*. 1999. Vol. 65, no. 2, p. 396-403.
17. ARAUJO, Yelinda; LUIZAO, Flavio y BARROS, Eleusa. Effect of earthworm addition on soil nitrogen availability, microbial biomass and litter decomposition in mesocosms. En: *Biology and Fertility of Soils*. 2004. Vol. 39, no. 3; p. 146-152.
18. SESSITSCH A. et al. Advances in Rhizobium research. En: *Critical Reviews in Plant Sciences*. 2002. Vol. 21, no. 4, p. 323-328.
19. STAMFORD, N.P.; et al. Agronomic effectiveness of biofertilizers with phosphate rock, sulphur and *Acidithiobacillus* for yam bean grown on a Brazilian tableland acidic soil. En: *Bioresource Technology*. 2007. Vol. 98, no. 6, p. 1311-1318.
20. LÓPEZ GUTIÉRREZ, Juan Carlos; TORO, Marcia y LÓPEZ HERNÁNDEZ, Danilo. Micorrizas arbusculares y actividades enzimáticas en la rizósfera de *Trachypogon plumosus* Ness en tres sabanas de suelos ácidos. En: *Acta Biológica Venezolana*. 2001. Vol. 21, no. 2, p. 49-57.
21. GUERRA SIERRA, Beatriz Elena. Micorriza arbuscular. Recurso microbiológico en la agricultura sostenible. En: *Tecnología en Marcha*. Enero-marzo 2008. Vol. 21, no. 1, p. 191-201.
22. AMERICAN/WESTERN FRUIT GROWER. Mycorrhiza. En: *Western Fruit Grower, Career and Technical Education*. 2003. Vol. 119, no. 3, p. 12.
23. PADILLA, Erik; et al. Efecto de biofertilizantes en cultivo de melón acolchado con polietileno. En: *Revista Fitotecnia Mexicana*. 2006. Vol. 29, no. 4, p. 321-329.
24. SALINAS, Jaime; et al. Efectos de la labranza y biofertilización en propiedades del suelo que afectan la sostenibilidad de la producción de frijol. En: *Ciencia y Tecnología Alimentaria*. 2005. Vol. 5, no. 1, p. 30-34.
25. COKER, Craig. Environmental remediation by composting. En: *Biocycle*. Vol. 47, no. 12, p. 18-23.
26. PEIGNÉ, Joséphine and GIRARDIN, Philippe. Environmental impacts of farm – scale composting practices. En: *Water Air Soil Pollution*. 2004. Vol. 153, no. 1-4, p. 45-68.
27. TOGNETTI, C.; et al. Composting vs. vermicomposting: A comparison of end product quality. En: *Compost Science & Utilization*. 2005. Vol. 3, no. 1, p. 6-13.
28. PETIOT, C. y GUARDIA, A. Composting in a Laboratory Reactor: A review. En: *Compost Science & Utilization*. 2004. Vol. 12, no. 1, p. 69-79.
29. MILLS, Tessa. Composting cafeteria residuals with earthworm. En: *Biocycle*. 2006. Vol. 47, p. 54-55.
30. BERC, Jeri; MUÑIZ, Olegario y CALERO, Bernardo. Vermiculture offers a new agricultural paradigm. En: *Biocycle*. 2004. Vol. 45, no. 6, p. 57.
31. CHHOTU, Jadia y FULEKAR, M. Vermicomposting of vegetal waste: a bio-physicochemical process based on hydro-operating reactor. En: *African Journal of Biotechnology*. 2008. Vol. 7, no. 20, p. 3723-3730.

32. REDDY, K. y SHANTARAM, M. Potentiality of earthworms in composting of sugarcane byproducts. En: Asian Journal of Microbiology Biotechnology and Environmental Sciences. 2005.Vol. 7, no. 3, p.483-487.
33. TOGNETTI, C.; et al. Composting vs. vermicomposting: A comparison of end product quality. En: Compost Science & Utilization. 2005.Vol. 3, no. 1, p. 6-13.
34. BERC, Jeri; MUÑIZ, Olegario y CALERO, Bernardo. Vermiculture offers a new agricultural paradigm. En: Biocycle. 2004.Vol. 45, no. 6, p. 56
35. ROSSET, Peter. Alternative Agriculture Works: the case of Cuba. En: Monthly Review. 1998. Vol. 50, no. 3, p. 137-146.
