

Estabilización de fangos activos en planta de tratamiento mediante la técnica de compostaje Bokashi

Stabilization of Activated Sludge in a Wastewater Treatment Plant through the Bokashi Composting Technique



María Fernanda Pincay Cantos ¹
Eliana Judyth Sabando Vélez ¹
Emelyn Valentina Zambrano Falcones ¹

✉ <https://orcid.org/0000-0001-8431-4418>
✉ <https://orcid.org/0000-0001-9997-3969>
✉ <https://orcid.org/0000-0002-1990-9850>

¹Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí | Calceta-Ecuador | CP130250

✉ maria.pincay@espam.edu.ec

<https://doi.org/10.26423/rctu.v10i2.743>
Páginas: 11 - 22

Resumen

Los fangos activos generados por las plantas de tratamiento de aguas residuales contienen altas concentraciones de microorganismos patógenos y materia orgánica, convirtiéndose en un problema ambiental, el objetivo de esta investigación fue la estabilización de fangos mediante la técnica de Bokashi, se realizó un diseño completamente al azar (DCA) con cuatro tratamientos y cuatro réplicas. El T1 compuesto por 35 % fango y 65 % Bokashi, el T2 tuvo 45 % de fango y 55 % de Bokashi, el T3 55 % de fango y 45 % de Bokashi, y el T4 65 % de fango y 35 % de Bokashi. Los análisis estadísticos ejecutados mostraron que el T3 alcanzó mejores resultados para una estabilización de los fangos, presentando parámetros de valores óptimos de humedad de 46,35 %, carbono de 42,73 %, nitrógeno 1,55 %, el valor de pH 6,4 y la temperatura que una vez estabilizada se mantuvo entre 30-31 °C presentando potencialidades como alternativas eficientes, para la estabilización de fangos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales para ser utilizado en el sector agrícola.

Palabras clave: Aguas residuales, humedad, materia orgánica, microorganismos.

Abstract

Activated sludge generated by wastewater treatment plants contains high concentrations of pathogenic microorganisms and organic matter, posing a significant environmental challenge. The objective of this research was to achieve sludge stabilization using the Bokashi technique. A completely randomized design (CRD) was employed, comprising four treatments with four replicates each. Treatment 1 (T1) consisted of 35% sludge and 65% Bokashi, Treatment 2 (T2) included 45% sludge and 55% Bokashi, Treatment 3 (T3) comprised 55% sludge and 45% Bokashi, and Treatment 4 (T4) had 65% sludge and 35% Bokashi. Statistical analyses demonstrated that T3 yielded superior results for sludge stabilization, exhibiting optimal parameters, including a moisture content of 46.35%, carbon content of 42.73%, nitrogen content of 1.55%, a pH value of 6.4, and a stabilized temperature range of 30-31 °C. These findings suggest the potential for efficient alternatives in stabilizing sludge from wastewater treatment plants, making it suitable for agricultural applications.

Keywords: Wastewater, moisture, organic matter, microorganisms.

Recepción: 05/01/2023 | Aprobación: 19/09/2023 | Publicación: 22/12/2023

1. Introducción

La producción mundial de lodos de depuradora se estima en 45 millones de toneladas por año expresada en materia seca. Los lodos activados son un subproducto habitual de las plantas de tratamiento de aguas residuales que puede suponer una importante amenaza medioambiental si no se gestiona adecuadamente. El tratamiento de las aguas residuales domésticas e industriales es esencial para reducir los niveles potencialmente dañinos de compuestos orgánicos e inorgánicos y microbios patógenos que permiten que el agua tratada fluya hacia un cuerpo de agua receptor, de modo que su capacidad de autpurificación no se vea comprometida [1][2].

En los últimos años a nivel mundial el manejo de los fangos activos en plantas de tratamiento de aguas residuales ha sido uno de los problemas ambientales serios que enfrenta el ser humano, sufriendo afectaciones de manera directa e indirecta, convirtiendo estos fangos en una amenaza para la salud, esto es debido a su alta concentración de microorganismos patógenos, materia orgánica; macronutrientes, micronutriente, metales pesados [3] y microcontaminantes orgánicos que inducen toxicidad en las plantas y alteran el metabolismo de los microorganismos presentes en el cultivo del suelo [4][5].

A escala industrial, se reconoce que el vertido y la incineración son dos medios ambientalmente aceptados de eliminación de fangos [6][7]. Sin embargo, el principal inconveniente de estos métodos es que el vertido y la incineración eliminan, materia orgánica que puede considerarse para buenos usos [8]. El tratamiento de estos fangos cada día es costoso y complejo, al no contar con una gestión adecuada se convierte en un problema, los cuales son desechados simplemente a los rellenos sanitarios [9], en el Ecuador el decrecimiento de sitios para su depósito final sin contaminar o influir el ambiente es más evidente, los fangos activos son vertidos sin ningún tratamiento.

Sin embargo, existen diversas técnicas para estabilizar los lodos activados y convertirlos en un recurso útil. Una de estas técnicas es el compostaje Bokashi, que ofrece una forma única y eficaz de transformar los residuos orgánicos en compost de alta calidad, tales mejoras incluyen aumentar la concentración de materia orgánica, nutrientes y biomasa microbiana, así como mejorar las propiedades físicas, como la capacidad de retención de agua [10].

