

MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD MICROBIOLÓGICA DE BIOSÓLIDOS GENERADOS EN PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS

PATRICIA TORRES*
CARLOS MADERA**
JORGE SILVA***

RESUMEN

Uno de los principales problemas de calidad que presentan los biosólidos de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas –PTAR– es el contenido de microorganismos patógenos que los clasifica en muchos casos como Clase B con restricción para uso agrícola. Este estudio evaluó la estabilización alcalina de los biosólidos de la PTAR Cañaveralejo (Cali, Colombia) para mejorar su calidad microbiológica, empleando dos tipos de cal (hidratada y viva) en dosis entre 8 y 25 % y dos tipos de ceniza con dosis entre 8 y 40 % en unidades experimentales de 0,2 m² con un tiempo de contacto de 13 días. Los resultados mostraron que con cal se logró reducción total de las variables de respuesta evaluadas (coliformes fecales, *Salmonella sp* y huevos de helmintos), mientras que el poder alcalinizante de las cenizas evaluadas fue insuficiente. El biosólido higienizado con cal presenta alto potencial de uso agrícola por su calidad microbiológica y por el contenido final de materia orgánica y nutrientes (N, P) que pueden beneficiar los suelos, pero es recomendable evaluar la optimización a escala piloto de la dosificación de cal y la aplicación del biosólido en diferentes tipos de suelos y cultivos para precisar los beneficios o medidas preventivas antes de la aplicación.

PALABRAS CLAVE: biosólidos; cal; calidad microbiológica; estabilización alcalina; ceniza.

* Ingeniera Sanitaria, Doctora en Ingeniería Civil, énfasis en Hidráulica y Saneamiento. Profesora Asociada, Universidad del Valle. Cali, Colombia. patoloz@univalle.edu.co

** Ingeniero Sanitario, Magíster en Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Profesor Asistente, Universidad del Valle. Cali, Colombia. cmadera@univalle.edu.co

***Ingeniero de Producción Biotecnológica. Magíster en Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Estudiante de Doctorado, Universidad del Valle. Cali, Colombia. joasilva@univalle.edu.co

MICROBIOLOGICAL QUALITY IMPROVEMENT OF BIOSOLIDS FROM DOMESTIC WASTEWATER TREATMENT PLANTS

ABSTRACT

One of the main quality problems of biosolids from domestic wastewater treatment plants –WWTP– is the high concentration of pathogens, often classified as a class B, with restriction for use in agriculture. This study evaluated the alkali stabilization of biosolids from Cañaveralejo wastewater treatment plant (PTAR-C), located in Cali, Colombia, in order to improve their microbiological quality using two types of lime (quick and hydrated) with doses between 8 to 25 % and two types of ash with 8 to 40 % as doses, in experimental units 0,2 m² with 13 days of contact time. The results showed that both type of lime reached the total reduction of evaluated monitoring variables (faecal coliforms, *Salmonella sp*, helminths eggs) while the alkali power of ashes were lower. The obtained biosolids treated with lime have a high potential use in agriculture purposes for the good microbiological quality, and for the organic matter and nutrient content (N, P) that can generate benefit to the soil, but it is recommendable to evaluate at pilot scale the lime doses and application of biosolid in different soils types and crops in order to precise the benefits or prevent measurements before application of material in soil.

KEY WORDS: biosolids; lime; microbiological quality; alkali stabilization; ash.

MELHORAMENTO DA QUALIDADE MICROBIOLÓGICA DE BIOSÓLIDOS GERADOS EM PLANTAS DE TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUAIS DOMÉSTICAS

RESUMO

Um dos principais problemas de qualidade que apresentam os biossólidos de estações de tratamento de esgotos –ETE– é o conteúdo de microrganismos patogênicos que os classifica em muitos casos como Classe B com restrição para uso agrícola. Este estudo avaliou a estabilização alcalina dos biossólidos da ETE Cañaveralejo (Cali, na Colômbia) para melhorar sua qualidade microbiológica empregando dois tipos de cal (hidratada e viva) em dose entre 8 e 25 % e dois tipos de cinza com dose entre 8 e 40 % em unidades experimentais de 0,2 m² com um tempo de contato de 13 dias. Os resultados mostraram que com cal se alcançou redução total das variáveis de resposta avaliadas (coliformes fecais, *Salmonella sp* e ovos de helmintos) enquanto que o poder alcalinizante das cinzas avaliadas foi insuficiente. O biossólido higienizado com cal apresenta alto potencial de uso agrícola pela sua qualidade microbiológica e pelo conteúdo final de matéria orgânica e nutrientes (N, P) que podem beneficiar os solos, mas é recomendável avaliar a otimização a escala piloto da dose de cal e a aplicação do biossólido em diferentes tipos de solos e cultivos para precisar os benefícios ou medidas preventivas antes da aplicação.

PALAVRAS-CÓDIGO: biossólidos; cal; qualidade microbiológica; estabilização alcalina; cinza.



1. INTRODUCCIÓN

Entre los materiales removidos en las plantas de tratamiento de aguas residuales –PTAR– se encuentran residuos tamizados, arenas, escorias, sólidos y biosólidos; estos dos últimos se encuentran en forma líquida o semisólida, dependiendo de la operación o proceso utilizado y son generados en mayor volumen. Su procesamiento, reutilización y disposición es quizás el problema más complejo que se enfrenta en el campo del tratamiento de aguas residuales (Metcalf y Eddy, 2003).

Los biosólidos son los lodos que pueden aprovecharse después de ser sometidos a procesos de estabilización como la digestión aerobia o anaerobia (WEF, 1995); aunque contienen una importante proporción de elementos fertilizantes de gran valor agronómico, para poder hacer un uso eficiente y seguro de ellos, entre otras medidas, se debe prevenir y controlar la descarga al sistema de alcantarillado de sustancias químicas contaminantes como los metales pesados. La concentración de microorganismos

patógenos guarda relación con factores como las condiciones socio-económicas, sanitarias y de salud de la población, la región, la presencia de animales y el tipo de tratamiento al que el lodo fue sometido (Andreoli, Lara y Fernandes, 1999); su presencia implica que la aplicación directa de biosólidos sin tratamiento previo representa riesgos para la salud humana y biótica (Kiely, 1999).

El desarrollo de la Norma 40 CFR parte 503 (EPA, 2003) 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. En países como México, Brasil, Chile y Argentina también se ha logrado regular el uso y disposición de biosólidos con características similares a la norma de Estados Unidos. En Colombia la norma se encuentra en proceso de aprobación.

La tabla 1 resume la clasificación de los biosólidos en términos de la calidad microbiológica.

