

Eliminación de patógenos en biosólidos por estabilización alcalina

Eliminating pathogens in biosolids by alkaline stabilization

Patricia Torres Lozada¹, Carlos Arturo Madera², Jorge Antonio Silva Leal³

¹Área Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Universidad del Valle, Colombia. joasilva@univalle.edu.co ²Área Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Universidad del Valle, Colombia. cmadera@univalle.edu.co ³Estudiante de Doctorado en Ingeniería, Universidad del Valle, Colombia. joasilva@univalle.edu.co

Rec: 04-12-08 Acep. 03-09-09

Resumen

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Cañaveralejo –PTAR-C de Cali– Colombia, produce alrededor de 100 t/día de biosólidos que, aunque no tienen restricción por metales pesados, son clase B por el nivel de microorganismos patógenos y parásitos. En un diseño completamente al azar, conformado por seis tratamientos con su respectivo duplicado, se evaluó la estabilización alcalina con dosis del 9% peso a peso de cal viva e hidratada, aplicada a pilas de 0.5 t de biosólidos húmedos (66.5%) y secos a temperatura ambiente (25 - 31°C) durante 72 h (humedad 50.1%). Con la estabilización alcalina el pH aumentó a valores superiores a 12 unidades durante el tiempo suficiente para garantizar la reducción de patógenos y parásitos, alcanzando un material clase A; sin embargo, el biosólido seco facilitó la formación de grumos que dificultaron las labores de homogenización del sustrato con los alcalinizantes, factor indeseable para la eficiente reducción de patógenos.

Palabras clave: Desechos sólidos, aguas residuales, procesamiento, tratamiento alcalino.

Abstract

The Cañaveralejo wastewater treatment plant (PTAR-C) based in Cali-Colombia, produces almost 100 t-day⁻¹ of biosolids. Although do not have heavy metals restrictions, it is class B for high contents of pathogens microorganisms and parasites. The alkali stabilization was done with a 9% of dose (w/w) of quicklime and hydrated lime applied to different 0.5 ton piles of wet biosolids (66.5% humidity) and dry biosolids an environmental temperature (25-31°C) for 72 hours (50.1% humidity). The experiment had a completely randomized design and it was composed by 6 treatments with their respective duplicated. With the alkali stabilization, the pH increments above 12 units during enough time to assure pathogens and parasites reduction in order to achieve a class A material level. On the other hand, the dry biosolids facilitate the conditions for lumps formation that reduce the homogenization of the substrate with the alkali material, which it is and undesirable factor for pathogen reduction.

Key-words: Biosolids, effluents, alkali treatments.

1 Ingeniera Sanitaria, PhD. Profesora U. del Valle, Colombia.

2 Ingeniero Sanitario, MSc. Profesora U. del Valle, Colombia.

3 Ingeniero de Producción Biotecnológica, MSc., estudiante posgraduado U. del Valle, Colombia.

Introducción

La presencia de patógenos, parásitos, metales pesados y plaguicidas puede limitar el potencial como insumo agrícola de los lodos generados en el tratamiento de las aguas residuales municipales (Metcalf Eddy, 2003). Con la digestión de los lodos se estabiliza la materia orgánica, disminuye el volumen y se reducen los sólidos volátiles entre 45-50%, y los agentes patógenos (García, 2006, Mahamud et al., 1996a). Los investigadores recomiendan seguimiento suficientemente prolongado de las características de los biosólidos para que no produzcan impacto en el ambiente y contribuyan a la preservación y recuperación del mismo (Ferreira, 2000 y Mahamud et al., 1996b).

En 1993 la Agencia de Protección Ambiental de E.U (EPA, su sigla en inglés) definió dos clases de biosólidos según el contenido de patógenos: Clase **A** ($<1 \times 10^3$ coliformes fecales, $< \frac{3}{4}$ NMP/g de *Salmonella* sp. $< \frac{1}{4}$ de huevos de helmintos y $< \frac{1}{4}$ UFP de virus) los cuales se pueden usar sin restricción en agricultura, y la clase **B** ($<2 \times 10^6$ coliformes fecales), que presenta restricciones (EPA, 2003).

