

Compostaje Aeróbico de Lodo Residual con Material Vegetal Aerobic Compost with Residual Sludge and Garden Prunings

Juan Pedro Flores-Márgez^{1*} y Francisco J. Núñez-Sánchez²

¹ Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. Av. Plutarco Elías Calles No. 1210, Foviste Chamizal. 32310. Ciudad Juárez, Chihuahua, México; (J.P.F.M).

* Autor para correspondencia: juflores@uacj.mx

² Junta Municipal de Agua y Saneamiento. Calle Pedro N. García No. 2231, Colonia Partido Romero. 32030 Ciudad Juárez, Chihuahua, México; (F.J.N.S.).

RESUMEN

La necesidad de utilizar los lodos residuales que provienen del tratamiento de agua y los residuos de podas para la elaboración de composta son estratégicos para mejoramiento de suelo y ahorro de agua. El objetivo fue evaluar el efecto de lodos residuales de diferente tiempo de almacenamiento y proporciones lodo:vegetal en el contenido de cenizas, C orgánico, N total, relación C/N, pH y salinidad en compostaje aeróbico. Las proporciones lodo: vegetal fueron 1:1, 1:2 y 1:3 m³ en pilas 5 × 1.5 × 0.5 m, con manejo de riegos y aireación semanal; se utilizó un diseño experimental completamente al azar con arreglo factorial y cinco repeticiones; se monitoreo la temperatura, humedad y oxígeno durante un período de 20 semanas. El pH mayor registrado fue 6.89 en el tratamiento lodo nuevo 1:1, mientras el menor de 6.36 fue en lodo apilado con la misma relación 1:1, lo cual fue inversamente a los niveles de salinidad detectados de 12.3 y 13.7 mS cm⁻¹. El C orgánico mayor fue en los lodos apilados con más de 12 meses en las relaciones 1:2 y 1:3, mientras que los valores menores fueron en los lodos nuevos. Se encontró diferencia significativa ($P < 0.05$) para el efecto del tipo de lodo residual en el porcentaje de cenizas, materia orgánica, C orgánico y la relación C/N, pero no se detectó efecto significativo para el N total. Las relaciones lodo-vegetal evaluadas solo resultaron significativas para la relación C/N. El C orgánico presento una reducción de 73, 66 y 51% en los lodos nuevo, medio y apilado de mayor tiempo, esto como producto del proceso de descomposición. El aprovechamiento de la composta conforme la norma NMX-AA-180-SCFI-2018, indica que de acuerdo con los niveles de los parámetros evaluados tiene utilidad como mejorador de suelo.

Palabras clave: carbono orgánico, cenizas, nitrógeno total, salinidad, temperatura.

SUMMARY

The need to use residual sludge from wastewater treatment and residues from gardens pruning to produce composts are strategic to soil improvement and water saving. The objective was to evaluate the effect of residual sludge and plant material ratios on content of ash, organic C, total N, C:N ratio, pH and electrical conductivity during aerobic composting. The sludge and wood chips proportions were 1:1, 1:2 and 1:3 m³, in piles of 5 × 1.5 × 0.5 m, irrigation management and aeration were per week. A completely randomized experiment design with factorial arrangement and five replications was conducted. Temperature, water content and oxygen were monitored over a period of 20 weeks. The highest pH was 6.89 in treatment with new sludge 1:1, and the lowest pH was 6.36 in piled sludge for same relation 1:1, these was inversely to salinity levels detected of 12.3 and 13.7 mS cm⁻¹. The highest organic C was in sludge stacked with more than 12 months in the 1:2 and 1:3 ratios, while the lowest values were in the new sludge. A significant difference ($P < 0.05$) was found for the effect of type of sludge on the percentage of ash, organic matter, organic C and C/N ratio, but no significant effect for total N. The proportions residual sludge and



Cita recomendada:

Flores-Márgez, J. P., & Núñez-Sánchez, F. J. (2024). Compostaje Aeróbico de Lodo Residual con Material Vegetal. *Terra Latinoamericana*, 42, 1-16. e2029. <https://doi.org/10.28940/terra.v42i.2029>

Recibido: 30 de junio de 2024.
Aceptado: 2 de octubre de 2024.
Artículo. Volumen 42.
Diciembre de 2024.

Editor de Sección:
Dr. Francisco H. Ruiz Espinoza

Editor Técnico:
Dr. David Cristóbal Acevedo



Copyright: © 2024 by the authors.
Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC ND) License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

wood chips were only significant for C/N ratios. The content of Organic C decreased in 73%, 66%, and 51% for the new, medium and stacked sludge, as a product of the decomposition process. The use of compost, according to the NMX-AA-180-SCFI-2018 standards indicates that, compost can be used as a good soil amendment.

Index words: *organic carbon, ash, total nitrogen, salinity, temperature.*

INTRODUCCIÓN

Los lodos residuales que se generan en el tratamiento de agua doméstica e industrial en los grandes centros urbanos representan un enorme potencial como residuo orgánico que es benéfico para mejorar la calidad de los suelos, sin embargo, también se perciben como residuos con cierto grado de riesgo al ambiente y a la salud pública cuando estos son apilados como sitios de confinamiento al aire libre (SEMARNAT, 2002). En la zona fronteriza México-EUA se tiene el Programa Frontera 2025 que incluye “promover la gestión integral de materiales y residuos y la limpieza de sitios” (NABD, 2023), la cual atiende la problemática que se tiene actualmente con los lodos residuales o biosólidos provenientes del tratamiento de agua residual en Ciudad Juárez, Chihuahua, donde se producen en promedio 69 350 metros cúbicos por año, los cuales se han estado apilando durante 20 años (JMAS, 2021). Algo relevante a destacar es que estos materiales cumplen con la legislación mexicana de la Norma NOM-004-SEMARNAT-2002 (SEMARNAT, 2002), la cual establece los límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamientos y disposición final. Esta norma es congruente a lo establecido por la legislación de la agencia ambiental de los Estados Unidos sobre los biosólidos (USEPA, 2002). Además del problema de los lodos residuales, otra situación crítica corresponde a la escasa o nula utilización de materiales orgánicos provenientes de la poda de jardines, troncos de árboles, hojas recolectadas, ya que de 495 998 toneladas de residuos sólidos urbanos que se generan al año, se estima que 10.84% corresponde a residuos de jardinería como material de podas (Municipio Juárez, 2022; Plan Estratégico de Juárez, 2022). Las estadísticas del parque el Chamizal en su área de captación han reportado que se generan hasta 6 Mg día⁻¹ de material vegetal que son enviados al relleno sanitario junto con los desperdicios domésticos (Municipio Juárez, 2022). De acuerdo con la Norma NOM-NMX-AA-180-SCFI (2018), esta fracción orgánica tiene un aprovechamiento muy importante, ya que después de su descomposición mediante la presencia de microorganismos en sistema aerobio, se reduce el peso y volumen de la materia orgánica, lo cual deriva en distintos productos como mejoradores que enriquecen los suelos productivos, o bien suelos degradados o erosionados y representan una opción útil en la conservación de áreas verdes públicas, bosques, actividades de jardinería y agricultura. Ambos residuos, lodos generados del tratamiento de agua y el material de podas de jardines y árboles, representan un enorme potencial para la elaboración de compostas. Los estudios donde se han combinado residuos de madera tratada y sin tratar con los lodos residuales han resultado en compostas apropiadas mediante sistemas de pilas aireadas estáticas (Kamal, Wichuk, McCartney, Londry y Felske, 2017). En general, el proceso y ventajas del composteo han sido ampliamente documentados a nivel mundial por la FAO, esto mediante manuales que describen los fundamentos teóricos y prácticos del compostaje, así como los productos y experiencias en América Latina (Román, Martínez y Pantoja, 2013). Las ventajas son evidentes al considerar que una alternativa preferida es el compostaje para reciclar los lodos residuales y material vegetal, ya que así se aprovechan estos materiales altos en materia orgánica y amigables con el ambiente, los cuales una vez compostados pueden ser susceptibles de utilizarse en áreas verdes donde se puede ahorrar fertilizantes y agua de manera significativa (Lin, Cheruiyot, Bui y Ngo, 2022; Figueroa, Flores, Palomo, Corral y Flores, 2008, Flores-Márgez, Shukla y Deb, 2014). El compostaje es un proceso natural ampliamente aceptado que consiste en estabilizar completamente los residuos orgánicos, de tal forma que pueden usarse en una gama amplia desde mejorar paisajes urbanos, en actividades de recuperación de suelos y en áreas productivas agrícolas, reportados en varios estudios (Mahon, Gomez, Andersen, Calvo y Aranda, 2020; Kamal *et al.*, 2017; Coutino *et al.*, 2013; Uçaroğlu y Alkan (2016); Acosta, Zárraga, Rodríguez, y El Zauahre, 2012). El compostaje de los lodos residuales es considerado una estrategia que consiste en un tratamiento aeróbico de tres a seis meses, periodo en que se hace una reducción de patógenos significativamente, lo cual hace que estos materiales una vez compostados puedan ser factibles de aplicarse en diversas áreas productivas y recreacionales (Hernández, Juárez, de la Rosa y Carreño, 2014). Por lo anterior, es deseable continuar fomentando una de las mejores opciones reportadas por la US-EPA para el manejo y disposición de lodos residuales como fertilizante orgánico y mejorador de suelos agrícolas, lo cual permite reciclar los nutrientes y materiales orgánicos en un sistema natural con beneficios ambientales y económicos (Cogger, Bary, Fransen y Sullivan, 2001; Cerny, 2009; Cai *et al.*, 2013). La investigación reciente sobre lodos residuales en suelos agrícolas del Valle de Juárez ha mostrado ventajas en la economía de los agricultores al reducir el costo de fertilizantes químicos, aumentar la producción de cultivos sin afectar la calidad del suelo y mejorar las condiciones ambientales (Flores-Márgez,