Tabla 1. Criterios microbiológicos para la caracterización de biosólidos

Criterio	Unidad	EE. UU. (1)	México (2)	Brasil (3)	Chile (4)	Argentina (5)	Colombia (6)
Coliformes fecales	NMP/g	Clase A: $<1 \times 10^3$ Clase B: $<2 \times 10^6$	Clase A: $<1 \times 10^3$ Clase B: $<1 \times 10^3$ Clase C: $<2 \times 10^6$	Clase A: $<1 \times 10^3$ Clase B: $<1 \times 10^6$	Clase A: $<1 \times 10^3$	Clase A: $<1 \times 10^{3*}$ Clase B: $<2 \times 10^{6*}$	Clase A: $<1 \times 10^3$ Clase B: $<2 \times 10^6$
<i>Salmonella sp</i>	NMP/g	Clase A: $<3/4$	Clase A: <3 Clase B: <3 Clase C: <300	Ausencia en 10 g	Clase A: $<3/4$	Clase A: $<3/4$	Clase A: ausente Clase B: $<1 \times 10^3$
Huevos de helmintos	HH/g	Clase A: $<1/4$	Clase A: <1 Clase B: <10 Clase C: <35	Clase A: $<1/4$ Clase B: <10	Clase A: $<1/4$	–	Clase A: $<1/4$
Virus	UFP/g	Clase A: $<1/4$	–	Clase A: $<1/4$	–	–	–

(1) Norma 40 CFR parte 503 (EPA, 2003) (2) NOM-004-2002 (SERMANAT, 2002) (3) Resolución N°_375 de 29 de agosto de 2006 (Conama, 2006). (4) Decreto Supremo N°123 (30/08/2006) (Conama, 2000; Mena, 2008) (5) Resolución N° 97/01 (22/11/2001) (Mena, 2008) (6) Propuesta de norma, versión de abril, 2009 (Minambiente, 2009),* Valores para *E. coli*.

En la mayoría de estas normas, los biosólidos se clasifican en Clases A y B, con excepción de la norma mexicana, que introduce una tercera categoría (clase C), y la norma chilena, en la que sólo existe la clase A, la cual corresponde a biosólidos que pueden utilizarse sin restricción en agricultura incluyendo todos los usos urbanos con contacto público directo; los de Clase B pueden ser aplicados con restricciones, para contacto indirecto, revegetación, cultivos de alimentos que se procesen antes de ser consumidos o cobertura en rellenos sanitarios, y los de clase C mostrados en la norma mexicana pueden emplearse para usos forestales o mejoramientos de suelos. Se resalta en las normas mostradas que mientras todas establecen límites para coliformes fecales, *Salmonella sp* y huevos de helmintos, los virus sólo son reglamentados en la norma norteamericana y brasilera.

Entre los tratamientos más comunes para la reducción de patógenos en biosólidos se encuentran el compostaje, la estabilización alcalina y el tratamiento térmico, los cuales utilizan como mecanismos de remoción la radiación solar, la elevación del pH y el aumento de la temperatura. La intensidad y los tiempos de exposición de la masa de biosólido en estos mecanismos son determinantes para una eficiente desinfección. Los métodos de higienización deben ser económicos, seguros y de fácil aplicación práctica (Fernandes y Souza, 2001).

La tabla 2 muestra la temperatura y el tiempo de exposición para eliminación de algunos microorganismos patógenos.

En la estabilización química se adicionan productos que inhiben la actividad biológica y oxidan la

Tabla 2. Temperatura y tiempo de exposición para la eliminación de patógenos

Organismo	Observaciones
<i>Salmonella typhosa</i>	Sin crecimiento por encima de 46 °C, eliminación en 30 minutos a 55-60 °C y en 20 minutos a 60 °C
<i>Salmonella sp.</i>	Eliminación en 1 hora a 55 °C y en 15-20 minutos a 60 °C
<i>Shigella sp.</i>	Eliminación en 1 hora a 55 °C
<i>Escherichia coli</i>	Eliminación en 1 hora a 55 °C y 15-20 minutos a 60 °C
<i>Entamoeba histolytica</i>	Eliminación en pocos minutos a 45 °C y en pocos segundos a 55 °C
<i>Taenia saginata</i>	Eliminación en pocos minutos a 55°C
<i>Trichinella spiralis</i>	Eliminación rápida 55 °C e instantánea 60 °C
<i>Brucella abortus</i> o <i>Br. suis</i> .	Eliminación en 1 hora a 55 °C y en 3 minutos a 62-63 °C
<i>Mycrococcus pyogenes var. Aureus</i>	Eliminación en 10 minutos a 50 °C
<i>Streptococcus pyogenes</i>	Eliminación en 10 minutos a 54 °C
<i>Mycobacterium tuberculosis var. Homini</i>	Eliminación en 15-20 minutos a 66 °C
<i>Corynebacterium diphtheria</i>	Eliminación en 45 minutos a 55 °C
<i>Necator americanus</i>	Eliminación en 50 minutos a 45 °C
<i>Ascaris lumbricoides</i>	Eliminación en menos de 1 hora a temperaturas mayores de 50 °C

Fuente: Tchobanoglous, Theisen y Vigil, 1994.



materia orgánica; el tratamiento más empleado es la estabilización alcalina en la cual una base, normalmente cal, se mezcla con el biosólido para elevar el pH y destruir la mayor parte de los microorganismos patógenos (Andreoli *et al.*, 2001). Según EPA (2003), el proceso para la reducción significativa de patógenos y la estabilización del biosólido podría lograrse mediante la combinación de dos mecanismos: la elevación del pH a valores superiores a 12 unidades por un periodo de al menos 72 horas y la elevación de la temperatura a 52 °C por un periodo de 12 horas. En la tabla 3 se muestran algunos valores de pH en los cuales los microorganismos patógenos no pueden sobrevivir.

Tabla 3. Máximo valor de pH tolerado por los microorganismos

Microorganismo	pH
<i>Vibrio parahaemolyticus</i>	9,5
<i>Clostridium perfringens</i>	9,5
<i>Aeromonas hydrophilia</i>	10,5
<i>E. coli</i>	10,5
<i>Yersinia enterocolitica</i>	9,5
<i>Shigella sonnei</i>	9,5
<i>Salmonella typhimurium</i>	10,5
<i>Salmonella typhi</i>	9,5

Fuente: Boost y Poon, 1998

La cal es uno de los productos alcalinos más utilizados en el saneamiento y tiene usos como la elevación del pH en los digestores y la reducción de fósforo en los tratamientos avanzados de efluentes; puede emplearse como cal viva (CaO) o hidratada (Ca(OH)₂) (Williford *et al.*, 2007). Algunas características físicas y químicas de los biosólidos se alteran por la adición de cal; físicamente, pueden formar una capa más dura y blanca al ser expuestos al aire libre, y químicamente, puede ocurrir fijación de metales pesados, insolubilización de fósforo, a causa de la reacción con ortofosfatos para formar precipitados de fosfato de calcio y pérdidas de nitrógeno por

volatilización de amonio (Andreoli *et al.* 2001; Méndez, Jiménez y Salgado, 2002).