La selección de los métodos de estabilización para obtener biosólidos de una de estas clases (digestión aerobia o anaerobia, compostaje y estabilización alcalina) depende del uso final (Mahamud et al., 1996 a, b). En la estabilización alcalina, el material se endurece al ser expuesto al aire libre y ocurre fijación de metales pesados, insolubilización de fósforo y pérdidas de nitrógeno por volatilización (EPA, 1999; Andreoli et al., 2001).

Para obtener material clase **A** es necesario mantener el pH por encima de 12 unidades durante 72 h y una temperatura de 52 °C por 12 h. Para obtener un biosólido clase **B** el pH se debe mantener por encima de 12 unidades durante 2 h (EPA, 2003). Los investigadores que consideran la zona segura, recomiendan mantener temperaturas mayores a 62 °C durante 1 h, o mayores a 50 °C por 1 día y a 46 °C por 1 semana (Strauch, 1998).

Las principales desventajas de la estabilización alcalina radican en que el material final es aplicable principalmente 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 Cabirol, 2002). Después de la estabilización en el biosólido la alcalinidad total aumenta y descienden el nitrógeno-amoniaco y el fósforo total (Andreoli et al., 2001; Williford, et al., 2007).

La presente investigación tuvo como objetivo evaluar la reducción de patógenos mediante estabilización alcalina con cal viva e hidratada de los biosólidos de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Cañaveralejo (PTAR Cali) con dos características de humedad: deshidratados solamente en filtro prensa y deshidratados en filtro prensa y a temperatura ambiente por 72 horas adicionales.

Materiales y métodos

La etapa experimental se desarrolló en el área de maduración de la Planta Piloto de Compostaje de la PTAR Cañaveralejo de la ciudad de Cali, Colombia, 3° 28' 16.2" N y 76° 28' 39.3" O, 995 m.s.n.m. La PTAR trata 6.32 m³/s bajo la modalidad de Tratamiento Primario Avanzado – TPA; el lodo se espesa, se digiere anaeróbicamente y se deshidrata en filtro prensa produciendo aproximadamente 100 t/día de biosólidos con 65% a 70% de humedad (EMCALI, 2009).

Para evaluar la estabilización alcalina se empleó un diseño experimental completamente al azar con seis tratamientos y dos repeticiones (Cuadro 1). Se consideraron dos estados de humedad del biosólido: 66.5% (condición normal húmedo) y 50.1% (deshidratación adicional a temperatura ambiente entre 25 y 31°C durante 72 h (biosólido seco). En las pilas de biosólidos de 0.5 t se aplicó 9% de cal hidratada y cal viva. En el Cuadro 2 se presentan las variables analizadas al comienzo y al final del ensayo.

Como consecuencia del alto número de experiencias relacionadas con el tiempo de contacto necesario para la reducción de patógenos en biosólidos, el seguimiento del proceso se realizó durante 13 días (Boost y Poon 1998; Madera et al., 2002; Bina et al., 2004; Araque, 2006; Torres et al., 2008) mediante la medición de las variables que aparecen en el Cuadro 3, conformando muestras compuestas a través del método del cuarteo.

Cuadro 1. Tratamientos aplicados en el ensayo. Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Cañaveralejo - PTAR-C de Cali -

Trat. (no.)	Sustrato	Material alcalinizante	Proporción alcalinizante
1		Testigo	0%
2	Biosólido húmedo (500 kg/tratamiento)	Cal hidratada	9%
3		Cal viva	9%
4		Testigo	0%
5	Biosólido seco (500 kg/tratamiento)	Cal hidratada	9%
6		Cal viva	9%

Cuadro 2. Variables analizadas en los tratamientos aplicados al comienzo y al final del ensayo. PTAR-Cañaveralejo, Cali

