

Uso de biosólidos en Colombia: métodos de estabilización y aplicaciones a nivel agrícola

Use of biosolids in Colombia: methods of stabilization and applications at agricultural level

ELSA HELENA MANJARRÉS-HERNÁNDEZ

Bióloga

Msc. Ciencias Biológicas

Grupo de Investigación Gestión Ambiental

Universidad de Boyacá, Colombia

ehmanjarres@uniboyaca.edu.co

JOSÉ MIGUEL CASTELLANOS-ROZO

Microbiólogo

MSc. Ciencias Microbiológicas

Grupo de Investigación Gestión Ambiental

Universidad de Boyacá, Colombia

joscastellanos@uniboyaca.edu.co

JAQUELINE ARLETH GALVIS-LÓPEZ

Química de alimentos

MSc. Ciencias Biológicas

Grupo de Investigación Gestión Ambiental

Universidad de Boyacá, Colombia

jagalvis@uniboyaca.edu.co

NURI ANDREA MERCHÁN-CASTELLANOS

Microbióloga

PhD. Biotecnología

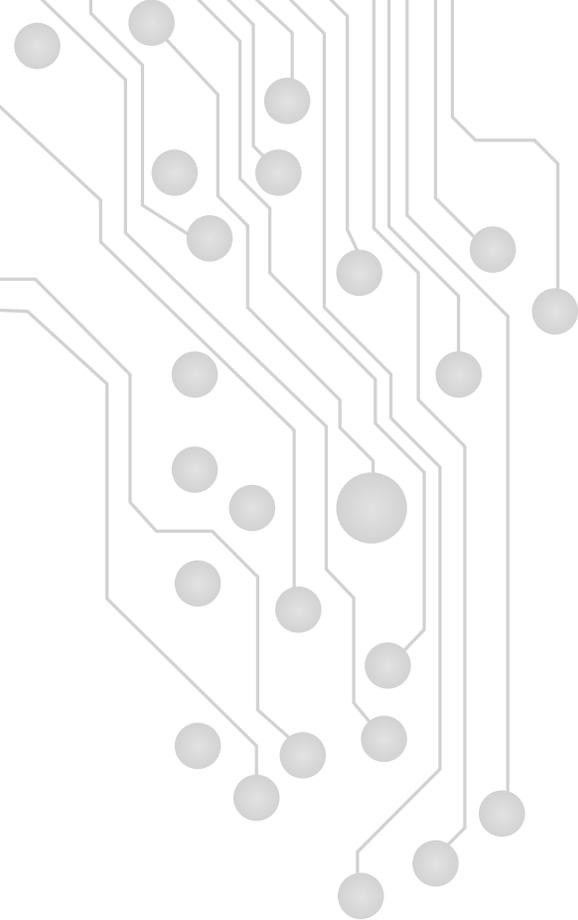
Grupo de Investigación de Bacteriología y Laboratorio Clínico

Universidad de Boyacá, Colombia

namerchan@uniboyaca.edu.co

Recibido: 05/07/2017

Aceptado: 04/12/2018



RESUMEN

Las plantas de tratamiento de agua residual, son sistemas diseñados con el objetivo de disminuir la carga contaminante del agua residual doméstica e industrial, mediante una serie de procesos físicos, químicos y biológicos produciendo efluentes de mejor calidad. El principal subproducto del tratamiento de aguas residuales son los lodos provenientes de los tratamientos primarios y secundarios. Dependiendo del sistema de tratamiento de aguas residuales y del manejo de los lodos generados en la planta, será la calidad de los lodos. Se ha determinado que en Colombia los lodos no presentan elevadas cantidades de metales pesados, no obstante, presentan grandes cantidades de microorganismos patógenos que pueden convertirse en un riesgo para la salud y el medio ambiente. Los lodos tienen que ser estabilizados para poder ser reutilizados como biosólidos. La estabilización comprende tratamientos que disminuyen las concentraciones de microorganismos patógenos. La selección del tratamiento para la estabilización del lodo depende de varios factores, tales como: la cantidad y calidad de lodos a tratar, las condiciones particulares del sitio y la situación financiera para esta disposición. En Colombia se han aplicado diferentes tratamientos de estabilización como la estabilización alcalina, deshidratación en el lecho de secado, entre otros. Cada tratamiento tiene sus ventajas y desventajas. En Colombia son pocos los estudios y a baja escala, donde se evidencia la aplicación de biosólidos a nivel agrícola. Sin embargo, los estudios han indicado que los biosólidos se pueden aplicar en el suelo mejorando su estructura y fertilidad, aumentando el rendimiento de los cultivos y produciendo alimentos inocuos con similares características organolépticas y nutricionales que los cultivos tradicionales.

Palabras clave: ácido gálico, polifenoles totales, reactivo de Folin-Ciocalteu.

ABSTRACT

Wastewater treatment plants are systems with the objective of reducing a load of domestic and industrial wastewater through a series of physical, chemical and biological processes that produce effluents of better quality. The main byproduct of wastewater treatment are the first steps of primary and secondary treatments. Depending on the wastewater treatment system and the management of the sludge generated in the plant, it will be the quality of the sludge. It has been determined

Citar este artículo así: Majarres E., Catellanos J., Galvis J., & Mechán N (2018). Uso de biosólidos en Colombia: métodos de estabilización y aplicaciones a nivel agrícola. Revista I3+, 4(1), 9 - 28 p.p

that in Colombia the quantities of heavy metals are not presented, they are not presented, the quantities of pathogenic microorganisms that can become a risk for health and the environment are presented. The sludge has to be stabilized in order to be reused as biosolids. Stabilization includes treatments that decrease the results of pathogenic microorganisms. The selection of the treatment for the stabilization of time depends on several factors, such as the quantity and quality of the treatment, the particular conditions of the site and the financial situation for this provision. In Colombia, different stabilization treatments have been applied such as alkaline stabilization, dehydration in the drying bed, among others. Each treatment has its advantages and disadvantages. In Colombia, there are few studies and a low level of escalation, where the application of biosolids at agricultural level is evident. However, studies have indicated that biosolids can be applied to the soil better than their structure and fertility improve crop yields and the production of harmless foods with similar organoleptic and nutritional characteristics than traditional crops.