Corral y Sapien, 2007; Flores-Márgez *et al.*, 2010; Flores-Márgez *et al.*, 2013; Rivera, Ibarra, Moreno, Martínez y Rafael, 2019). El objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de relaciones lodo residual:material vegetal en el contenido de carbono orgánico y nitrógeno total durante el proceso de compostaje mediante pilas en condiciones aeróbicas de campo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio de Estudio

El área de disposición de lodos residuales en Ciudad Juárez, Chihuahua, tiene 15 ha que corresponde a un lecho de secado localizado a 31° 33' 11.6" N y a los 106° 28' 44.5" O, altitud promedio de 1232 metros de altitud, y está ubicado junto al relleno sanitario municipal (Figura 1). Los lodos residuales son producidos mediante digestión anaeróbica y resultan con 70 a 75% de humedad al momento de su traslado al lecho de secado, el cual se localiza en el km 30 de la carretera Juárez-Chihuahua. Dentro de la citada área, se asignaron 5 000 m² para establecer el experimento con las pilas de tratamientos para evaluar el compostaje de lodos residuales que cumplen con los lineamientos de la Norma: NOM-004-SEMARNAT-2002. SEMARNAT, 2002 tanto en términos de metales pesados como de parámetros microbiológicos.

Recolección, Muestreo y Análisis de Materiales para el Compostaje

Los lodos residuales que han sido almacenados en el área de disposición citada tienen una variación en tiempo, por ello fueron clasificados en tres clases: lodo nuevo, menor a 1 mes (N); lodo medio de 1 a 12 meses (M) y lodo apilado, más de 12 meses (A). Estos fueron utilizados para formar el diseño de tratamientos del tipo de lodo y tres proporciones lodo:vegetal (1:1, 1:2 y 1:3 m³), al tener la siguiente combinación de nueve tratamientos: N-1:1, N-1:2, N-1:3, M-1:1, M-1:2, M-1:3, A-1:1, A-1:2, A-1:3. La formulación de la mezcla a compostar fue con la ecuación siguiente (García, 2021):



Figura 1. Área de disposición de lodos residuales (a) y experimento de tipos de lodos y material vegetal (b) en Ciudad Juárez, Chihuahua, México.
Figure 1. Disposal area of residual sludge (a), and experiment for sludge types and wood chips (b) in Ciudad Juárez, Chihuahua, México.

$$C/N_m = \sum (\%MP_i/100) * (C/N_{mpi}) \quad (1)$$

Donde: C/N_m = C/N inicial de la mezcla, $\%MP_i$ = proporción de la materia prima i , C/N_{mpi} = relación C/N de la materia prima i , 100 = para expresar en decimales la proporción porcentual de cada materia prima.

Así, la estimación de las relaciones C/N inicial variaron de 20.9 a 28.1 (Cuadro 1), lo cual se encuentra en el rango de 25 a 35 considerado ideal para el comienzo del compostaje (Román *et al.*, 2013), los volúmenes de cada proporción fueron ajustados al considerar la humedad inicial.

Las pilas tuvieron una dimensión de $5 \times 1.5 \times 0.5 \text{ m} = 3.75 \text{ m}^3$, donde los materiales fueron triturados y mezclados con un equipo conectado a un bobcat marca Canopy JCB®. Las pilas de compostaje fueron distribuidas en un diseño experimental completamente al azar y arreglo factorial (tipos de lodos y proporciones de material vegetal) con cinco repeticiones, las cuales se consideraron dentro de las pilas. Se registró la temperatura y humedad durante un periodo de 20 semanas, mientras que la concentración de oxígeno durante cuatro semanas, ya que en las siguientes semanas de monitoreo se estabilizó entre 18 y 19% que es muy cercano al 20% del contenido atmosférico natural. Los materiales vegetales utilizados para el composteo fueron residuos de podas (trozos de tallos, podas de pasto, ramas y hojas) aportadas por la Dirección de parques y jardines de la ciudad en su área de transferencia localizada en el parque "El Chamizal". Tanto al inicio como durante el proceso de compostaje se estuvieron colectando muestras compuestas de las mezclas de material vegetal y lodos residuales para el análisis físico-químico, ya que el análisis microbiológico y de metales pesados de los lodos residuales fue aprobado desde el reporte por las plantas de tratamiento conforme la norma NOM-004-SEMARNAT-2000 (SEMARNAT, 2002). El método de muestreo utilizado en los lodos de cada pila fue tipo cuarteo, el cual consistió en coleccionar 10 sub-muestras con una pala de acero inoxidable (desinfectada con alcohol), luego se juntaron las sub-muestras, se mezclaron hasta homogeneizarse utilizando guantes desinfectados, luego se dividió el montículo de muestra en cuatro partes, donde dos partes de extremo se eliminaron y las otras dos se juntaron y se siguieron mezclando, así se repitió el proceso de cuarteo hasta reducir el volumen a 0.5 kg. Esta muestra se colectó en bolsas de plástico debidamente etiquetada con descripción de la muestra, número de muestra y fecha. Esta fue transportada en hielera al laboratorio para su procesamiento y análisis. En el caso de los análisis físico y químicos, la muestra se secó a la sombra en un invernadero de ICB-UACJ, se molió y tamizó con un equipo trituradora que incluyó una criba de 0.05 mm (Gilson SA-45F, 220 V, 50 Hz). El volumen de las pilas de compostaje se fue reduciendo conforme la actividad microbiana hizo efecto en los materiales orgánicos, así hasta llegar a formar un material carbonáceo oscuro estable que fue la composta final. Las pilas de compostaje fueron irrigadas y aireadas mediante volteos a diferentes intervalos de tiempo, una a dos veces por semana según el contenido de humedad y condiciones climáticas.