Variable fisicoquímica	Unidad	Técnica de medición*
pH	Unidades	Potenciométrico
Humedad	%	Gravimétrico
Materia orgánica	%	Digestión titulación
Nitrógeno total	%	Digestión titulación
Fósforo total	mg/Kg	Digestión titulación
Potasio	-	Espectrofotometría
Sodio -Na	meq/100mg	Espectrofotometría
Calcio -Ca	meq/100mg	Espectrofotometría
Magnesio -Mg	meq/100mg	Espectrofotometría
Hierro -Fe	mg/kg	Espectrofotometría
Cobre -Cu	mg/kg	Espectrofotometría
Manganeso -Mn	mg/kg	Espectrofotometría
Zinc -Zn	mg/kg	Espectrofotometría
Microbiológico y parasitológico		
Coliformes fecales	UFC/g	Filtración por membrana
<i>Salmonella</i> sp.	Presencia	Siembra en medio selectivo
Huevos de helmintos	HH/g	Bailinger (1979) modificado

*. Apha, 2005.

Cuadro 3. Variables evaluadas y frecuencia de medición. PTAR-Cañaveralejo, Cali.

Variable	Frecuencia
Mediciones en campo	
Temperatura (°C)	Día 0: ocho mediciones diarias cada hora durante las primeras 8 h Día 1 al 6: tres mediciones diarias. Día 7 - 13: una medición diaria.
Humedad (%)	Mediciones días 0, 3, 5, 8, 11 y 13
pH (unidades)	Día 0: cuatro mediciones en el día cada 2 h durante las primeras 8 h. Día 1 al 3: dos mediciones diarias. Día 3 - 13: una medición diaria.
Microbiológicas y parasitológicas	
Coliformes fecales (UFC/g)	Mediciones días 0, 3 y 13.
<i>Salmonella</i> sp. (presencia)	Mediciones días 0, 3 y 13.
Huevos de helmintos (HH/g)	Mediciones días 0, 3 y 13.

El día cero (0) se considerò como el día de aplicación del alcalinizante.

Para las variables de seguimiento del proceso se emplearon herramientas de estadística descriptiva como los diagramas de cajas para el pH y para las variables de respuesta (coliformes fecales y huevos de helmintos) se empleó el modelo completamente al azar.

Resultados y discusión

Los biosólidos húmedo y seco muestran potencialidad de uso agrícola por el contenido de materia orgánica y nutrientes. La relación C/N se encuentra dentro del rango para los biosólidos de plantas de tratamiento de aguas residuales (ADEME, 2002) y no presentan restricción desde el punto de vista físico-

químico y de contenido de metales pesados como hierro, cobre, manganeso y zinc, según la guía para control de patógenos y vectores en lodos y biosólidos de la EPA (2003); sin embargo, por la calidad microbiológica se clasifican como clase **B** (Cuadro 4).

En el biosólido seco se alcanzó una reducción adicional de humedad de 16.4% antes de la mezcla con el alcalinizante. Las características fisicoquímicas, microbiológicas y parasitológicas no se alteraron, no obstante, se presentó la formación de grumos lo que dificultó la mezcla del alcalinizante con el biosólido, factor no deseable en la reducción de patógenos (Andreoli et al., 2001), fenómeno que también observaron Torres et al. (2007) en compostaje de biosólidos de la PTAR-C.

Cuadro 4. Caracterización inicial del biosólido. PTAR-Cañaveralejo, Cali.