La tecnología Bokashi es una tecnología sencilla pero innovadora para reciclar y valorizar varios tipos de residuos biológicos en un producto rico en nutrientes que puede usarse como fertilizante orgánico [11]. Los microorganismos presentes consumen carbono y nitrógeno como fuentes de nutrientes, utilizando el carbono como fuente de energía para crecer y nitrógeno

para construir las estructuras celulares medida que aumenta el período del proceso de compostaje, la cantidad de carbono y nitrógeno disminuirá, ya que los microbios crecen continuamente.

Este trabajo, explora las ventajas de utilizar el compostaje Bokashi para estabilizar los lodos activados en las plantas de tratamiento y proporcionará información valiosa sobre este enfoque innovador y ecológico de la gestión de lodos activados.

2. Materiales y métodos

2.1. Ubicación

La investigación se realizó en la Planta de Tratamiento de Agua Residual (PTAR), localizada en la comunidad el Tambo, cantón Tosagua, provincia de Manabí (Figura 1), situada geográficamente en las coordenadas UTM WGS84 Z17M del este y norte con una altitud de 10m.s.n.m.



Fuente : Ficha Técnica y PMA PTAR cantón Tosagua - 2013.

Figura 1: Ubicación geográfica de PTAR.

Tabla 1: Coordenadas PTAR, cantón Tosagua

Este	Norte
583647.34 m E	9915325.24 m S
583549.74 m E	9915220.36 m S
583426.34 m E	9915055.22 m S
583664.97 m E	9915049.01 m S
583717.70 m E	9915172.22 m S
583741.82 m E	9915218.98 m S
583761.01 m E	9915255.32 m S
583804.52 m E	9915351.03 m S
583692.34 m E	9915410.89 m S
583845.52 m E	9915470.17 m S
583751.64 m E	9915481.69 m S

2.2. Diseño Experimental

Se empleó un diseño completamente al azar (DCA) con cuatro tratamientos constituidos por fango (F); más acelerador de descomposición (AD) la melaza y el material vegetal (MV) constituido por desechos orgánicos, hojarasca de maní, molida y entera, cascarilla de arroz y tierra de bosque en diferentes proporciones (Tabla 2). Se realizaron 4 tratamientos con 4 réplicas, el tiempo de duración fue de 10 semanas, se controlaron los parámetros de pH y temperatura, los mismos que se evaluaron 3 veces por semana, en los horarios de 07h00, 12h00 y 17h00, durante el proceso de estabilización.

ANOVA: Se realizó de acuerdo a la metodología de López y Rivas [12], determinando la existencia de diferencia significativa estadística entre los tratamientos en estudio.

Tabla 2: Composición de cada tratamiento

Tratamientos F + MV + AD	Descripción (kg)	(Abono Bokashi) (AD+MV) (kg)
T ₁	5,60	5,20 + 5,20
T ₂	7,20	4,40 + 4,40
T ₃	8,80	3,60 + 3,60
T ₄	10,40	2,80 + 2,80

2.3. Toma de muestras de fango

Se recogió 2 kg de muestras de fango, según la guía metodología de Ruiz y Quevedo [13] se tomó muestras

en las eras de secado con ayuda de un recipiente hermético y una pala, una vez colocados en el balde se almacenaron en fundas de polietileno.

2.4. Análisis físico-químico de las muestras de fango

Una vez obtenidas las muestras se procedió al desarrollo de los análisis físico - químicos al laboratorio de Química Ambiental de la ESPAM-MFL para obtención de los resultados, de acuerdo con las metodologías establecidas por diferentes autores (Tabla 3):

2.5. Elaboración de pilas

Las pilas fueron realizadas por medio de la técnica del montón, se utilizó los materiales en proporciones mencionadas en la Tabla 2, fangos provenientes de la PTAR, material vegetal como la cascarilla de arroz, tierra de bosque y hojarasca de maní, siendo este un elemento rico en nitrógeno que facilitará mejor rendimiento, para la aceleración de descomposición la melaza [14].

Se mezcló una capa de tierra de bosque, una capa de cascarilla de arroz, una capa de hojarasca de maní (molida y entera) y material vegetal, posteriormente se procedió a revolver con una pala, luego se fue agregando poco a poco el acelerador de descomposición (melaza) ya diluido en agua (Figura 2), y por último el fango. se procedió a cubrir con plástico negro para acelerar su descomposición.

Tabla 3: Parametros físico químicos

Análisis	Tipo de metodología	Autor
Humedad	Método Gravimétrico	[15]
Materia Organica	Método de Ignición	[15]
pH	Método Electrométrico	[16]
Nitrogeno Total	Método Kjeldahl	Laboratorio Investigación UDLA
Carbono Orgánico Total	Método Calcinación	Laboratorio Investigación UDLA



Figura 2: Elaboración de Bokashi: a) Recolección de materia prima, b) Pesado, c) Adición de melaza, d) Pilas.