Análisis Físicos de las Muestras de Lodos y Compostas

El contenido de humedad en las pilas de compostaje se monitoreo utilizando un tensiómetro marca Irrometer de 30 cm (irrometer.com) al obtener la tensión de humedad en kPa, estas fueron convertidas a porcentaje de humedad volumétrica al utilizar un equipo TDR (Soilmoisture, 2012) en laboratorio para los lodos residuales en promedio como se muestra en la Figura 3. Los registros de temperatura se llevaron a cabo con termómetros

Cuadro 1. Relaciones C/N para cada tipo de lodo residual y valores iniciales de C/N para las mezclas evaluadas de relación lodo/vegetal.
Table 1. Relation C/N for each type of residual sludge, and initial C/N for treatments of sludge/vegetal.

| Materia prima | CO | NT | C/N | 1:1 | 1:2 | 1:3 |
|-----------------|-------|------|-------|------|------|------|
| | % | % | | C/N | C/N | C/N |
| Lodo nuevo | 38.73 | 5.91 | 6.55 | 20.9 | 25.5 | 28.1 |
| Lodo medio | 34.11 | 5.32 | 6.41 | 20.9 | 25.5 | 28.1 |
| Lodo apilado | 29.55 | 4.36 | 6.78 | 20.9 | 25.5 | 28.1 |
| Vegetal (podas) | 53.47 | 1.61 | 35.36 | | | |

CO = carbono orgánico; NT = nitrógeno total; C/N = relación carbono/nitrógeno.
 CO = organic carbon; NT = total nitrogen; C/N = carbon/nitrogen ratio.

marca Oremor de 1 m de longitud (Oremor, 2024), los cuales se insertaron en las pilas de compostas entre tres a cinco minutos hasta obtener lecturas estables. La concentración de oxígeno para monitorear la aireación de las pilas en compostaje se realizó cada semana con un equipo marca Oxytemp-ReoTemp (Reotemp, 2024) que tuvo una longitud de tallo de 0.9 m, el cual se insertó por triplicado en cada pila para obtener una apropiada estimación de esta variable.

Análisis Químico de Lodo y Composta

Las mediciones de pH se realizaron al pesar 10 g de muestra en una balanza electrónica (Scout™ Pro, OHAUS®), se colocó en frasco de plástico de 100 mL, se agregó 30 mL de agua desionizada, las muestras se agitaron en un instrumento mecánico marca EBERBACH® durante 15 minutos, luego se dejaron reposar dos minutos y se agitaron por 15 minutos, luego se dejaron reposar 10 minutos antes de la medición de pH, la cual se realizó con un potenciómetro marca Hanna® Instruments HI 207 (CP, 2008¹).

Salinidad. A la muestra donde se midió el pH, se agregó 20 mL de agua desionizada, se agito durante 15 minutos y se dejó reposar 24 horas, luego se midió la conductividad eléctrica con un conductivímetro marca Thermo electron Co. Orion 3). El valor obtenido de conductividad se multiplico por el factor 2.6 para aproximar al valor real en pasta de saturación del cual se obtuvo ese factor. También se registró la concentración de sólidos disueltos totales (SDT) y el cloruro de sodio (%) con el mismo conductivímetro (CP, 2008¹).

Nitrógeno total. El porcentaje de nitrógeno total se obtuvo con el método Kjeldahl al pesar 0.1 g de muestra seca molida y tamizada, digestión y titulación con ácido sulfúrico utilizando un equipo Labconco (Labconco Co., Kansas City) conforme el procedimiento descrito por Bremner (1996) y Aguilar, Etchevers y Castellanos (1987).

Cenizas. Se pesó 1 g de muestra, luego se colocó en un crisol de porcelana previamente secado y registro de tara, se llevó a la mufla donde se calcinó a 550 °C durante dos horas, se enfriaron los crisoles y se pesaron, así el cálculo de cenizas se realizó conforme la norma (NMX-Ff-109-SCFI-2008, 2008).

Materia orgánica. Al utilizar el método por calcinación mencionado para cenizas, el contenido de materia orgánica fue: %M.O. = % cenizas-100, (NMX-Ff-109-SCFI-2008, 2008).

Carbono orgánico. Al seguir el método de calcinación para cenizas y materia orgánica, el porcentaje de carbono orgánico (%CO) se calculó: CO (%) = materia orgánica (%) / 1.724, donde este es el factor VanBenmelen (NMX-Ff-109-SCFI-2008, 2008).

Relación C/N. se calculó al dividir el porcentaje de carbono orgánico estimado por el método de calcinación entre el porcentaje de nitrógeno total Kjeldahl.

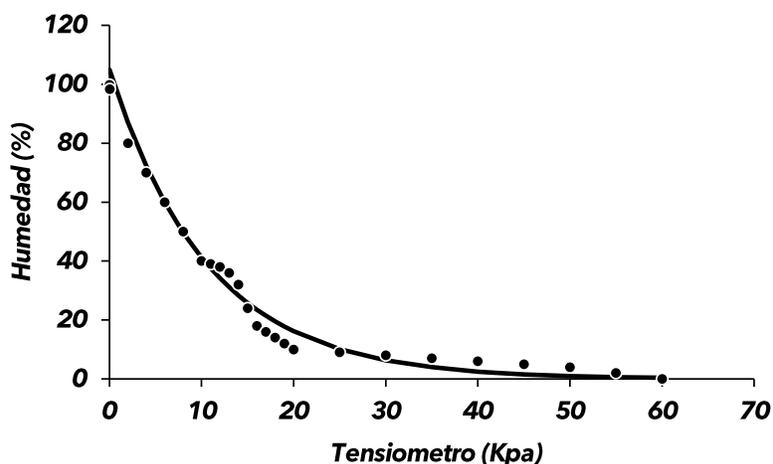


Figura 3. Porcentaje de humedad en las compostas como función de la tensión registrada en los tensiómetros.

Figure 3. Moisture percentage in compost as a function of moisture tension recorded in tensimeter.

¹ CP (Colegio de Postgraduados). (2008). *Manual de procedimientos de análisis de suelos y plantas*. Documento de laboratorio del Centro de Edafología. Montecillos, Estado de México, México: Colegio de Postgraduados.