36. ROBERTS, Paula; EDWARDS-JONES, Gareth; JONES, David L. Yield responses of wheat (*Triticum aestivum*) to vermicompost. En: Compost Science & Utilization. 2007.Vol. 15, no. 1, p.6-15.
37. ROLLI, Uwe. Microorganismos efectivos EM en la agricultura. [En línea]. Yucatán, México: Ecologic Mantencances, 2007. [Citado 3 de marzo 2008]. URL disponible en: <<http://www.emyucatan.com>>
38. ALFONSO, Elein; LEYVA, Ángel y HERNÁNDEZ, Annia. Microorganismos benéficos como biofertilizantes eficientes para el cultivo de tomate (*Lycopersicon esculentum*, Mill). En: Revista Colombiana de Biotecnología. 2005. Vol. 2, no. 2, p. 47-54.
39. WELBAUM, Gregory; et al. Managing Soil Microorganisms to Improve Productivity of Agro-Ecosystems. En: Critical Reviews in Plant Sciences. ProQuest Biology Journals. 2004.Vol. 23, no. 2, p. 179.
40. ARANDA, Elisabeth; et al. Disminución por hongos saprobios de la fitotoxicidad del alpeorajo seco y extractado. Optimización de su uso como fertilizante biológico y para control de hongos fitopatógenos. CAO01-008. Granada, España: Departamento de Microbiología del suelo y sistemas Simbióticos, 2005. p. 1-3.
41. VALENCIA CANTERO, Eduardo y PEÑA CABRIALES, Juan José. El suelo y sus habitantes microbianos: consideraciones ecológicas. En: Avance y perspectiva. 2001.Vol. 20, p. 401-406.
42. FAGGIOLI, Valeria; et al. Fertilizantes biológicos en maíz.: ensayo de inoculación con cepas de *Azospirillum brasilense* y *Pseudomonas fluorescens*. Córdoba, Argentina: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, 2003. p. 4.
43. CHRISTRY, M. y RAMALIGAM, R. Vermicomposting of sago industrial soil waste using epigeic earthworm *Eudrilus eugeniae* and macronutrients analysis of vermicompost. En: Asian Journal of Microbiology Biotechnology and Environmental Sciences. 2005.Vol. 7, no. 3, p. 377-381.
44. SUTHAR, S.; et al. Vermicomposting of kitchen waste by using *Eisenia foetida* (SAVIGNY). En: Asian Journal of Microbiology Biotechnology and Environmental Sciences. 2005.Vol. 7, no. 3, p.541-544.
45. CANALES LÓPEZ, Benito. Uso de los derivados de algas marinas en la producción de papa. Tomate, chile y tomatillo: Resultados de investigación. Coahuila: Palau Bioquím S.A., 2001. 24 p.

46. CANALES LÓPEZ, Benito. Enzimas-algas: posibilidades de su uso para estimular la producción agrícola y mejorar los suelos. En: Terra Latinoamericana. 1999. Vol. 17, no. 3, p.271-276.
47. PAINTER, T. J. Biofertilizers: exceptional calcium binding affinity of a sheath proteoglycan from the blue-green soil alga *Nostoc calcicola*. En: Carbohydrate Polymers. 1995. Vol. 26, no. 3, p.231-233.
48. EDDY, D. Eye on micronutrients: There are plenty of materials you can use to fertilize your crops. Here's a look at what's hot. En: American Vegetable Grower. 1999. Vol. 47, no. 1, p.48-49.
49. LUÉVANO GONZÁLEZ, Armando y VELÁZQUEZ GÁLVEZ, Noel Enrique. Ejemplo singular en los agronegocios. Estiércol vacuno: de problema ambiental a excelente recurso. En: Revista Mexicana de Agronegocios. 2001. Vol. 9, p. 306-320.
50. DÁGUER, Gian Paolo. Gestión de biosólidos en Colombia. En: Congreso Internacional de ACODAL "Sociedad, Ambiente y Futuro" (46: 29-31, octubre: Santiago de Cali, Colombia). Memorias. Cali: ACODAL, 2004. p. 2.