Keywords: gallic acid, total polyphenols, Folin-Ciocalteu reagent.

INTRODUCCIÓN

El tratamiento de aguas residuales es una combinación de procesos físico-químicos y biológicos cuyo principal subproducto es la generación de lodos altamente putrescibles, compuestos principalmente de materiales orgánicos e inorgánicos y microorganismos (Vélez, 2007; Comisión Europea, 2010; Metcalf y eddy, 2003). Algunos autores han indicado que el manejo de los lodos constituye el mayor costo del tratamiento de aguas residuales (Anjum et al., 2016). La generación de los lodos se ha convertido en un problema ambiental porque presenta una alta concentración de agentes patógenos y pueden contener sustancias tóxicas como metales pesados y compuestos orgánicos recalcitrantes (Kefala et al., 2013). La acumulación de los lodos en las plantas de tratamiento también ocasiona malos olores, atraen insectos que pueden convertirse en vectores que transmiten enfermedades. En la actualidad, Colombia genera aproximadamente 274 toneladas diarias de lodos, por lo tanto su caracterización y estabilización es fundamental para su gestión, de ahí la importancia de buscar tratamientos que permitan dar uso a este tipo de residuos o hacer la disposición final adecuada de los mismos de la forma más conveniente, tanto desde el punto de vista económico como ambiental (Superintendencia de Servicios Públicos, 2017, Mahamud et al., 1996). El presente artículo es una recopilación de los principales métodos utilizados para estabilizar los lodos, sus ventajas, desventajas y los principales usos a nivel agrícola en Colombia.

1. DIFERENCIA ENTRE LODOS Y BIOSÓLIDOS

Los lodos son subproductos líquidos, sólidos o semisólidos producto del tratamiento de las aguas residuales, están compuestos principalmente de materiales orgánicos e inorgánicos, metales pesados, así como organismos como virus, parásitos, hongos y bacterias (Comisión Europea, 2010). Las características de los lodos dependen de los tratamientos que se le apliquen a las aguas residuales, estos tratamientos pueden ser de dos clases según el tipo de agua a tratar, los aerobios y los anaerobios. También pueden darse procesos combinados.

En la figura 1 se presentan los tipos de lodos que se producen en las plantas de tratamiento de aguas potable y residual.



Los lodos crudos son aquellos que no han sido tratados ni estabilizados, generalmente producen malos olores. Los primarios se producen durante los procesos de tratamiento primario de las aguas residuales y contiene generalmente una gran cantidad materia orgánica no digerida. A diferencia de los primarios los lodos secundarios contienen partículas no hidrolizables y una gran cantidad de biomasa producto del metabolismo celular. Los lodos terciarios, se producen a través de procesos de tratamiento posterior como la adición de agentes floculantes. Los lodos activados se generan a partir del tratamiento biológico y se caracterizan por formación de flóculos, los cuales están constituidos por biomasa viva y muerta además de partes minerales y orgánicas. Cuando este lodo activado retorna al tanque de aireación se denomina lodo activado de retorno. En procesos de digestión aeróbica, se producen lodos digeridos que se caracterizan por tener un aspecto negro y olor a tierra. Tienen una proporción de materia orgánica del orden de 45 to 60 % (Lenntech, 2017).

Parámetro	Unidad	Lodo	Biosólido
pH	Unidad	5-8	6.5-7.5
Alcalinidad	Mg de Ca CO ₃	500-1500	2500-3500
Nitrógeno	% de ST	1,5-4	1,6-6
Fósforo	P ₂ O ₃ % de ST	0,8-2,8	1,5-4
Aceites y grasas	% de ST	6-30	5-20
Proteínas	% de ST	20-30	15-20
Ácidos orgánicos	Mg L ⁻¹	6800-10000	2700-6800
Sólidos totales	%	2-8	6-12
Sólidos volátiles	% de ST	60-80	30-60

Fuente: Hurtado, A. 2015

2. NORMATIVIDAD

La normatividad sobre biosólidos en general establece los límites permisibles de microorganismos indicadores de contaminación fecal y las concentraciones de metales pesados que debe tener el biosólido con el fin de determinar su uso. Las normas establecen la necesidad de realizar un tratamiento posterior a los lodos, para poder ser reutilizados como biosólidos.

Se debe evaluar el contenido de metales pesados como Arsénico (AS), Cadmio (Cd), Cromo (Cr), Mercurio (Hg), Plomo (Pb) y su posterior magnificación porque su peligrosidad reside en que no pueden ser degradados (ni química, ni biológicamente) y tienden a bioacumularse en los organismos vivos provocando efectos tóxicos de muy diverso carácter, entre ellos patologías como diferentes tipos de cáncer, problemas en el desarrollo de fetos y niños, artritis, enfermedades cardiovasculares, dolencias renales, desórdenes en el sistema nervioso (Meléndez, 2012).

También se debe evaluar el contenido de microorganismos patógenos porque constituyen un riesgo para la salud humana. Entre las bacterias patógenas más importantes que pueden estar presentes en los biosólidos se encuentran, *Salmonella typhi* (que produce fiebre tifoidea), *Escherichia coli* (que produce gastroenteritis), *Shigella sp.*, (que produce disentería bacilar) y *Vibrio cholerae* (que produce cólera). Entre los protozoos se encuentran la *Cryptosporidium parvum* y *Balantidium coli* (que producen diarrea); también se pueden encontrar huevos de helmintos, los que más prevalecen son *Ascaris lumbricoides* y *Taenia saginata*. También se ha encontrado virus en los biosólidos como los causantes de la hepatitis A y de la poliomielitis (Cortez, 2003).

En varios países, se han implementado normas con el objetivo de minimizar los riesgos asociados con el uso de los biosólidos. La norma 40 CFR parte 503 de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), establece un precedente importante en cuanto a manejo de lodos y biosólidos, fijando límites de metales pesados, calidad microbiológica y atracción de vectores, además de recomendar tratamientos para su estabilización, de tal forma que puedan cumplir con dichas exigencias. Esta norma clasifica los biosólidos de acuerdo con el contenido de indicadores de contaminación fecal en dos categorías clase A y clase B. Los de clase A presentan coliformes fecales en una concentración menor de 1000 UFC g-1 de sólidos totales (ST), Salmonella <3 NMP 4g-1 ST, enterovirus <1 UFP 4g-1 ST y huevos viables de helmintos <1 4g-1 ST; pueden ser usados sin restricciones en la agricultura (EPA, 1999).

La Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT contempla microorganismos indicadores similares, sin embargo, establece concentraciones menores a 10 huevos viables de helmintos g-1 para los biosólidos clase B (NOM-004-SEMARNAT, 2003).

Como antecedentes a la normatividad de biosólidos en Colombia, se tiene el Reglamento Técnico del Sector Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS, 1998), la Resolución 822 de 1998, donde se define el término “lodo biológico”. Solo hasta el RAS 2000 en la Resolución 1096 de 2000 se define el término “biosólido” pero no reglamenta la gestión de los mismos. Otra normatividad implementada es la que establece la Norma Técnica Colombiana (NTC) 5167 que regula los productos orgánicos usados como fertilizantes o acondicionadores del suelo (Norma Técnica Colombiana 5167, 2004, Bedoya et al., 2013). Solo a partir del 2014 en Colombia, se cuenta con el decreto 1287 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, el cual establece los criterios para el uso de los biosólidos resultantes del tratamiento de aguas residuales. En la tabla 3 se muestran los parámetros microbiológicos que permiten definir o clasificar los biosólidos con respecto a la normatividad de algunos países.

Tabla 3. Criterios microbiológicos para la caracterización de los biosólidos en América

País	Coliformes fecales NMP g-1	Salmonella sp NMP g-1	Huevos de helmintos HH g-1	Virus UFPg-1
Colombia (1)	Clase A: < 1x10 ³	Clase A: ausente	Clase A: < 1	Clase A: < 1
EE.UU. (2)	Clase B: < 2x10 ⁶	Clase B: < 1x10 ³	Clase B: < 10	Clase A: < 1/4
México (3)	Clase A: < 1x10 ³	Clase A: < 3/4g	Clase A: < ¼	-
Brasil (4)	Clase B: < 2x10 ⁶	Clase A: < 3 Clase B: < 3 Clase C: < 300	Clase A: < 1	Clase A: < 1/4

Chile (5)	Clase A: < 1x103	Ausencia en 10g	Clase B: <10	-
Argentina (6)	Clase B: < 1x103 Clase C: < 2x106	Clase A: < 3/4	Clase C: <35	-
	Clase A: < 1x103* Clase B: < 2x106*	Clase A: < 3/4	Clase A: < 1/4 Clase B: <10	Clase A: < 1/4 Clase B: <10
			Clase A: <1/4	Clase A: <1/4

(1) Decreto 1287 de 2014 (Minambiente).

(2) Norma 40 CFR parte 503 (EPA, 2003).

(3) NOM-004-SEMARNAT (SERMANAT, 2002).

(4) Resolución N°_375 de 29 de agosto de 2006 (Conama, 2006).

(5) Decreto Supremo N° 123 (30/08/2006) (Conama, 2000; Mena, 2008) (6) Resolución N° 97/01 (22/11/2001) (Mena, 2008).

Por otra parte, los valores máximos permitidos de metales según el Decreto 1287 de 2014 se presentan en la tabla 4.

Tabla 4. Valores máximos permisibles, biosólidos categoría A y B.

País	Coliformes fecales NMP g-1	Salmonella sp NMP g-1	Huevos de helmintos HH g-1	Virus UFPg-1
Metales pesados	Arsénico (AS)		20	40
	Cadmio (Cd)		8	40
	Cobre (Cu)		1000	1750
	Cromo (Cr)		1000	1500
	Mercurio (Hg)	Mg Kg-1 de biosólido (Base seca)	10	20
	Molibdeno (Mb)		18	75
	Níquel (Ni)		80	420
	Plomo (Pb)		300	400
	Selenio (Se)		36	100
	Zinc (Zn)		2000	2800

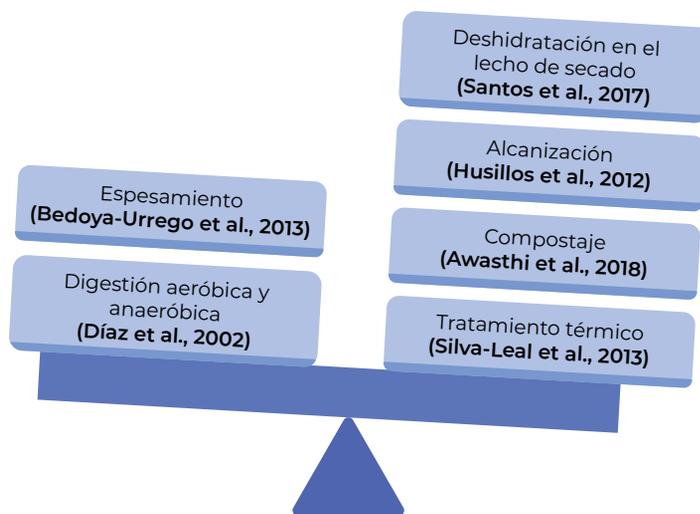
Hasta el momento en Colombia se han realizado estudios de caracterización y estabilización de los lodos en las principales plantas de tratamiento como son Río Frío en Bucaramanga, San Fernando en Medellín, Cañaveralejo en Cali y Salitre en Bogotá (López, 2015; Bedoya-Urrego et al., 2013; Torres et al., 2008; Giraldo et al., 2006). Los resultados indicaron que los lodos generados en estas plantas,

presentan metales pesados por debajo de los límites máximos permisibles según el decreto 1287 de 2014. No obstante, presentan un alto contenido de agentes patógenos, por lo cual requieren procesos de estabilización para reducirlos o eliminarlos.

Con la entrada en vigencia de la normatividad colombiana se espera que las problemáticas asociadas a la mala disposición o reutilización de estos residuos, sean subsanadas mediante la aplicación de métodos de estabilización factibles, seguros y sostenibles (Cuevas, 2006; Vélez, 2007).