Análisis Estadístico

La información colectada se analizó mediante estadísticos descriptivos, prueba de normalidad de datos Kolmogórov- Smirnov, análisis de varianza para un diseño experimenta completamente al azar con arreglo factorial, correlación entre las variables, comparación múltiple de promedios con la técnica Tukey, se utilizó el paquete estadístico SPSS versión 24.0 (IBM SPSS Statistics, 2016)

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Temperatura, Humedad y Oxígeno en las Pilas de Compostaje

Las temperaturas mayores observadas fueron de 65 °C y se registraron en los tratamientos con lodo apilado (> 12 meses) y la relación lodo/vegetal (1:2 y 1:3) a partir de la tercera semana de compostaje (Figura 2). Esta reacción de aumento en la temperatura fue consistente en los lodos medios y apilados en ese período de tres a cuatro semanas, lo cual coincide con la más alta relación C:N de 28:1 inicial de estos materiales, lo que promueve la acción microbiana para descomposición del material orgánico al aportarse más carbono en este proceso biológico (Cuadro 1). Estudios similares han mostrado temperatura máxima promedio de 52.5 °C en compostaje de lodos lo que elimina coliformes fecales (Vicencio-De La Rosa, Pérez, Medina y Martínez, 2011). En esta fase del compostaje, los microorganismos utilizan las fuentes sencillas de C y N al generar calor (Román *et al.*, 2013). En este experimento se observaron dos fases termófilas, en las semanas 3 a 5 para los tratamientos con lodo medio (2 a 12 meses) y apilado (>12 meses), mientras que para lodo nuevo (<1 mes) las temperaturas mayores se registraron en la semana 10 a 12 de compostaje para los tratamientos de menor relación C/N (20:1) que fue para el lodo nuevo. El contenido alto de humedad (75%) en este tipo de lodo no permitió mayor actividad microbiana en las primeras cuatro semanas. Después de la semana ocho, la temperatura de las pilas con lodo medio y apilado fue cercana a la temperatura ambiente del verano que fueron entre 30 y 40 °C para la región norte de Chihuahua. En este proceso de compostaje ocurren tres fases según la temperatura de la pila, fase mesófila donde la temperatura aumenta hasta los 45 °C, aquí ocurre la descomposición de compuestos solubles como azúcares, produce ácidos orgánicos y el pH puede bajar en las primeras dos semanas. La siguiente es la fase termófila o de higienización, es cuando el material alcanza temperaturas mayores a 45 °C, los microorganismos mesófilos son reemplazados por bacterias termófilas que actúan degradando materiales orgánicos más complejos de C como celulosa y lignina. Así, el N se transforma en amoníaco y el pH sube a partir de los 60 °C. Este calor destruye bacterias de origen fecal como *Escherichia coli* y *Salmonella* spp., así como quistes y huevos de helminto, esporas de hongos y semillas de malezas.

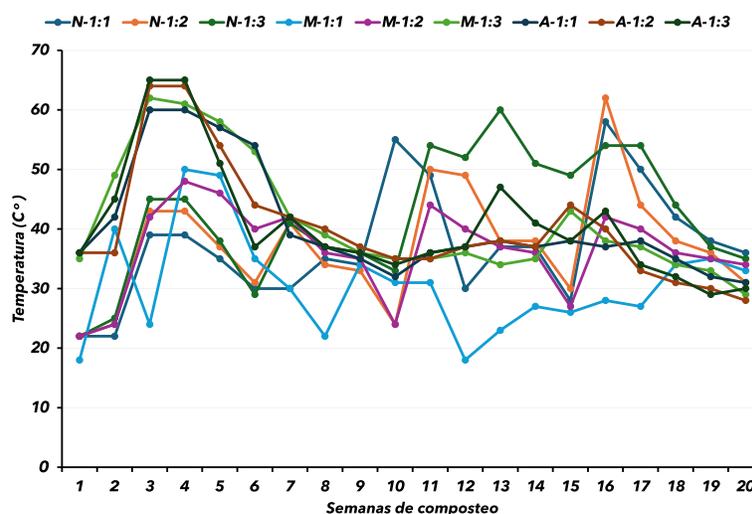


Figura 2. Temperatura registrada en las pilas de compostaje para las tres combinaciones de lodo residual y material vegetal.
Figure 2. Temperature recorded in the compost piles for the three combinations of residual sludge and wood material.

La tercera fase o fase de enfriamiento o mesófila II, al agotarse las fuentes de C y N en el material de compostaje, la temperatura desciende a 40-45 °C, pero continua la degradación de polímeros como la celulosa y el pH desciende un poco, aunque se mantiene ligeramente alcalino. Finalmente, existe una fase de maduración de la composta que demora meses y existen reacciones de condensación y polimerización de compuestos carbonatados para la formación de ácidos húmicos y fúlvicos (Román *et al.*, 2013; Orozco-Almanza, 2014).

El contenido de humedad en las pilas de compostaje vario a lo largo del estudio, debido a los riegos y ocurrencia de precipitaciones pluviales en el área, y volteo de pilas para aireación, sin embargo, en lo general, las pilas estuvieron en el rango óptimo de humedad para compostaje que fue entre 45 y 60%, es decir 20 a 10 kPa (Figura 3 y 4). Una observación consistente en el estudio fue que a mayor cantidad de lodo residual en los tratamientos de compostaje, se conservó más humedad, es decir las relación lodo:vegetal de 1:3 perdía más humedad entre riegos. Esto puede explicarse por la estructura física de los lodos al ser muy pegajosos y retener más humedad en sus estructuras internas.

La aireación de las pilas es una actividad importante para asegurar la presencia de oxígeno en los espacios libres dentro de los materiales de la composta, lo cual estuvo relacionado con las aplicaciones de riegos, la actividad de mezclado y volteos para promover la aireación. En este estudio se presenta la medición de la concentración de oxígeno durante cuatro semanas de compostaje (Figura 5), donde vario de 15 a 19%, a partir de la tercera semana se alcanzó la concentración de oxígeno en las pilas de compostaje cercano al contenido natural del aire que es entre 18 y 20% (Román *et al.*, 2013; Orozco-Almanza, 2014). Es común que hacia el interior de las pilas el contenido de oxígeno disminuye, mientras que el dióxido de carbono aumenta por la actividad de los microorganismos que actúan en la mineralización o descomposición de la materia orgánica hasta crear un material estable tipo humus que sería la composta madura o material humificado.

Caracterización de los Materiales del Compostaje

El contenido de cenizas, materia orgánica y relación C/N inicial en los lodos residuales vario de 33 a 49%, 51 a 67% y 6.4 a 6.8%, respectivamente (Cuadro 2). Los lodos medio y apilado presentaron el mayor contenido de cenizas significativamente, así como menor materia orgánica y NTK, pero la relación C/N fue igual en todos

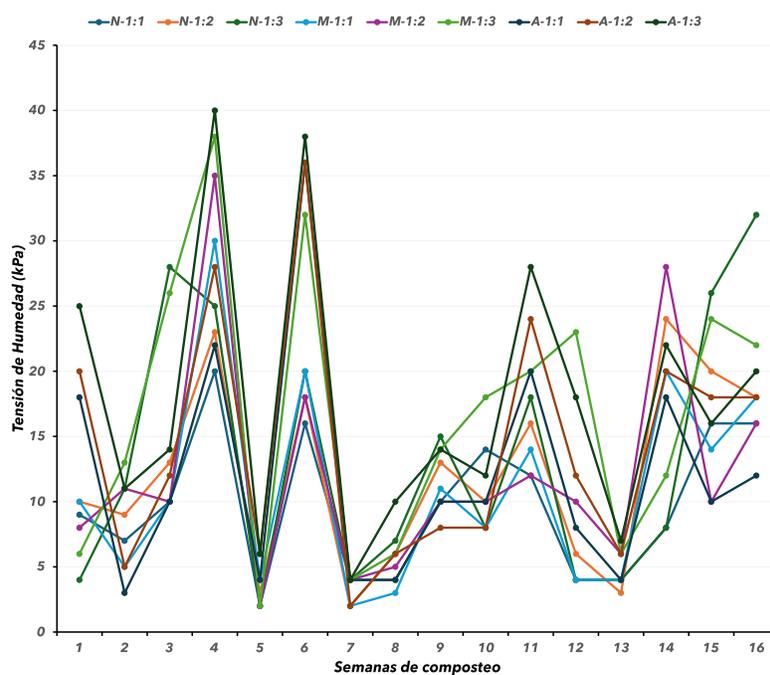


Figura 4. Tensión de humedad registrada en las pilas de compostaje para las tres combinaciones de lodo residual y material vegetal.
Figure 4. Moisture tension recorded in the compost piles for the three combinations of residual sludge and wood material.

