

ESTUDIO DE LA MOVILIDAD DE NPK EN LOS BIOSÓLIDOS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PTAR SALITRE, TRATADOS CON VERMICOMPOSTAJE

Álvaro Chávez Porras, Doctor en Ingeniería Civil, alvaro.chavez@unimilitar.edu.co
Ximena Loaiza Echeverry, Ingeniera Química, ximena.loaiza.e@gmail.com

Universidad Militar Nueva Granada, Especialización en Planeación Ambiental y Manejo Integral de Recursos Naturales, Bogotá 2014

RESUMEN

La sobreproducción de lodos como subproducto del tratamiento de aguas residuales industriales, representa una problemática que va en aumento. Una alternativa para reciclar y reincorporar estos biosólidos a la cadena productiva, consiste en aprovecharlos como enmienda de suelos y abonos orgánicos, gracias a la riqueza mineral de su composición. En el presente estudio, se realizó una revisión bibliográfica sobre las diversas investigaciones que se han desarrollado en torno a determinar la viabilidad del uso de este subproducto en aplicaciones agrícolas, después de ser tratado con vermicompostaje. Asimismo, se compararon las características fisicoquímicas del lombricompost obtenido a partir de biosólidos de la PTAR Salitre, con las de abonos orgánicos comerciales. Se concluyó que aunque la lombricultura es una técnica adecuada para la estabilización de los biosólidos de PTARs, que promueve la concentración de macronutrientes fundamentales para las plantas como N, P y K, no es suficiente para lograr una composición microbiológica ideal del producto final, que cumpla con los estándares internacionales para ser empleado como abono orgánico en el cultivo de hortalizas.

Palabras Clave: biosólidos, vermicompostaje, NPK, Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Salitre.

ABSTRACT

Overproduction of sewage sludge, as byproduct of industrial wastewater treatment, represents a problem that grows every day. Using these biosolids as soil amendment and organic fertilizer, is an alternative to recycle and reintroduce the sewage sludge to the supply chain, thanks to its rich mineral composition. The aim of this study was to conduct a literature review on the investigations on determining the feasibility of using this product in agricultural applications, after being treated with vermicomposting. Also, the physicochemical characteristics of vermicompost obtained from El Salitre WWTP biosolids with those of commercial organic fertilizers were compared. It was concluded that although vermicomposting is a suitable technique for stabilizing WWTP biosolids, which promotes the concentration of essential macronutrients for plants as N, P and K, it is not enough to achieve an ideal microbiological composition of the final product, which reaches the standards for use as organic fertilizer in vegetable cultivation.

Key words: biosolids, vermicomposting, NPK, Waste Water Treatment Plant (WWTP) Salitre.

INTRODUCCIÓN

La sobreproducción de residuos sólidos municipales tanto en Latinoamérica como en Colombia, es un tema preocupante que se ha ido agudizando de la mano de la urbanización, industrialización y el crecimiento de la economía [11]. En términos ambientales, este fenómeno tiene una relación directa con la contaminación del recurso hídrico, aire, suelo y paisaje; sin embargo, su protección se ve frenada por las limitaciones de orden institucional, de legislación ambiental y financieras. Se hace inminente entonces la necesidad de desarrollar procesos productivos más limpios, así como programas de recuperación, reúso y reciclaje

de los RSM¹. Para ello se debe realizar una gestión integral sobre todo el proceso de tratamiento que involucre la ubicación para la disposición final de los residuos, lugares de almacenamiento, estaciones de transferencia, plantas de tratamiento, recuperación, recolección y transporte [11].

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales PTAR Salitre, es un complejo tecnológico ubicado al noroccidente de Bogotá, que trabaja para la recuperación y saneamiento del río Bogotá. En ella se procesan aguas residuales generadas por más de 2

¹ Residuos Sólidos Municipales.

millones de personas. La planta emplea un proceso de tratamiento primario químicamente asistido, obteniendo remociones del 40% de materia orgánica y 60% de sólidos suspendidos totales. Uno de los productos de este proceso son los lodos, los cuales se deshidratan y convierten en más de 4.000 toneladas mensuales de biosólidos. De acuerdo con su origen principalmente doméstico, así como el alto contenido de nitratos y fosfatos, dichos biosólidos se catalogan según la USEPA² como Clase B; esto significa que son aptos para uso directo en reforestación [10].

Un grupo de investigación del Departamento de Ingeniería Industrial de la Universidad Militar Nueva Granada, dedicado al tratamiento de residuos sólidos orgánicos a través de sistemas de lombricultura, tiene como propósito realizar una caracterización del biosólido de la PTAR Salitre y del humus producido a partir de su tratamiento, para determinar la viabilidad de su implementación en el cultivo de hortalizas para consumo humano [9].

Desde esa perspectiva, el presente trabajo tiene como finalidad contribuir a la investigación en mención³, realizando una revisión bibliográfica de la literatura y estudios publicados sobre los procesos de tratamiento de los biosólidos, el vermicompostaje, las reacciones metabólicas que influyen en el procesamiento de NPK, y ejemplos de otras plantas de tratamiento donde el residuo sólido tratado se destina al uso agrícola. También se revisará la composición de los abonos comerciales y su eficiencia, para finalmente concluir sobre la conveniencia del humus de la PTAR para cultivo hortalizas.

METODOLOGÍA

Revisión bibliográfica

Con el fin de cumplir con los objetivos del presente proyecto, se realizó una búsqueda de información específica sobre los siguientes temas:

- Biosólidos y sus tipos de tratamiento.

- Vermicompostaje y composición fisicoquímica del humus producido a partir de biosólidos por medio de esta técnica.
- Procesos químicos de mineralización de los suelos.
- Estado del arte sobre la implementación del humus generado a través del tratamiento con lombriz Roja Californiana de los biosólidos de la PTAR Salitre, en el cultivo de hortalizas.

Para ello se realizó una búsqueda online de artículos científicos reportados por universidades nacionales, textos académicos y publicaciones en revistas internacionales de ciencia, a través de la base de datos de la plataforma de *Science Direct*.

Visita a plantas

Para complementar el entendimiento sobre los procesos de tratamiento de aguas residuales y la generación de biosólidos, se realizó una visita guiada a la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Salitre (PTAR Salitre).

Así mismo, se visitó la empresa de Lombricultura de Tenjo, ubicada a 35 minutos de Bogotá, con el fin de visualizar la producción de humus a partir de desechos orgánicos con la técnica de vermicompostaje.

Por último, en varias tiendas de agroinsumos, se recogieron fichas técnicas para examinar la composición fisicoquímica de los humus y abonos para hortalizas más exitosos del mercado. Con ello se pudieron comparar sus características nutricionales, con las del vermicompost analizado en el presente proyecto.

Diagnóstico

Con base en la información reportada en la revisión bibliográfica, la consulta a expertos en las visitas y la normatividad ambiental nacional e internacional sobre el manejo de biosólidos, se realizó un completo análisis que permitió determinar la viabilidad del uso de humus producido en la PTAR Salitre, en cultivos de hortalizas para consumo humano y aportar a la investigación en desarrollo de la Universidad Militar Nueva Granada.

² United States Environmental Protection Agency.

³ Este artículo hace parte del proyecto ING 1651 de la Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá D.C., Colombia.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características de los biosólidos

De acuerdo con el Título E del Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS-2000, se entiende por agua residual, *toda aquella que contiene material disuelto y en suspensión, luego de ser usada por una comunidad o industria*. Específicamente, las aguas residuales municipales, consideran *las de origen doméstico, comercial e institucional que contienen desechos humanos* [1].

Existen en la actualidad diversas tecnologías para el tratamiento de aguas residuales, que van desde el convencional hasta el terciario y avanzado, y que varían en complejidad y costos. Todos ellos sin embargo, se pueden definir como un conjunto de procesos físicos, químicos y microbiológicos que buscan remover basuras, sólidos suspendidos y agentes patógenos, presentes en las aguas residuales municipales. Estos procesos suelen llevarse a cabo en Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTARs), en las que se obtiene agua tratada y subproductos como los lodos de depuración y el biogás [2].

Mahamud et al. (1996) establecen que los lodos se producen de manera inherente al proceso de depuración de aguas residuales y los define como *cualquier sólido, semi-sólido o líquido de desecho generado por una planta municipal, comercial o industrial de tratamiento de aguas residuales, de aguas de consumo o instalaciones de control de la contaminación atmosférica u otra clase de desechos de similares características y efectos* [3].

El lodo puede catalogarse como crudo, es decir, lodo proveniente de la decantación primaria; estabilizado, que pasó por un proceso de tratamiento adicional para evitar la putrefacción y atracción de vectores; higienizado, aquel que se procesó para matar agentes patógenos; y lodo no peligroso, como el que debido a sus características de toxicidad, reactividad, inflamabilidad o corrosividad, no representa ningún tipo de peligro [2] y [4].

Según la USEPA, los biosólidos, son *lodos orgánicos generados a partir del tratamiento de aguas residuales de origen doméstico, que se someten a un proceso de estabilización; tienen un alto contenido de materia orgánica y nutrientes, lo*

cual representa una oportunidad para reintegrarlos a la cadena trófica [8].

A pesar de que los biosólidos no son considerados sustancias tóxicas ni peligrosas, no pueden emplearse directamente en actividades agrícolas por ejemplo, debido a que contienen una serie de contaminantes que obligan a su tratamiento. Dentro de dichos contaminantes se consideran principalmente metales pesados, materia orgánica e inorgánica, agentes patógenos y contaminantes orgánicos [5].

Los metales pesados están presentes en concentraciones bajas en las aguas residuales domésticas y altas en aguas provenientes de la actividad industrial; los más comunes son Zn, Cu, Cd, Ni, Pb, Cr y Hg. Su peligrosidad radica en la posible bioacumulación en tejidos humanos y biomagnificación dentro de la cadena trófica [5].

Los nutrientes y materia orgánica en altas concentraciones se consideran problemáticos debido a su potencial de eutroficación en cuerpos de agua superficial y subterránea; sin embargo, en las proporciones adecuadas, pueden aportar propiedades fertilizantes [5].

La presencia de agentes patógenos, tales como virus, bacterias, protozoos, tremátodos, cestodos y nematodos, se asocia directamente con afectaciones a la salud humana y animal que pueden causar enfermedades graves e incluso la muerte. Los patógenos presentes en aguas residuales, provienen típicamente de residuos animales, desechos hospitalarios y funerarios [5].

La estabilidad en la estructura molecular de contaminantes orgánicos como plaguicidas, solventes, colorantes, tensoactivos y plastificantes, los hacen poco solubles en agua y de fácil acumulación en los lodos. Estas sustancias tóxicas generan gran afectación sobre el medio ambiente puesto que son difíciles de degradar, generando un riesgo de reincorporación a la cadena alimenticia a través del sistema suelo-planta-agua [5].

Debido a esta problemática, en muchos países la solución para la gran producción de biosólidos se limita a una disposición final a través de incineración, vertido controlado en rellenos sanitarios e incluso vertido en el mar. Afortunadamente, diversas investigaciones llevaron a la USEPA a la conclusión de que el reciclaje de estos lodos representa una solución ambientalmente

responsable, lo cual ha incentivado a numerosas empresas a invertir en un proceso que genere menor impacto sobre los ecosistemas. Sin embargo, la decisión sobre cuál de estas opciones seguir, sigue siendo un asunto local [5].

Tratamientos de los biosólidos

Existen diversas alternativas para el procesamiento y posterior aprovechamiento de los biosólidos; la elección entre uno u otro, depende directamente de la calidad del agua residual, el tipo de tratamiento de la PTAR y su composición físicoquímica y microbiológica [5].

Dentro de los tratamientos de biosólidos reportados en la literatura, cuyo propósito principal se centra en la destrucción de virus, bacterias y olores desagradables, Ozores-Hampton y Méndez (2010) recopilaron los siguientes.

Digestión anaeróbica: es la técnica con la que se trata el mayor porcentaje de los biosólidos a nivel mundial; consiste en emplear bacterias anaeróbicas que procesan el material al interior de un contenedor libre de oxígeno (digestor), mediante un proceso de fermentación en el que se libera metano (biogás), fibra y aguas residuales [7].

Digestión aeróbica: similar a la digestión anaeróbica, este tratamiento utiliza bacterias que en ambientes ricos en oxígeno –tales como lagunas o tanques con aireación natural o mecánica-, descomponen la materia orgánica [7].

Compostaje: realiza una descomposición biológica del material, empleando microorganismos que digieren las sustancias orgánicas complejas y producen humus rico en nutrientes inorgánicos. Para que la descomposición se lleve a cabo, el material a descomponer debe tener una alta carga de carbono; para esto se requiere la presencia de biosólidos o la mezcla de estos con residuos maderosos, de poda, rastrojos de cosecha, restos de alimentos, entre otros. El compostaje se puede realizar de múltiples formas; los procesos más conocidos comprenden el sistema *in-vessel* (aireación forzada y volteo mecánico), *pilas estáticas* (aireación forzada sin volteo), ó *windrows* (aireación y agitación periódicas) [7].

Tratamiento térmico: por medio de secadores activos o pasivos, se somete a los biosólidos a un proceso de secado durante determinado periodo en el que las altas temperaturas, contribuyen a la destrucción de agentes patógenos [7].

Alcalinización con cal: la adición de cal viva (CaO) a los biosólidos, busca elevar su pH hasta un valor en el que se genere un ambiente que mata o retarda las reacciones microbianas que causan olores y atraen vectores. pH muy altos generan además un proceso de destrucción celular para los agentes patógenos [6].

Secado con aire: sobre camas de arena o pavimento, se extienden los biosólidos durante periodos de 3 meses, manejando temperaturas superiores a 0°C [7].

Clasificación y alternativas de uso de los biosólidos

A pesar de que actualmente Debido a la ausencia sobre normatividad para disposición y reutilización de biosólidos generados en las PTARS de Colombia, se debe recurrir a la norma internacional USEPA 40 CFR 503 [8], en la cual se clasifican los biosólidos según su composición (metales pesados y patógenos) y espectro de uso.