3. PROCESOS DE ESTABILIZACIÓN

Los lodos producidos en las plantas de tratamiento de aguas residuales, deben de ser procesados, es decir convertidos en biosólidos antes de ser reutilizados. Este proceso, denominado “estabilización”, ayuda a minimizar la generación de olores, destruir los agentes patógenos y reducir las probabilidades de atracción de vectores (Decreto 1287 de 2014). Los procesos de estabilización involucran tratamientos como la centrifugación y digestión aerobia y anaerobia, no obstante, los más usados a nivel mundial son el compostaje, la estabilización alcalina, el tratamiento térmico, los cuales utilizan como mecanismos de remoción la radiación solar, la elevación del pH y el aumento de la temperatura (Figura 2). La selección de los métodos de estabilización depende de la concentración de microorganismos patógenos y de las características químicas de los lodos. La concentración y diversidad de microorganismos patógenos depende del estado epidemiológico de la comunidad (Fernandes y De Souza, 2001; Jiménez, 2001), mientras que las características químicas dependen de las actividades económicas es decir actividades domésticas o industriales de la comunidad (Mahamud et al., 1996 a, b). A continuación se muestran algunos tratamientos para lograr la estabilización de los lodos:



3.1 Espesamiento

Este tratamiento busca reducir la fracción líquida del lodo aumentando la fracción sólida del mismo, esa reducción del volumen del lodo es beneficiosa para los procesos posteriores tanto por la capacidad de los tanques como el uso de reactivos, el espesamiento se puede realizar mediante procesos físicos como el espesado por gravedad o sedimentación, por centrifugación o por flotación, con ello se reduce los costos de transporte. La desventaja de este método es que no inactiva los microorganismos patógenos, solo reduce el volumen de los lodos (Bedoya-Urrego et al., 2013; Oropeza, 2006; Moeller, 1997).

3.2 Digestión (Aeróbica/Anaeróbica)

Con estos procesos se logra la estabilización biológica, mediante la conversión de la materia orgánica principalmente en dióxido de carbono, agua y metano. En la digestión anaerobia hay dos fases, en la primera se forman ácidos volátiles y en la segunda las bacterias anaerobias producen gas metano a partir de dichos ácidos, todo esto en ausencia de oxígeno molecular (O_2), mientras que en la digestión aerobia hay un continuo proceso de aireación prolongada (dotando al sistema de O_2) para provocar el desarrollo de microorganismos aerobios hasta sobrepasar el periodo de síntesis de las células y llevar a cabo su propia auto-oxidación, reduciendo así el material celular (Díaz, et al., 2002; Van Haandel; Oropeza, 2006). Con estos tratamientos se reduce el contenido de materia orgánica biodegradable, por la conversión de materiales solubles y gas, además de reducir los niveles de organismos patógenos, olores y potencial de atracción de vectores durante la aplicación (Jiménez, 1998). Cabe aclarar que la digestión anaerobia, no reduce eficientemente la concentración de patógenos hasta los límites permisibles según la normatividad (Schwartzbrod et al., 1987).

3.3 Estabilización alcalina

La estabilización alcalina consiste en agregar concentraciones de sustancias básicas al lodo. Se ha estudiado la posibilidad de agregar diferentes tipos de sustancias alcalinas como cenizas, y $CaOH_2$ (Torres et al., 2008). Sin embargo, el compuesto más utilizado es la cal viva (CaO). Se ha comprobado que la aplicación de concentraciones de cal viva al 9% eleva el pH alrededor de 12 generando altas eficiencias de remoción de coliformes fecales, virus y huevos de helmintos en poco tiempo (Torres et al., 2008 y Torres et al., 2009). La estabilización alcalina es reconocida por la Agencia de Protección al Ambiente de los Estados Unidos (US EPA) como un proceso capaz de reducir significativamente el contenido de microorganismos y producir biosólidos que pueden ser utilizados con fines agrícolas (EPA, 1993). La estabilización alcalina es uno de los métodos más usados, sin embargo tiene como desventajas el endurecimiento del material al ser expuesto al aire, produciendo fijación de metales pesados, insolubilización de fósforo y pérdidas de nitrógeno por volatilización (Williford, et al., 2007; Andreoli et al., 2001; EPA, 1999; Girovich, 1996), requiere inversión de dinero para comprar y transportar la cal a la planta de tratamiento, es aplicable únicamente a suelos ácidos y el volumen de biosólidos se incrementa

por la aplicación de cal, lo que genera mayores costos de transporte y tratamiento final (Mahamud et al., 1996a; Barrios y Cabriol, 2002). Este método ha sido aplicado en plantas de tratamiento de aguas residuales en las grandes ciudades de Colombia (Torres et al., 2009).

3.4 Tratamiento con microorganismos eficaces

Consiste en la utilización de un consorcio de microorganismos benéficos que gracias a su metabolismo generan un ambiente negativo, controlando los microorganismos patógenos como los coliformes. Estos microorganismos tienen la capacidad de fermentar la materia orgánica, disminuir el pH, reducir la demanda bioquímica de oxígeno y el contenido de nitratos, grasas y aceites. Algunos de ellos tienen la capacidad de inmovilizar metales pesados. La desventaja de este método es el costo de utilización del consorcio microbiano y su adaptación al tipo de lodo utilizado (Fioravanti, 2003). No se han realizado estudios donde se evalúe el efecto de este tratamiento sobre los huevos de helmintos.