Variable	Biosólido húmedo*	Biosólido seco**	Valores de referencia
Fisicoquímico			
pH	7.21	6.96	6.5 – 7.5 (1)
Humedad (%)	66.5	50.1	–
Materia orgánica (%)	29.58	25.88	–
Nitrógeno total (%)	2.42	2.25	1.6-3.0 (1)
Relación C/N	7.10	6.7	–
Fósforo total (mg/kg)	304.03	296.73	15,000 – 40,000 ^a
Potasio (meq/100g)	0.05	0.04	0-3.0 (1)
Sodio (meq/100g)	0.02	0.02	–
Calcio (meq/100g)	0.70	0.68	–
Magnesio (meq/100g)	0.06	0.07	–
CIC (meq/100g)	104.49	125.85	–
Hierro-Fe (mg/kg)	<1.00***	<1.00***	3.0-8.0 ^a
Cobre- Cu (mg/kg)	<0.10***	<0.10***	1500 ^b
Manganeso- Mn (mg/kg)	11.28	13.40	–
Zinc- Zn (mg/kg)	2.71	2.71	2800 ^b
Microbiológico y Parasitológico			
Coliformes fecales (UFC/g)	6.30 x10 ⁵	7.90 x 10 ⁵	Clase A : <1X10 ³ ^b Clase B : <2X10 ⁶ ^b
<i>Salmonella</i> sp.	Ausencia	Ausencia	< 3NMP/4g
Huevos de Helmintos (HH/g)	5	5	Clase A: < 1HH/4 g ^b

* Procedente de digestión anaerobia y deshidratación en filtro prensa.

** Biosólido húmedo sometido a una deshidratación natural adicional a temperatura ambiente (25 - 31 °C) por 72 h.

*** Límite de detección del método.

a. Metcalf y Eddy (2003). b = EPA (2003).

Estabilización alcalina

Temperatura. La adición de cal aumentó la temperatura durante el primer día (40 °C y 52 °C), siendo la cal viva responsable de los mayores valores. Aunque las temperaturas elevadas no permanecieron durante el tiempo mínimo recomendado por la EPA (2003) para lograr un biosólido clase **A** (Figura 1), las experiencias de estabilización alcalina de Araque (2006) y Torres et al. (2009) mostraron que biosólidos de plantas de tratamientos de aguas residuales que no cumplen este requerimiento, también pueden garantizar la obtención de un biosólido de esta clase. En el biosólido seco la diferencia de temperaturas entre cal viva vs. hidratada fue menor, lo que muestra el efecto potencial de la humedad, debido a una menor liberación de calor en

la reacción y consecuentemente un menor aumento de la misma.

Humedad. El contenido de humedad final varió entre 28% y 31% para el biosólido húmedo y entre 18% y 32% para el seco. La deshidratación natural del biosólido húmedo después de 72 h no afectó significativamente los valores finales de humedad, con excepción del tratamiento con 9% cal hidratada que presentó el valor más bajo (Cuadro 5), cumpliendo la recomendación del Icontec (2003) de valores menores que 20% para productos en la industria agrícola y materiales utilizados como fertilizantes y acondicionadores. Estos resultados muestran que para cumplir los requerimientos, probablemente sería necesario prolongar el tiempo de contacto con el alcalinizante.