2.6. Medición de la temperatura y pH en la pila

Se realizaron monitoreos de manera *in situ* de las variables a medir, los datos recolectados de temperatura y el pH fueron con una frecuencia de tres veces a la semana (lunes, miércoles y viernes) a las 16 unidades experimentales, para la toma temperatura se empleó un termómetro de bolsillo y para el pH se utilizó el potenciómetro de acuerdo a la metodología establecida por Mendoza y Vigil [17].

2.7. Verificación de la humedad en la pila

Se empleó la técnica del “puño cerrado” para controlar el riego y humectación de los tratamientos, consistió en introducir la mano en la pila, sacar un puñado de material y abrir la mano. El material debe quedar apelmazado, pero sin escurrir agua. Si corre agua, se debe voltear o se añadirá material secante (materia vegetal). Si el material queda suelto en la mano, entonces se debe añadir agua comprobando que tenga una humedad idónea, los niveles de humedad en el proceso deben alcanzar valores de 40-60 %.

2.8. Mejor tratamiento en la disminución de los contaminantes presentes en los fangos activos

Una vez que finalizó el proceso de estabilización de cada unidad experimental de acuerdo con la

metodología [17] se tomaron muestras representativas con un aproximado de 1 kg por pila y fueron rotuladas con el número de muestra y código según su tratamiento, hora, fecha y recolección, posteriormente fueron llevados al laboratorio de Química Ambiental de la ESPAM MFL, se secó en la estufa de aire circulante por un periodo de 24 horas a una temperatura constante de 40 °C, para en análisis físico - químico del sustrato, en cuanto a la identificación del mejor tratamiento, se realizaron los análisis de: Humedad, pH, materia orgánica, carbono orgánico, nitrógeno total. De acuerdo con la metodología de López y Rivas [12] se llevó un control del pH, según los valores y rangos establecidos en la Tabla 4.

Para la determinación de humedad se realizó bajo el método gravimétrico, en donde se relacionó el porcentaje de la masa de fracción líquida y el porcentaje de la masa de fracción sólida según la metodología expuesta por Cornejo y Machado [15]. Para la materia orgánica se empleó la metodología expuesta por López y Rivas [12] indicando que el % de materia orgánica se lo realiza por pérdida de ignición, aplicando la siguiente fórmula (ecuación 1):

$$\%M.O = \frac{M2}{M1} * 100 \% \quad (1)$$

Tabla 4: Valores y rangos de pH permitidos en suelos estabilizados.

Valores	Rangos	Interpretación digital
Muy alto	8,5	Suelos alcalinos: el Ca y Mg no está disponible tal vez la concentración de Na sea alta; posible toxicidad del B.
Alto	7,0 - 8,5	Decrementa la disponibilidad de P y B Arriba de 7,0 se incrementa la deficiencia de Co, Cu, Fe, Mn y Zn.
Medio	5,5 - 7,0	Rango preferido por muchos cultivos; más debajo de este rango comienza a hacer muy ácido para algunas plantas
Bajo	5,5	Suelos ácidos: posible toxicidad de Al y exceso de Co, Cu, Fe, Mn, Zn; deficiencias de Ca, K, N, Mg, Mo, P, S. Con pH debajo de 5,0 se presenta deficiencia de B.

Fuente: López y Rivas [12]

3. Resultados y discusión

3.1. Análisis de las características físico-químicas de los fangos activos de la PTAR, para la determinación de cargas contaminantes

En la tabla 5 se muestra que el porcentaje de humedad fue de 11,11% por lo que se asegura que este tipo de fango resulta favorable para el proceso de estabilización en menor tiempo; un alto contenido de humedad en los fangos activos proveniente de plantas de tratamiento de agua residual indica que no pueden ser compostados, primero necesitan ser mezclados con materiales secos. Además, un bajo porcentaje de humedad en estos fangos no solo ayuda a aumentar el poder calorífico sino también a elevar el contenido de materia seca [18]. Se obtuvo un 65,87 % de materia orgánica lo cual es un factor importante y conveniente para ser estabilizado; según Pérez [19] los fangos provenientes de las PTAR contienen un elevado porcentaje de materia orgánica derivándose en altas concentraciones de microorganismos, el rango idóneo es entre 25 - 50 %.

Tabla 5: Porcentaje de la Humedad y Materia orgánica en el fango.

Propiedades Físicas	Valor (%)
Humedad	11,11
Materia Organica	65,87

Por otro lado, se evidenció valores de nitrógeno 1,73 % y carbono 38,21 % (Tabla 6) de acuerdo con Serrano. [20] un valor óptimo debe de ser rico en C y pobre en N, tomando como referencia el rango ideal, de nitrógeno entre 0,4 y 3,5 % y carbono 8 y 50 % este se puede mejorar, según especificaciones referenciales para la calidad de un buen compostaje.

Tabla 6: Propiedades químicas en el fango

Propiedades Químicas	Resultado
pH	6,43
Nitrogeno	1,73 %
Carbono	38,21 %

3.2. Elaboración de abono orgánico a través de técnica de Bokashi para la reducción de los contaminantes

Luego de la recolección de todos los elementos necesarios para realizar el Bokashi se obtuvo una mezcla uniforme, conteniendo una capa de cascarilla de arroz, una capa de tierra de bosque, una capa de cáscara entera y molida de maní, y melaza diluida en agua, de acuerdo con Mendevil-Lugo *et. al*[21].