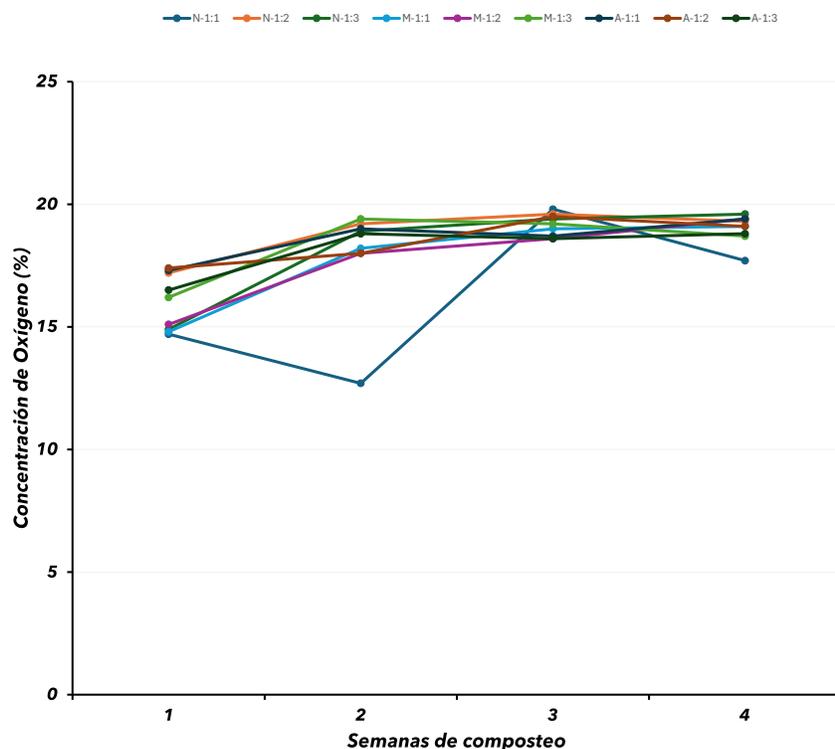


Figura 5. Concentración de oxígeno registrada en las pilas de compostaje para las tres combinaciones de lodo residual y material vegetal.

Figure 5. Oxygen concentration recorded in the compost piles for the three combinations of residual sludge and wood material.

($P < 0.05$). Las hojas tuvieron el mayor contenido de cenizas y menor materia orgánica, mientras que la relación C/N no varío significativamente entre estos tres materiales utilizados en el compostaje. Así, este material vegetal utilizado como adición al compostaje para permitir mayor aireación y C orgánico presentó un contenido de cenizas entre 6 y 15%, materia orgánica de 90 a 94% y una relación C/N de 32 a 44. En promedio la relación C:N fue 25:1 al iniciar el proceso de compostaje para esta combinación de materiales. Con base en esta caracterización, por ejemplo, el tratamiento de lodo y relación vegetal 1:1 inició con 439 kg de C orgánico y 60.5 kg de NTK, mientras que la relación 1:3 con 543 kg de C y 64.7 kg de NTK, lo cual es de utilidad para compararse con los valores de estos parámetros al final del proceso de compostaje.

Cuadro 2. Caracterización inicial de los materiales utilizados en el compostaje de lodos residuales y material vegetal.

Table 2. Initial characterization of materials used in compost with residual sludge and garden pruning's.

| Material | Cenizas | MO | CO | NTK | C/N |
|---------------|---------------------------|---------------|---------------|-------------|--------|
| ----- % ----- | | | | | |
| Lodo nuevo | 33.23±0.47 b [†] | 66.77±0.47 a | 38.73±0.27 a | 5.91±0.05 a | 6.55 a |
| Lodo medio | 41.19±3.29 ab | 58.81±3.29 ab | 34.11±1.91 ab | 5.32±0.04 b | 6.41 a |
| Lodo apilado | 49.06±5.02 a | 50.94±5.02 b | 29.55±2.91 b | 4.36±0.05 c | 6.78 a |
| Pasto Bermuda | 10.04±1.07 b | 89.96±1.07 a | 52.18±0.62 a | 1.73±0.42 a | 31.7 a |
| Hojas árboles | 15.52±1.34 a | 84.48±1.55 b | 49.00±1.76 b | 1.24±0.25 a | 39.5 a |
| Madera trozos | 6.21±1.89 b | 93.79±1.89 a | 54.40±1.10 a | 1.20±0.15 a | 43.9 a |

MO = materia orgánica; CO = carbono orgánico, NTK = nitrógeno total kjeldhal, C/N = relación carbono/nitrógeno. [†] Letras distintas en los tratamientos entre tipos de lodos o bien entre pasto-hoja-madera indican diferencias significativas (Tukey $P \leq 0.05$).

MO = organic matter; CO = organic carbon, NTK = total nitrogen kjeldhal, C/N = carbon/nitrogen ratio. [†] Different letters in the treatments among sludge type or wood chips indicate significant differences Tukey's ($P \leq 0.05$).

El pH de las compostas evaluadas fue poco variable entre tratamientos al final de proceso de compostaje, estuvo entre 6.36 y 6.89 (Cuadro 3) con cierta tendencia a aumentar conforme se agregó más material vegetal y significativamente ($P < 0.05$) diferente con reducción del pH cuando se utilizó lodo apilado, este rango es considerado óptimo o ideal para calidad de compostas (NOM-NMX-AA-180-SCFI-2018, 2018; Román *et al.*, 2013). Al hacer la estimación de los cambios de pH, se detectó una variación promedio de 0.28 unidades de reducción, esto debido a la nitrificación, es decir el proceso de composteo reduce el pH hacia la acidez ligeramente de los materiales en compostaje como producto de la actividad microbiana (Sánchez-Monedero, Roig, Paredes y Bernal, 2001). La conductividad eléctrica como medición del contenido de sales solubles en las compostas fue mayor significativamente en el tratamiento con lodo apilado (> 12 meses) y relación 1:1, aunque en la combinación con 1:2 y 1:3 disminuyó significativamente ($P < 0.05$). Esta misma tendencia se observó para los SDT y el porcentaje de cloruro de sodio, lo cual resulta evidente al aumentar el material vegetal y, por ende, es menor la cantidad de lodo lo que reduce la concentración de sales solubles del sustrato al final del proceso (Cuadro 3). También en los niveles de salinidad se observó una reducción promedio de 7.51 mS cm⁻¹, lo cual es benéfico al tener una composta con menor cantidad de sales solubles que pudieran afectar la calidad del suelo.