3.5 Deshidratación en lecho de secado

La estabilización por deshidratación en lecho de secado es un proceso natural donde el lodo es depositado en compartimientos rectangulares de poca profundidad con fondos porosos, lo cual permite junto con la incidencia de la luz solar, la deshidratación y desinfección del lodo. Las ventajas de este método son bajo nivel de inversión, simplicidad operacional, limitado consumo de energía, la no adición de químicos. La deshidratación reduce el volumen de los lodos, aumentando la concentración de la materia orgánica expresada como sólidos totales, por lo cual facilita su manejo en la planta porque ocupa menos terreno. Otra ventaja importante es que este tratamiento no tiene efecto sobre las propiedades nutricionales del lodo como sí lo tiene el uso de la cal en altas concentraciones (Pompeo et al., 2016). La desventaja es que depende de las características meteorológicas del lugar donde está la planta de tratamiento como la temperatura, humedad relativa, la incidencia de la luz solar. Estas características hacen que el proceso de deshidratación y desinfección del lodo se prolongue en el tiempo. Estudios realizados indican que se requiere alrededor de varios meses, para eliminar *Salmonella* sp., y disminuir la concentración de coliformes hasta límites permisibles (Shanahan et al., 2010; Santos et al., 2017). Estudios de deshidratación en lecho de secado han demostrado que algunos agentes patógenos como los huevos de helmintos pueden sobrevivir hasta por dos años en lodos, por lo cual los lodos casi siempre alcanzan la categoría B (Onofre et al., 2017, Pompeo et al., 2016). La deshidratación en lecho de secado parece ser que es una buena alternativa para plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas pequeñas como las municipales, donde se maneja un menor volumen de lodo.

3.6 Compostaje

El compostaje es un método biológico que transforma restos orgánicos de distintos materiales (lodos residuales, residuos domiciliarios, residuos de cosecha, cortezas y estiércol, entre otros) en un producto relativamente estable, cuyo uso se ha incrementado en los últimos años como una alternativa efectiva para mejorar la productividad y la calidad de los suelos. En este proceso se identifican dos fases consecutivas claramente diferenciadas: la fase de compostaje propiamente dicha, donde la actividad microbiana es alta dado a que tienen a su disposición gran cantidad de compuestos fácilmente biodegradables, y la fase de maduración o estabilización, en la que la actividad de los microorganismos decae al estar agotada la reserva de material biodegradable. Ambas fases están sometidas a control de temperatura, humedad y aireación. El compostaje tiene como ventajas que es de fácil manejo, disminuye los malos olores, los microorganismos patógenos y las sustancias fitotóxicas obteniendo un producto final con una materia orgánica biodegradada más estabilizada, donde se pierde menos nitrógeno (Costa et al., 1991). Tiene como desventajas la inversión inicial, se necesita una aclimatación adecuada, también disposición de terreno y un control de la temperatura, humedad y aireación (García, 2014).

3.7 Tratamiento térmico

El tratamiento térmico es un proceso en el que los lodos se calientan en un depósito a temperaturas elevadas durante un periodo corto de tiempo. Se ha reportado que temperatura superior a 60 °C durante 12 horas elimina microorganismos patógenos como coliformes fecales y huevos de helmintos. Este tratamiento hace que el agua contenida y ligada a los lodos se libere, permitiendo una deshidratación adecuada sin necesidad de adición de reactivos químicos, lo cual disminuye su volumen. Una vez que el agua contenida en los lodos se ha liberado, se provoca la destrucción celular y la liberación de sólidos orgánicos solubles y nitrógeno amoniacal. Este método tiene como desventaja el costo y el consumo de energía (Torres et al., 2009).

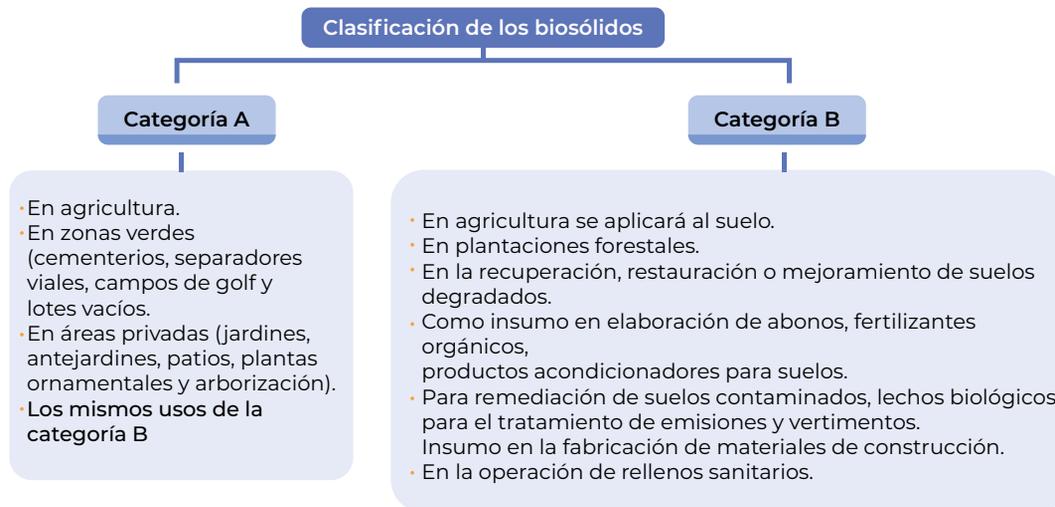
Otro tratamiento utilizado es la incineración. Este proceso consiste en aplicar temperatura elevada oxidando toda la materia orgánica. Se lleva a cabo en hornos a una temperatura por encima de los 800°C en un ambiente rico en oxígeno, lo cual produce dióxido de carbono, agua, cenizas y energía. Las ventajas que tienen este tipo de tratamiento son la reducción del volumen total de los lodos, la eliminación del olor, la destrucción de los patógenos y la producción de energía. Tiene como desventajas el transporte y el alto costo como también la emisión de contaminantes en forma en gases de combustión como las dioxinas que ocasiona problemas de calidad de aire y salud pública. Existen varios tipos y arreglos de incineradores, sin embargo, para el tratamiento de lodos se emplean los de pisos múltiples, los de lecho fluorizado y aquellos de “powder burning”. Los mecanismos de transferencia de calor conducción convección y radiación ocurren en sólidos, líquidos y gases a altas temperaturas. El flujo interior debería ser laminar o turbulento, aunque generalmente es el último (Roy et al., 2018).