Los biosólidos Clase A, son aquellos de *calidad excepcional*, es decir, que han sido sometidos a tratamientos desinfectantes que garantizan la reducción de agentes patógenos hasta niveles no detectables (ver Anexo A.1. Tabla 6). Este tipo de biosólidos pueden emplearse casi sin restricciones de sitio de aplicación, únicamente solicitando los permisos para garantizar el cumplimiento de la norma [5]; dependiendo del uso que se les dé, podrían requerir monitoreo continuo para garantizar que no se presente recrecimiento de bacterias [6].

Por el contrario, los biosólidos Clase B según la USEPA, requieren tratamiento y están sujetos a mayores restricciones para su aplicación en agricultura; esto se debe a que presentan concentraciones mayores de microorganismos. La Clase B de biosólidos tiene un uso extremadamente restringido para cultivos de hortalizas. Su principal aplicación se hace en revegetalización de suelos [7].

De acuerdo con Rámila y Rojas (2008), se han descubierto diversos usos potenciales para los biosólidos, alternativos a las actividades agrícolas; la mayoría aún están en proceso de investigación. Entre ellos se destacan el reuso silvoagrícola, la recuperación de pasivos ambientales, la producción de energía y la fabricación de ladrillos [4].

Su empleo en plantaciones forestales se ha reportado como exitoso en diversas investigaciones, dada la altísima carga de nutrientes que contienen. Sin embargo, tanto este uso como el agrícola implican

esperar largos periodos entre una aplicación y otra, lo cual frente a su producción constante, podría resultar poco efectivo [4]. En el tema energético, los procesos de incineración y co-incineración, tanto para la de disposición final del residuo como para la producción de biogás, constituyen una opción rentable aunque no muy amigable con el medio ambiente [4]. La fabricación de ladrillos a partir de biosólidos es todo un hecho en China y a pesar de que en otros países apenas se están haciendo las pruebas para verificar el cumplimiento normativo, ésta podría ser una alternativa muy promisoriosa [4].

Biosólidos de la PTAR de Salitre

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Salitre, ubicada a las afueras de Bogotá, recibe a diario un caudal de $4 \text{ m}^3/\text{s}$ de aguas residuales municipales, provenientes de la cuenca norte de la ciudad, que cuenta con más de dos millones de habitantes. Estas aguas son procesadas mediante un tratamiento primario, que se resume en el siguiente esquema:

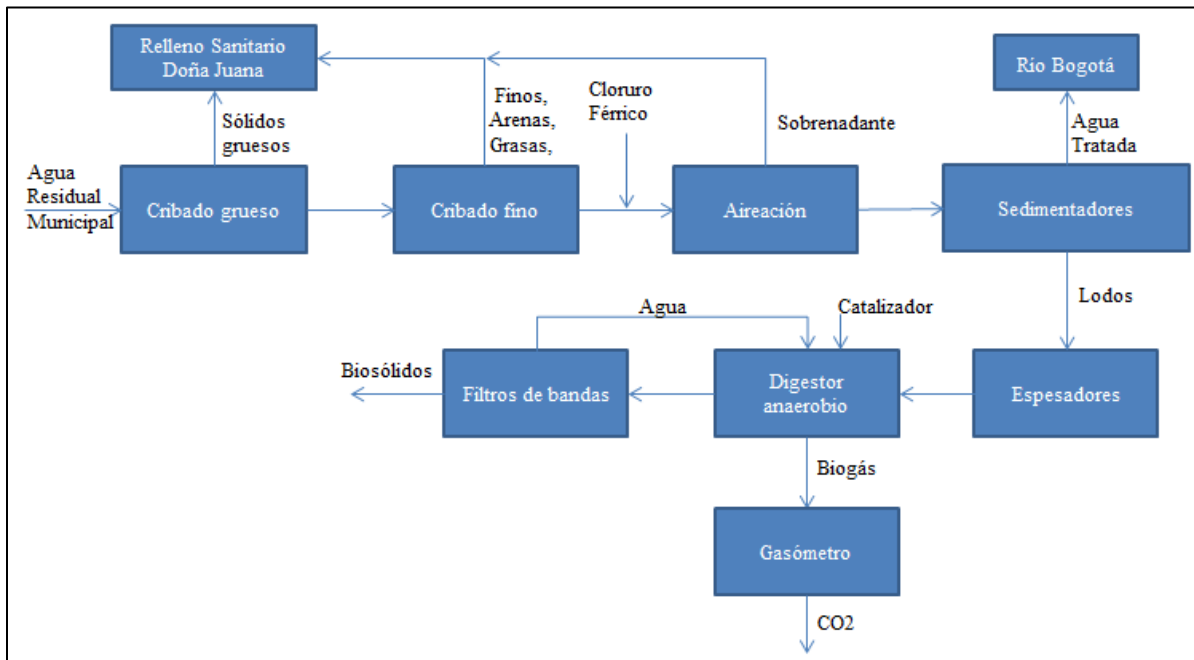


Figura 1. Esquema de tratamiento de aguas residuales de la PTAR de Salitre

Tal como se observa en la Figura 1, los lodos de depuración producidos durante la sedimentación, son tratados en un digestor tipo Reactor UASB. Allí, bacterias anaerobias crecen por la ausencia de oxígeno y digieren el lodo; para garantizar su supervivencia y rendimiento se opera el reactor a una temperatura de 37°C durante entre 17-22 días. Este proceso permite la eliminación de algunos organismos patógenos y produce gas metano como resultado del proceso metabólico de las bacterias, así como biosólidos con un alto grado de humedad. Tras finalizar esta etapa, los biosólidos se deshidratan en filtros de bandas (hasta una humedad del 30%) y las bacterias anaerobias mueren al estar en contacto con el aire.

En total, la PTAR de Salitre produce 165 toneladas de biosólidos por día, catalogados como Clase B, según las pruebas rutinarias que se le practican en el laboratorio del Acueducto de Bogotá. La mayor parte de este lodo deshidratado que sale de la PTAR, se emplea actualmente para procesos de revegetalización y restauración de suelos en terrenos de la localidad de Bosa, ubicados a las afueras de la ciudad.

Como un proyecto a futuro, la PTAR de Salitre espera implementar un tratamiento secundario que permita no sólo alcanzar una mejor calidad del agua tratada, sino también la producción de biosólidos de Clase A, que puedan emplearse directamente en cultivos agrícolas cumpliendo con las normas de la USEPA.

Características e insumos del vermicompostaje

Domínguez y Pérez-Díaz (2011), definen la vermicultura como la cría de lombrices de tierra en residuos orgánicos, y vermicompostaje como el manejo de residuos orgánicos por medio de lombrices. Este último es considerado como un método de *conversión de material sólido orgánico en productos medioambientalmente adecuados y valorizables como enmienda orgánica para cultivos* [12]. Dicha técnica, empleada desde la década de los 70's en Estados Unidos, es considerada actualmente como una ecotecnología limpia, que no genera impacto ambiental y cuyos costos de implementación y mantenimiento resultan muy bajos [12].

El vermicompostaje es una solución real al problema de disposición final de residuos sólidos orgánicos, cuyo crecimiento se está acelerando con el tiempo e incremento de la población mundial. Las principales ventajas de su implementación, consisten en eliminar residuos orgánicos nocivos, generar un producto final de enorme utilidad para la enmienda orgánica del suelo y como abono químico potencial, y producir una gran biomasa de lombrices que sirven para alimentación animal (avícola, porcino y piscícola) [12].

Por siglos, las lombrices han procesado toneladas de material, que posteriormente es revertido a la tierra a través de deyecciones. Estos organismos son sinónimo de tierra vegetal, productividad, fertilidad, mejoramiento y remediación. Han sido empleadas con éxito en el tratamiento de residuos de alimentos, destilería, industria de papel, estiércol de animales, entre otros. En el proceso de vermicompostaje, desempeñan un rol fundamental para la fragmentación y acondicionamiento del sustrato, que incrementa la superficie para la actividad microbiológica y por ende, genera mayor descomposición; las lombrices “muelen” la materia orgánica, alterando sus propiedades físicas, químicas y microbiológicas, reduciendo su relación C:N y homogenizando el material [12].

Como producto final del vermicompostaje, se obtiene un compuesto muy similar al humus – denominado vermicompost- que se caracteriza por tener una baja relación C:N, alta porosidad y capacidad de retención de agua. Este material es además rico en materia orgánica y tiene gran parte

de los nutrientes de forma accesible para las plantas [12].

Las lombrices modifican las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas de la materia orgánica a través de tres actividades vitales: alimentación, enterramiento y excreción. Dentro de dichos cambios se destacan la mejora de la agregación, estabilidad y porosidad del material. Para ello, las lombrices *alteran el ciclo de los nutrientes (N y P principalmente), la tasa de descomposición de la materia orgánica, y la disponibilidad de los nutrientes para las plantas a través de distintas formas químicas. Igualmente, cambian el pH del suelo, la dinámica de la materia orgánica en términos cualitativos y cuantitativos, la presencia de microorganismos descomponedores, la producción de enzimas y reguladores de crecimiento vegetal, así como la abundancia de biomasa y diversidad de microflora y microfauna* [12].

De los tres grandes grupos taxonómicos de lombrices que albergan más de 7.000 especies, las especies epigeas son las más adecuadas para el vermicompostaje. Entre las características que las hacen idóneas para este fin, se consideran la capacidad de colonizar residuos orgánicos de forma espontánea, la alta tasa de consumo, la digestión y asimilación de materia orgánica, la alta tasa reproductiva (gran producción de capullos y tiempo de incubación corto) y el rápido desarrollo de las crías; además, la capacidad de sobrevivir ante diversas condiciones ambientales como altas temperaturas, variaciones de los niveles de humedad y la manipulación de los operarios [12]. Dentro del grupo de las epigeas, la *Eisenia andrei* y *Eisenia fetida* o Lombriz Roja Californiana, son las más empleadas para el tratamiento de residuos orgánicos a través de compostaje. Ambas especies, muy relacionadas entre ellas, tienen amplia distribución por todo el mundo, son de fácil manejo y muy resistentes. Bajo condiciones óptimas, su ciclo de vida es de alrededor de 51 días; las crías tardan entre 21-30 días en alcanzar la madurez; y su longevidad máxima llega a los 5 años de vida. Aunque la *E. fetida* tiene mayor capacidad adaptativa, en medios de cultivo controlados, la *E. andrei* compite e incluso domina a la *E. fetida*. Es posible que en numerosos estudios sobre vermicompostaje en los que se mencionaba únicamente a la *E. fetida*, se tratase de la *E. andrei* o de una mezcla entre ambas,

que aunque pueden compartir nicho ecológico, no se aparean entre ellas naturalmente [12].



Ilustración 1. *Eisenia andrei* (arriba) y *Eisenia fetida* (abajo) [13]

El vermicompostaje involucra no sólo a las lombrices, sino también a un sinnúmero de microorganismos tales como bacterias, hongos y protozoos. Algunos de estos sirven de alimento para las lombrices y además, realizan el proceso de descomposición del material pretratado por estas. Igualmente, al interior del aparato digestivo de las lombrices, cohabitan varios microorganismos que intervienen en actividades enzimáticas para modificar la composición química y microbiológica de la materia orgánica ingerida. Lamentablemente, aún no se ha ahondado mucho en el conocimiento de estas interacciones lombrices-microorganismos; sin embargo, este tema está tomando cada día más fuerza como actividad científica, a partir del análisis de la biología molecular [12]

Factores externos que influyen sobre la productividad del vermicompostaje

A pesar de que especies como la *E. andrei* y *E. fetida*, son tolerantes y funcionan exitosamente dentro de un abanico de condiciones ambientales para el vermicompostaje, la productividad del procesamiento de materia orgánica, está igualmente supeditado un límite de dicha tolerancia a factores externos como la disponibilidad de alimento, temperatura, humedad, iluminación y nivel de competencia. Cuando se sobrepasan dichos límites, las lombrices pueden morir o simplemente migran hacia ambientes más estables.

Para el caso de la naturaleza y acondicionamiento de residuos de partida, Domínguez y Pérez-Díaz (2011) recopilan el trabajo de diversos autores que han implementado el vermicompostaje sobre residuos convencionales o naturales -estiércoles vacuno,

ovino y de caballo- y residuos no convencionales o no naturales como purines de cerdo, lodos de PTARs urbanas, lodos de la industria papelera, láctea, residuos oleícolas y vitivinícolas. Al respecto, los autores resaltan la importancia de acondicionar previamente el residuo para garantizar la supervivencia de las lombrices, cuando [12]:

- La estructura física del residuo no permite contar con un sustrato bien aireado y poroso que facilite el flujo de aire, drenaje de agua en exceso y paso de las lombrices. Se sugiere la mezcla con materiales estructurantes.
- La salinidad del residuo sea muy alta (superior a 8 dS/m), debido a que por la relación de este parámetro con la composición iónica de los fluidos internos de las lombrices, se podría presentar inhibición de la reproducción y desarrollo de las lombrices, e incluso la muerte. Para remediarlo se recomienda el lavado.
- Exista una elevada concentración de amonio, es decir, superior a 0.5 mg/g de sustrato, que genera intoxicación en las lombrices. La solución consiste en volatilizar el amonio a través de la aireación del residuo por varios días.
- El pH sea muy bajo, puesto que valores por debajo de 4.5 podrían ser letales. El rango de pH ideal para la cría de lombrices epigeas se encuentra entre 5.5 y 8.4; el valor óptimo está alrededor de 7.2. Para mantener controlado este factor, se recomienda hacer adiciones de caliza al vermicompost, conforme se hacen las nuevas descargas de residuos.
- La relación C:N se salga del rango 20-30. En este caso es pertinente trabajar con una mezcla de más de un tipo de material orgánico.
- El residuo tiene alta carga de metales pesados y contaminantes orgánicos, que pueden alterar el metabolismo de las lombrices, degradando su crecimiento y desarrollo sexual; además pueden generar bioacumulación en tejidos por absorción intestinal. Para ello se debe evitar el uso de material muy contaminado.