Efecto del Tipo de Lodo y Material Vegetal

Los resultados indican diferencia significativa ($P < 0.05$) para el efecto del tipo de lodo residual sobre el porcentaje de cenizas, materia orgánica, carbono orgánico y la relación C/N, pero no se detectó efecto significativo para el NTK (Cuadro 4). Las relaciones ó proporciones de lodo-vegetal evaluadas 1:1, 1:2 y 1:3, solo resultaron significativas ($P < 0.05$) para la relación C/N, mientras que las otras variables no mostraron efecto. El análisis como efecto anidado de la relación lodo-vegetal dentro de lodo residual mostró efecto altamente significativo para las variables evaluadas excepto para NTK ($P < 0.01$). Una tendencia observada fue que en las proporciones igual (1:1) se conservó más la humedad durante el compostaje, pero la actividad microbiana fue menor, mientras que donde la proporción de material vegetal fue mayor (1:2) se promovió mayor descomposición de los materiales orgánicos, esto debido a la fuente de carbono agregada mediante los residuos vegetales.

De acuerdo con la prueba de comparación múltiple de promedios, el contenido de cenizas mayor significativamente ($P < 0.05$) fue para el lodo nuevo, mientras que el contenido de materia y carbono orgánicos fue mayor en el lodo apilado (Cuadro 5). Los tratamientos de lodo nuevo 1:3, lodo nuevo 1:2 y lodo medio 1:1 tuvieron los porcentajes de cenizas mayores estadísticamente, mientras que los promedios menores de cenizas fueron para el lodo apilado con relaciones 1:2 y 1:3 (Cuadro 6). Méndez-Alvarado (2022¹) reportó que en una

Cuadro 3. Promedios de pH y salinidad en los tratamientos de composta con lodo residual y material vegetal.
Table 3. Average of pH and salinity for compost treatments with residual sludge and garden pruning's.

| Tratamiento | pH | CE | SDT | NaCl |
|-----------------|----------|---------------------|--------------------|--------|
| | | mS cm ⁻¹ | Mg L ⁻¹ | % |
| (lodo:relación) | | | | |
| Nuevo 1:1 | 6.890 a | 12.33 b | 2.44 b | 8.69 b |
| Nuevo 1:2 | 6.715 b | 11.85 c | 2.28 c | 8.28 c |
| Nuevo 1:3 | 6.735 b | 11.68 cd | 2.24 cd | 8.09 e |
| Medio 1:1 | 6.530 cd | 11.69 cd | 2.22 cd | 8.19 d |
| Medio 1:2 | 6.590 c | 12.53 b | 2.40 b | 8.69 b |
| Medio 1:3 | 6.675 b | 11.28 e | 2.18 d | 7.81 f |
| Apilado 1:1 | 6.365 e | 13.76 a | 2.65 a | 9.59 a |
| Apilado 1:2 | 6.475 d | 11.36 e | 2.2 d | 7.91 f |
| Apilado 1:3 | 6.550 c | 11.49 de | 2.18 d | 7.99 f |

CE = conductividad eléctrica; SDT = sólidos disueltos totales. † Letras distintas en los tratamientos indican diferencias significativas (Tukey $P \leq 0.05$).
EC = electrical conductivity; TDS = total dissolved solids. † Different letters in the treatments indicate significant differences Tukey's ($P \leq 0.05$).

² Méndez-Alvarado, A. (2022). Evaluación de la composta producida en la planta de compostaje de Xalapa, Veracruz. Proyecto de intervención para obtener el diploma de Especialista en Diagnóstico y Gestión Ambiental. Universidad Veracruzana, Facultad de Ciencias Químicas. Consultado el 1 de noviembre de 2023, desde <https://cdigital.uv.mx/bitstream/handle/1944/52607/MendezAlvaradoAbraham.pdf?sequence=3&isAllowed=y>.

Cuadro 4. Análisis de varianza para el porcentaje de cenizas por gramo de muestra en los tratamientos de composta con lodo residual y material vegetal.**Table 4. Analysis of variance for the percentage of ashes per gram of sample in the compost treatments with residual sludge and garden pruning's.**

| Fuente de variación | g.l. | Cenizas | Materia Orgánica | Carbono Orgánico | NTK | C/N |
|---------------------------------------|------|----------|------------------|------------------|-------|---------|
| Lodo residual | 2 | 0.000**† | 0.000** | 0.000** | 0.525 | 0.000** |
| Relación lodo-vegetal | 2 | 0.087 | 0.087 | 0.08 | 0.828 | 0.014* |
| Relación lodo-vegetal (lodo residual) | 4 | 0.000** | 0.000** | 0.000** | 0.382 | 0.000** |
| Error | 18 | | | | | |
| Total | 26 | | | | | |

† valor p; g.l.= grados de libertad; NTK = nitrógeno total Kjeldhal; C/N = relación carbono/nitrógeno.

† p value; g.l.= degrees of freedom; NTK = total Kjeldhal nitrogen; C/N = carbon/nitrogen ratio.

composta elaborada con lodo residual y restos vegetales usando la técnica de pilas de volteo, el contenido de materia orgánica por el método de calcinación fue de 39.3%, no obstante, cabe señalar que el tiempo de compostaje fue solo de 70 días. Por otra parte, Marín-Bahamón (2019³) reportó una determinación de 28.5% de materia orgánica en una composta elaborada con 60% lodo residual de PTAR, 39% restos de poda de césped, y 1% papel de periódico, a lo largo de 40 días por medio de un reactor horizontal de volteo.

Al comparar las relaciones C/N de los materiales al inicio (Cuadro 1) y final (Cuadro 7) del proceso de compostaje se estimó una reducción de 27.8%, 21.4% y 14.4% en el contenido de C orgánico para los lodos nuevo, medio y apilado, respectivamente, lo cual indica una mineralización de la materia orgánica de 72, 63 y 49%, respectivamente, durante el periodo del compostaje (Cuadro 8). Estos cambios resultan evidentes al considerar que los lodos nuevos o frescos contienen más materia orgánica que los demás tipos de lodos residuales por descomposición natural al estar apilados por largos periodos de tiempo, así como lo indican Sánchez-Monedero *et al.* (2001) donde las pérdidas de nitrógeno durante el compostaje dependen de los materiales usados y del pH

Cuadro 5. Promedio y error estándar del porcentaje de cenizas, materia orgánica y carbono orgánico para los efectos principales del tipo de lodo y de la relación lodo-vegetal.**Table 5. Mean and standard error of the percentage of ash, organic matter, and organic carbon for the main effects of sludge type and relation sludge-plant material.**

| Efecto principal | Cenizas | Materia Orgánica | Carbono Orgánico |
|------------------------------|---------------|------------------|------------------|
| | ----- % ----- | | |
| Tratamiento | | | |
| Lodo nuevo (<1mes) | 81.1±0.97 a | 18.9±0.98 c | 10.9±0.56 c |
| Lodo medio (2 a 12 meses) | 78.2±0.78 b | 21.8±0.79 b | 12.6±0.45 b |
| Lodo apilado (> 12 meses) | 73.9± 0.98 c | 26.0±0.98 a | 15.1±0.57 a |
| Relación 1:1 | 78.6±0.60 a | 21.3±0.61 a | 12.4±0.35 a |
| Relación 1:2 | 77.2±1.21 a | 22.8±1.21 a | 13.2±0.70 a |
| Relación 1:3 | 77.4±1.93 a | 22.6±1.93 a | 13.1±1.12 a |

Letras distintas en los tratamientos indican diferencias significativas (Tukey $P \leq 0.05$).

Different letters in the treatments indicate significant differences Tukey's ($P \leq 0.05$).