51. CELIS, José; et al. Effect of sewage sludge and salmon wastes applied to a Patagonian soil on lettuce (*Lactuca Sativa L.*) germination. En: Journal of Soil Science and Plant Nutrition. 2006. Vol. 6, no.3, p. 13-25.
52. JURADO GUERRA, Pedro; LUNA LUNA, Miguel y BARRETERO HERNÁNDEZ, Rodolfo. Beneficial use of biosolids as organic fertilizers in arid and semiarid rangelands. Técnica Pecuaria en México. 2004. Vol. 42, no. 3, p.379-395.
53. MARTÍN, Gloria M.; et al. Crop rotation of canavalia ensiformis green manure of maize and arbuscular mycorrhize in an eutric rodic nitisol of Cuba. En: Agronomía tropical. 2007. Vol. 57, no. 4, p. 313-321.
54. BUNCH, Roland. El uso de abonos verdes por agricultores campesinos: lo que hemos aprendido hasta la fecha: informe técnico N°3. 2ª ed. Honduras: Fundación Interamericana, 1994. p. 1
55. CHEN, Jen-Hshuan. The combined use of chemical and organic fertilizers and/or biofertilizer for crop growth and soil fertility. International Workshop on Sustained Management of the Soil-Rhizosphere System for Efficient Crop Production and Fertilizer Use. Taiwan: National Chung Hsing University, 2006. 11 p.
56. SINGH, Anshu y SHARMA, Satyawati. Effect of microbial inocula on mixed solid waste composting, vermicomposting and plant response. En: Compost Science & Utilization. 2003. Vol. 11, no. 3, p.190-199.
57. RAJENDRAN, K. y DEVARAJ, P. Biomass and nutrient distribution and their return of *Casuarina equisetifolia* inoculated with biofertilizers in farm land. En: Biomass and Bioenergy. 2004. Vol. 26, no. 3, p. 235 –249.
58. KUPPER, K. C.; et al. Biofertilizer for control of *Guignardia citricarpa*, the causal agent of citrus black spot. En: Crop Protection. 2006. Vol. 25, no. 6, p. 569-573.
59. CLASSEN, Jhon; RICE, Mark y SHERMAN, Rhonda. The effects of vermicompost on field turnips and rainfall runoff. En: Compost Science & Utilization. 2007. Vol. 15, no. 1, p. 34-39.

60. GORDILLO, Fernando; et al. Análisis de la Actividad Fotosintética de Plantas de Café Utilizando la Técnica Fotoacústica. En: Revista Colombiana de Física. 2008. Vol. 40, no. 1, p. 186-189.
61. GHARIB, Fatma A.; MOUSSA, Lobna A. AND MASSOUD, Osama N. Effect of Compost and Bio-fertilizers on Growth, Yield and Essential Oil of Sweet Marjoram (*Majorana hortensis*) Plant. En: International Journal of Agriculture & Biology. 2008. Vol. 10, no. 4, p. 381-387.
62. ROJAS SIERRA, Johanna y MORENO-SARMIENTO, Nubia. Producción y formulación de prototipos de un biofertilizante a partir de bacterias nativas asociadas al cultivo de arroz (*Oryza sativa*). En: Revista Colombiana de Biotecnología. 2008. Vol. 10, no. 2, p. 50-62.
63. MOHAMEDY, El and AHMED, M.A. Effect of Biofertilizers and Humic Acid on control of Dry Root Rot Disease and Improvement Yield Quality of Mandarin (*Citrus reticulata* Blanco). En: Research Journal of Agriculture and Biological Sciences. 2009. Vol. 5, no. 2, p. 127-137.
64. BOCCHI, Stefano y MALGIOGLIO, Antonino. Azolla-Anabaena as a Biofertilizer for Rice Paddy Fields in the Po Valley, a Temperate Rice Area in Northern Italy. En: International Journal of Agronomy. 2010. Vol. 2010. p. 1-5.
65. THENMOZHI, R.; et al. Study on Effectiveness of Various Biofertilizers on the Growth & Biomass Production of Selected Vegetables. En: Research Journal of Agriculture and Biological Sciences. 2010. Vol. 6, no. 3, p. 296-301.