Fase de fermentación: El monitoreo constante in situ en cada pila la temperatura de los 4 tratamientos registra entre 32 – 65 °C, siendo el T4 el que obtuvo un menor valor de 32 °C. Los promedios de temperatura de los tratamientos oscilan entre 40 – 50 °C constatando que el T4 tiene la más baja temperatura promedio, 42 °C (Figura 3).

Se evidencia un patrón común en los promedios obtenidos (Figura 3) y en los días de monitoreo, no obstante, a las 17h00 la temperatura de los tratamientos es menor, a las 07h00 muestra un nivel medio y a las 12h00 alcanza su nivel máximo; fluctuando acorde al nivel térmico de la atmósfera, pues al mediodía se alcanza los valores más altos. Como lo menciona Hualpa [22] si se cuenta con una mezcla ideal la temperatura debe ser hasta 50 °C si se incrementa y llega a 70 °C debe ser enfriada ya que muchos microorganismos benéficos no se desarrollan a esta temperatura.

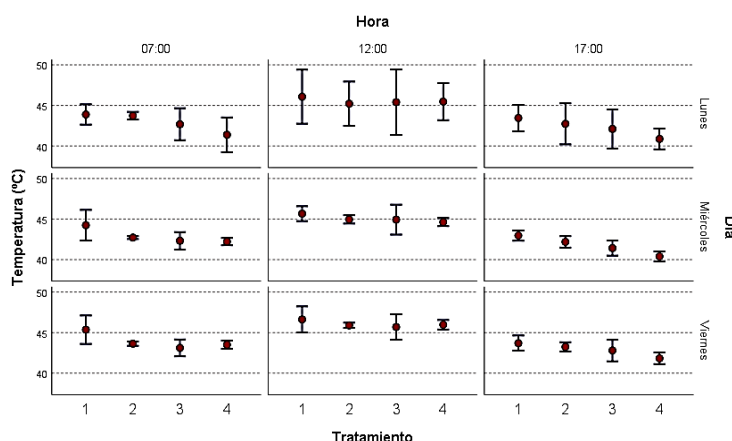


Figura 3: Determinación de la temperatura en el Bokashi más fango en la fase de fermentación.

El pH en la fase de fermentación el T2 alcanzó los mayores valores con un promedio de 7,0 en este primer periodo, obteniendo también la más amplia distribución de datos; mientras que el T3 presentó los niveles más bajos de 6,2 en este parámetro.

En los promedios descritos el parámetro pH se observa que esta entre 6,2 y 7,0, evidenciando un patrón similar en los días de monitoreo; tomando de referencia que el pH de un sustrato determina la asimilación de los nutrientes como lo señala López y Rivas [12] un valor de pH por encima de 7,0 incrementa la deficiencia de ciertos micronutrientes como B, Cu, Fe, Mn Zn, entre otros que son necesarios para la nutrición vegetal, por el contrario, un pH de 5,5 - 7,0 es rango preferido para los cultivos.

Además del monitoreo de la temperatura y pH en esta fase también se determinó valores de humedad en todos los tratamientos. Se logró alcanzar promedios de los tratamientos entre 44 - 51 % (Figura 4.); se observó que T1 y T3 mostraron menores efectos de humedad con una media de 44 %; mientras que el T2 obtuvo los valores más altos (51 % en promedio); y, el T4 alcanzó un 49 % de humedad en esta fase. Álvarez, C. [23] menciona que, los escenarios de humedad perfeccionan el buen desarrollo de la actividad microbiológica y que estos valores deben de fluctuar entre 50 - 60 % para una buena absorción de nutrientes.

Fase de maduración: En fase de maduración, el monitoreo constante en cada pila de los 4 tratamientos registra un decremento de la temperatura entre 28 - 34 °C.

Los promedios de los tratamientos oscilan entre 30 - 32 °C (Figura 5), los cambios que se dieron en los parámetros de temperatura durante la fase de

maduración fueron menores de 30 °C para el T4; la temperatura final debe ser igual a la del medio ambiente [24] siendo idóneos para el uso en el sector agrícola, como lo afirma Moreno [25] cuando la temperatura desciende muestra que el proceso de compostaje es normal; ya que en esta segunda fase empieza la estabilización del abono y llega a su estado óptimo para su utilización.

Por otra parte, en la fase de maduración, el monitoreo realizado in situ en cada pila de los tratamientos, así como en los tiempos de monitoreo. el pH se situó entre 6,6 y 6,7.

Para Vásquez y Vargas [3] este parámetro es el ideal porque debe coincidir en su valor óptimo para muchos cultivos reportados entre 5,5 - 7,0; en este rango hay mayor disponibilidad de nutrientes, ya que por debajo de 5,5 se producen ácidos perjudiciales para las raíces de las plantas.

Los promedios de los tratamientos estuvieron entre 51 - 54 %; el de mayor dispersión de datos en referente a humedad fue el T3 que alcanzó valores de 53 %; el T1 mostró la media más alta 54 %; en el T4 se obtuvo una media de 52 % y para el T2 se evidenció un 51 %, siendo este último el de menor humedad en la fase de maduración del abono.