Diversos estudios sobre la influencia de la temperatura en la respuesta de las lombrices durante el vermicompostaje, concluyen que los rangos óptimos son muy variables entre una especie y otra. En términos generales, la información recopilada por Domínguez y Pérez-Díaz (2011) sugiere que una temperatura inferior a 10°C reduce la actividad alimentaria de las lombrices; un valor por debajo de los 4°C cesa por completo la actividad reproductiva y el desarrollo de nuevas lombrices, puesto que las lombrices adultas entran en un estado de hibernación o migran a capas más profundas del sustrato para protegerse; y temperaturas superiores a los 30°C maximizan la actividad de los microorganismos presentes en el material de degradación, agotando el oxígeno disponible para la supervivencia de las lombrices. La temperatura ideal entonces, estaría alrededor de los 25°C [12]. No obstante, este valor puede variar dependiendo si hay o no estaciones y del tipo de clima (seco o húmedo) de la zona donde se practique el vermicompostaje.

Otro factor de gran importancia es la humedad, la cual afecta directamente la tasa de crecimiento de las lombrices. Según Domínguez y Pérez-Díaz (2011), estos organismos toleran un rango entre 50-90%. Para distintos tipos de sustrato, el rango óptimo para la *E. fétida* va de 75-90%, mientras que el de la *E. andrei* se alcanza en el 85% de humedad. En términos generales, humedades altas se prefieren sobre las bajas, dado que éstas últimas van en detrimento de la actividad sexual de las lombrices [12].

Las lombrices respiran, es decir, asimilan el oxígeno y expulsan el dióxido de carbono, a través de las paredes de su cuerpo. A pesar de no contar con órganos respiratorios especializados, son muy sensibles a ambientes anaerobios. Bajo estas condiciones, disminuyen su reproducción en hasta un 65%, así como su actividad alimenticia. En sustratos saturados con agua, dióxido de carbono o sulfuro de hidrógeno, las lombrices tienden a migrar [12]. Por ello es importante mantener un nivel de aireación óptimo que en ocasiones se puede alcanzar a través de filtros aireados, o con la formación de camas de baja profundidad.

La excesiva población de lombrices en un sustrato que tenga incluso la composición ideal, genera problemas de competencia que afectan su tasa de

crecimiento. Ambientes más densos, tienden a generar crecimiento lento y bajo peso de final de la lombriz; a su vez, estas condiciones retardan el proceso de maduración de dichos organismos [12].

La luz es otra variable de fundamental importancia en la cría de lombrices; éstas son fotofóbicas, puesto que los rayos ultravioleta las matan en corto plazo. Las lombrices cuentan con sensores sobre su epidermis que detectan la procedencia de luz e inmediatamente huyen. De ahí que es muy importante mantener cubierto el módulo de vermicompostaje, ya sea con una malla o con material vegetal seco [16].

El manejo de residuos orgánicos como sustrato, hace casi inevitable la presencia de vectores tales como ratones, aves y topos, los cuales representan una amenaza para las lombrices. Estos pueden ser controlados con el manejo de lonas resistentes sobre las camas de compostaje. Igualmente, existen otro tipo de depredadores de lombrices que deben ser combatidos. Las hormigas por ejemplo, se controlan manteniendo rangos de humedad arriba del 80% y pH por encima de 7. La planaria, típica de climas tropicales, se fija en el intestino de la lombriz y se alimenta de su contenido interno hasta llevarla a la muerte; para evitarla, es necesario mantener rangos de pH entre 7.5 y 8 [12].

Lombricultura de Tenjo

Un ejemplo exitoso de vermicompostaje es la empresa dirigida por Norberto Díaz Mendoza, Lombricultura de Tenjo. Esta se ubica a 2.3 Km sobre la vía Tenjo-Tabio. Allí se emplea esta técnica en la cual, mediante el uso de la lombriz Roja Californiana (*Eisenia fétida*), se aprovechan desechos orgánicos vegetales o animales, obteniendo ventajas ecológicas, medio ambientales y productivas. Dentro de los desechos animales, se consideran los estiércoles bovinos, equinos, ovinos y porcinos; los vegetales comprenden desechos de frutas -preferiblemente las más azucaradas- tales como banano, naranja, melón, papaya, fresa y guayaba [14].

Según el director técnico de la empresa, la meta de la lombricultura consiste en *aprovechar todos los desechos orgánicos producidos en una granja o lugar de explotación agropecuaria*. Con este ideal en mente se diseña e implementa el esquema productivo reportado en la Tabla 1. Aquí se explica

el paso a paso del proceso para la obtención de humus en un módulo de lombricultura. La

información detallada de la visita a la planta se puede consultar en el Anexo 2 [14].

Tabla 1. Proceso productivo de la Lombricultura de Tenjo [14]

Etapa del proceso	Descripción
Construcción del módulo	<ul style="list-style-type: none"> De forma rectangular con dimensiones de 3*0.4*0.2 m. Emplea materiales de la región: orillos, guadua y estacas de madera; se recubre con un plástico.
Llenado del módulo	<ul style="list-style-type: none"> Se cubre la cama con contenido ruminal y estiércol bovino fresco hasta los 10 cm de profundidad. Se siembran 30 Kg de pie de cría por 1m-área-piso. Se extiende uniformemente sobre la cama una proporción de 70% lombrices por 30% sustrato. El sustrato debe tener una humedad ideal (75%) y ser rico en nutrientes.
Riego y alimento	<ul style="list-style-type: none"> El riego con agua lluvia se hace 2-3 veces por semana, para mantener una humedad del 75%. Cada 18 días se realiza una nueva alimentación (depósito de sustrato).
Polisombra y cubierta de material vegetal	<ul style="list-style-type: none"> El sustrato se cubre con un polisombra de 85%, para proteger el cultivo de vectores, hormigas, gusanos y la Planaria. Cada 2 días se levanta el polisombra y se revisa el cultivo. Encima del polisombra se instala una cobertura de pasto seco para controlar la temperatura del cultivo.
Seguimiento	<ul style="list-style-type: none"> Con una tabla de registros, se reportan todas las variables de control del módulo. El seguimiento se realiza durante los 4 meses de cultivo.
Trampeo	<ul style="list-style-type: none"> Después de 120 días de cultivo se ponen sobre el módulo canastillas con rótulos llenas de sustrato fresco, para que las lombrices migren del cultivo. Con esta técnica se recupera cerca del 70% del pie de cría para futuros cultivos.
Agua del proceso	<ul style="list-style-type: none"> El agua lluvia recogida para el riego, se hace pasar entre 7-8 veces por los cultivos y se recolecta para convertirla en humus líquido. Antes de envasar este líquido, se somete a agitación para estabilizarla.
Cosecha	<ul style="list-style-type: none"> Se realiza 120 días después de la siembra. Tras retirar las lombrices del módulo con trampeo, se recoge el lombricompost: un sólido granulado, café oscuro e inodoro.
Secado	<ul style="list-style-type: none"> En un invernadero con piso pavimentado, se esparce el lombricompost durante 3 días para que la humedad se reduzca de un 75 a un 25%.
Limpieza	<ul style="list-style-type: none"> El lombricompost se hace pasar a través de una máquina de construcción casera, en la cual se retiran hojas, palos y piedras remanentes. A su paso por la máquina, el humus adquiere la granulometría ideal.
Empaque	<ul style="list-style-type: none"> El empaque del producto se hace en una bolsa plástica recubierta por una bolsa de polipropileno (bulto de 50 Kg). Se busca evitar que el material adquiera humedad o se pierda por rupturas del empaque. El lombricompost no se almacena por periodos largo y se evita su exposición al sol y la lluvia.
Comercialización	<ul style="list-style-type: none"> El producto se comercializa con los agricultores de la región.

Cada módulo de la Lombricultura de Tenjo, produce 17 bultos de 50 Kg de lombricompost, cada 120 días. La siembra en los módulos se diseña de forma tal que todos los días se esté recogiendo cosecha. La empresa cuenta además con el registro ICA 5565 y sus productos son analizados periódicamente por el laboratorio AGILAB®, el cual garantiza que se cumpla con la composición físico-química y microbiológica del lombricompost registrada ante el ICA.

Tratamiento de biosólidos con vermicompostaje en Colombia

Aunque en Colombia el tratamiento de aguas residuales es un tema muy reciente que sólo se ha implementado en ciudades como Bogotá, Cali, Medellín, Bucaramanga y en algunas empresas puntuales, la comunidad académica ha impulsado en los últimos años, la realización de investigaciones sobre el tratamiento de biosólidos por medio de vermicompostaje. La mayoría de dichos estudios han

concluido sobre las bondades de este tratamiento como herramienta para estimular un uso alternativo de las toneladas de desechos que se producen y desperdician diariamente en el país.

Trejos Vélez y Agudelo Cardona (2012), estudiantes de La Universidad Tecnológica de Pereira⁴, trabajaron con los lodos generados por la planta de tratamiento de aguas residuales de la empresa Comestibles La Rosa S.A.. Esta fábrica dedicada a la producción de alimentos, cuenta con su propia PTAR en la cual se tratan aguas residuales del proceso productivo de galletas, chocolatería y otros comestibles, así como aguas residuales domésticas del personal que labora allí. La planta de tratamiento procesa cerca de 3 L/s de aguas residuales, por medio de una tecnología de lodos activados; el postratamiento de los lodos que resultan como subproducto (1 ton/día), se realiza a partir de lechos de secado [15].

El principal objetivo de este estudio era determinar el potencial de aprovechamiento de los lodos de la PTAR, después de someterlos a un proceso de estabilización mediante lombricultura, durante 2 meses. El humus producido en este periodo, fue analizado en el laboratorio AGRILAB®, y a partir de la caracterización de su composición físico-química y microbiológica, se determinó que tenía gran potencial en el uso de enmienda de suelos, puesto que no contenía ningún residuo peligroso que pudiera afectar las características físicas de los suelos, ni la salud humana. El lombricomposto cumplía además con las disposiciones del Decreto 4741 de 2005⁵ y la NTC 5167 de 2004⁶ [15].

También en la Universidad Tecnológica de Pereira, Grajales et al. (2006) formularon un programa de manejo integral de los lodos de la PTAR de esta institución, que permitiera convertir el lodo en un material útil que se reincorporase en las áreas verdes de la Universidad. En esta investigación se estudió la efectividad del tratamiento de los lodos con tres técnicas: secado, compostaje y vermicompostaje.

⁴ Universidad Tecnológica de Pereira (UTP).

⁵ El Decreto 4741 de 2005 reglamenta la prevención y manejo de los residuos o desechos peligrosos.

⁶ La NTC 5167 de 2004 ejerce control para los productos orgánicos usados como abonos y/o fertilizantes de enmiendas de suelos, exigiendo límites permisibles de metales pesados y componentes químicos que puedan tener efectos indeseables en la salud o medio ambiente.

Los tres productos fueron analizados por el laboratorio de Química Ambiental de la UTP, con el fin de determinar qué procedimiento generaba un material más idóneo para la mejora de suelos. Como complemento, se realizó una prueba de germinación de semillas de lechuga White Boston sobre los tres sustratos, para determinar el grado de toxicidad de los materiales y su incidencia sobre el crecimiento de la planta [18].

Los resultados a nivel químico arrojaron una relación C/N ideal en el lombricompost y un porcentaje de materia orgánica comercialmente aceptable para el compost. Las concentraciones de N, P y K fueron significativamente buenas para los tres tratamientos, presentando el lombricompost un mayor flujo de nutrientes. En cuanto al contenido de metales pesados, en los tres escenarios se reportó un indicador positivo de calidad [18].

El análisis microbiológico indicó que el secado de lodos no es un tratamiento efectivo para disminuir la carga de agentes patógenos, como sí lo son el compostaje y lombricompostaje. Este último alcanzó una reducción tal de indicadores de coliformes totales y fecales, hasta el punto de encajar en la Clase A, según el criterio de la USEPA. Los autores atribuyen este resultado a los procesos de transformación de los desechos en el organismo de la lombriz, así como los cambios en pH e inoculación de flora microbiana en su sistema digestivo [18].

La prueba de toxicidad en la germinación de lechuga determinó que el compost y vermicompost se enmarcan como “no tóxicos” [18].

El estudio concluyó que el lombricompost es la mejor alternativa para tratar los biosólidos, pues presenta el mejor desempeño para la mejora de suelos; esto se debe a sus características físico-químicas de alta calidad, la estabilidad, baja toxicidad y ausencia de microorganismos patógenos [18].

Otro estudio sobre tratamiento de lodos con vermicompostaje, fue realizado por Amaya Arbeláez (2010) de la Universidad del Bosque, con apoyo de la empresa Control de Sólidos Ltda.. Esta organización se dedica a deshidratar el lodo extraído del alcantarillado de Bogotá (537 m³/mes), para producir agua y sólido residual (43 m³/mes). Control de Sólidos Ltda. propende por dar valor agregado comercial y ambiental a los residuos; para ello desarrolló un proyecto de investigación con la

Empresa de acueducto y alcantarillado de Bogotá, que busca evitar el vertimiento de lodos industriales sin tratar (aquellos que generan represamiento y desborde a través de las alcantarillas), en áreas de disposición de residuos sólidos, que ocasionan problemas como el incremento en el volumen de lixiviados, la atracción de vectores y la disminución de la vida útil de los rellenos sanitarios [16].

Esta empresa propuso una alternativa de co-procesamiento de los sólidos resultantes del lodo que llega del alcantarillado, con lombricultura, para transformar sus características iniciales en otras que permitan darle un valor comercial. Para este proceso se construyó una planta piloto de lombricultura, empleando la lombriz Roja Californiana y cuatro recetas de sustrato con distintas proporciones de sólido residual y estiércol bovino. El laboratorio de Ingeniería Medio Ambiental, realizó las pruebas para caracterizar tanto el lodo como el humus, y así determinar el potencial de uso de éste último [16].