4. UTILIDAD DE LOS BIOSÓLIDOS

Según el decreto colombiano 1287 de 2014, los biosólidos se clasifican en categoría A y categoría B. Los biosólidos de categoría A gracias a su alto valor nutricional (materia orgánica, fósforo y nitrógeno así como en micro elementos como el zinc, el níquel y el cobre), pueden ser utilizados sin restricción como enmienda orgánica no húmica en la agricultura, mejorando la estructura y textura de los suelos y favoreciendo la capacidad de absorción de agua y la asimilación de los nutrientes por las plantas, lo que garantiza un mejor desarrollo de los cultivos y disminuye el costo generado por la aplicación de fertilizantes (Mantilla, 2015). También puede ser utilizado como agente recuperador de suelos en zonas verdes tales como cementerios, separadores viales, campos de golf y lotes vacíos, en jardines, antejardines, patios, plantas ornamentales y arborización. También puede cumplir los mismos usos que los biosólidos categorizados como B (Figura 3).

Los biosólidos categoría B pueden ser utilizados principalmente en la restauración de suelos degradados, en lechos biológicos para el tratamiento de emisiones y vertimientos, soporte físico y sustrato biológico en sistemas de filtración, absorción y adsorción, como insumo en la fabricación de materiales de construcción, en la estabilización de taludes de proyectos de la red vial, en actividades de revegetalización y paisajismo, en cobertura de rellenos sanitarios y en procesos de valorización energética ya que los biosólidos poseen un alto valor calorífico lo cual los hace una excelente fuente para el desarrollo de alternativas de combustión con recobro de energía (Hurtado, 2015).

Tabla 3. Absorbancia obtenida con el reactivo de F-C a 760 nm en función del tiempo y de la concentración de AG.



5. EXPERIENCIAS DEL USO DE BIOSÓLIDOS EN LA AGRICULTURA

El aprovechamiento agrícola de los biosólidos es una práctica establecida y aceptada en muchos países del mundo, entre ellos Estados Unidos, México, Brasil y la Comunidad Europea. Esto implica un reto económico y de ingeniería, porque requiere inversión en infraestructura como también en investigación y desarrollo de nuevas tecnologías.

Una alternativa viable en Colombia es utilizar los biosólidos en la agricultura sostenible ya que presenta una gran cantidad de nutrientes representados en materia orgánica, ello ayudaría a mejorar la fertilidad, textura y estructura de los suelos, reducir la utilización de fertilizantes químicos, de tal manera que se podría optimizar gastos, aumentar la producción de las cosechas y por ende las ganancias (Arévalo et al., 2009).

Las investigaciones en Colombia sobre la aplicación de biosólidos se han llevado a cabo a pequeña escala. Estudios realizados por Silva et al., (2013a), evaluaron el posible aprovechamiento de tres tipos de biosólido obtenidos en la planta de tratamiento de aguas residuales de Cañaveralejo Cali-Colombia, para el cultivo y producción de rábano (*Raphanus sativa*), biosólido deshidratado, secado térmicamente (60 °C por 12,58 h) y alcalinizado (cal viva 9% peso seco). Los resultados indicaron que el tratamiento de secado térmico incrementa el contenido de nitrógeno mineralizado en los biosólidos, lo que los convierte en una fuente efectiva y rápida de nitrógeno para las plantas. El tratamiento con biosólido deshidratado aumentó entre un 40% y 150% el peso de las plantas de rábano, mientras que el biosólido secado térmicamente y alcalinizado lo aumentó entre un 92% y 109% y un 17% y 40% respectivamente.

Consecutivamente se evaluó el efecto de aplicación de biosólido deshidratado, biosólido secado térmicamente y biosólido estabilizado con cal, sobre las propiedades físicas de un suelo cultivado con caña de azúcar, los tratamientos consistieron en suelo sin biosólido, suelo sin fertilización mineral (To) y suelo con fertilización mineral (FM), de los cuales se observó una tendencia en los tratamientos con biosólido a disminuir la densidad aparente, la microporosidad y a aumentar la estabilidad estructural y la macro porosidad de los suelos (Peñarete et al., 2013).

En estudios realizados por Torres et al., (2007), se evaluó la aplicación de lodos compostados obtenidos del tratamiento primario de la PTAR Cañaveralejo Cali, en cultivos de acelga y observaron un incremento entre el 43% y 130% en relación con el suelo testigo.

En Santander, se evaluó el efecto de la aplicación de biosólidos de la PTAR de Río frío, estabilizado con cal en una dosis de 33% en lechuga, encontrando un efecto positivo en su crecimiento (Escobar, 2010).

Experimentos a nivel de invernadero realizados en la Universidad Nacional, Sede Medellín, evaluaron la acumulación de metales pesados en las diferentes partes de plántulas de tomate raíz, el tallo, las hojas, el fruto que fueron fertilizadas con Biosólidos de la PTAR de San Fernando. Ellos determinaron que las plantas absorben cantidades relativamente pequeñas de metales pesados (inferiores a las concentraciones consideradas como permisibles), las cuales se acumulan más que todo en la raíz más no en el fruto (Ortega, 2017).

CONCLUSIONES

Los lodos deben ser estabilizados porque presentan grandes cantidades de microorganismos patógenos que pueden convertirse en un riesgo para la salud y el medio ambiente. La estabilización comprende tratamientos como estabilización alcalina, deshidratación en el lecho, de secado, tratamientos térmicos, compostaje, entre otros. La selección del tratamiento para la estabilización del lodo depende de varios factores, tales como: la cantidad y calidad de lodos a tratar, las condiciones particulares del sitio y la situación financiera de la Planta de tratamiento de Aguas Residuales. Cada tratamiento tiene sus ventajas y desventajas. En plantas de tratamiento municipales pequeñas se recomienda la estabilización en lechos de secado, mientras que, en plantas de tratamiento grandes, el compostaje y la estabilización alcalina, como también el tratamiento térmico son las que mejor se adaptan a sus necesidades. En Colombia, son pocos los estudios donde se evidencia la aplicación de biosólidos a nivel agrícola. Estos estudios se han hecho a pequeña escala. Sin embargo, han determinado que la utilización de los biosólidos en la agricultura es lo más recomendable. La utilización de biosólidos en el suelo podría mejorar su estructura y fertilidad aumentando el rendimiento de los cultivos, disminuyendo costos de la fertilización química produciendo alimentos inocuos con las mismas las características organolépticas y nutricionales que los alimentos tradicionales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andreoli, C. V., Ferreira, A. C., Cherubini, C., Rodrigues, C., Carneiro, C. y Fernandes, F. (2001). Higienização do lodo de esgoto. En: Abes – Prosab (ed.). Resíduos sólidos do saneamento; procesamento, reciclagem y disposição final. Brasil. 87-117p.
- Anjum, M., Al-Makishaha, N. H. y Barakat, M.A. (2016). Wastewater sludge stabilization using pre-treatment methods. *Process Safety and Environmental Protection*, 102, 615–632. <http://dx.doi.org/10.1016/j.psep.2016.05.022>
- Arévalo de Gauggel. G. y Castellano M. (2009). Manual Fertilizantes y Enmiendas. El Zamorano, Honduras: Escuela Agrícola Panamericana, Carrera de Ciencia y Producción Agropecuaria. https://www.se.gob.hn/media/files/media/Modulo_6_Manual_Fertilizantes_y_Enmiendas.pdf