Krach *et al.* (2008) encontraron que en Estados Unidos el 20 % de las PTAR emplean la estabilización alcalina como método de tratamiento de los biosólidos, por cuanto es un proceso simple y económico, adicionalmente, permite reducir los olores generados por los biosólidos estabilizados.

Barros *et al.* (2005) evaluaron la estabilización alcalina con cal hidratada de los biosólidos deshidratados de reactores UASB de una PTAR en Brasil. Las proporciones peso a peso evaluadas fueron 30, 40 y 50 % del biosólido y el tiempo del ensayo fue 60 días. La mejor proporción fue 50 %, en la cual se encontraron reducciones máximas de 6 unidades logarítmicas para los coliformes fecales (27) y eliminación total de huevos de helmintos, permitiendo su uso en la agricultura sin restricción acorde con la legislación brasilera. Con esta proporción de cal se presentaron pérdidas de nitrógeno total en el biosólido del 59 al 72 % debidas probablemente a la volatilización del amonio. La temperatura se mantuvo entre 24 y 36 °C y el pH fue mayor de 11 unidades durante los 60 días de seguimiento.

Farzadkia, Jaafarzadeh y Loveimi Asl (2007) evaluaron la estabilización alcalina de los biosólidos digeridos anaeróbicamente y deshidratados de una PTAR de lodos activados en Irán para uso agrícola; empleando unidades experimentales de 30 L y dosis de cal hidratada de 0,265 g Ca (OH)₂/g biosólido, los coliformes fecales (1,3 x 10⁵ NMP/g ST) y huevos de helmintos (314 HH/4g ST) mostraron una reducción del 99,99 % y 100 % respectivamente a los 30 días de aplicación, con lo que se obtuvo un biosólido clase A.

Plachá *et al.* (2008) evaluaron a escala de laboratorio el efecto de dos métodos de estabilización (mesofílica aeróbica y alcalina) para la eliminación de *Salmonella typhimurium* del biosólido de la PTAR de Propad en Eslovaquia en unidades experimentales de 1 L durante 120 horas. La estabilización aeróbica fue realizada a una temperatura entre (25,7±0,4) °C y (37,82±1,38) °C manteniendo un pH

entre 5,6 y 6,1; la estabilización alcalina se realizó con 10 kg $\text{Ca(OH)}_2/\text{m}^3$ a una temperatura entre 21,5 y 22,9 °C, siendo más efectiva esta última, puesto que se alcanzó una reducción completa de *Salmonella typhimurium* en una hora manteniendo el pH mayor de 12 unidades durante todo el ensayo, mientras que con la estabilización aeróbica este resultado se obtuvo en 48 horas.

Bina, Movahedian y Kord (2004) evaluaron la reducción de patógenos del biosólido deshidratado de una PTAR de lodos activados en Irán empleando dosis de cal de 9,8 g/L y 21,3 g/L durante 5 días de contacto. Los resultados mostraron que con ambas dosis la *Salmonella sp* fue inactivada después de dos horas de contacto; aun cuando con la dosis de 21,3 g/L se redujo el contenido de coliformes fecales a valores de 47, no se logró la remoción total de los huevos de helmintos, ya que se encontraron valores finales de 22 y 98 HH/g, que representaron reducciones del 56 y 83 % respectivamente, lo que impide su uso directo en la agricultura por el alto contenido de patógenos, y se clasifica como clase B según la EPA (2003).

Samaras *et al.* (2008) evaluaron la estabilización de lodos de la PTAR de Kozani en Grecia usando ceniza obtenida de la combustión del carbón y cal durante 35 días en cinco proporciones peso a peso 1:1 cal:lodo; 1:1, 1:2 y 2:1 ceniza:lodo y 0,5:0,5:2 ceniza:cal:lodo. La mezcla 1:1 cal:lodo elevó el pH a más de 12 unidades mientras que las mezclas de ceniza:lodo y ceniza:cal:lodo no superaron las 10 unidades de pH.

Jiménez, Barrios y Maya (2001) realizaron pruebas de estabilización alcalina para reducir la concentración de bacterias y huevos de parásitos en lodos fisicoquímicos deshidratados mediante filtro prensa y centrífuga de un sistema piloto de tratamiento primario avanzado (TPA) de la Ciudad de México. Los lodos fueron estabilizados con dosis de cal viva de 15 a 40 % en base seca y se emplearon muestras de 400 a 1000 g de lodo. Las reducciones

mínimas y máximas de microorganismos fueron de 6,3 y 8,4 unidades logarítmicas para coliformes fecales y 5,3 y 7,3 unidades logarítmicas para *Salmonella sp*. Los lodos estabilizados cumplieron con los límites de la EPA (2003) para clase B, y encontraron que la resistencia de los huevos de helmintos a la cal viva es superior a la de otros microorganismos.

En Colombia, en la PTAR El Salitre de Bogotá operada con la modalidad de TPA, Araque (2006) evaluó los tratamientos térmico (60 °C y 80 °C) y alcalino (cal viva (CaO)) en dosis de 25 %, 45 %, 65% y 85 % durante 43 días de contacto) para la desinfección del lodo espesado y biosólido deshidratado, evaluando la eliminación de indicadores de contaminación fecal (coliformes fecales, fagos somáticos y huevos de helmintos). Los resultados mostraron que a 80 °C durante 10 minutos los lodos tratados adquirieron características de biosólido clase A y que una dosis de 25 % de cal viva es suficiente para eliminar los patógenos en 21 días de tratamiento. A pesar de que la EPA (2003) recomienda mantener el pH sobre 12 unidades por 72 horas, una temperatura mayor de 52 °C por 12 horas y un secado por aire, el tratamiento alcalino evaluado permitió alcanzar un producto clase A sin cumplir los requisitos de temperatura (valor máximo 42 °C durante 4 horas) y secado por aire.

El biosólido generado en la PTAR-Cañaverales (PTAR-C) de la ciudad de Cali procede de la digestión anaerobia y deshidratación del lodo primario del TPA. Si bien este material no es un residuo tóxico que genere riesgo para la salud humana y el medio ambiente, ya que los valores de metales pesados se encuentran por debajo de lo establecido por la EPA (Moreno y Ospina, 2003), el contenido de coliformes fecales es relativamente alto y se encuentra por encima de los límites para biosólidos clase A para su aprovechamiento en la agricultura, de tal forma que no represente un riesgo para la salud pública. La evaluación del biosólido de la PTAR San Fernando de Medellín presenta resultados similares (Quinchía y Carmona, 2004).