De acuerdo con este análisis, Amaya Arbeláez (2010) reportaron incrementos del P y K, pero una disminución de N total, tras el vermicompostaje. El Ca aumentó mientras que el Mn permaneció constante. No hubo afectación sobre las lombrices por la presencia de metales pesados, puesto que éstos se encontraban en niveles no detectables dentro del lodo; esto se explica en el hecho que los lodos provienen de aguas residuales domésticas y aliviaderos. La receta que dio mejores resultados en términos de generación de nutrientes es la de residuos sólidos al 100%. Sin embargo, el estudio concluye que debido al alto contenido de coliformes totales tanto del residuo sólido como en el humus, éste no puede ser aún empleado como abono, puesto que requiere un tratamiento de disminución de patógenos que ayude a evitar afectaciones sobre la salud humana y el medio ambiente [16].

Araque Manrique (2006) de la Universidad de los Andes, realizó una investigación sobre el tratamiento térmico y alcalino de los biosólidos generados en la PTAR de Salitre, como un mecanismo de desinfección que prepare estos lodos para su posterior uso como fertilizante en tierras agrícolas [6].

En el tratamiento térmico, se evaluaron temperaturas de 60°C y 80°C en diferentes tiempos de exposición. La temperatura de 80°C, mostró que los lodos tratados lograron una destrucción de indicadores de contaminación fecal (coliformes fecales, fagos

somáticos y huevos de helminto), que les permite catalogarse como Clase A, según el criterio de la USEPA. Para el tratamiento alcalino, se estudiaron dosis entre 25% y 85% de CaO. Se encontró que con una dosis del 25% es suficiente para sanear el lodo durante un periodo de 21 días. Aunque estos tratamientos lograron evitar un recrecimiento de indicadores bacterianos, el pH al que se llega por la adición de cal, disminuyó el valor fertilizante del biosólido [6].

En el departamento de Ingeniería Industrial de la Universidad Militar Nueva Granada, Chávez Porras y Rodríguez González (2011), llevaron a cabo el *Análisis químico y biológico de biosólidos sometidos a un sistema de lombricultura como potencial abono orgánico*.

Esta investigación –aún en curso–, implementó un módulo de lombricultura en los predios de la Universidad con *Eisenia fetida*, empleando como sustrato mezclas de biosólidos provenientes de la PTAR de Salitre con tierra (arcilla, limo, material vegetal descompuesto), por un periodo de 60 días. El Laboratorio Nacional de Suelos del IGAC, realizó el análisis químico y microbiológico del humus producido y del biosólido original. Igualmente, se realizó un ensayo de germinación con semillas de repollo sobre ambos sustratos, con el fin de evaluar el porcentaje de biomasa y longitud de tallo de las plántulas obtenidas a cinco días [17].

Los resultados de la caracterización química reportaron incrementos significativos del N, P y K, tras el proceso de lombricultura. Los porcentajes de estos tres nutrientes en el humus, lo convierten en una opción interesante como abono orgánico [17].

En cuanto a metales pesados, se produjo una disminución del Mn, Cr y Pb y un aumento de Fe, Zn y Cu. El contenido de estos oligoelementos en el humus, cumple con el máximo aceptado para abonos orgánicos según la NTC 5167 [17].

El análisis de microorganismos patógenos determinó que a pesar de alcanzar una disminución mayor al 90% de coliformes totales y fecales, el lombricompostado cuenta con más de 1.600 NMP/g, por lo cual es catalogado como Clase B, según el criterio de la USEPA [17].

El ensayo de germinación del repollo arrojó que el biosólido no es apto para la germinación, mientras que el humus produjo un 113% de crecimiento de la semilla; se evidenció la capacidad del biosólido

vermicompostado como fertilizante y promotor del desarrollo vegetal [17].

El estudio concluyó que el vermicompostaje es una alternativa ecológica para el tratamiento de biosólidos de las PTARs, que les aporta características de abonos orgánicos útiles para uso ornamental y recuperación forestal, más no para cultivos agrícolas, puesto que no cumplen con el acuerdo de la NTC 5167.

Procesamiento de NPK en vermicompostaje

Una de las variables fundamentales para determinar el potencial de uso de biosólidos vermicompostados es su calidad nutricional. Una forma de medir este parámetro es a partir de la concentración de los nutrientes estructurales en el humus, especialmente N-P-K. A continuación, se resumen las explicaciones que dan algunos autores a la composición fisicoquímica del lombricompost, en relación con los procesos metabólicos de las lombrices.

Según Domínguez y Pérez-Díaz (2011), en el vermicompostaje una parte de la materia orgánica de los residuos se mineraliza, lo cual explica la notable disminución del carbono orgánico total al pasar de biosólido a humus (entre el 10 y el 55%). La otra parte de la materia orgánica se humifica, polimeriza y policondensa, especialmente en la última fase del proceso; por ello se produce un incremento en los ácidos húmicos y flúvicos del producto final (entre 20-60%) [12].

Recientemente se ha estimulado el interés por conocer acerca de las actividades enzimáticas como biomarcadores de los procesos de lombricompostaje, para profundizar sobre los ciclos de los nutrientes. Domínguez y Pérez-Díaz (2011) reportan que la mayor parte de las actividades enzimáticas se estimulan en los primeros estadios del proceso, pero disminuyen con el avance de la biodegradación. Por esta razón el vermicompost tiene menor actividad enzimática que el material orgánico fresco, sin embargo es más estable y capaz de resistir la desnaturalización de las enzimas [12].

Durante el vermicompostaje, la concentración de nutrientes de los residuos orgánicos tiende a incrementarse. Este comportamiento se evidencia fácilmente en el P, Ca, Mn y otros micronutrientes que se concentran, como consecuencia de la mineralización de la materia orgánica. La dinámica del N por su parte es variable; algunos estudios en

los que se trabajó con dosis muy elevadas de este elemento en el desecho, presentaron descensos de su concentración por el consumo de la lombriz, y posibles pérdidas por lixiviación y volatilización en su forma de amonio (NH_4^+). Otros estudios contrariamente, muestran un aumento en el porcentaje de N en el humus, que se asocia con la mineralización de la materia orgánica. El F tiene una tendencia a disminuir durante la lombricultura, lo cual podría atribuirse a una pérdida parcial a través del agua de lixiviación que percola. La concentración de metales pesados asimilables o extraíbles, por lo general tienen una gran disminución como consecuencia de la formación de complejos insolubles de elementos con los ácidos húmicos. [12].

En el artículo de Subrata H., Vinod (2012), se estudió la transformación y disponibilidad de nutrientes y metales pesados, en el producto de la maduración de lodos de agua residual mediante una técnica combinada de compostaje y vermicompostaje con lombriz *Eisenia fetida*. El autor aplicó los métodos analíticos establecidos por el USDA⁷ para caracterizar el humus que se obtiene como producto final y así determinó las bondades del uso de dicha técnica [21].

El análisis de la composición fisicoquímica mostró un incremento significativo en el contenido de nitrógeno total (TN) y nitrógeno soluble en agua (WSN), pasando de 41.7% a 64.6% y 37.1% a 50.5%, respectivamente, entre el biosólido y el vermicompost. Igualmente, se presentó un incremento en la concentración de NO_3^- combinada con una disminución de NH_4^+ . El contenido de fósforo total (TP) y fósforo soluble en agua (WSP) del vermicompost fue considerablemente superior al del biosólido inicial en todas las condiciones de experimentación implementadas, variando de 39.9% a 69.8% y 25.2% a 34.3%, respectivamente. En términos de los macronutrientes, el Na resultó tener un aumento tanto en su contenido total como en el contenido soluble en agua al comparar el vermicompost con el biosólido fresco. El Ca y Mg, tuvieron el comportamiento opuesto. El potasio total (TK) tuvo un incremento de entre el 30.1-51.9% entre el biosólido y el vermicompost. En términos generales, el contenido de metales pesados

⁷ United States Department of Agriculture and United States Composting Council.

en el vermicompuesto fue mayor, pero el porcentaje de metales pesados solubles en agua fue menor, respecto del biosólido inicial; esto es muy beneficioso por cuanto fracción de metales pesados solubles en agua tiene el mayor potencial de contaminación dentro de la cadena alimenticia. Por

último el estudio demostró que el vermicompostaje mejoró la disponibilidad de nutrientes de los biosólidos, aumentó el porcentaje de humedad y redujo el contenido de carbono total. [21]. La caracterización del biosólido, el compost y el vermicompost se resume en la **Tabla 2**.

Tabla 2. Composición fisicoquímica del biosólido, compost y vermicompost de la PTAR de India [21]

Parámetro	Biosólido fresco	Biosólido compostado	Biosólido vermicompostado
pH	7.5	8.6-8.8	7.9-8.5
Capacidad de retención hídrica	NM	49.26-50.34 %	72.70 %
Sólidos volátiles	51.8 %	56.25-56.64 %	26.9-36.1%
Carbono total	22.79 %	32.30-32.55 %	13.1-25.2 %
N total	1.70 %	2.09-2.42 %	2.92-4.15 %
P total	0.72 %	1.36-1.46 %	1.78-2.64 %
K total	5.50 mg/g	12.65-13.51 mg/g	30.8-44.0 mg/g (3.08-4.4%)
Na	4.91 mg/g	5.69-5.98 mg/g	27.3-38.8 mg/g
Ca	45.43 mg/g	46.25-48.39 mg/g	68.6-78.9 mg/g
Mg	8.28(mg/g)	14.12-14.36 mg/g	23.0-36.7 mg/g
Cu	0.52 mg/g	0.24-0.28 mg/g	0.39-0.44 mg/g
Co	0.08 mg/g	0.026-0.040 mg/g	0.063-0.069 mg/g
Fe	12.05 mg/g	12.64-13.40(mg/g)	20.16-20.63 mg/g
Mn	0.12 mg/g	0.30-0.36 mg/g	0.49-0.57 mg/g
Zn	1.24 mg/g	0.64-0.80 mg/g	0.97-1.04 mg/g
Cr	1.47 mg/g	0.46-0.62 mg/g	0.75-0.81 mg/g

Dentro de la discusión de los resultados Subrata H., Vinod (2012), afirma que el compostaje cumple un rol dual en el tratamiento del biosólido: por un lado concentra y por el otro degrada naturalmente la materia orgánica. Sugiere además, la necesidad de hacer un pre-compostaje para evitar la mortalidad de lombrices por generación de gases potencialmente tóxicos en las pilas [21].

En cuanto al vermicompostaje, el autor señala que éste proceso genera cambios significativos en las características fisicoquímicas del material compostado. La disminución del pH entre una etapa y la siguiente, puede atribuirse a los gases orgánicos y CO₂ producidos por el metabolismo de los microorganismos. La disminución de los sólidos volátiles es un indicador de descomposición, mineralización de los sustratos y maduración del compost. El menor contenido de carbono total, tiene relación con el proceso de respiración de las lombrices durante el vermicompostaje. El incremento significativo del nitrógeno total en ésta fase puede estar relacionado las actividades metabólicas de la *Eisenia fetida* y los microorganismos, durante la mineralización de la

materia orgánica. De acuerdo con los autores consultados por Subrata H., Vinod (2012), un aumento en el NT sugiere además que la actividad del pie de cría enriquece el perfil de nitrógeno del vermicompuesto a través de la adición al sustrato de productos de la excreción de las lombrices, moco, fluidos corporales, enzimas, entre otros. Así pues, el contenido de este mineral en el lombricompuesto depende del contenido inicial de nitrógeno en el sustrato y la tasa de descomposición alcanzada por el pie de cría, según las condiciones ambientales del cultivo y la densidad de lombrices [21].

Asimismo, los cambios en el nitrógeno soluble en agua reflejan las variaciones en el nitrógeno mineral, es decir, los iones amonio (NH₄⁺) y nitrato (NO₃⁻). Se presenta una mayor concentración de nitrato que de amonio en el vermicompuesto, lo cual implica que la amonificación y nitrificación no se inhiben con la lombricultura. Se sugiere que el alto contenido de nitrato se debe a la oxidación del nitrógeno en su fase orgánica (amino-N) a una fase mineral que realizan algunas bacterias heterótrofas, hongos y actinomicetos. En la experimentación se

demonstró que las altas temperaturas privilegian las reacciones de nitrificación [21].

El incremento en el contenido del fósforo total (TP) durante el vermicompostaje, lo atribuye el autor a la acción directa de las enzimas del intestino de la lombriz y el efecto indirecto de la estimulación de la microflora. Es decir, los altos contenidos de fósforo se asocian con la mineralización; se libera y moviliza el fósforo disponible en la materia orgánica por acción de los fosfatos en el intestino de la lombriz y luego por P-solubilización de los microorganismos presentes en su sistema digestivo. El fósforo orgánico se transforma a su forma mineral, solubilizando el fósforo desde formas no disponibles de nutrientes y manteniendo la magnitud de fijación del P liberado en una forma insoluble e inorgánica en bajos niveles y por ende, aumentado la disponibilidad del mineral [21].

Respecto de otros macronutrientes como el K, Na, Ca y Mg, el incremento en su contenido en el humus comparado con el del lodo inicial, se explica en el hecho que aunque las lombrices requieren estos minerales para la asimilación de la materia orgánica, dicho requerimiento es muy bajo y el proceso de mineralización de materia orgánica se encarga de concentrarlos. Aunque en la investigación de Subrata H., Vinod (2012) el potasio aumentó, otros autores han reportado disminuciones al aplicar lombricultura a biosólidos de aguas residuales. Lo anterior se puede atribuir a diferencias en la composición química del sustrato y a posibles filtraciones de este mineral por exceso de agua [21].

El autor finalmente concluye que la técnica combinada de compostaje y vermicompostaje logra una alta estabilización de biosólido en términos de reducción de materia orgánica a nutrientes. También, se disminuye la disponibilidad de metales pesados en el humus (excepto por Fe y Mn), a través de la formación de complejos orgánicos. La

disponibilidad de nutrientes se ordena en la siguiente escala (de mayor a menor): N>P>Na>Ca>K>Mg>Fe>Mn>Cu≈Co>Zn≈Cr. De ahí que esta técnica integrada convierte y permite reciclar el lodo de una PTAR en fertilizantes orgánicos de gran riqueza nutricional y/o acondicionadores de suelo para aplicaciones agrícolas, sin efectos ecotóxicos [21].