- Barrios, J. A. y Cabirol, N. (2002). Estabilización de lodos. En: Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 28, Cancún, México, 27 - 31 de octubre, 10 p.
- Bedoya, K., Acevedo, J., Peláez, C. y Agudelo, S. (2013). Caracterización de biosólidos generados en la planta de tratamiento de agua residual San Fernando, Itagüí (Antioquia, Colombia). *Revista de Salud Pública*. 15 (5): 778-790.
- Comisión Europea. (2010). Sewage sludge. European Commission, Brussels. En: <http://ec.europa.eu/environment/waste/sludge/index.htm> Consultado el 07 de Marzo-2017.
- Cortez, E. (2003). Fundamentos de ingeniería para el tratamiento de biosólidos generados por la depuración de aguas servidas de la región Metropolitana. Tesis para optar al Título de Ingeniero Civil Químico. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile, Santiago, Chile. 102 p.
- Costa, F., García, C., Hernández, T. y Polo, A. (1991). Residuos orgánicos urbanos. Manejo y utilización. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura. Murcia. España, 181p.
- Decreto 1287 de 2014 Colombia. Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio.1-15 p.p.
- Díaz-Báez, M., Espitia, S. y Molina, F. (2002). Digestión Anaerobia, una Aproximación a la Tecnología. UNIBIBLIOS. Bogotá, Colombia.
- EPA. Environmental Protection Agency. (1993). Standards for the Use or Disposal of Sewage Sludge; Final Rules. Federal Register: 40 CFR Part 257 et al. Environmental Protection Agency (Part II).
- EPA. Environmental Protection Agency. (1999). Biosolids generation, use, and disposal in the United States. Office of Solid Waste. Estados Unidos, 57 p.
- EPA. Environmental Protection Agency. (2003). Control of pathogens and vector attraction in sewage sludge under 40 CFR part 503. Office of Water/ Office Science and Technology Sludge/ Risk Assessment Branch. Washington.
- Escobar, M. (2010). Efecto de la aplicación del biosólido de la PTAR de Río Frío (Floridablanca, Santander, Colombia), compostado o estabilizado con cal, en plantas de lechuga *Lactuca sativa*, Guadua *Bambusa guadua* y *Saman Pithecellobium saman*. Formulación y Desarrollo del Plan General de Ordenación Forestal del Área de Jurisdicción de la CDMB 6p.

- Fernández, F. y De Souza, S. (2001). Estabilização de lodo de esgoto. En: Abes Y Prosab (ed.). Resíduos sólidos do saneamento; procesamento, reciclagem y disposição final. Brasil, 29-55 p.p.
- Fioravanti, M. y Vega, N. (2003). Eficiencia de los microorganismos eficaces en la estabilización de lodos sépticos para su reuso agrícola. Tesis en opción del título de Ingeniero Agrónomo con el grado de Licenciatura. Costa Rica.
- García, C., Cazorla, L., Ruíz, L. y Calderón, P.A. (2014). Métodos y parámetros para determinar la madurez en el compost a nivel de fincas. Revista electrónica de la Agencia de Medio Ambiente, 14,26.
- Giraldo, O. y Lozano de Yunda, A. (2006). Efecto del secado de los biosólidos de la planta de tratamiento de aguas residuales El Salitre (Bogotá) sobre su contenido de nutrientes, metales pesados y patógenos. Agronomía Colombiana, 24 (2), 348-354. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/agro-col/article/view/20049/21173>.
- Girovich, M. J. (1996). Biosolids Treatment and Management. Marcel Dekker, Inc. Cap. 7. N.Y., E.U.A. 343-388.
- Hurtado, A. (2015). Proceso de transformación de biosólidos de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) con vermicompostaje y su aplicación en germinación, caso países europeos: España, Reino Unido, Francia, Portugal, Italia. Tesis para optar por el Título de Ingeniero Civil. Universidad Militar Nueva Granada. 24-43 p.p.
- Jiménez, B. (2001). La contaminación ambiental en México: Causas, efectos y tecnología apropiada. Editorial Limusa, Colegio de Ingenieros Ambientales de México, A.C., Instituto de ingeniería de la UNAM y FEMISCA. 926 p.
- Keffala, C., Harerimana, C. y Vassel, J. (2013). A review of the sustainable value and disposal techniques, wastewater stabilisation ponds sludge characteristics and accumulation. Environmental Monitoring and Assessment, 185, 45-58. <https://doi.org/10.1007/s10661-012-2532-1>.
- Lenntech (2017). Disponible en: <https://www.lenntech.es/tipo-de-lodos.htm>.
- López C. (2015). Manejo de biosólidos a raíz de la nueva normatividad en la PTAR río frío, bucaranga (Santander). Universidad Militar Nueva Granada Facultad de Ingeniería especialización en planeación ambiental y manejo integral de los recursos naturales. Bogota D.C. julio 2015.