Torres *et al.* (2007) evaluaron el compostaje de los biosólidos generados en la PTAR-C y encontraron la viabilidad del proceso, siendo necesaria la incorporación de materiales de soporte y enmienda que aporten estructura, manejabilidad y la relación C/N inicial y final; sin embargo, aunque desde el punto de vista parasitológico no se detectaron huevos de helmintos viables, no fue posible una reducción completa de los coliformes totales y fecales clasificando el producto como clase B. Posteriormente, Torres, Madera y Martínez (2008) evaluaron la estabilización alcalina del compost empleando cal hidratada, cal viva y ceniza en proporciones de 8, 15 y 30 % y hallaron que con una proporción del 15 % de cal hidratada y cal viva se obtiene un producto de clase A.

En este estudio se muestran los resultados de la evaluación de la reducción de patógenos mediante estabilización alcalina aplicada directamente al biosólido deshidratado de la PTAR-C para mejorar su calidad microbiológica y parasitológica y poder dar un mayor aprovechamiento en la agricultura sin riesgo para la salud pública.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La etapa experimental se desarrolló en la planta de tratamiento de aguas residuales de Cañaveralejo de la ciudad de Cali, la cual usa la tecnología TPA aplicando cloruro férrico como coagulante para un caudal de 4,55 m³/s (EMCALI, 2008); el biosólido es el lodo del sedimentador primario que es espesado, digerido anaeróbicamente y deshidratado en filtro prensa, para generar 100 t/día (EMCALI, 2007).

2.1 Unidad experimental

Se emplearon como unidades experimentales formaletas de madera sin fondo de 40 cm de ancho, 50 cm de largo y 40 cm de profundidad las cuales se construyeron y adecuaron para los tratamientos de 20 kg de peso.

2.2 Sustratos

El biosólido y los tratamientos fueron caracterizados fisicoquímica y microbiológicamente al inicio y al final del ensayo para verificar su potencial de uso agrícola de acuerdo con las variables mostradas en la tabla 4.

Tabla 4. Variables analizadas en el biosólido y los tratamientos conformados

Variable	Unidad	Técnica de medición**
pH	Unidades	Potenciométrico
Humedad	%	Gravimétrico
Materia orgánica*	%	Digestión titulación
Nitrógeno*	%	Digestión titulación
Fósforo*	mg/kg	Digestión titulación
Potasio*	-	Espectrofotometría
Na Intercambiable	meq/100mg	Espectrofotometría
Ca intercambiable	meq/100mg	Espectrofotometría
Mg Intercambiable	meq/100mg	Espectrofotometría
Elementos menores (Fe, Cu, Mn, Zn)	mg/kg	Espectrofotometría
Microbiológico y parasitológico		
Coliformes fecales	UFC/g	Filtración por membrana
<i>Salmonella sp</i>	Presencia	Siembra en medio selectivo
Huevos de helmintos	HH/g	Bailinger (1979) modificado

* Análisis realizados al terminar el ensayo

** APHA, AWWA y WEF, 2005

2.3 Tratamientos con estabilización alcalina y diseño experimental

Se evaluaron cuatro alcalinizantes, dos tipos de cal (hidratada y viva) y dos tipos de ceniza: la ceniza 1, procedente de una industria papelera, generada en la combustión de una mezcla de carbones del Valle del Cauca y Antioquia en una relación 2:1, y la ceniza 2, obtenida de la combustión de bagazo de caña. Se evaluaron por duplicado las proporciones de alcalinizantes mostradas en la tabla 5. En el caso de la ceniza 1, se evaluó un porcentaje adicional (40 %) con el objetivo de verificar su posible poder alcalinizante en dosis mayores. El tratamiento testigo (control) fue solo biosólido sin adición de alcalinizante. Se empleó como diseño experimental el que es completamente al azar, donde se supone que todas las unidades experimentales son homogéneas y se asignan los tratamientos de manera aleatoria; en total se acondicionaron 13 tratamientos con su respectivo duplicado, ubicados aleatoriamente en la zona de investigación para un total de 26 tratamientos.

Tabla 5. Descripción de los tratamientos

No.	Material alcalinizante	Proporción alcalinizante en %
1 y 2	Testigo	0
3 y 4	Cal hidratada	8
5 y 6		15
7 y 8		25
9 y 10	Cal viva	8
11 y 12		15
13 y 14		25
15 y 16	Ceniza 1	8
17 y 18		15
19 y 20		25
21 y 22		40
23 y 24	Ceniza 2	8
25 y 26		15

Debido a que existen gran variedad de experiencias en cuanto a los tiempos de contacto necesarios para la reducción completa de patógenos con estabilización alcalina entre 5 y 30 días (Boost y Poon, 1998; Madera *et al.*, 2002; Bina, Movahedian y Kord, 2004; Araque, 2006; Plachá *et al.*, 2008; Torres, Madera y Martínez, 2008) se seleccionó para este estudio un tiempo de contacto y seguimiento de 13 días, contando el día 0 como el día de aplicación del alcalinizante. El seguimiento del proceso se realizó con la medición de variables de campo (temperatura, pH y humedad), microbiológicas (coliformes fecales, *Salmonella sp*) y parasitológicas (huevos de helmintos). La tabla 6 muestra las variables evaluadas y su frecuencia de medición.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Sustrato

La tabla 7 muestra la caracterización del biosólido utilizado para el ensayo y su comparación con el biosólido de la PTAR El Salitre de Bogotá, que usa la misma modalidad de tratamiento del agua residual y con los límites de la norma EPA.

No obstante que los biosólidos mostrados presentan algunas diferencias en términos de materia orgánica, N y P, la principal se encuentra en el nivel de metales presentes, ello se debe tal vez a las diferencias en las características de las aguas residuales afluentes a las PTAR, asociado posiblemente a la presencia de aguas residuales de origen industrial, lo que muestra la necesidad de caracterizar el biosólido antes de establecer la técnica de mejoramiento de la calidad. Con relación a las características microbiológicas, ambos biosólidos se catalogan como clase B, siendo restringido su uso en agricultura (EPA, 2003).