³ Marín-Bahamón, D. (2019). *Propuesta de aprovechamiento de lodos residuales provenientes de una PTAR del municipio de Sopó Cundimarca para la producción de un fertilizante organo-mineral*. Tesis para obtener el grado de Ingeniero Químico. Fundación Universidad de América. Disponible en: <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7393/1/6122932-2019-1-IQ.pdf>

Cuadro 6. Promedio y error estándar del porcentaje de cenizas, materia orgánica y carbono orgánico en los tratamientos de lodos residuales y relación lodo-vegetal en compostas.
Table 6. Mean and standard error of the percentage of ash, organic matter, and organic carbon for the combined effects of sludge type nested in the relation sludge-plant material.

| Lodo residual | Relación Lodo-Vegetal | Cenizas | Materia Orgánica | Carbono Orgánico |
|---------------|-----------------------|---------------|------------------|------------------|
| ----- % ----- | | | | |
| Nuevo | 1:1 | 78.0±0.56 b | 21.9±0.56 d | 12.7±0.32 cd |
| Nuevo | 1:2 | 80.6±0.96 ab | 19.1±0.96 de | 11.1±0.55 de |
| Nuevo | 1:3 | 84.4±0.39 a | 15.6±0.39 e | 9.0±0.22 e |
| Medio | 1:1 | 80.8±0.40 ab | 19.2±0.40 de | 11.1±0.23 de |
| Medio | 1:2 | 77.0±1.23 bcd | 22.9±1.23 bcd | 13.3±0.71 bcd |
| Medio | 1:3 | 76.6±0.61 bcd | 23.4±0.61 bcd | 13.5±0.35 bc |
| Apilado | 1:1 | 77.1±0.40 bcd | 22.9±0.40 bcd | 13.3±0.23 bcd |
| Apilado | 1:2 | 73.6±1.43 de | 26.4±1.43 ab | 15.3±0.83 ab |
| Apilado | 1:3 | 71.2±0.73 e | 28.8±0.73 a | 16.7±0.42 a |

Letras distintas en los tratamientos indican diferencias significativas (Tukey $P \leq 0.05$).
 Different letters in the treatments indicate significant differences Tukey's ($P \leq 0.05$).

de las mezclas. Las relaciones C/N de los materiales estuvo entre 2.8 a 6.4 para lodos residuales y 38 a 42 para los materiales vegetales, lo cual da una combinación C/N de 20:1 a 25:1 en las mezclas de lodos y vegetal, lo cual es un rango ideal de comienzo del proceso de compostaje (Román *et al.*, 2013). Se puede observar que los lodos residuales aportan más nitrógeno, mientras que los residuos de plantas aportan más carbono. Lin *et al.* (2022) encontraron en lodo residual compostado un contenido de nitrógeno de 1.7 a 4.7%, mientras que la relación C/N fue entre 11.3 y 11.5. Se detectó una correlación significativa inversa entre el NTK y la relación C/N (Figura 6). Con base en la información anterior donde al comienzo del compostaje se tuvieron relaciones C/N estimadas entre 16:1 y 32:1, estas se redujeron durante la fase termofílica que ocurrió entre las 4ª. y 6ª. semanas de composteo, y así fueron disminuyendo hasta el final del compostaje al contener relaciones C/N entre 9:1 y 16:1, la cual es ideal para una composta madura que se lleva entre tres y seis meses (NOM-NMX-AA-180-SCFI-2018, 2018).

El contenido de carbono orgánico se redujo conforme el tiempo de compostaje para todas las combinaciones de proporciones evaluadas con lodo residual y material vegetal (Figura 3). La disminución promedio del carbono orgánico como producto del proceso de mineralización de la materia orgánica en estos materiales fue que cuando

Cuadro 7. Promedio y error estándar del porcentaje de nitrógeno total Kjeldahl (NTK) y la relación carbono-nitrógeno (C/N) para los efectos principales de lodo residual y relación lodo-vegetal.
Table 7. Mean and standard error of the NTK and Ratio C/N for the main effect of sludge type and the relation sludge-plant material.

| Efecto principal | NTK | Relación C/N |
|------------------|--------------|---------------|
| % | | |
| Lodo nuevo | 1.205±0.06 a | 9.01±0.60 c |
| Lodo medio | 1.015±0.12 a | 12.87±1.19 b |
| Lodo apilado | 1.026±0.17 a | 15.24±1.20 a |
| Relación 1:1 | 1.040±0.11 a | 12.87±1.93 a |
| Relación 1:2 | 1.060±0.16 a | 12.56±1.17 ab |
| Relación 1:3 | 1.146±0.11 a | 11.69±1.39 b |

Letras distintas en los tratamientos indican diferencias significativas (Tukey $P \leq 0.05$).
 Different letters in the treatments indicate significant differences Tukey's ($P \leq 0.05$).

Cuadro 8. Promedio y error estándar del porcentaje de nitrógeno total Kjeldahl (NTK) y la relación carbono-nitrógeno (C/N) en los tratamientos de lodos residuales y relación lodo-vegetal en compostas.**Table 8. Mean and standard error of the NTK and Ratio C/N for treatments of sludge type and the relation sludge-plant material in compost.**

| Lodo residual | Relación Lodo-Vegetal | NTK % | Relación C/N |
|---------------|-----------------------|-------------|---------------|
| Nuevo | 1:1 | 1.18±0.03 a | 10.59±0.05 d |
| Nuevo | 1:2 | 1.20±0.24 a | 8.99±0.65 de |
| Nuevo | 1:3 | 1.22±0.02 a | 7.43±0.17 e |
| Medio | 1:1 | 1.22±0.02 a | 9.11±0.07 de |
| Medio | 1:2 | 0.90±0.43 a | 14.75±0.06 b |
| Medio | 1:3 | 0.91±0.31 a | 14.74±0.13 b |
| Apilado | 1:1 | 0.70±0.01 a | 18.91±0.04 a |
| Apilado | 1:2 | 1.07±0.42 a | 13.92±0.96 bc |
| Apilado | 1:3 | 1.30±0.24 a | 12.89±0.15 c |

Letras distintas en los tratamientos indican diferencias significativas (Tukey $P \leq 0.05$).
Different letters in the treatments indicate significant differences Tukey's ($P \leq 0.05$).

se utilizó el lodo nuevo, éste presentó una reducción de 28.3% en su contenido de carbono lo que representó $73.1 \pm 2.38\%$, mientras que en el lodo medio disminuyó 22.6%, es decir $66.0 \pm 3.66\%$, mientras que el contenido de carbono disminuyó en 15.2% en el lodo apilado lo que representó $51.4 \pm 1.95\%$ de reducción a los 99 días de compostaje aeróbico. En promedio, el lodo viejo mostró menor reducción para las tres combinaciones de lodo residual y material vegetal evaluados en este estudio (Figura 7).