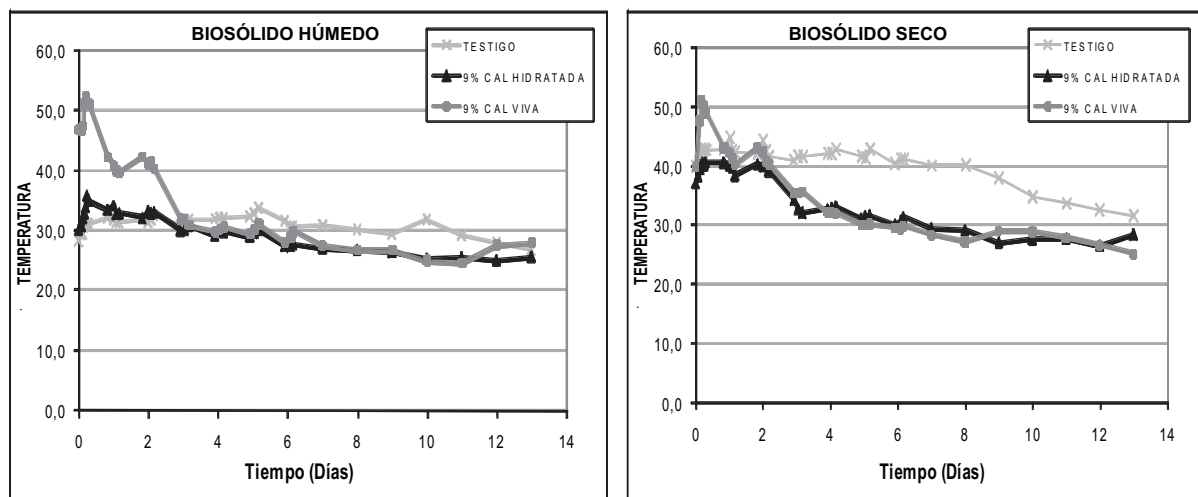


Figura 1. Comportamiento de la temperatura a través del tiempo en los tratamientos. PTAR-Cañaveralejo, Cali.

Cuadro 5. Comportamiento de la humedad (%) a través del tiempo. PTAR-Cañaveralejo, Cali.

No.	Tratamiento	Material alcalinizante	Proporción (%) de alcalinizante	Día							
				0*	1	2	3	5	8	11	13
1	Biosólido húmedo	Testigo	0	66.5	63.5	59.9	55.9	49.2	37.1	32.8	30.7
		Cal hidratada	9	60.3	57.7	48.4	48.6	41.1	34.0	30.5	28.1
		Cal viva	9	55.0	52.1	50.9	49.4	36.6	34.4	34.1	29.3
4	Biosólido seco	Testigo	0	50.1	45.3	45.2	43.0	42.6	39.8	35.6	31.6
		Cal hidratada	9	49.0	44.0	43.8	41.5	36.1	22.4	20.5	18.5
		Cal viva	9	47.2	45.0	43.3	39.8	37.4	29.7	28.1	26.6

* Momento de toma de muestra cuando se realizó la mezcla entre el biosólido y el alcalinizante.

pH. Con la dosis de cal utilizada el pH aumentó a valores de 12 unidades (Figura 2), cumpliendo con las recomendaciones de la EPA (2003) para reducción de patógenos.

Microbiológico y parasitológico

Aunque en este estudio se empleó un diseño experimental, no fue posible realizar el análisis de varianza ya que los resultados de las variables de respuesta (coliformes fecales y huevos de helmintos) al final del ensayo fueron cero (0) para los tratamientos con cal (Cuadro 6).

Las cales hidratada y viva en dosis de 9% permitieron una reducción total de coliformes fecales y huevos de helmintos alcanzando un biosólido clase **A** a los 13 días, además, durante el ensayo no se encontró presencia de *salmonella* sp. Estos resultados confirman que si el pH se mantiene alto por más de 72 h, aun sin cumplir el requisito de temperatura, es suficiente para obtener un biosólido que no genera riesgo de microorganismos patógenos (Araque, 2006; Torres et al., 2009).