**Tabla 6.** Variables evaluadas y frecuencia de medición

Variable	Frecuencia	Método*
Mediciones de campo		
Temperatura (°C)	Día 0: 8 mediciones en el día, cada hora durante las primeras 8 horas Día 1 al 6: 3 mediciones diarias Día 7 al 13: 1 medición diaria	Termómetro de bulbo de 30 cm
Humedad (%)	Mediciones los días 0, 3, 5, 8, 11 y 13	Gravimétrico
pH (unidades)	Día 0: 4 mediciones en el día, cada 2 horas durante las primeras 8 horas Día 1 al 3: 2 mediciones diarias Día 3 al 13: 1 medición diaria	Potenciométrico
Microbiológicas y parasitológicas		
Coliformes fecales (UFC/gr)	Mediciones los días 0, 3 y 13	Filtración por membrana
<i>Salmonella sp</i> (presencia)	Mediciones los días 0, 3 y 13	Siembra en medio selectivo
Huevos de helmintos (HH/gr)	Mediciones los días 0, 3 y 13	Baillinger (1979) modificado

* APHA, AWWA y WEF, 2005

Tabla 7. Características del biosólido

Variable	Biosólido PTAR-C	Biosólido El Salitre*	EPA (2003)
pH (unidades)	6,71	6,74	-
Humedad (%)	68,17	71**	-
Materia orgánica (%)	26,63	10,6	-
Nitrógeno total (%)	1,45	0,33	-
Fósforo total (mg/kg)	179,41	933	-
Potasio (meq/100g)	0,06	0,75	-
Sodio intercambiable (meq/100g)	0,02	0,36	-
Calcio intercambiable (meq/100g)	1,99	10,34	-
Magnesio intercambiable (meq/100g)	0,29	1,62	-
Hierro (mg/kg)	125,55	470	-
Cobre (mg/kg)	0,10	0,8	4300
Manganeso (mg/kg)	32,79	9,1	-
Cinc (mg/kg)	5,46	43,8	7500
Microbiológico y parasitológico			
Coliformes fecales (UFC/g)	3,63 x 10 ⁵	3,19 x 10 ^{6**}	< 10 ³ clase A < 2 x 10 ⁶ clase B
<i>Salmonella sp</i>	Ausencia	-	Clase A: < ¼ NMP
Huevos de helmintos (HH/g)	7	12 a 52**	< 1 en 4 g clase A

* Ramírez y Pérez (2006) **Araque (2006)

3.2 Tratamientos con estabilización alcalina

La tabla 8 muestra los valores máximos y los aumentos de la temperatura para los tratamientos.

Se observa que apenas en los tratamientos con 15 y 25 % de cal viva se alcanzaron temperaturas mayores de 52 °C (55 y 98 °C respectivamente), sin embargo, el tiempo de duración en este valor fue de 6 y 4 horas respectivamente; en los tratamientos restantes con cal hidratada y viva se alcanzaron incrementos de temperaturas entre 8 y 20 °C y

en los tratamientos con las cenizas la variación de temperatura fue más o menos similar al tratamiento testigo. Los resultados obtenidos con cal son similares a los reportados por Madera *et al.* (2002), por Prim, de Castillo y Hahn (2005) y por Torres, Madera y Martínez (2008) donde se presentó un aumento de la temperatura al comienzo del ensayo debido a la reacción exotérmica de la cal viva con el biosólido con altos porcentajes de humedad, pero luego descendió a temperaturas próximas al ambiente. Aunque en el estudio de Araque (2006) se usaron contenidos de cal viva superiores al 25 %, el incremento de temperatura fue menor.

Tabla 8. Comportamiento de la temperatura para los tratamientos

Material alcalinizante	Proporción alcalinizante %	Temperatura máxima °C	Aumento de temperatura °C
Testigo	0	30	8
Cal hidratada	8	30	8
	15	34	12
	25	37	15
Cal viva	8	42	20
	15	55	33
	25	98	76
Ceniza 1	8	30	8
	15	30	8
	25	29	7
	40	31	9
Ceniza 2	8	30	8
	15	29	7



Tabla 9. Comportamiento de la humedad en % para los tratamientos

Material alcalinizante		Día						
		0*	0,333	3	5	8	11	13
Testigo	0%	66,6	64,0	61,5	59,4	59,5	53,5	53,0
Cal hidratada	8%	60,8	58,1	56,0	54,7	49,0	47,4	46,0
	15%	56,0	52,8	50,3	44,4	42,0	38,8	36,7
	25%	50,1	46,0	44,0	42,4	37,0	36,0	30,0
Cal viva	8%	58,8	55,8	52,6	50,6	46,6	41,1	41,1
	15%	54,9	50,4	45,9	44,3	39,6	35,0	34,5
	25%	52,0	50,0	40,1	38,4	31,0	27,2	24,0
Ceniza 1	8%	61,5	57,5	56,8	55,1	53,7	48,6	45,2
	15%	56,3	56,3	55,4	52,5	48,3	47,4	44,1
	25%	53,1	50,0	46,9	45,0	42,0	38,0	35,0
	40%	53,0	50,0	46,8	46,5	38,0	37,3	36,0
Ceniza 2	8%	60,9	57,5	56,2	52,8	52,2	44,3	38,2
	15%	58,4	56,3	52,8	50,1	46,6	42,9	38,6

* Toma de muestra cuando se realizó la mezcla del biosólido con el alcalinizante.

Con relación a la humedad, en la tabla 9 se muestra el comportamiento de su reducción en el tiempo.

En el testigo se observa que ocurrió una reducción del 13,6 % (humedad al final del ensayo 53 %) mientras que en los tratamientos con cal se alcanzaron valores entre 24 y 45 %, habiéndose presentado la mayor reducción de humedad en el tratamiento con 25 % cal viva (24 %), lo que representa una reducción del orden del 54 %. En los tratamientos en los cuales se aplicó ceniza se alcanzaron valores de humedad a los 13 días entre 35 y 45 %. En los productos para la industria

agrícola y materiales usados como abonos orgánicos, fertilizantes y acondicionadores, ICONTEC (2003) (NTC 5167) recomienda valores máximos de 20 % en abonos de origen animal y 35 % en abonos de origen vegetal. Los resultados de humedad muestran que, para alcanzar los niveles de humedad requeridos por la norma, en los tratamientos se debería mantener un tiempo mayor de 13 días. Con relación al pH, la tabla 10 muestra la numeración empleada para el análisis de diagrama de cajas y alambres y el resumen de los cuartiles del análisis de los datos de pH, y la figura 1 muestra el diagrama de caja (*box plot*) para todos los tratamientos.