Campos et al. (2011), en su artículo titulado *Predicción y comparación de transferencia de nutrientes de dos tipos de vermicomposteo de lodos residuales a suelos forestales*, realizaron un estudio similar y reportaron la siguiente composición del vermicompost de lodos residuales de una PTAR de la ciudad de Toluca, México [19]:

Tabla 3. Composición físico-química del vermicompost de lodos residuales de la PTAR de Toluca [19]

Parámetro	Valor
Humedad	45 %
pH	6.9
N total	2.6%
P total	5 %
Mg	2.5 mg/Kg
Materia orgánica	58 %
Carbono orgánico	30 %
Relación C/N	11.5
Na	5.13 mg/Kg
K	3.70 mg/Kg (0.00037%)
Ca	16.52 mg/Kg
Cu	0.119 mg/Kg
Pb	0.176 mg/Kg
Mn	0.011 mg/Kg
Fe	3.81 mg/Kg
Cd	0.003 mg/Kg

Igualmente, la composición del vermicompost reportada por Chávez Porras y Rodríguez González (2011), en el artículo *Análisis químico y biológico de biosólidos sometidos a un sistema de lombricultura como potencial abono orgánico*, se resume en la **Tabla 4**.

Tabla 4. Composición fisicoquímica del biosólido y el vermicompost de la PTAR de Salitre [17]

Parámetro	Biosólido fresco	Vermicompost
pH	5.7	6.0
Carbono orgánico total (%)	3.33	7.8
N total (%)	0.013	0.0639
P (%)	0.0311	0.0448
K (%)	0.0329	0.0392
Ca (mg/Kg)	2579	8150

Parámetro	Biosólido fresco	Vermicompost
Mn (mg/Kg)	326	420
Na (mg/Kg)	28	53
Fe (mg/Kg)	183	233
Zn (mg/Kg)	11.8	15.7
Co (mg/Kg)	25.6	16.7
Cr (mg/Kg)	18.9	7.68
Cd (mg/Kg)	0.6	0.4
Pb (mg/Kg)	15.4	12

Al comparar la composición entre el biosólidos y el vermicompuesto producido a partir de lodos de PTARs en India y Colombia, se puede observar en términos generales, que las tendencias en cuanto a la disponibilidad de nutrientes se rigen por el mismo patrón.

Para el caso puntual de N, P y K, la investigación realizada en la India arrojó incrementos al pasar del biosólido al vermicompost de 145%, 266% y 700%, de estos tres minerales respectivamente (ver **Tabla 2**) [21]. Por su parte, el estudio de Chávez Porras y Rodríguez González (2011), arrojó incrementos de 390% para el N, 44% para el P y 19% para el K (ver **Tabla 4**) [17]. Este comportamiento similar en ambos casos, permite inferir que la aplicación de lombricultura a lodos de tratamiento de aguas residuales, tiene un efecto de concentración de los minerales fundamentales para el crecimiento de las plantas. De ahí que tienen un alto potencial para su aplicación como abono orgánico.

En los dos proyectos se reporta igualmente un aumento en el pH al pasar de biosólido a lombricompost. Esta condición casi alcalina del humus, es una característica muy favorable para el crecimiento de plantas y la eliminación de agentes patógenos que rechazan ambientes básicos.

El contenido de carbono orgánico total que reporta Subrata H., Vinod (2012), tiende a incrementarse tras el vermicompostaje; el mismo comportamiento se observa en los resultados de Chávez Porras y Rodríguez González (2011). Macronutrientes como Na, Ca, Mn y Fe aumentan durante el proceso de estabilización de los en ambos experimentos, mientras que metales pesados como Zn, Cr, Co disminuyen.

Al establecer un comparativo entre la composición puntual de N, P y K del vermicompuesto que se produjo en India, México y Colombia, se observan diferencias entre el orden de magnitud de las composiciones reportadas por Chávez Porras y Rodríguez González (2011) y los otros dos trabajos. Mientras que el humus de la PTAR de Salitre cuenta con un 0.064% de N, el de la PTAR de Toluca y la India oscilan entre el 2% y el 4%. Para el caso del P, el primer artículo muestra un contenido de 0.045%, el de México 5% y el de la India 2.6%. El K es el elemento que presenta mayores diferencias; en el lombricompost de la PTAR de India tiene un valor de 4.4%, en el de la PTAR de Toluca de 0.0004%, mientras que en el de la PTAR de Salitre es de 0.04%.

Estas marcadas diferencias pueden tener relación con las composiciones de las aguas residuales de cada país, asociados con el tipo de alimentación de la población y el nivel de tratamiento que reciben los desechos. También puede obedecer al uso de distintos métodos analíticos en los laboratorios donde se llevaron a cabo las pruebas. Se sugeriría volver a realizar los análisis en el caso colombiano, para reconfirmar las variaciones significativas en el orden de magnitud.

Composición de humus comercial vs. humus de la PTAR Salitre

Con el fin de determinar la viabilidad –en términos fisicoquímicos más no microbiológicos- del uso del humus producido a partir de biosólidos de la PTAR Salitre para cultivo de hortalizas, se establece en la siguiente tabla, un comparativo de las características nutricionales y físicas de seis marcas de humus de lombriz comerciales (usados principalmente para jardinería) y dos marcas de abonos inorgánicos comerciales empleados para el cultivo de hortalizas (número 7 y 8).

Tabla 5. Cuadro comparativo de las características fisicoquímicas de humus de lombriz y abonos inorgánicos comerciales

Marca del abono/ Composición	1	2	3	4	5	6	7	8
Nitrógeno total (%)	1.0	1.8	1.19	1.4	1.0	0.8	13	15
Fósforo total (P ₂ O ₅) (%)	1.0	4.5	1.21		1.0	2.4	3	4
Potasio total soluble en agua (K ₂ C) (%)	1.5		1.01	1.19	1.5	2.38	43	23
Materia Orgánica (%)		51.0		52.0-56.0				
Calcio (CaO) (%)	3.0		1.62	2.8	0.01	0.05		
Magnesio (MgO) (%)	1.3		0.67		0.001	0.07		4
Carbono orgánico oxidable (%)	15.0	29.1	19.5		15	16,64		
Cenizas (%)	48.0		32.6		48.0			
Humedad máxima (%)	30.0	20.0-35.0	25.0	30.0	30.0		28.0	33.0
pH		6.75	7.37		8		7.3	6.25
Capacidad de retención de humedad (%)	130.0	125.0	139		195.92			
Relación C/N	11.0	15.9	16.0		11.0	20.8		
PA (%)	8.0							
Densidad (g/cm ³)	0.6	0.49	0.55		0.6	0.6		9.5
Conductividad electrónica (ds/m)	5.0				5		6.4	6.0
Capacidad eléctrica								
Capacidad de intercambio catiónica CIC (mEq/100g)	70.0	63.6	41.0		70			
Presentación	Sólido granulado fino	Sólido granulado fino	Humus granulado	Enmienda húmica sólida	Sólido Granulado fino	Sólido Granulado	Granular	Granular
Uso sugerido por fabricante	Jardinería	Jardinería	Frutales, ornamentales, extensivos, hortalizas	Frutales, hortalizas, ornamentales			Hortalizas y cultivos cortos	Frutales y hortalizas

1: Confiabonos (Registro ICA 1123187); 2: AgroHumus (Registro ICA 4719); 3: LombriTeno (Registro ICA 5565); 4: Biocat S (Producto importado de México); 5: Humus de lombrices San Rafael (Registro ICA 2038); 6: Humus el Cedro (Registro ICA 3867); 7: SoluNKP [Fertirriego/Nutrimon](4285); 8: Abocol

Al analizar los valores de las composiciones fisicoquímicas del lombricompost en la **Tabla 4** y los abonos comerciales en la **Tabla 5**, se observa que el pH del vermicompost procedente del lodo de la PTAR de Salitre (pH=6), está levemente por debajo de los abonos comerciales, cuyo valor oscila entre 6.25 y 8.

La concentración de N, P y K del humus obtenido en la investigación de Chávez Porras y Rodríguez González (2011), que corresponde a 0.065%, 0.045% y 0.039% respectivamente, se acerca más a las de los humus de lombriz comerciales (N:1-1.8%, P:1-4.5%, K:1-2.4%) que a las de los abonos inorgánicos (N: 13-15%, P: 3-4%, K:23-43%). Lo anterior tiene sentido por cuanto el proceso de producción del primero y los segundos es natural, mientras que el de los terceros se hace de forma forzada para obtener una composición deseada que permita satisfacer requerimientos altos de nutrientes para un suelo posiblemente deteriorado. Esta condición de baja concentración de NPK en el humus de la PTAR frente a los fertilizantes artificiales, no necesariamente resulta contraproducente para el crecimiento de cobertura vegetal. No se debe olvidar que este proceso se basa en una técnica ecológica, que permite una asimilación y transmisión de nutrientes más espontánea, que puede ser útil dependiendo del tipo de planta y suelo sobre el cual se cultive.

Debido a su similitud física y química con los humus de lombriz comerciales, en comparación con las diferencias frente a los fertilizantes inorgánicos, es de esperar que el lombricompost de la PTAR de Salitre resulte más conveniente para aplicaciones en jardinería y ornamentación, que para el cultivo de hortalizas. Sin embargo, la prueba de germinación del repollo realizada por Chávez Porras y Rodríguez González (2011), sugiere que no hay que descartar la posibilidad de emplear este producto como fertilizante orgánico de vegetales; para confirmar esta hipótesis, se requeriría realizar más ensayos con distintos tipos de hortaliza para evaluar el desempeño en la germinación y crecimiento de la planta.

Viabilidad del humus de la PTAR Salitre para cultivo de hortalizas

Con base en la literatura consultada, las visitas técnicas y revisión de abonos en el mercado, es posible concluir sobre la aplicabilidad del lombricompost producido a partir de biosólidos de la PTAR Salitre, en cultivos de hortalizas para consumo humano.

En términos netamente fisicoquímicos, el valor del pH y los contenidos de elementos estructurales como N, P y K del lombricompost elaborado a partir de lodos de la PTAR Salitre, resultan convenientes para su uso como insumo agrícola. Aunque al comparar las proporciones de NPK de este humus con las de abonos comerciales especializados para el cultivo de hortalizas, los primeros tienen contenidos más bajos, esto no necesariamente representaría un obstáculo para la germinación y desarrollo de las plantas –tal como se comprobó con el ensayo de germinación de repollo–, por cuanto todo depende de las condiciones iniciales y requerimientos nutricionales del suelo sobre el cual se realice el cultivo.

Respecto a la concentración de metales pesados en el humus de la PTAR de Salitre, vale la pena destacar que desde la composición inicial del biosólido que se produce allí, el porcentaje de metales pesados se encuentra en niveles no peligrosos [10]. Sin embargo, es fundamental regular esta variable desde el sustrato porque la *Eisenia fetida* no está en capacidad de degradarlos [16]; inclusive podría afectarse su desarrollo sexual y generar bioacumulación en caso de presentarse niveles elevados de estos oligoelementos [12].

Durante el proceso de humificación de la materia orgánica, los extractos húmicos que se forman actúan como agentes quelantes de algunos metales, lo cual explica las disminuciones en su porcentaje al pasar por el proceso de vermicompostaje [24]. De ahí que los valores de metales pesados reportados por Chávez Porras y Rodríguez González (2011), no representan un inconveniente para el uso potencial del lombricompost en aplicaciones agrícolas.

El humus que resulta como producto de la maduración con lombricultura de los biosólidos de la PTAR de Salitre, en teoría, debería tener un bajo contenido de agentes patógenos. Lo anterior por cuanto el proceso de digestión anaerobia al que es sometido en la PTAR y la vermicultura, son técnicas que conllevan a una reducción importante de las poblaciones de microorganismos patógenos [12].

Sin embargo, según los resultados de Chávez Porras y Rodríguez González (2011), aunque se logró un descenso significativo del 90%, llegando hasta 1.600 NMP/g, no se puede enmarcar el producto como Clase A, según el criterio de clasificación de la USEPA [17]. Por lo tanto, este humus puede ser empleado para procesos de reforestación y enmienda de suelos (Clase B), más no como abono para el cultivo de hortalizas, por cuanto podría generar afectaciones sobre la salud de los consumidores de estos vegetales.

Valdría la pena realizar algunas alteraciones en el proyecto que posiblemente conducirían a una mejora en los resultados. Entre ellas se sugiere prolongar el proceso de precompostado a 30 días, y realizar la lombricultura en el módulo por 120 días (el doble del tiempo que se experimentó), tal como lo sugiere el director técnico de la Lombricultura de Tenjo para climas fríos [14]. Inclusive, se podría combinar la lombricultura con el compostaje, siguiendo el modelo de Subrata Hait, Vinod Tare (2012).

CONCLUSIONES

Sería muy beneficioso tanto en términos de costos ambientales como sociales, llegar a un nivel de desarrollo tecnológico en Colombia, que permita empelar –tal como lo hace Estados Unidos- hasta el 70% de los biosólidos producidos en actividades agrícolas, bosques y restauración de suelos, e incluso en producción de hortalizas y frutales [7].

A pesar de que los biosólidos cuentan con una alta carga de nutrientes que los convierte en un abono potencial y una opción de

reemplazo de los fertilizantes inorgánicos, los remanentes de agentes patógenos, la presencia de metales pesados y restos de sustancias tóxicas, restringen su uso directo en la agricultura [4]. En USA se emplean directamente debido a que sus plantas de tratamiento cuentan con procesos mucho más avanzados, generando biosólidos de mejor calidad, que logran enmarcarse dentro de la Clase A, según la clasificación de la USEPA.