3.3. Comparación entre las dos fases

Al analizar los promedios de cambios de temperatura en ambas fases, se evidencia que en la fase de fermentación los cuatro tratamientos alcanzaron niveles que oscilaron entre 43 y 44 °C, estando muy por encima de la fase de maduración donde la media de los tratamientos varió de 30 a 31 °C siendo el T3 y T4 de menor temperatura 30 °C (Figura 4).

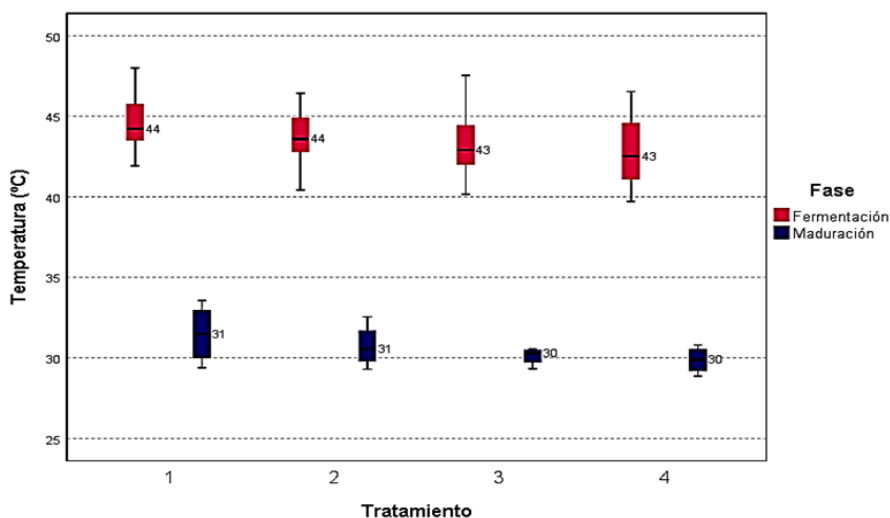


Figura 4: Comparación de las características físicas en las dos fases (Temperatura °C).

Arango [26] plantea que al inicio (fase de fermentación), un aumento de temperatura refleja una óptima actividad microbiana y la temperatura se elevará, no obstante, hay que controlarla permitiendo que no pase los 50°C, a medida que pase el tiempo ésta irá descendiendo en la segunda fase (maduración) hasta llegar a temperatura ambiente.

Para la comparación de los valores de pH para ambas fases indica que, durante la fermentación para todos los tratamientos existió una amplia distribución de los datos, con medias que oscilaron de 6,2 a 7,0. Por el contrario, durante la maduración la distribución de datos fue más estrecha con medias de 6,6 a 6,7 en donde el T1 tuvo un resultado más favorable (Figura 5).

El pH presentado en las dos fases fue de 6,6 a 6,7 lo que ayuda a que las bacterias tengan una mayor actividad; como lo indica el mismo autor si el pH llegase a estar en rangos de 5,5 a 7,0 la actividad de asimilación de nutrientes aumentaría tomándose en cuenta como un rango de pH ideal. Un aumento en el pH del proceso de compostaje final se debe a una cantidad excesiva de contenido de nitrógeno mineral en el sustrato, cambios en el equilibrio de nitrato de amonio. [7].

La humedad aumentó en la fase de maduración alcanzando medias de 52 a 55 %. Por el contrario, en la fase de fermentación el rango es más amplio de 22 a 46 .

El aumento de la humedad en la fase de maduración del T3 y T4 52 % y 54 % respectivamente, demostró que el crecimiento de los microorganismos e inactivación de microorganismos patógenos se dieron correctamente ya que de acuerdo con lo mencionado por Castillo y Jerezano [27] la humedad en estos casos debe ser superior al 50 % y se da por posibles aumentos de pH o formación de amoniaco.

3.4. Identificación del mejor tratamiento en la disminución de contaminantes presentes

Humedad: En cuanto al porcentaje de humedad, el ANOVA indica que sí existe diferencia significativa entre tratamientos (Sig. = ,000) tal como se detalla en la Tabla 7. Por consiguiente, al aplicar la prueba de Tukey (0,05) se formaron dos subconjuntos, resultando que el T1 y T2 son similares entre sí y, el T3 y T4 también resultan semejantes, Tabla 8.

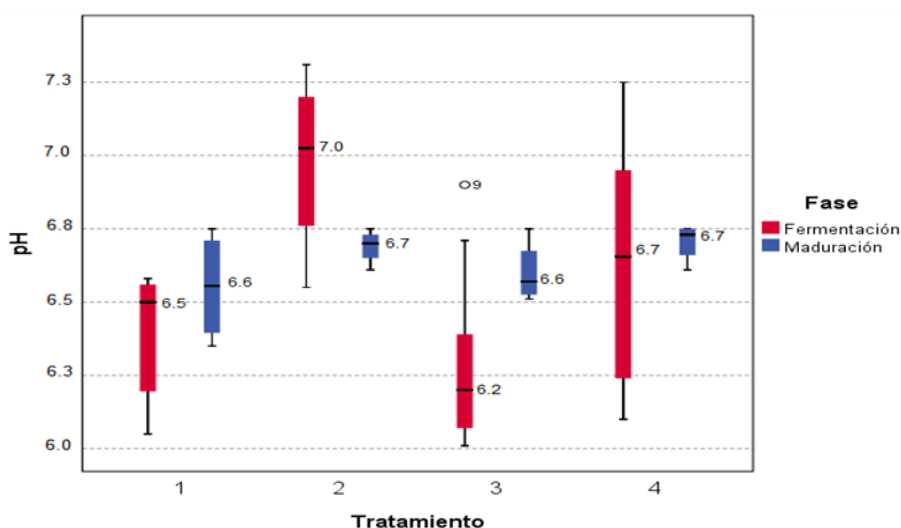


Figura 5: Comparación de las características físicas en las dos fases (pH).