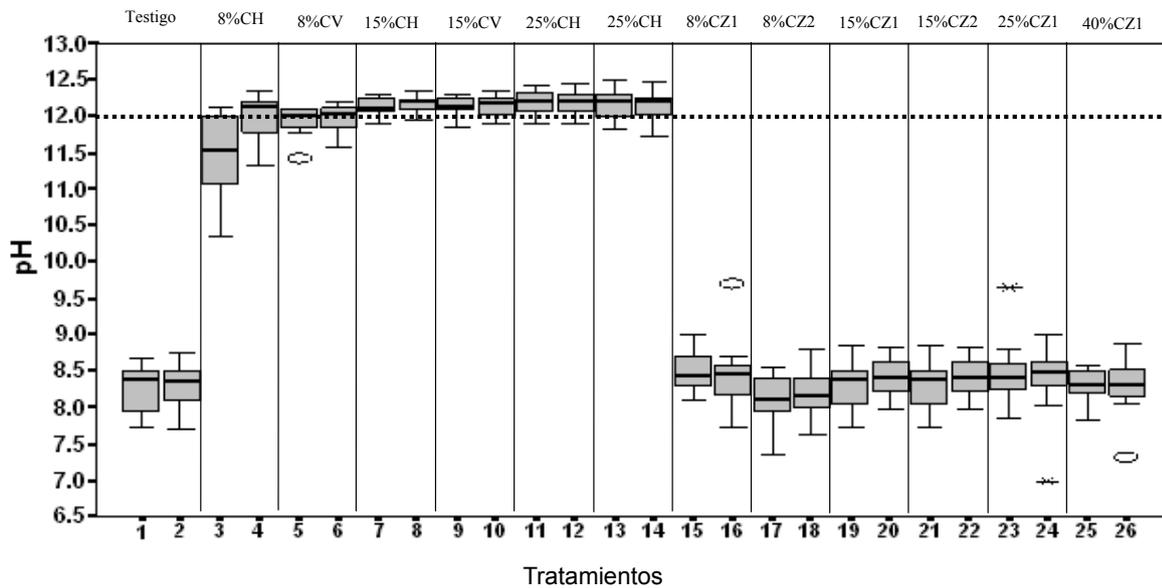
Tabla 10. Numeración empleada en análisis *box plot* y resumen de los cuartiles

Número	Descripción	Q1: 25%	Q2: Mediana	Q3: 75%
1	Testigo	7,93	8,38	8,5
2	Testigo (D)	8,09	8,35	8,50
3	8% cal hidratada	11,00	11,53	12,03
4	8% cal hidratada (D)	11,77	12,12	12,20
5	8% cal viva	11,83	12,00	12,10
6	8% cal viva (D)	11,85	12,03	12,11
7	15% cal hidratada	12,05	12,10	12,25
8	15% cal hidratada (D)	12,07	12,19	12,23
9	15% cal viva	12,07	12,14	12,26
10	15% cal viva (D)	12,03	12,18	12,24
11	25% cal hidratada	12,05	12,20	12,33
12	25% cal hidratada (D)	12,06	12,19	12,30
13	25% cal viva	11,98	12,21	12,30
14	25% cal viva (D)	12,01	12,20	12,27
15	8% ceniza 1	8,29	8,45	8,70
16	8% ceniza 1 (D)	8,15	8,46	8,58
17	8% ceniza 2	7,86	8,11	8,40
18	8% ceniza 2 (D)	7,95	8,16	8,40
19	15% ceniza 1	8,17	8,40	8,51
20	15% ceniza 1 (D)	8,17	8,40	8,51
21	15% ceniza 2	8,03	8,38	8,50
22	15% ceniza 2 (D)	8,16	8,41	8,63
23	25% ceniza 1	8,22	8,41	8,62
24	25% ceniza 1 (D)	8,30	8,49	8,64
25	40% ceniza 1	8,17	8,32	8,51
26	40% ceniza 1 (D)	8,14	8,30	8,62

En general se observa que, si bien los tratamientos con 8 % de cal hidratada y cal viva presentaron alta variabilidad, con hasta 25 % de los datos de pH por debajo de 12 unidades, los demás tratamientos con cal permitieron mantener este valor por periodos mayores de las 72 horas recomendadas por la EPA (2003) para la reducción de patógenos. Los tratamientos con las dos cenizas evaluadas presentaron variabilidad alta y no alcanzaron los valores requeridos, lo que indica que tienen un bajo poder alcalinizante, debido tal vez a su bajo contenido de óxidos de calcio.

Aunque en este estudio se empleó como diseño experimental el modelo completamente al azar y se definieron como variables de respuesta los coliformes fecales y huevos de helmintos, no fue posible realizar el análisis de varianza, ya que los resultados al final del ensayo fueron cero (0) para los tratamientos con cal. En la tabla 11 se muestran los resultados microbiológicos.

La tabla 11 muestra que, mientras en el testigo se presentaron elevados contenidos tanto de



CH: Cal hidratada, CV: Cal viva, CZ1: Ceniza obtenida de la combustión del carbón y CZ2: Ceniza obtenida de la combustión del bagazo □ Valor atípico *Valor extremo

Figura 1. Diagrama de cajas y alambres

Tabla 11. Resultados microbiológicos de coliformes totales y fecales

Día	0*		1		6		13	
	CF	HH	CF	HH	CF	HH	CF	HH
Testigo	$2,77 \times 10^5$	4	$2,15 \times 10^5$	4	$3,46 \times 10^5$	4	$2,86 \times 10^4$	4
8% cal hidratada	160	1	58	0	0	0	0	0
8% cal viva	30	0	25	0	0	0	0	0
15% cal hidratada	10	0	0	0	0	0	0	0
15% cal viva	0	0	0	0	0	0	0	0
25% cal hidratada	0	0	0	0	0	0	0	0
25% cal viva	0	0	0	0	0	0	0	0
8% ceniza 1	$3,00 \times 10^6$	3	$1,20 \times 10^6$	3	$6,40 \times 10^4$	3	$6,00 \times 10^3$	3
8% ceniza 2	$4,61 \times 10^5$	3	$7,00 \times 10^5$	3	$2,04 \times 10^5$	3	$4,23 \times 10^5$	3
15% ceniza 1	$2,20 \times 10^4$	2	$6,10 \times 10^4$	2	$9,00 \times 10^4$	2	$2,00 \times 10^4$	2
15% ceniza 2	$9,21 \times 10^5$	3	$3,59 \times 10^4$	3	$3,23 \times 10^4$	3	$9,74 \times 10^4$	3
25% ceniza 1	$4,00 \times 10^6$	5	$3,60 \times 10^6$	5	$2,00 \times 10^6$	2	$2,00 \times 10^3$	2
40% ceniza 1	$1,00 \times 10^6$	7	$2,20 \times 10^6$	5	$1,70 \times 10^6$	5	$1,00 \times 10^6$	5

CF: Coliformes fecales, HH: Huevos de helmintos. *Toma de muestra cuando se realizó la mezcla del biosólido con el alcalinizante.