Para convertir los biosólidos en un insumo de la agricultura, resulta imperativo someterlos a un tratamiento previo de estabilización adicional [21]. Dentro de dichos tratamientos, se consideran la adición de cal, secado, calor, digestión anaerobia y aerobia, compostaje, entre otros [7]. También es posible emplear técnicas combinadas de saneamiento como por ejemplo, lombricultura y compostaje [21].

La lombricultura es una técnica idónea para la estabilización de biosólidos, ya que genera un producto final rico en nutrientes estructurales (N-P-K) que son muy convenientes para el crecimiento de plantas, en el caso de usarlo como abono orgánico. Esta técnica emplea típicamente especies epigeas de lombrices de tierra como la *Eisenia andrei* y *Eisenia fetida*. Para lograr óptimos resultados en el vermicompostaje es necesario controlar factores medioambientales como la humedad, temperatura, calidad del sustrato, luz, densidad del pie de cría, entre otros [12].

La concentración de nutrientes en el vermicompostaje, se debe a la acción conjunta del metabolismo de las lombrices, los microorganismos presentes en su flora intestinal y la microfauna del suelo. En términos generales, el nitrógeno, fósforo y potasio tienden a incrementarse como consecuencia de los procesos de mineralización y humificación de la materia orgánica; el ciclo del nitrógeno, es determinante para comprender esta dinámica [12, 21].

A nivel mundial y nacional, se han realizado numerosos estudios sobre la posibilidad de aplicar lombricultura a los biosólidos de las

PTARs y emplear el humus en el cultivo de hortalizas. Aunque las conclusiones muchas veces son contradictorias, en términos generales se sugiere que sí es posible, siempre y cuando el vermicompost tenga el mínimo de agentes patógenos que se puedan transmitir del suelo a la planta y de la planta al ser humano o animales, generando efectos adversos sobre la salud y el medio ambiente [6, 11, 12, 15, 16, 17, 18, 21].

En el caso particular de la PTAR Salitre, sus directivos consideran que hasta que no se realice un tratamiento secundario tanto de aguas residuales como de lodos, para el cual se tiene previsto implementar la infraestructura y tecnologías adecuadas en un futuro cercano, no se comprometen a usar el humus para cultivo de hortalizas. La PTAR de Salitre manifiesta que sus biosólidos podrían emplearse como abono para cultivo de hortalizas si se dejasen madurar por lo menos un mes hasta que murieran todos los patógenos. Sin embargo, así esto se hiciera, debido a la ausencia de normatividad en el tema de manejo de biosólidos en Colombia, la PTAR no estaría como tal autorizada para realizar ese tipo de aplicaciones.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico (2000). Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS. Título E: Tratamiento de Aguas Residuales. Ministerio de Desarrollo Económico, Bogotá.

[2] Jaramillo, Luis (2002). Elementos para una reglamentación de biosólidos. 45° Expo-congreso Internacional de Acodal. Bogotana de aguas y saneamiento, Bogotá.

[3] Mahamud López, Manuel; Gutiérrez Lavín, Antonio; Sastre Andrés, Herminio. 1996. Biosólidos generados en la depuración de aguas (I). Revista de Ingeniería del Agua. Oviedo, España – Volumen 3 – No. 2 – Junio de 1996. Págs. 47-62.

[4] Rámila Garrido, Ignacia y Rojas Brockway, Sebastián (2008). Alternativas de uso y disposición de biosólidos y su impacto en las tarifas de agua. Tesis de pregrado en Ingeniería Comercial, Universidad de Chile, Santiago.

[5] Vélez Zuluaga, Juan (2007). Los biosólidos: ¿una solución o un problema?. Empresas Públicas de Medellín E.S.P. y Universidad Nacional sede Medellín, Medellín.

[6] Araque Manrique, María del Pilar (2006). Evaluación de los tratamientos térmico y alcalino en la desinfección del lodo generado en la PTAR el Salitre. Tesis de Maestría en Ingeniería Civil, Universidad de los Andes, Bogotá.

[7] Ozores-Hampton, Mónica y Méndez, Joel (2010). Uso de biosólidos en producción de hortalizas. Publicación del Departamento de Horticultural Sciences. Universidad de la Florida, Institute of Food and Agricultural Sciences Extension, Florida.

[8] Environmental Protection Agency. Title 40: Protection of Environment. Part 50: Standards for the Use and Disposal of Sewage Sludge (21 de 03 de 2014). Recuperado el 25 de 03 de 2014, de: <<http://www.ecfr.gov/cgi-bin/retrieveECFR?gp=&SID=f0f3be4d6339b5aedd3616a1db0c6a3&n=40y31.0.1.2.42&r=PART&ty=HTML#40:31.0.1.2.42.1.13.2>>

[9] Garavito Najas, J., Morales Posada, N., & Chávez Porras, A. (2012). Descripción de metodologías del sistema de lombricultura para gestión de residuos sólidos orgánicos. Recuperado el 15 de 09 de 2013, de http://www.umng.edu.co/documents/10162/745277/V2N1_7.pdf

[10] Bogotá gov.co. (15 de 09 de 2013). Acueducto: Agua y Alcantarillado de Bogotá. Recuperado el 15 de 09 de 2013, de <http://www.acueducto.com.co/wpsv61/wps/portal!/ut/p/c4/04_SB8K8xLLM9MSSzPy8xBz9CP0os3gLw2DfYHMPIwN_cyMXA09H>

V1cLM2MTJ5MgE_2CbEdFAO5fkgY!/?W
CM_PORTLET=PC_7_81SMS7H20O72D0I
AEE8634B4N0_WCM&WCM_GLOBAL_C
ONTEXT=/wps/wcm/connect/eaabv6/sacued
ucto/aambiental/aambs>.

[11] Acurio, G., Rossin, A., Teixeira, P., & Zepeda, F. (1997). Diagnóstico de la situación de manejo de residuos sólidos municipales en América Latina y el Caribe. Organización Panamericana de la Salud, O.M.S., B.I.D.

[12] Domínguez, J. y Pérez-Díaz, D. (2011). Gestión de residuos orgánicos de uso agrícola. Desarrollo y nuevas perspectivas del vermicompostaje. Servizio de Publicacions e Intercambio Científico. Universidad de Santiago de Compostela, España.

[13] INFOJARDIN (2014). Eisenia fétida & Eisenia andrei. Recuperado el 04 de 04 de 2014, de <<http://www.infojardin.com/foro/showthread.php?t=308570>>.

[14] Díaz Mendoza, N. (27 de 10 de 2013). Video corporativo de Lombricultura de Tenjo. Tenjo, Cundinamarca, Colombia.

[15] Trejos Vélez, Mariana y Agudelo Cardona, Natalia (2012). Propuesta para el aprovechamiento de lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales de la empresa “Comestibles la Rosa” como alternativa para la generación de biosólidos. Proyecto de grado para optar por el título de Administrador Ambiental, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira.

[16] Amaya Arbeláez, Stefanía (2010). Transformación de sólidos provenientes de lodos generados en el sistema de alcantarillado de Bogotá mediante lombriz Roja Californiana (*Eisenia foetida*). Trabajo de pasantía para optar por el título de Ingeniero Ambiental, Universidad del Bosque, Bogotá.

[17] Chávez Porras, Álvaro y Rodríguez González, Alejandra (2011). Análisis químico

y biológico de biosólidos sometidos a sistema de lombricultura como potencial abono orgánico. Facultad de Ingeniería de la Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá.

[18] Grajales, Sandra J.; Monsalve, Jaime A.; Castaño, Mauricio (2006). Programa de manejo integral de los lodos generados en la planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad Tecnológica de Pereira. Revista Scientia et Technica. Pereira, Colombia – Volumen 31. Junio de 2006. Págs. 285-290.

[19] Campos M., Eduardo; Velázquez R., Alma; Gómez H., Ana M. (2011). Predicción y comparación de transferencia de nutrientes de dos tipos de vermicomposteo de lodos residuales a suelos forestales. Revista Quivera. México, -Volumen 13- Número 1. Enero-Junio de 2011. Págs. 1-15.

[20] Agroforestería. Agroforestry Science Web Information (2011). Recuperado el 11 de 04 de 2014, de <<http://agroforesteria.wordpress.com/2011/11/08/ciclo-del-nitrogeno-en-el-suelo/>>.

[21] Subrata Hait, Vinod Tare (2012). Transformation and availability of nutrients and heavy metals during integrated composting-vermicomposting of sewage sludges. Ecotoxicology and Environmental Safety. Kanpur, India, -Volume 79-. Pages 214-224.

[22] Nitrificación y Desnitrificación. Recuperado el 21 de 04 de 2014, de <<http://www.arc-cat.net/es/altres/purins/guia/pdf/ficha5.pdf>>.

[23] Sánchez, Jaime y Sanabria, Janeth (2009). Metabolismos microbianos involucrados en procesos avanzados para la remoción de nitrógeno, una revisión prospectiva. Revista Colombiana de Biotecnología, Bogotá, Colombia, -Volumen 11- Número 1. Enero-Junio de 2009. Págs. 114-124.

[24] Inofuentes, Jorge (2014). Corporación Bioquímica Internacional: Ácidos húmicos y fluvicos en la agricultura orgánica. Recuperado el 22 de 04 de 2014, de <

<http://www.slideshare.net/silvesterperez24/acidos-humicos-y-fulvicos-en-la-fertilizacion-organica>>.

ANEXOS

A1. Clasificación de biosólidos según su composición (USEPA)

Tabla 6. Límites de contaminantes por el uso de biosólidos en la producción de hortalizas (USEPA, 1994 Y 1995) [7]

Contaminante	Límite máximo de concentración para todos los biosólidos aplicados al suelo [mg/kg ⁻¹ (ppm)] ^z	Límite de concentración de contaminantes para el índice de calidad excepcional y Concentración de contaminantes de biosólidos [mg/kg ⁻¹ (ppm)] ^z	Límite de tasa de carga de contaminantes acumulada (CPLR) de biosólidos (kg/ha ⁻¹) ^x	Límite de tasa de carga de contaminante anual (APLR) de biosólidos (kg/ha ⁻¹ por periodo de 365 días) ^w
Arsénico	75	41	41	2.0
Cadmio	85	39	39	2.0
Cobre	4,300	1,500	1,500	75
Plomo	840	300	300	15
Mercurio	57	17	17	0.85
Molibdeno	75	---	---	---
Níquel	420	420	420	21
Selenio	100	100	100	5.0
Zinc	7,500	2,800	2,800	140
Aplicado a :	Todos los biosólidos son aplicados al suelo	Biosólidos a granel y biosólidos en bolsas	Biosólidos a granel ^y	Biosólidos empacados

^z Basado en peso seco.
^y Los biosólidos empacados fueron vendidos o dados en bolsas u otro contenedor.
^x 0.893 lb/acre = 1 kg/ha⁻¹

Tabla 7. Cantidad de patógenos en biosólidos Clase A y B (USEPA, 1994) [7]

Clasificación	Coliformes Fecales	<i>Salmonella</i> spp
Clase A	< 1,000 MPN ^z .g ⁻¹ TS ^y	o < 3 MPN 4g ⁻¹ TS
Clase B	< 2,000 MPN.g ⁻¹ TS or < 2,000 CFU ^x .g ⁻¹ TS	

^z numero más probable.
^y sólidos totales.
^x Unidades formadoras de colonias.

A2. Descripción del proceso de Lombricultura de Tenjo

Dimensiones del módulo de instalación de la siembra:



Ilustración 2. Configuración de la cama de lombrices en Lombricultura de Tenjo [14]

Bajo la configuración que se muestra en la Ilustración 2, se siembran 30 Kg de pie de cría por metro-área-piso. Para la instalación de la cama de siembra, se disponen en el piso de forma rectangular, orillos, guadua, esterilla y estacas de madera (materiales propios de la región), recubiertas por un plástico que ayuda a recoger los lixiviados [14].

El proceso de armado consiste en llenar la cama con estiércol bovino y extenderlo uniformemente hasta una altura de 10 cm. Si se sobrepasa esta altura, se produce un ambiente de compostaje, generando gases tóxicos y altas temperaturas que acabaría con las lombrices. A continuación se agrega el pie de cría. Para 90 Kg de semilla (por módulo), se adiciona la misma cantidad de alimento. Este material (contenido ruminal y estiércol bovino fresco de entre 5 y 60 días), es la casa y la comida para las lombrices. Cada 18 días se debe realizar la alimentación. En cada Kg de lombrices debe haber lombrices adultas y huevos. La proporción ideal de la cama debe ser de 70% lombrices por 30% de sustrato. Bajo estas condiciones, se extienden uniformemente la lombriz y el sustrato a lo largo de las dimensiones del módulo. Esta empresa también vende el pie de cría. Dado que las lombrices son fotofóbicas, estas se establecen en el interior del módulo, evitando la luz [14].

Luego, se produce el riego sobre la cama de siembra. Las lombrices no tienen dientes; por eso para succionar los nutrientes del alimento, éste debe estar húmedo. El riego se hace entre 2 y 3 veces a la semana por tratarse de un clima frío; la frecuencia del mismo, va de la mano con una prueba de humedad con un higrómetro. El valor ideal de humedad es del 75%; por prueba manual, implica el goteo de 3-4 gotas al exprimir una manotada de sustrato. El agua debe ser pulverizada, evitando encharcamientos e incrementado la uniformidad; se hace durante periodos cortos de alta frecuencia con aspersores [14].

La Lombricultura de Tenjo realiza una optimización en el uso del agua. Recoge las aguas lluvias que se depositan en los techos de plástico de los módulos y que viajan por un canal hacia un tanque de recolección (10 m³); con este recurso se realiza el riego [14].

Polisombra

Cada módulo se cubre con una polisombra de 85% o malla, que protege a las lombrices de las radiaciones directas. Se pone encima del sustrato. Evita además que aves de corral, pájaros, ciempiés, hormigas y La Planaria (*Prostheceraeus* sp.), entren en contacto y agredan a las

lombrices. A través de los orificios, se habilita la respiración y penetración del agua lluvia al interior del módulo. Este material permite la observación constante del módulo, que se hace 3-4 veces por semana [14].