- Mantilla, G. A. (2015). Validación de uso de lodos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales tipo UASB como insumo en recuperación de suelos agrícolas. *Revista ESAICA*, Vol.1 n°1, pp. 18-23.
- Mahamud, M., Gutiérrez, A., y Sastre, H. (1996a). Biosólidos generados en la depuración de aguas. I. Planteamiento del problema. *Ingeniería del Agua*, 3(2):47-62.
- Mahamud, M., Gutiérrez, A., y Sastre, H. (1996b). Biosólidos generados en la depuración de aguas: II. Métodos de tratamiento. *Ingeniería del Agua*. 3(3):45-54.
- Meléndez, G. (2012). Evaluación de las propiedades físicas de un suelo cultivado con caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) bajo la aplicación de biosólidos. Tesis para optar el título de Ingeniero Agrícola. Universidad del Valle,5-12p.p.
- Moeller, G. (1997). Biological treatment of municipal sludge. *Biotechnology for water use and conservation. The Mexico 96 Workshop*, OECD, Cedex, París, Francia.
- NOM-004-SEMARNAT. (2003). Sdmapeds. Norma oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, protección ambiental. -Lodos y biosólidos. -especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final.
- Norma Técnica Colombiana 5167. (2004). Productos para la industria agrícola, productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas de suelo.
- Onofre, S.B., Bertoldo, I.C., Abatti, D., Refosco, D. y Agustini, D. (2017). Physico-chemical and microbiological properties of the sewage sludge produced by the sewage treatment plant (STP) of Toledo - Paraná - Brazil. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 6(3), 2420-2429. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.603.276>.
- Oropeza, N. (2006). Lodos residuales: estabilización y manejo. *Caos Conciencia* 1: 51-58.
- Ortega, C. (2017). Biosólidos no representan riesgo para cultivos de tomate. Maestría en Medio Ambiente y Desarrollo de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia (U.N.) Sede Medellín. p.5. Disponible en: <http://agenciadenoticias.unal.edu.co/detalle/article/biosolidos-no-representan-riesgo-para-cultivos-de-tomate.html>.
- Peñarete, W. Silva, José, Urrutia, N. y Torres P. (2013). Efecto de aplicación de biosólidos sobre las propiedades físicas de un suelo cultivado con caña de azúcar. Cali (Colombia). *Acta Agronómica*. 62, 254.

- Pompeo RP, Andreoli CV, De Castro EA, Aisse MM. (2016). Influence of long-term storage operating conditions on the reduction of viable *Ascaris* eggs in sewage sludge for agricultural reuse. *Water, Air, and Soil Pollution*, 227:144. doi: 10.1007/s11270-016-2816-0.
- RAS – 98. (1998). Reglamento de Agua Potable y Saneamiento Básico, Ministerio de Desarrollo Económico.
- RAS – 2000. (2000). Reglamento de Agua Potable y Saneamiento Básico, Ministerio de Desarrollo Económico.
- Roy MM, Dutta A. Corscadden K. Havard P. Dickie L. (2018). Review of biosolids management options and co-incineration of a biosolid-derived fuel. *Waste Manag.* 31(11):2228–35. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X1100273X>.
- Salusso, F. (2014). Respuesta de un cultivo de ajo regado con efluentes urbanos tratados aplicación de biosólidos y fertilización líquida. Argentina: horticultura, p. 8.
- Santos, D. S., Teshima, E., Furiam D. S. M., Araújo R.A. y Rodrigues da Silva., C. M. (2017). Efeito da secagem em leito nas características físico-químicas e microbiológicas de lodo de reator anaeróbio de fluxo ascendente usado no tratamento de esgoto sanitário. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 22 (1), 341-349. DOI: 10.1590/S1413-41522016100531 http://www.scielo.br/pdf/esa/v22n2/1809-4457-esa-s1413_41522016100531.pdf.
- Shanahan, E., Roiko, A., Tindale, N., Thomas, M., Walpole, R. y Kurtböke, I. (2010). Evaluation of pathogen removal in a solar sludge drying facility using microbial indicators. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 7, 565-582. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2872295/pdf/ijerph-07-00565.pdf>.
- Silva Leal, J.A; Bedoya Ríos, D. F. Torres Lozada, P. (2013a). Evaluación del potencial de aplicación de biosólidos higienizados en el cultivo de rábano. *Acta Agronómica*. 62: 2, 155 – 164. Disponible en: https://revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica/article/view/30010/43671.
- Silva-Leal, J.A; Bedoya-Ríos., DF y Torres-Lozada P. (2013b). Efecto del secado térmico y el tratamiento alcalino en las características microbiológicas y químicas de biosólidos de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas. *Química Nova*, 36 (2), 207-214. <http://www.scielo.br/pdf/qn/v36n2/v36n2a02.pdf>.
- Schwartzbrod, J., Mathieu, C., Thévenot, M.T., Baradel, J.M. y Schwartzbrod, L. (1987). Wastewater sludge: parasitological and virological contamination. *Water Science and Technology*, Vol. 19, No. 8, pp. 33-40.

Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. (2016). Estudio Sectorial de los Servicios Públicos Domiciliarios de Acueducto y Alcantarillado –Retrieved from https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/SSPD%20Publicaciones/Publicaciones/2018/Oct/estudio_sectorial-compilado-26-12-2017-vbibiana.pdf.

Torres LP, Madera CA, Silva J. (2009). Microbiological quality improvement of biosolids from domestic wastewater treatment plants. *Escuela de Ingeniería de Antioquia EIA*, 11:21-37, Disponible: <http://www.scielo.org.co/pdf/eia/n11/n11a03.pdf>.

Torres, P., Madera, C., Martínez, G. (2008). Estabilización alcalina de biosólidos compostados de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas para aprovechamiento agrícola. *Revista Facultad Nacional de Agronomía, Medellín* 61(1).4432-4444.

Torres P. Silva J. y Escobar, JC. (2007). Aplicación agrícola de lodos compostados de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales. *Livestock Research for Rural Development* 19 (12).

Vélez, M., Cardona, N. (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 Biosólido. *Pereira*, p. 18.

Vélez, J. (2007). Los biosólidos ¿Una Solución o un problema? *Revista Producción + Limpia*. - Julio - Diciembre 2007 -Vol. 2 No. 2.

Williford, C., Chen, W., Shammas, N. K. y Wang, L. K. (2007). Lime stabilization. biosolids treatment processes. *Handbook Environ. Engine.*Totowa, NJ. Humana Press Inc. 6. 207-241.