Tabla 7: ANOVA del porcentaje de humedad

% de humedad					
	Suma de cuadrados	Gl	Media Cuadrática	F	Sig
Entre grupos	2509,818	3	836,606	45,269	0,000
Dentro de grupos	221,769	12	18,481		
Total	2731,588	15			

Por consiguiente, al aplicar la prueba de Tukey (0,05) se formaron dos subconjuntos, resultando que el T1 y T2 son similares entre sí y, el T3 y T4 también resultan semejantes, Tabla 8 .

Tabla 8: Tukey HSD de los valores del porcentaje de humedad.

% de Humedad		
Tratamiento	N	Subconjunto para = 0,05
		1 2
T2	4	17,1150
T1	4	22,0975
T4	4	42,1000
T3	4	46,3475
Sig.		0,395

La humedad de los tratamientos T3 y T4 se encuentran en un rango óptimo (40 % al 60 %); según lo propuesto por la FAO y citado por MAAE [28], si este porcentaje se situara por debajo del 40 % tiende a detenerse el proceso de compostaje debido a la falta de agua que beneficia a los microorganismos.

Materia orgánica: De acuerdo con la Tabla 9, en cuanto al porcentaje de materia orgánica, el ANOVA indica que no existe diferencia significativa alguna entre los cuatro tratamientos, pues el valor fue de 0,258 (>0,05).

Asimismo, al aplicar la prueba de Tukey solo se formó un subconjunto representando a todos los tratamientos con porcentajes de materia orgánica similar, Tabla 10.

Para que el Bokashi tenga una buena calidad y pueda ser usado en el sector agrícola, el porcentaje de materia orgánica debe oscilar entre el 25 - 50 % [21].

Carbono orgánico: En la Tabla 11 se describe el porcentaje de carbono orgánico, el ANOVA indica que no existe diferencia significativa entre los cuatro tratamientos; Tukey confirma lo señalado (Tabla 11, 12)

Tabla 9: ANOVA del porcentaje de materia orgánica

% de Materia orgánica					
	Suma de cuadrados	GI	Media Cuadrática	F	Sig
Entre grupos	276,654	3	92,218	1,527	0,258
Dentro de grupos	724,699	12	60,392		
Total	1001,353	15			

Por consiguiente, al aplicar la prueba de Tukey (0,05) se formaron dos subconjuntos, resultando que el T1 y T2 son similares entre sí y, el T3 y T4 también resultan semejantes, Tabla 8.

Tabla 10: Tukey HSD de los valores del porcentaje de materia orgánica.

% Materia orgánica		
Tratamiento	N	Subconjunto para = 0,05
		1
T1	4	65,4400
T2	4	66,7075
T4	4	74,2750
T3	4	74,4075
Sig.		0,398

Tabla 11: ANOVA del porcentaje de carbono orgánico

% de Carbono orgánico					
	Suma de cuadrados	GI	Media Cuadrática	F	Sig
Entre grupos	54,916	3	18,305	0,739	0,549
Dentro de grupos	297,318	12	24,776		
Total	352,234	15			

Tabla 12: Tukey HSD porcentaje de carbono orgánico

% de Carbono orgánico		
Tratamiento	N	subconjunto para $\alpha=0,05$
T1	4	37,6975
T4	4	39,0250
T2	4	40,2000
T3	4	42,7325
Sig.		0,505

Tabla 13: ANOVA porcentaje de Nitrógeno

% de Nitrógeno					
	Suma De Cuadrados	gl	Media Cuadrática	F	Sig
Entre grupos	0,142	3	0,047	4,797	0,020
Dentro de grupos	0,119	12	0,010		
Total	0,261	15			

Tabla 14: ANOVA porcentaje de Nitrógeno

% de Nitrógeno					
	Suma De Cuadrados	gl	Media Cuadrática	F	Sig
Entre grupos	0,142	3	0,047	4,797	0,020
Dentro de grupos	0,119	12	0,010		
Total	0,261	15			

Todos los tratamientos se encuentran en un rango óptimo (8 % - 50 %) el mejor tratamiento es el T3 con mayor cantidad de carbono 42,73 % el cual ayuda en el proceso de la actividad microbiana.

Nitrógeno: En cuanto al porcentaje nitrógeno, existen diferencias significativas entre tratamientos; Tukey diferencia dos grupos estadísticos (Tablas 13 y 14).