Cubierta con material vegetal

Más adelante, se pone sobre el polisombra una cobertura vegetal (pasto seco) para aumentar la temperatura en clima frío, y en épocas de mucha lluvia, se descompone y actúa como alimento de las lombrices igualmente. El color, viscosidad y movilidad de las lombrices es un indicativo de su buen estado de salud [14].



Ilustración 3. Polisombra y cobertura con material vegetal Lombricultura de Tenjo [14]

Seguimiento

El proceso de seguimiento se hace a través del diligenciamiento de una tabla de registro, durante 120 días en clima frío y de 90-100 días en clima caliente. En ella se deben reportar la fecha, cantidad de alimento incluido y cantidad de lombrices sembradas.

TABLA DE REGISTROS									
PROYECTO LOMBRICULTURA DE TENJO									
Modulo No									
ALIMENTACIÓN		RECOLEC. HUMUS				RECOLECC. LOMBRIZ		RIEGO	
FECHA	Kg	FECHA	Kg	TEXTURA 1	TEXTURA 2	FECHA	TOTAL Kg	FECHA	CANTIDAD

Ilustración 4. Formato de seguimiento Lombricultura de Tenjo [14]

Suministro de sustratos

El aspecto más importante del sustrato es la humedad, ya que un sustrato muy acuoso no ofrece condiciones de supervivencia a la lombriz, mientras que uno muy seco dificulta su alimentación. El porcentaje ideal es de 75% [14].

En la Lombricultura de Tenjo manejan cuatro tipos de sustrato: 1) estiércol de caballo al 100%, 2) estiércol bovino al 100%, 3) Desechos orgánicos vegetales al 100% , tales como cáscara de plátano, cáscara de papa, cáscara de zanahoria o desechos de la cocina que no contengan sal, 4) mezcla de los tres sustratos anteriores, cada uno al 33% [14].

Trampeo

Se lleva a cabo por medio de una canastilla convencional con rotótulos u orificios por toda su superficie, en la que se deposita una capa de 10-15 cm de comida fresca (estiércol equino con pasto seco). Estas canastillas se ponen sobre los módulos que ya cumplieron los 120 días. Como las lombrices para ese momento ya no tienen alimento, migran del módulo hacia la canastilla en busca de comida a través de los orificios. Se estima que cerca del 70% del pie de cría es recuperado con esta técnica. Así se facilita la labor de cosecha (recogido del lombricompost) [14].



Ilustración 5. Canastilla para el trampeo Lombricultura de Tenjo [14]

Humus líquido

Es el resultado del suministro de agua a los cultivos. En este proceso el líquido pasa por el sustrato, se enriquece con sus minerales y se drena por gravedad, debido al ángulo de inclinación del 5% del módulo; para recoger el lixiviado, se dispone de una estructura a la altura del suelo, construida con cemento, arena y ladrillo [14].

Este humus se enriquece mediante un repaso del líquido por la cama entre 7 y 8 veces en el transcurso de 6 meses. Una vez recolectado, se almacena en tanques y se agita constantemente para aportarle estabilidad y que no tenga problemas en el futuro envasado. Su calidad se puede mejorar con adición de minerales típicos de la agricultura. Este producto puede usarse para autoconsumo o comercialización cuando se cuenta con una gran cantidad, tal como lo hace la empresa de Lombricultura de Tenjo [14]



Ilustración 6. Humus líquido de Lombricultura de Tenjo [14]

Sus productos son analizados periódicamente por el laboratorio AGILAB®, el cual garantiza la composición del lombricompost registrado ante el ICA.

Cosecha

Representa la culminación del proceso y se produce 120 días después de la siembra en clima frío, ó de 100 días en clima cálido. Con el método de trampeo, se capturan las lombrices en un periodo de 24-36 horas, para emplearlas en siembras posteriores. A continuación se recoge un material granuloso, café oscuro, inodoro, rico en nutrientes que se denomina lombricompuesto. Inmediatamente se recoge, el material tiene un 75% de humedad y rinde 20 bultos; al pasarlo al invernadero para bajar su humedad, rinde 17 bultos con un porcentaje de humedad del 25% [14].



Ilustración 7. Lombricompuesto cosechado Lombricultura de Tenjo [14]

Secado

Se dispone de una zona cubierta tipo invernadero, con un área de 10 m², totalmente pavimentada. Allí se extiende el lombricompuesto durante 22-3 días para que la intervención del sol permita bajar la humedad del material cosechado de 75 a 25%. Esta zona sirve también como bodegaje y almacenamiento del material [14].



Ilustración 8. Zona de secado Lombricultura de Tenjo [14]

Limpieza

Luego del paso por el invernadero, el lombricompuesto se somete a una prueba de humedad manual, la cual al ser aprobada, conlleva al tamizado y posterior empaque en bultos del producto. El tamizado se puede realizar mediante una malla o con una máquina especializada que optimiza el tiempo de limpieza. Esta máquina se compone de una tolva y un cilindro inclinado de operación manual, que limpia completamente el lombricompuesto, retirando pedazos de palos, hojas y piedras remanentes. El material sucio o de mayor granulomertría se clasifica como lombricompuesto de segunda; es posible repararlo por las lombrices o venderlo directamente. Se usa idealmente para pastos.



Ilustración 9. Máquina de construcción casera para limpiar el lombricompuesto Lombricultura de Tenjo [14]

El humus sólido que se obtiene al final, debido a su granulometría y bajo contenido de humedad, ofrece una ventaja para el agricultor en término de la fácil dispersión sobre el cultivo.

Empaque y almacenamiento

En este último paso, se debe considerar la condición higroscópica del lombricompuesto. Por ello, en Lombricultura de Tenjo el empaque consta de una bolsa plástica para evitar que el material reciba humedad y una bolsa externa de polipropileno para mayor protección contra rasgaduras y pérdidas. Con ayuda de un trípode se llena el bulto, luego se pesa en una balanza para garantizar la cantidad especificada en el empaque, y finalmente se sella con una cosedora industrial. Cada bulto contiene 50 Kg de lombricompuesto.



Ilustración 10. Empaque del lombricompuesto Lombricultura de Tenjo [14]

Por su contenido de microorganismos, el lombricompuesto no debe mantenerse almacenado por más de un año, se debe evitar la exposición al sol y a la lluvia.

Lombricultura de Tenjo comercializa tanto el humus sólido, como el líquido, pie de cría de lombriz Roja Californiana, acondicionador de suelos y cursos de lombricultura personalizados.

A3. Ciclo del nitrógeno en el suelo [20]

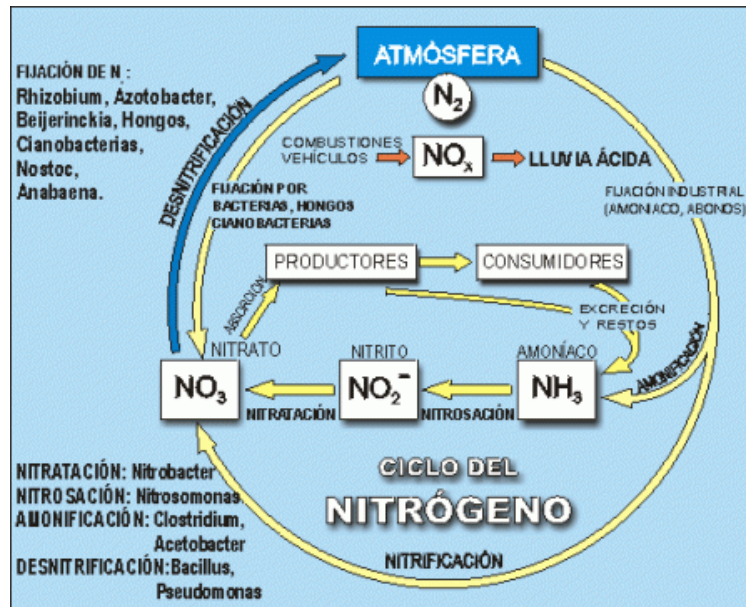


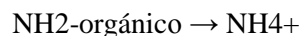
Ilustración 11. Ciclo del nitrógeno [20]

El ciclo del nitrógeno (N) en el suelo es una parte integrante del ciclo global del N. El N del suelo se deriva originalmente del gas N atmosférico, N_2 . Los microorganismos del suelo, sean de vida libre o asociados simbióticamente con plantas, fijan N_2 formando N orgánico a la forma de grupos aminos, $-NH_2$, en las proteínas. Este N pasa entonces a formar parte de la materia orgánica del suelo. Una característica principal del ciclo interno del N es su transformación continua desde la fase orgánica (N insoluble) a la fase inorgánica o mineral (N soluble) a través de los procesos de mineralización e inmovilización respectivamente, y realizados por la biomasa microbiana. Ambos procesos ocurren simultáneamente en el suelo; si el efecto neto es un incremento o disminución del N mineral disponible para las plantas depende principalmente de la relación carbono (C)/N en los residuos orgánicos que se degradan o descomponen en el suelo (ver más abajo). Las transformaciones ('turnover') de otros nutrientes, especialmente el fósforo (P) y el azufre (S), están estrechamente asociadas a las transformaciones bioquímicas del N. La descomposición de la materia orgánica convierte parte del N orgánico en N -mineral, de allí el término mineralización, denominación que se aplica a los iones amonio, NH_4^+ , nitrito, NO_2^- y nitrato, NO_3^- . El N mineral, principalmente amonio y nitrato, es absorbido por las plantas o asimilado por los microorganismos y convertido a N orgánico. Muchos de los problemas medioambientales relacionados con la agricultura están relacionados, directa o indirectamente, con el nitrógeno.

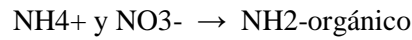
Conversiones del N en el suelo

El N del suelo se mueve (flujos) continuamente desde una forma a otra como resultado de la actividad de las plantas y microorganismos.

Mineralización es la transformación microbiana del N orgánico a N inorgánico o mineral:



Inmovilización es la conversión de N-mineral a N orgánico. Ocurre cuando los microorganismos no pueden satisfacer sus necesidades de N desde los materiales orgánicos de los cuales se están alimentando. Como resultado estos incorporan N-mineral:



Mineralización neta. Porque la mineralización e inmovilización ocurren al mismo tiempo es difícil separarlas. Normalmente el cambio en la cantidad de N-mineral acumulado en el suelo se mide dentro de un período de tiempo dado, y considerando las pérdidas por lixiviación, desnitrificación y volatilización (ver más abajo), se calcula un efecto neto. Puede haber una ganancia (mineralización neta) o pérdida de N-mineral, la última constituyendo una inmovilización neta.

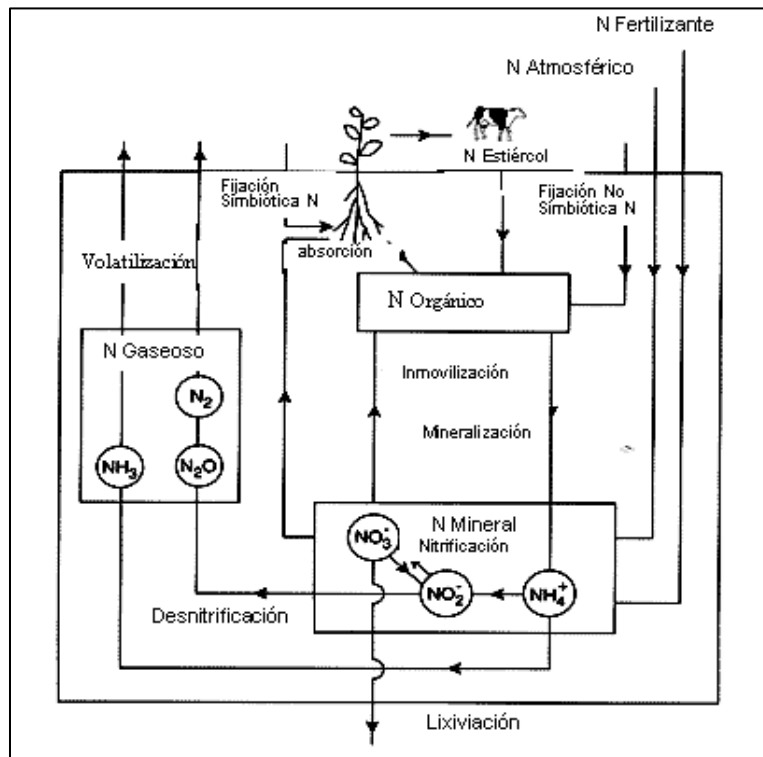
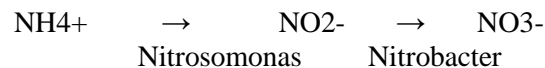
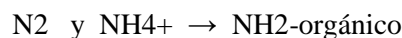


Ilustración 12. Procesos de nitrificación y desnitrificación [20]

Nitrificación es la oxidación de N-amonio a nitrito y nitrato por microorganismos específicos:



Fijación de N es la conversión de N₂ en la atmósfera del suelo a NH₄⁺ por grupos especializados de microorganismos. El NH₄⁺ es entonces asimilado a N-orgánico:



En ecosistemas agrícolas la asociación simbiótica de las leguminosas y bacterias del género Rhizobium y Bradyrhizobium es muy importante, considerando las cantidades de N₂ fijado. Su equivalente en ecosistemas forestales lo constituye la asociación del actinomiceto Frankia con plantas no leguminosas (Angiospermas).