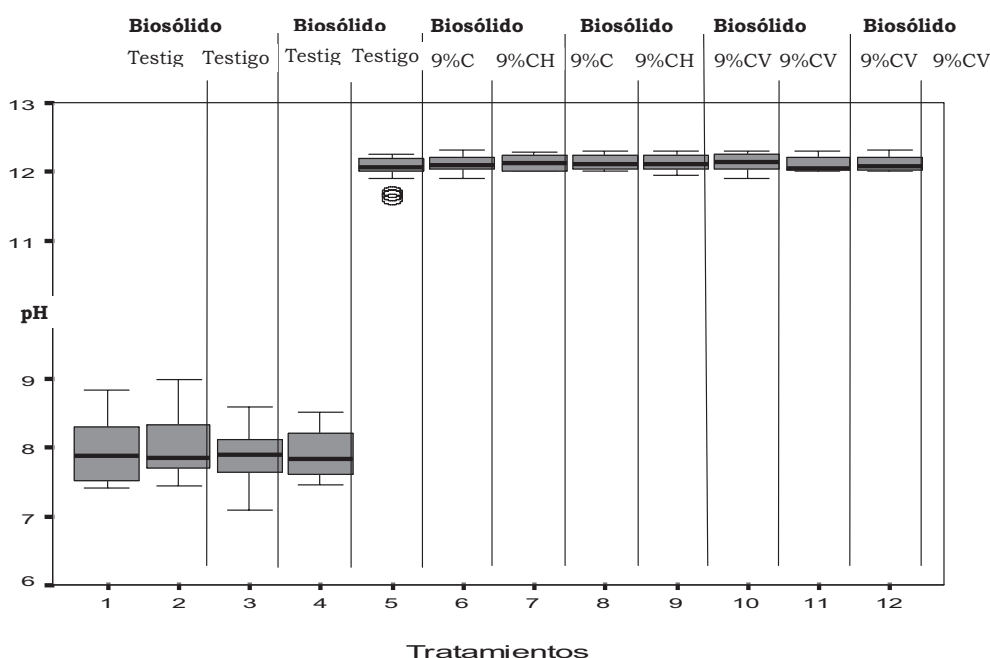


Figura 2. Diagrama de box-plot para pH en biosólidos tratados. PTAR Cañaveralejo, Cali.
CH = cal hidratada. CV = cal viva. D = duplicado. □ valor atípico.

Cuadro 6. Resultados de coliformes fecales y huevos de helmintos los días 0, 3 y 13. PTAR-Cañaveralejo, Cali.

Biosólido	Tratamiento	Día					
		0		3		13	
		CF	HH	CF	HH	CF	HH
Biosólido húmedo	Testigo	3.87 x 10 ⁶	6	2.76 x 10 ⁶	3	3.32 x 10 ³	3
Biosólido seco	Testigo	1.36 x 10 ⁶	3	8.00 x 10 ⁴	3	3.02 x 10 ⁴	3
Biosólido húmedo	9% cal hidratada	0	0	0	0	0	0
Biosólido seco	9% cal hidratada	0	0	0	0	0	0
Biosólido húmedo	9% cal viva	0	0	0	0	0	0
Biosólido seco	9% cal viva	15	0	0	0	0	0

CF: Coliformes Fecales (UFC/g), H.H: Huevos de helmintos (HH/g)

Características fisicoquímicas

En el día 13 los tratamientos testigo presentaron valores finales similares (Cuadro 7) indicando que no existe un efecto significativo por la reducción de humedad aplicada al biosólido seco. Todos los tratamientos mostraron su potencialidad de uso en la agricultura debido al alto contenido de nutrientes; adicionalmente no presentan restricción por el contenido de manganeso, zinc cobre y hierro de acuerdo con las recomendaciones de EPA (2003).

Los valores finales de pH fueron altos, por tanto, es recomendable realizar una neutralización de los sólidos antes de su uso en agricultura o aplicación en suelos con problemas de acidez. Se presentó reducción de la materia orgánica, nitrógeno y fósforo en los tratamientos debido a la volatilización de carbono y nitrógeno por el aumento de la temperatura y el pH en el proceso de estabilización alcalina, lo que se reflejó en un aumento de la relación C/N. El bajo contenido de fósforo mostrado (Cuadro 8) fue debido probablemente a la reacción de inmovilización del mismo, formando precipitados de fosfatos

de calcio (Fernandes y Souza, 2001; Méndez et al., 2002; Andreoli et al., 2001; Williford et al., 2007). El zinc y el manganeso son inmovilizados a valores de pH elevados convirtiéndose en elementos insolubles, condición que se refleja en los valores bajos finales de estos elementos obtenidos en este estudio.

El aumento de cobre en los tratamientos con cal muestra que este elemento puede estar presente como trazas en la cal, condición asociada con el tipo y la fuente de la misma. Una vez ocurre la mezcla cal-biosólido, el cobre puede pasar a una forma más soluble, lo que se reflejó en el aumento de su contenido al final del experimento. Jamali et al. (2008) encontraron que el contenido de metales en el lodo disminuyó después de la aplicación de cal ya que se redujo su disponibilidad a altos pH, con excepción de cadmio y cobre que aumentaron su movilidad 4% o 5 % y consecuentemente su disponibilidad para las plantas, corroborando el aumento de cobre en los tratamientos y la disminución de hierro, manganeso y zinc.