Tabla 12. Resultados fisicoquímicos finales

Tratamiento	Materia orgánica (%)	Nitrógeno (%)	Fósforo (mg/kg)	Potasio (meq/100g)
Testigo	27,3	1,38	193,8	0,04
8% cal hidratada	21,5	0,78	9,2	0,03
8% cal viva	23,0	0,98	4,4	0,03
15% cal hidratada	21,7	1,15	3,5	0,02
15% cal viva	18,1	0,36	5,6	0,02
25% cal hidratada	10,7	0,75	4,5	0,02
25% cal viva	14,8	0,92	5,8	0,04
8% ceniza 1	22,1	1,30	90,8	0,07
8% ceniza 2	24,2	0,48	164,8	0,07
15% ceniza 1	20,2	1,33	88,8	0,08
15% ceniza 2	22,9	0,38	166,8	0,10
25% ceniza 1	14,5	1,05	156,5	0,08
40% ceniza 1	20,2	0,91	145,4	0,07

coliformes fecales como de huevos de helmintos durante los 13 días del estudio, en los tratamientos con cal la obtención de un biosólido Clase A ocurrió desde su aplicación al biosólido en las diferentes dosis evaluadas y estas características se mantuvieron durante todo el ensayo, lo que confirma que haber mantenido niveles de pH superiores a 12 unidades por al menos 72 horas sí es garantía para la reducción de patógenos. Los resultados obtenidos muestran que, con dosis inferiores a las evaluadas por otros autores (Barros *et al.* 2005; Farzadkia, Jaafarzadeh y Loveimi Asl, 2007 y Araque, 2006) que emplearon dosis entre el 25 % y el 85 % de cal, es posible alcanzar la reducción de patógenos necesaria para la obtención de un biosólido Clase A. Vale la pena resaltar que, en este estudio, en ninguno de los tratamientos tampoco se encontró presencia de *Salmonella sp.*

Contrario a lo ocurrido con la cal, ninguno de los tratamientos con ceniza contribuyó a una reducción significativa de los patógenos presentes en el biosólido, debido posiblemente al bajo poder

desinfectante de este material reflejado en los bajos valores de pH obtenidos, se presentó una leve disminución que está asociada a la reducción natural de los patógenos.

Este estudio también evidenció lo reportado por Araque (2006) referente al tratamiento alcalino que permite obtener un producto de clase A según lo recomendado por la EPA sin el necesario cumplimiento del requisito de temperatura (52 °C/12 horas).

En la tabla 12 se muestran los resultados fisicoquímicos realizados a los tratamientos al cabo del ensayo.

Todos los tratamientos presentaron al final del proceso menores porcentajes de materia orgánica y nutrientes que el testigo; los tratamientos con cal en las dosis más altas (25 %) alcanzaron menores porcentajes que los tratamientos con ceniza. Esta disminución pudo haberse presentado por el aumento de la temperatura debido a la reacción exotérmica del material alcalinizante con el biosólido o por la



elevación del pH que puede producir la volatilización principalmente de carbono y nitrógeno (Méndez, Jiménez y Salgado, 2002). Además, con relación al contenido de fósforo, los bajos valores al concluir el ensayo en todos los tratamientos se debió quizás a que se presenta una reacción de inmovilización del fósforo, ya que se forma un precipitado de fosfato de calcio, condición reportada en la literatura científica (Fernandes y Souza, 2001; Méndez, Jiménez y Salgado, 2002; Andreoli *et al.*, 2001).

A pesar de la reducción de materia orgánica y nutrientes por el uso de los alcalinizantes, todos los tratamientos empleados con cal, previamente neutralizados, muestran su alto potencial de uso en la agricultura, debido a que el contenido de nutrientes de este material puede beneficiar los suelos del Valle del Cauca que se caracterizan por presentar bajos contenidos de materia orgánica (menores de 4%), de nitrógeno (entre 0,2 y 0,7 %) y de fósforo (10 mg/kg) (Quintero, 1993).

4. CONCLUSIONES

- Las características del biosólido de la PTAR Cañaveralejo son de un material Clase B, el cual requiere la reducción de los patógenos para potenciar su aprovechamiento agrícola sin riesgo para la salud de la población.
- El aumento del pH a valores superiores a 12 unidades por lo menos 72 horas con la aplicación de cal viva o hidratada en un rango de dosis del 8 al 15 % fue el mecanismo que permitió la eliminación de microorganismos patógenos, permitiendo alcanzar un material clase A, incluso sin alcanzar el estándar de temperatura recomendado.
- Las dos calidades de ceniza evaluadas no permitieron alcanzar la calidad microbiológica y parasitológica para el uso en la agricultura, evidenciando que el material empleado presentó bajo poder alcalinizante.
- El biosólido higienizado con cal muestra un alto potencial de uso agrícola por su calidad micro-

biológica y parasitológica y por el contenido final de materia orgánica y nutrientes (N, P) que pueden beneficiar el suelo y los cultivos como los del Valle del Cauca donde predominan suelos con deficiencias de estos elementos.

- Se recomienda evaluar la optimización de la dosificación de cal en escala piloto y la aplicación del biosólido en diferentes tipos de suelos y cultivos para precisar sus requisitos de manejo antes de la aplicación.

REFERENCIAS

- Andreoli, C. V.; Ferreira, A. C.; Cherubini, C.; Rodrigues, C.; Carneiro, C. e Fernandes F. (2001). Capítulo 4 Higienización de lodo de esgoto. En: *Resíduos sólidos do saneamento; processamento, reciclagem e disposição final*. ABES y PROSAB. Brasil. 282 p. ISBN 85-86552-19-4.
- Andreoli, C. V.; Lara, A. I. e Fernandes, F. (1999). *Reciclagem de biosólidos. Transformando problemas em soluções*. Companhia de Saneamento do Paraná SANEPAR. Ministerio de Ciência y Tecnología, FINEP, CNPq y CAPES (eds). Brasil. 300 p.
- APHA, AWWA and WEF (2005). *Standard methods for the examination of waters and wastewaters*. 21th ed. Estados Unidos.
- Araque, M. P. (2006). Evaluación de los tratamientos térmico y alcalino en la desinfección del lodo generado en la PTAR El Salitre. Tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental. Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.
- Bailinger, J. (1979). "Mechanisms of parasitological concentration in coprology and their practical consequences". *J. Amer. Med. Technol.* (41): 65-71.
- Barros, K. K.; Florencio, L.; Takayuki, M. K. e Gavazza, S. (2005). Desaguamento e estabilização alcalina de lodo anaeróbico. 23^o Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Brasil.
- Bina, B.; Movahedian, H. and Kord, I. (2004). "The effect of lime stabilization on the microbiological quality of sewage sludge". *Iranian J Env Health Sci Eng*, vol. 1. No. 1, pp. 34-38.
- Boost, M. V. and Poon, C. S. (1998). "The effect of a modified method of lime-stabilisation sewage treatment on enteric pathogens". *Environment International*, vol. 24, No. 7, pp. 783-788.
- Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (Minambiente). (2009). Reglamentación sobre aprovechamiento de residuos sólidos, y lodos