A medida que el proceso de compostaje avanzaba, el contenido de nitrógeno tiende a disminuir, esto debido a la volatilización del amoníaco; sin embargo, este es captado, convertido e incorporado a los microorganismos presentes en los fangos; fue el caso del porcentaje de nitrógeno en los cuatro tratamientos, pues este disminuyó frente al nitrógeno inicial 1,73 %, siendo el mejor tratamiento el T3 con 1,55 %, pero los porcentajes de todos los tratamientos están dentro del rango óptimo (0,4 % - 3,5 %) de nitrógeno [28].

4. Conclusiones

El compostaje por medio de la técnica de Bokashi es una forma eficaz de reducir la cantidad de residuos que se envían a vertederos, demostrando la reutilización de subproductos de plantas de tratamiento de aguas residuales, como los fangos activados.

Se obtuvo una mezcla uniforme de Bokashi más fango en cuya estabilización se logró una temperatura en su fase de maduración entre 30 a 31 °C que son los valores más convenientes, un pH óptimo en rangos de 6,6 a 6,7 demostrando una excelente actividad microbiana; también se presentó un aumento del porcentaje de humedad del 46 %, estando dentro de los rangos óptimos para los suelos en la producción de abono.

Se considera que la integración de la técnica de Bokashi como proceso biológico de estabilización primaria es rentable y respetuosa con el ambiente antes de las aplicaciones agrícolas y terrestres, convierte los fangos peligrosos en fertilizantes orgánicos y/o acondicionadores del suelo ricos en nutrientes no peligrosos

5. Financiamiento

La investigación tuvo un financiamiento compartido, entre los autores y la ESPAM MFL.

6. Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

7. Referencias

- GAGET V; LAU M; SENDALL B; FROSCIO S Y HUMPAGE AR. Cyanotoxins: Which detection technique for an optimum risk assessment? *Water Res* [Internet]. julio de 2017, vol. 118, págs. 227-238. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2017.04.025>.
- YE C., YANG X., ZHAO F.J., REN L. The shift of the microbial community in activated sludge with calcium treatment and its implication to sludge settleability. *Bioresour. Technol.* 2016, vol. 207, págs. 11-18. Disponible en: doi : %2010 . 1016/j.biortech.2016.01.135..
- VÁSQUEZ J; Y VARGAS G. Aprovechamiento de lodos provenientes de la planta de tratamiento de aguas residuales del municipio de Funza, como insumo de cultivo y mejoramiento del suelo. *Departamento de Ingeniería Civil. Bogotá D.C.: Universidad Católica de Colombia* [Internet]. 2018, págs. 1-90. Disponible en: <https://repository.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/0b4e8d61-3b56-4245-b62b-160151992fad/content>.
- CUKJATI N, ZUPANČIČ GD, ROŠ M, GRILC V. Compostaje de lodos anaeróbicos: un elemento económicamente viable de una gestión sostenible de lodos de depuradora. *J. Medio Ambiente. Administrar* [En línea]. 2012, vol. 106, págs. 48-55. Disponible en: doi : %2010 . 1016 / j . jenvman.2012.04.001.
- SUTHAR S, SINGH S. Feasibility of vermicomposting in biostabilization of sludge from a distillery industry. *Sci. Total Environ.* 2008, vol. 394, págs. 237-243. Disponible en: doi : %2010 . 1016 / j . scitotenv.2008.02.005.
- ELVIRA C, SAMPEDRO L, DOMINGUEZ J, MATO S. Vermicomposting of wastewater sludge from paper-pulp industry with nitrogen rich materials. *Soil Biol. Biochem.* 1997, vol. 29, págs. 759-762. Disponible en: <https://doi.org/10.18779/cyt.v10i2.165>.
- DOMÍNGUEZ, J., EDWARDS, CA WEBSTER, M. Vermicompostaje de lodos de depuradora: Efecto de los materiales voluminosos sobre el crecimiento y reproducción de la lombriz de tierra *Eisenia andrei*. 2000, vol. 32, págs. 24-32.
- WU C, LI W, WANG K, LI Y. Usage of pumice as bulking agent in sewage sludge composting. *Bioresour. Technol.* 2015, vol. 190, págs. 516-521. Disponible en: doi : %2010 . 1016 / j . biortech . 2015.03.104.
- CRUZ H. Evaluación de macronutrientes y metales en los lodos residuales de la laguna de estabilización secundaria de “El Espinar” - Puno. *Agroecosystems*. [Internet]. 2019. Disponible en: <http://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/3279624>.
- BOŻYM M; Y SIEMIĄTKOWSKI G. Characterization of composted sewage sludge during the maturation process: a pilot scale study. *Environ Sci Pollut Res* [Internet]. el 8 de diciembre de 2018, vol. 25, págs. 34332-34342. Disponible en: <http://link.springer.com/10.1007/s11356-018-3335-x>.
- OLLE, M. Bokashi technology as a promising technology for crop production in Europe. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*. 2021, vol. 96, n.º 2, págs. 145-152.
- LÓPEZ J. ; Y RIVAS J. Estabilización de lodos residuales procedentes de la Potabilizadora de agua EMAARS-EP en la Estancilla, mediante compostaje. *Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí “Manuel Félix López” (ESPAM MFL)* [Internet]. 2013. Disponible en: <https://repositorio.esпам.edu.ec/handle/42000/191>.
- RUIZ A;Y QUEVEDO L. Análisis de los lodos provenientes del proceso de tratamiento de aguas residuales del municipio de Guatavita. *Bogotá D.C.: Universidad Católica de Colombia* [Internet]. 2022, págs. 1-144. Disponible en: <https://repository.ucatolica.edu>.