Cuadro 7. Resultados fisicoquímicos de sólidos finales de biosólidos. PTAR-Cañaveralejo, Cali.

Variable/sustrato	Biosólido húmedo* (testigo)	Biosólido seco** (testigo)	Biosólido húmedo* (9% c.h. ^a)	Biosólido seco** (9% c.v. ^b)	Biosólido húmedo* (9% c.h.)	Biosólido seco** (9% c.v.)	Valor referencia
pH	7.24	7.20	11.37	12.66	12.65	12.68	5.5 – 8.0 ^c
Humedad %	30.7	31.6	28.1	18.5	29.3	26.6	30 – 60 ^a
M.O %	28.31	28.52	26.35	25.02	23.30	23.77	–
Nitrógeno total %	2.21	2.14	1.47	1.30	1.49	1.04	3.0 ^d)
Relación C/N	7.43	7.73	10.39	11.16	9.07	13.25	–
P total mg/kg	284.38	294.42	3.03	1.83	0.47	1.63	1.5 – 4 ^d
K meq/100g	0.06	0.05	0.03	0.03	0.03	0.03	–
Na meq/100g	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	–
Ca meq/100g	1.57	1.51	2.82	4.97	4.99	5.04	–
Mg meq/100g	0.10	0.09	0.04	0.21	0.22	0.22	–
CIC meq/100g	97.90	103.22	68.47	67.81	65.66	59.55	–
Fe mg/kg	1.26	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	–
Cu mg/kg	0.45	0.42	14.18	19.32	18.35	17.32	1500 ^e
Mn mg/kg	38.09	22.30	0.25	0.25	0.25	0.25	–
Zn mg/kg	56.42	20.59	0.30	0.15	0.15	0.15	2800 ^e

* Procedente de digestión anaerobia y deshidratación.

** Sometido a una deshidratación natural a temperatura ambiente (25-31°C) por 72 h.

a = cal hidratada. b = cal viva. c = Metcalf y Eddy (2003), d = Fernández y de Souza (2001), e = EPA (2003).

Conclusiones

Los resultados obtenidos en este estudio permiten concluir lo siguiente:

- El secado adicional a temperatura ambiente por 72 h favoreció la formación de grumos, lo que dificultó las labores de homogenización del sustrato con los alcalinizantes.
- En las pilas de 0.5 t, con 9% de cal viva e hidratada se aumentó el pH a valores superiores a 12 unidades el tiempo suficiente para reducción de patógenos y parásitos, alcanzando un biosólido clase **A** sin cumplir los requerimientos de temperatura recomendados.
- La calidad fisicoquímica de los biosólidos higienizados con cal, mostró su potencialidad de aplicación sin ninguna restricción con excepción del pH.

Agradecimientos

Los autores agradecen a EMCALI EICE ESP y a la Universidad del Valle por el apoyo financiero para la ejecución de este estudio.