Desnitrificación es la pérdida de gases nitrógeno y óxido nítrico desde el suelo bajo condiciones anaerobias. Nitrato y nitrito son reducidos a estos gases por microorganismos:

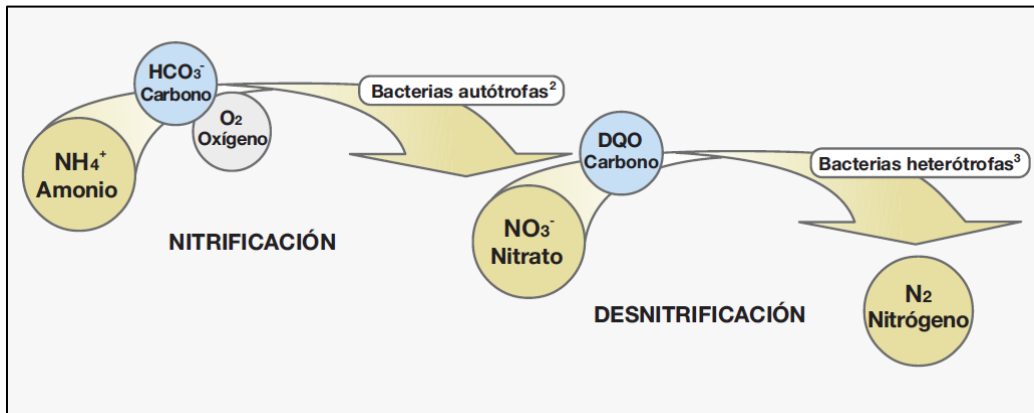
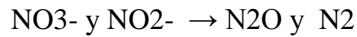


Ilustración 13. Reacciones de nitrificación y desnitrificación [22]

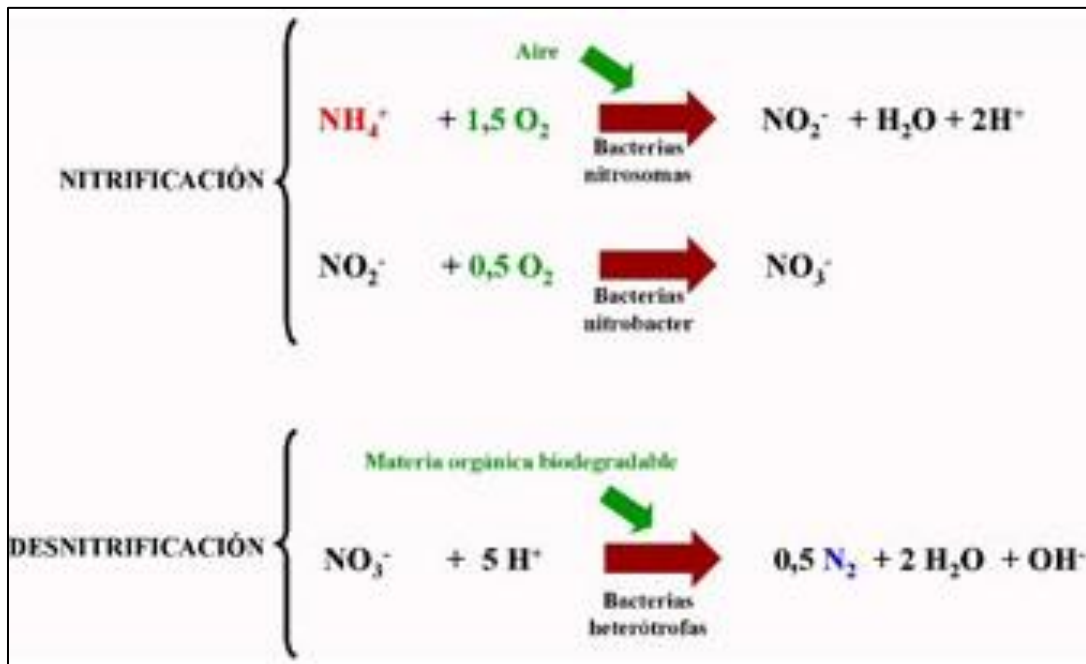
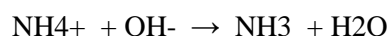


Ilustración 14. Reacciones de nitrificación y desnitrificación [23]

Volatilización es la pérdida de gas amoníaco desde el suelo. Bajo condiciones alcalinas los iones amonio son convertidos a moléculas de amoníaco en solución las cuales después pueden ser liberadas a la atmósfera del suelo:



Este proceso es estrictamente químico y no hay intervención de microorganismos.

Lixiviación del nitrato es el proceso por el cual el nitrato se pierde desde el suelo por flujo de masa a las aguas de drenaje. El nitrato no es adsorbido por las partículas del suelo a menos que ellas generen cargas positivas (ejemplo, suelos ácidos de origen volcánico, y húmedos del trópico).

Erosión y escurrimiento superficial. Considerables cantidades de N se pueden perder desde el suelo por erosión o escurrimiento superficial. Asumiendo una pérdida de 3×10^{12} kg de suelo agrícola y un contenido promedio de N de 0.15%, una cantidad estimada de 4.5×10^9 kg de N se podrían perder anualmente.

El ciclo del N se completa por la absorción de la planta desde el suelo, por adiciones directas desde la atmósfera (como nitrato, amoníaco, y gases de óxido de N los cuales son convertidos a nitrato en el suelo) y la adición de fertilizantes, residuos de cultivos, estiércoles animales o lodos biológicos (ejemplo, tratamiento de aguas servidas).

La absorción de N por las plantas

Las plantas absorben compuestos solubles de N, tanto en la forma de nitrato (que constituye la forma dominante de N soluble en el suelo) como a la forma de amonio. El equilibrio varía según las circunstancias y las especies, pero en general, el nitrato constituye la fuente principal de N para los cultivos. Los microorganismos pueden utilizar ambas formas como fuentes de N pero en general prefieren amonio.

En los ecosistemas agrícolas las fuentes de N, además de las adiciones atmosféricas (que controlan la productividad de los ecosistemas naturales), están las aplicaciones de fertilizantes tanto inorgánicos como orgánicos (estiércoles, lodos, composts). El cálculo preciso de los requerimientos de N por los cultivos depende de nuestro conocimiento de las tasas de mineralización del N en el suelo (la velocidad de transformación de la fase orgánica a la inorgánica) y la demanda de los cultivos.

Los factores que influyen la tasa e mineralización del N son los siguientes:

La cantidad de materia orgánica del suelo y su contenido. Ésta es el sustrato (alimento) para la actividad microbiana. En general, a cantidades mayores de materia orgánica, mayor será la actividad, con una sustancial parte del N mineralizado originado de la descomposición de residuos de cultivo frescos o recientes. Sin embargo para que ocurra una mineralización neta, la relación C/N de la materia orgánica en descomposición debe ser inferior a 30/1 (más de 1.8% de N). La descomposición de residuos o paja de trigo resultará en una inmovilización neta, al menos inicialmente, mientras que residuos de leguminosas al descomponerse producirán una mineralización neta.

Relaciones C/N típicas de algunos materiales orgánicos.

Material	C/N
Biomasa microbiana	6-12
Lodos biológicos	5-14
Humus del suelo	10-12
Estiércoles animales	9-25
Residuos de leguminosas y abonos verdes	13-25
Residuos de cereales y paja	60-80
Desechos (leñosos) forestales	150-500
Composts	15-20

Cambios en los niveles de NO_3^- durante la descomposición de residuos de cultivo en el suelo: Durante el proceso de descomposición de residuos con un bajo contenido de N. Bajo condiciones

favorables a la actividad microbiana, ocurre una degradación rápida de aquellos con la consecuente liberación de cantidades considerables de C como CO₂. Para satisfacer las necesidades de N de los microorganismos, se consume N mineral; y por lo tanto se produce inmovilización neta de N. Sin embargo, cuando la relación C/N del material que se descompone ha disminuido a un valor aproximado de 20, los niveles de NO₃⁻ aumentan otra vez debido a mineralización neta.

El tiempo requerido por los microorganismos para bajar la relación C/N de los residuos a un nivel donde las formas minerales de N se acumulan dependerá de factores como el clima, la tasa de aplicación, el contenido de lignina, el grado de contacto del material y los microorganismos, y el nivel de actividad de la microflora del suelo. Es razonable estimar que bajo condiciones favorables a la actividad microbiana, mineralización neta ocurrirá después de cuatro a ocho semanas de descomposición activa. Por lo tanto, si se incorporan residuos con una relación alta de N, inmediatamente antes de la siembra, se deberá proporcionar fertilizante-N extra para evitar la muerte del cultivo. Una regla general es agregar 1 kg de N por cada 100 kg de residuos adicionados.

El manejo agronómico. Se deben considerar una combinación de factores. Cuando las plantas mueren y se incorporan al suelo conjuntamente con los residuos de los cultivos, la aireación del suelo se mejora, condición favorable a la actividad microbiana. Normalmente la tasa de mineralización aumenta.

Otros factores que influyen la actividad microbiana y por lo tanto la tasa de mineralización son el contenido de agua, la temperatura, el pH y la aireación del suelo.

El contenido de agua. El suelo debe estar húmedo para que los microorganismos estén activos. El re-humedecimiento de un suelo seco produce un incremento dramático ('flush') de la actividad microbiana.

La temperatura. Los distintos grupos de microorganismos del suelo tienen un rango de temperaturas regulando las transformaciones que realizan (temperatura mínima, óptima y máxima). La tasa e metabolismo de los microorganismos aumenta en un factor 3 por cada 10°C de aumento en temperatura, hasta alcanzar un óptimo.

pH. Condiciones ácidas reducen la tasa de descomposición de la materia orgánica y la liberación de N-mineral, resultando en la acumulación de residuos de plantas parcialmente descompuestos en la superficie de suelos ácidos. El encalado aumenta la tasa e mineralización y mejora el suplemento de N-mineral a las plantas.

Aireación. Condición estrechamente relacionada al contenido de agua o niveles de compactación del suelo. Condiciones anaerobias disminuyen la actividad microbiana, causando la acumulación de materia orgánica (turberas) en áreas que se inundan y un suplemento reducido de N-mineral.

Por lo tanto, las máximas tasas de mineralización ocurren en suelos con altos contenidos de materia orgánica, húmedos y con altas temperaturas. Las estaciones del año, otoño y primavera, además de la incorporación de grandes cantidades de residuos frescos como práctica agronómica, son algunas de las condiciones anteriormente descritas, que favorecen la actividad microbiana, y consecuentemente la liberación de nutrientes.

Determinación de la absorción de N por las plantas

La absorción de N por las plantas, puede estudiarse mediante el empleo de fertilizantes enriquecidos en el isótopo de nitrógeno estable ^{15}N . Este último presenta igual número atómico (protones) que el ^{14}N pero con diferente número de masa (protones + neutrones). Por ejemplo, ^{1428}N , ^{1429}N . Los resultados de estudios de absorción con ^{15}N varían dentro de amplios límites. Algunos resultados típicos encontrados por diferentes autores se muestran en el Cuadro 2. Resultados de estudios realizados en Chile indican porcentajes de absorción de N del fertilizante aplicado en el rango 20-60 %, en cereales como trigo (*Triticum aestivum* L.) y maíz (*Zea mays* L.)

Balance de ^{15}N en un sistema suelo-planta%

Absorbido por el cultivo (parte aérea)	40-60
Incorporado en la materia orgánica del suelo	20-50
En forma mineral en el suelo (complejo arcilla-amonio)	5-20
Perdido por desnitrificación y volatilización	2-30
Perdido por lixiviación	2-10

La proporción de N aplicado absorbida por el cultivo se ve afectada por muchos factores, entre los que se incluyen las especies de cultivo, el clima y las prácticas de manejo agronómicas. La tasa de absorción varía también según la fase de desarrollo de la planta. Un trigo de invierno, necesita de solo pequeñas cantidades de N en otoño; en el invierno el cultivo está casi en un estado de dormancia. La absorción aumenta lentamente en primavera para posteriormente y en un período aproximado de dos meses alcanzar las tasas máximas de absorción. El rápido crecimiento del cultivo demanda en promedio cerca de $1.6 \text{ kgN ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$, aunque en días soleados y calientes, que producen un rápido crecimiento, las tasas de absorción pueden alcanzar hasta $6 \text{ kgN ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$. Idealmente el suplemento de N debería sincronizar esta distribución de demanda. Sin embargo, en la práctica una buena aproximación es parcializar las aplicaciones de N (por ejemplo 1/3 al momento de la siembra; 2/3 al tiempo de macolla). Estudios experimentales informan que a mayor número de aplicaciones parciales, la eficiencia de uso del N aumenta. Un cultivo como las papas (*Solanum tuberosum* L.) tiene una tasa de absorción más uniforme durante toda la temporada.

La capacidad de una planta para agotar el nitrato del suelo depende de muchos factores:

- De la duración de la temporada de crecimiento
- De la profundidad de la formación de raíces y la densidad de éstas. Las empastadas tienen una alta densidad de raíces, en tanto que los cereales de invierno, raps (*Brassica napus* L.) y la remolacha (*Beta vulgaris* L.) azucarera tienen raíces profundas para explotar las capas inferiores del suelo.
- De la disponibilidad de otros nutrientes. Las deficiencias de P y S, por ejemplo limitarán la absorción de N.
- De la incidencia de enfermedades. Las enfermedades de los cultivos producidas por hongos pueden reducir la absorción de N.
- De la humedad del suelo. Las condiciones excesivamente secas o húmedas limitarán la absorción de N.

Conclusiones

El conocimiento actual del ciclo del nitrógeno en el suelo y su interacción con el ciclo global o universal nos permite concluir que la correcta estrategia para un manejo del N en ecosistemas agrícolas es maximizar las entradas del elemento al suelo y disminuir sus salidas

desde el suelo a la atmósfera y aguas superficiales o profundas. Por otro lado para optimizar la eficiencia de uso del N es necesario sincronizar la demanda del cultivo con el suplemento entregado, ya sea naturalmente por el suelo o aquel proporcionado por los agricultores. Igualmente, la determinación de la tasa de mineralización del suelo permitiría ajustar las aplicaciones de N según los requerimientos del cultivo en la estación de crecimiento. Así, la incorporación de leguminosas en la rotación, el reciclaje de residuos de los cultivos, las prácticas de fertirriego, aplicaciones parciales del nutriente en la estación de crecimiento, y con las mayores aplicaciones durante la fase de mayor demanda, el desarrollo de un 'test' apropiado para cuantificar los aportes de N del suelo, entre otros, constituyen algunas de las buenas prácticas agronómicas y/o herramientas que permitirían desarrollar una estrategia de manejo del nutriente como la señalada anteriormente.