- estabilizados generados en plantas de tratamientos de aguas residuales municipales. Propuesta de resolución, abril de 2009.
- Comisión Nacional del Medio Ambiente (Conama Chile). (2000). *Reglamento chileno para el manejo de lodos no peligrosos generados en las plantas de tratamiento de aguas*. 27 p.
- Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama, Brasil). (2006). Resolução 375, de 29 de agosto de 2006. Critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências. 32 p.
- Empresas Municipales de Cali (Emcali). (2008). *Informe ejecutivo de operación abril 2008*. Gerencia de Acueducto y Alcantarillado. Cali.
- _____ (2007). *Informe ejecutivo de operación año 2007*. Gerencia de Acueducto y Alcantarillado. Cali.
- Environmental Protection Agency (EPA). (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.
- Farzadkia, M; Jaafarzadeh, N. and Loveimi Asl, L. (2007). *Feasibility study of lime addition method for biosolids stabilization in West Ahwaz wastewater treatment plant*. Department of Environmental Engineering, Islamic Azad University. P. G. Studies and Research Center, Ahwaz, Iran, pp. 1129-1133.
- Fernandes, F. e Souza, S. de (2001). Capítulo 2: *Estabilização de lodo de esgoto, en: Resíduos sólidos do saneamento; Processamento, reciclagem e disposição final*. ABES y PROSAB. Brasil. 282 p. ISBN 85-86552-19-4.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (Icontec). (2003). *Norma técnica colombiana NTC 5167: Productos para la industria agrícola y materiales usados como fertilizantes y acondicionadores*.
- Jiménez, B.; Barrios, J. A. y Maya, C. (2001). *Estabilización alcalina de lodos generados en un tratamiento primario avanzado*. Instituto de Ingeniería UNAM, Ciudad de México. 14 p.
- Kiely, G. (1999). *Ingeniería ambiental: fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión*. McGraw-Hill/ Interamericana de España, vols. I, II y III. 1331 p.
- Krach, K. R.; Burns, B. R.; Li, B.; Shuler, A.; Cole, C. and Xie, Y. (2008). "Odor control for land application of lime stabilized biosolids". *Water Air Soil Pollut: Focus* (2008) 8:369-378 DOI 10.1007/s11267-007-9147-5.
- Madera, C.; Peña, M.; Mara, D. and Muñoz, N. (2002). "Treatment and disinfection of biosolids from anaerobic ponds: lime application or natural drying?". pp. 761-765. En: *Waste stabilisation ponds: pond technology for the new millennium*, vol. 2. New Zealand Water & Wastes Association.
- Mena, M. P. (2008). *Legislación sobre lodos en América Latina: un análisis comparativo*. XXXI Congreso Interamericano AIDIS. Santiago de Chile.
- Méndez, J. M.; Jiménez, B. E. y Salgado, G. V. (2002). *Efecto del amoniaco en la estabilización alcalina de lodos residuales*. XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Cancún, México.
- Metcalf y Eddy, Inc. (2003). *Wastewater engineering treatment and reuse*. 4th ed. McGraw-Hill. New York. USA. 1819 p.
- Moreno, J. y Ospina, G. (2003). Normatividad y caracterización de lodos y biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales: caso planta de tratamiento de aguas residuales Cañaveralejo. Tesis de grado Ingeniero Sanitario y Ambiental. Universidad del Valle. Cali.
- Plachá, I.; Venglovský, J.; Maková, Z. and Martinez, J. (2008). "The elimination of *Salmonella typhimurium* in sewage sludge by aerobic mesophilic stabilization and lime hydrated stabilization". *Bioresource Technology* 99: 4269-4274.
- Prim, Elivete Carmem Clemente; de Castilho Borges, Armando e Hahn, Charles Belettini, H. C. (2005). *Estudo de avaliação da estabilização em estufa plástica de lodos de estações de tratamento de água e esgoto com adição de cal*. Memórias do 23^o Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Brasil. No. III-184. 9 p.
- Quinchía, A. M. y Carmona D. M. (2004). "Factibilidad de disposición de los biosólidos generados en una planta de tratamiento de aguas residuales combinada". *Revista EIA*, ISSN 1794-1237, No. 2, pp. 89-108. Escuela de Ingeniería de Antioquia, Medellín.
- Quintero, R. (1993). Interpretación del análisis de suelo y recomendaciones de fertilizantes para la caña de azúcar. Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia (Cenicaña). Serie Técnica No. 14.
- Ramírez, P. R. y Pérez, A. M. (2006). "Evaluación del potencial de los biosólidos procedentes del tratamiento de aguas residuales para uso agrícola y su efecto sobre el cultivo de rábano rojo (*Raphanus sativus* L.)". *Revista Facultad Nacional de Agronomía*, vol. 59, No. 2, pp. 3543-3556. Medellín.



- Samaras, P. A.; Papadimitriou, C. A.; Haritou, I. B. and Zouboulis, A. I. (2008). "Investigation of sewage sludge stabilization potential by the addition of fly ash and lime". *Journal of Hazardous Materials*. 154: 1052-1059. Disponible en www.sciencedirect.com.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Sermanat, México). (2002). Norma de Protección Ambiental de Lodos y Biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. NOM-004-SERMANAT-2002.
- Tchobanoglous, G.; Theisen, H. y Vigil, S. *Gestión integral de residuos sólidos*. McGraw-Hill: Madrid, 1994.
- Torres, P.; Madera, C. y 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.; Pérez; Escobar, J. C.; Uribe, I. e Imery, R. (2007). "Compostaje de biosólidos de plantas de tratamiento de aguas residuales". *Engenharia Agrícola*. Jaboticabal, Brasil, vol. 27, No. 1, pp. 267-275, jan./abr.
- Water Environment Federation. *WEF (1998) Biosolids Composting*. Special Publication. USA. 187 p.
- Williford, C.; Chen, W. and Shammas, N. K. En: Wang, L. K. (2007). *Lime stabilization. Biosolids treatment processes*. Handbook of Environmental Engineering. Springer, vol. 6, ISBN 978-1 58829-396-1, pp. 207-241.