Referencias

- ADEME (Agence de l'environnement et de la Maitrise de l'énergie). 2002. Déchets organiques. Composts de boues de stations d'épurations municipales: qualités agronomiques et utilisation. ADEME Éditions. France, Septembre. no. 3276. 428 p.
- 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; procesamiento, reciclaje y disposición final. Brasil. p. 87-117.
- Apha-Awwa-Wef. 2005. Standard methods for the examination of waters and wastewaters. 21th edition. Nueva York. Amer. Public Health Assoc. 1368 p.
- Araque, M. P. 2006. Evaluación de los tratamientos térmico y alcalino en la desinfección del lodo generado en la PTAR El Salitre. Maestría en Ingeniería Ambiental. Bogotá, Colombia: Universidad de los Andes. 61 p.
- 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.
- Bailinger, J. 1979. Mechanisms of parasitological concentration in coprology and their practical consequences. J. Am. Med. Technol. 41:65-71.
- Bina, B.; Movahedian, H.; y Kord, I. 2004. The Effect of lime stabilization on the microbiological quality of sewage sludge. Iranian J. Env. Health Sci. Eng. 1(1):34-38.
- Boost, M. V. y Poon, C. S. 1998. The effect of a modified method of lime-stabilisation sewage treatment on enteric pathogens. Environ. Intern. 24 (7):783-788.
- EMCALI (Empresas Municipales De Cali). 2009. Informe ejecutivo de operación, marzo 2009. Gerencia de Acueducto y Alcantarillado. Cali. 28 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. 173 p
- EPA (Environmental Protection Agency). 1999. Biosolids generation, use, and disposal in the United States. Office of Solid Waste. Estados Unidos. 57 p.
- Fernandes, F. y De souza, S. 2001. Estabilização de lodo de esgoto. En: Abes Y Prosab(ed.). Resíduos sólidos do saneamento; procesamiento, reciclaje y disposición final. Brasil. p. 29-55.
- Ferreira, W. 2000. Estudo de patógenos e metais em lodo digerido bruto e higienizado para fins agrícolas, das estações de tratamento de esgotos da ilha do Governador e da Penha no Estado do Rio de Janeiro. Tesis de Maestría. Brasil. Fundación Oswaldo Cruz Escuela de Salud Pública. 89 p.
- García, O. N. 2006. Lodos residuales: estabilización y manejo. Caos conciencia 1:51-58.
- Icontec. 2003. Norma Técnica Colombiana NTC 5167. Productos para la industria agrícola y materiales usados como fertilizantes y acondicionadores. Colombia.
- Jamali, M. K.; Kazi T. G.; Arain M. B.; Afridi H. I.; Memon A. R.; Jalbani, N.; y Shah, A. 2008. Use of sewage sludge after liming

- as fertilizer for maize growth. *Pedosphere* 18(2):203-213.
- Madera, C.; Peña, M.; Mara, D.; y Muñoz, N. 2002. Treatment and disinfection of biosolids from anaerobic ponds: lime application or natural drying? En: Waste stabilisation ponds: pond technology for the new millennium, Conference. IWA. Auckland, Nueva Zelanda. p. 761 - 765.
- Mahamud, M.; Gutierrez, 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.; Gutierrez, A.; y Sastre, H. 1996b. Biosólidos generados en la depuración de aguas: II. Métodos de tratamiento. *Ingeniería del Agua*. 3(3):45-54.
- Méndez, J. M.; Jiménez, B. E.; y Salgado, G. V. 2002. Efecto del amoníaco en la estabilización alcalina de lodos residuales Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 28, Cancún, México. 27 - 31 de octubre. p. 8.
- Metcalf y Eddy. 2003. *Wastewater engineering treatment and reuse*. Fourth edition. Nueva York. USA. McGraw Hill. 1819 p.
- Strauch, D. 1998. Pathogenic micro-organisms in sludge: Anaerobic digestion and disinfection methods to make usable fertiliser. *Europ. Water Manag.* 1 (2):12-26.
- Torres, P.; Pérez, A.; Escobar, J.; Uribe, I.; e Imery, R. 2007. Compostaje de biosólidos de plantas de tratamiento de aguas residuales. *Engenharia Agric.* 27(1):267-275.
- Torres, P.; Madera, C. A.; y Martínez, G. 2008. Estabilización alcalina de biosólidos compostados de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas para aprovechamiento agrícola. *Rev. Fac. Nac. Agron.(Medellin)*. 61 (1) 4432-4444.
- Williford, C.; Chen, W.; Shammis, N. K.; y Wang, L. K. 2007. Lime stabilization. biosolids treatment processes. *Handbook Environ. Engin.* Totowa, NJ. Humana Press Inc. 6(207-241).