- co/entities/publication/734d0ad2-3a67-48b2-b4e5-cdd9f5aa06d7.
14. PINZÓN A; Y PINZÓN S. Lodos generados en planta de tratamiento de aguas residuales el salitre Bogotá, como insumo para la producción de compost. *Universidad Distrital "Francisco José de Caldas"* [Internet]. 2018. Disponible en: <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/13588/Pinz?sequence=1>.
 15. CORNEJO C; Y MACHADO M. Diseño y construcción de un reactor Batch prototipo para la obtención de compost con residuos orgánicos generados en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. *Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH)* [Internet]. 2017. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/6943>.
 16. MILLÁN MARRERO FC; PRATO JG; LA CRUZ Y; Y SÁNCHEZ A. Estudio metodológico sobre la medición de pH y conductividad eléctrica en muestras de compost. *Rev Colomb Química* [Internet]. el 1 de mayo de 2018, vol. 47, n.º 2, págs. 21-27. Disponible en: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/rcolquim/article/view/67338>.
 17. MENDOZA M; Y VIGIL J. Evaluación físico-química y microbiológica de cuatro niveles de lodos ordinarios en la elaboración de compost. *Universidad de El Salvador* [Internet]. 2012. Disponible en: <https://ri.ues.edu.sv/id/eprint/3080/>.
 18. FEODOROV V. Modern Technologies of Treatment and Stabilization for Sewage Sludge from Water Treatment Plant. [Internet]. 2016, vol. 10, págs. 417-430. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2210784316302777>.
 19. PÉREZ M. Tratamiento de lodos residuales procedentes de plantas de tratamiento de aguas residuales mediante procesos electroquímicos para la disminución de metales pesados (Pb). *Universidad Politécnica Salesiana* [Internet]. 2018. Disponible en: <https://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/12045>.
 20. SERRANO E. Control de la deficiencia de nutrientes en un proceso de depuración biológica. *Tecnol del agua* [Internet]. 2018, págs. 72-78. Disponible en: http://www.bibliotecagbs.com/archivos/ta_265_2_05.pdf.
 21. MENDIVIL-LUGO C; NAVA-PÉREZ E; ARMENTA-BOJÓRQUEZ AD; RUELAS-AYALARD; Y FÉLIX-HERRÁN JA. Elaboración de un abono orgánico tipo bocashi y su evaluación en la germinación y crecimiento del rábano. *Biotechnia* [Internet]. el 18 de octubre de 2019, vol. 22, n.º 1, págs. 17-23. Disponible en: <https://biotechnia.unison.mx/index.php/biotechnia/article/view/1120>.
 22. HUALPA A. Mejoramiento de lodos deshidratados del proceso biorreactor de membrana (MBR) mediante la técnica del Bokashi. *Lima* [Internet]. 2019, págs. 1-23. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12805/905>.
 23. ÁLVAREZ C. Evaluación de dos variedades de perejil (*Petroselinum sativum* Hoffm.) con tres niveles de abono foliar (AOLA) en ambiente atemperado en el Centro Experimental Cota Cota. *Universidad Mayor de San Andrés* [Internet]. 2018. Disponible en: <https://repositorio.umsa.bo/handle/123456789/20138>.
 24. HUAYLLANI K. Influencia de microorganismos eficaces (Em-compost) en la producción de compost de lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales, Concepción, 2016. *Universidad Continental* [Internet]. 2017. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12394/3823>.
 25. MORENO B. Elaboración de un abono (Bocashi) a partir de residuos orgánicos del Bioterio de la Facultad de Ciencias – ESPOCH. *Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH)* [Internet]. 2019. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/13275>.
 26. ARANGO M. Abonos orgánicos como alternativa para la conservación y

- mejoramiento de los suelos. *Unilasallista Corporación Universitaria* [Internet]. 2017. Disponible en: http://repository.unilasallista.edu.co/dspace/bitstream/10567/2036/1/Abonos_organicos_alternativa_conservacion_mejoramiento_suelo.pdf.
27. CASTILLO B; Y JEREZANO K. Manual de abonos orgánicos. *Universidad Veracruzana* [Internet]. 2017, págs. 1-50. Disponible en: <https://www.uv.mx/television/files/2015/10/abonos-organicos-09.pdf>.
28. MINISTERIO DEL AMBIENTE Y AGUA DE ECUADOR [MAAE]. *Manual de aprovechamiento de residuos orgánicos municipales*. En: Internet, 2020, págs. 1-79. Disponible en: <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2020/07/MANUAL-DE-APROVECHAMIENTO-DE-RESIDUOS-ORGANICOS-MUNICIPAL.pdf>.



Artículo de **libre acceso** bajo los términos de una **Licencia Creative Commons Reconocimiento – NoComercial – CompartirIgual 4.0 Internacional**. Se permite que otros remezclen, adapten y construyan a partir de su obra sin fines comerciales, siempre y cuando se otorgue la oportuna autoría y además licencien sus nuevas creaciones bajo los mismos términos.