Al final del proceso, el lodo nuevo presentó de 9 a 12% de carbono orgánico, entre 10 y 13% para el lodo medio y 13 a 15% para el lodo apilado. Estas respuestas se pueden atribuir a que el lodo nuevo recién salido de las plantas de tratamiento de agua residual contiene mayor cantidad de nitrógeno total y materia orgánica que es susceptible de descomponerse o mineralizarse durante el compostaje, mientras que los lodos medio (2 a 12 meses) y apilado (> 12 meses) contienen menor proporción de materiales orgánicos susceptibles de

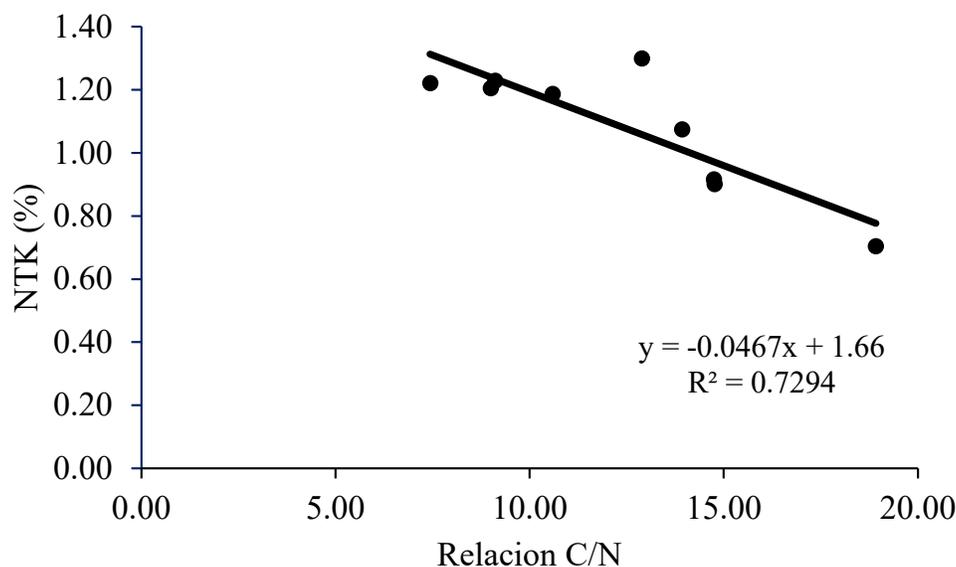


Figura 6. Correlación entre el contenido de NTK y la relación C/N de las compostas.
Figure 6. Correlation between NTK and C/N relationship for the compost.

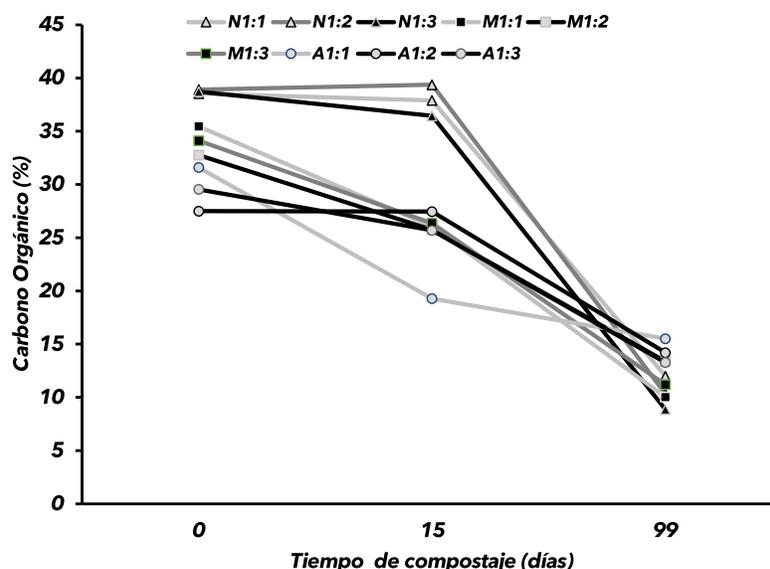


Figura 7. Contenido de carbono orgánico a lo largo del proceso de compostaje. N1:1, 1:2, 1:3 = lodo nuevo y relación lodo/vegetal; M1:1, 1:2, 1:3 = lodo medio y relación lodo/vegetal; A1:1, 1:2, 1:3 = lodo apilado y relación lodo/vegetal.

Figure 7. Organic carbon content along the compost process. N1:1, 1:2, 1:3 = new sludge and relation sludge/vegetal; M1:1, 1:2, 1:3 = sludge middle and relation sludge/vegetal; A1:1, 1:2, 1:3 = piled sludge and relation sludge/vegetal.

mineralización. Conforme la norma NOM-NMX-AA-180-SCFI-2018 (2018), se puede establecer que se logró obtener una composta madura terminada que cumple con las especificaciones de pH (6.7), conductividad eléctrica (0.5 a 12 dS m⁻¹) materia orgánica (> 20%), N total (1 a 3%) y relación C/N (15 a 25), aunque en este último solo los lodos medio y apilado estuvieron en el rango apropiado, por ello estos materiales serían útiles para utilizarse en suelos de parques y jardines, así como en suelos agrícolas (Figura 8).

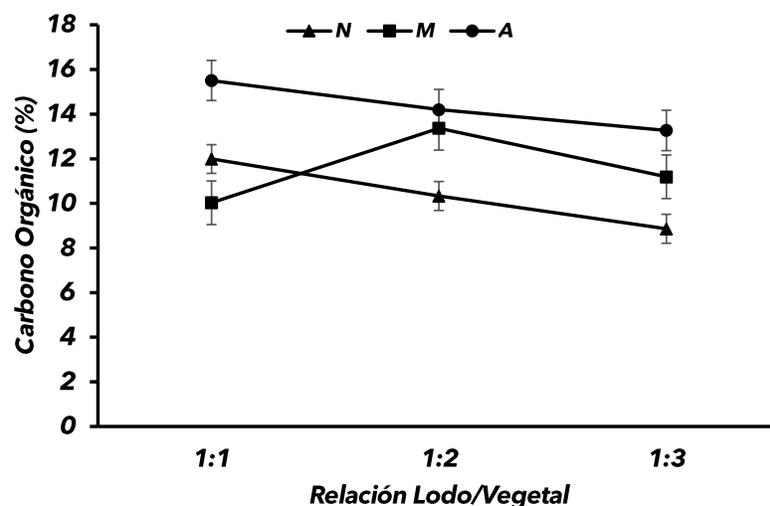


Figura 8. Respuesta promedio del contenido de carbono orgánico en relación con las combinaciones de lodo residual y material vegetal. N = lodo nuevo; M = lodo medio, A = lodo apilado; barras son el error estándar.

Figure 8. Average response of organic carbon in relation to sludge and wood material combination. N = new sludge, M = middle sludge, A = piled sludge, bars are standard error.

CONCLUSIONES

Este estudio permitió generar información que tiene utilidad para entender el compostaje de lodos residuales y material vegetal, así como los parámetros claves de la relación C/N, salinidad y alcalinidad que cambian en el proceso microbiano del compostaje. Se encontró que el tipo de lodo apilado de diferentes edades y la proporción de lodo:vegetal tienen efecto significativo en los contenidos de cenizas, materia orgánica y relación C/N. El mayor contenido de C orgánico al final del proceso de compostaje fue detectado en los lodos apilados (>12 meses) con relaciones lodo:vegetal de 1:2 y 1:3, mientras que los valores menores fueron en los lodos nuevos recién producidos en las plantas de tratamiento de agua residual. El contenido de materia y C orgánicos presentaron una reducción de 73, 66 y 51% en los lodos nuevo, medio y apilado, respectivamente, como producto del proceso de descomposición a las 20 semanas. Se demostró la factibilidad de obtener una composta aceptable a partir de los lodos residuales con mejoras ambientales y edáficas de la región. De tal manera que el uso potencial de las compostas de lodos residuales es como fertilizante orgánico en parques y jardines de las zonas urbanas, o en áreas agrícolas cercanas a la ciudad, pero también tienen enorme posibilidad de usarse como mejoradores de suelos al cumplir con la legislación ambiental.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los conjuntos de datos utilizados o analizados durante el estudio actual no están disponibles públicamente debido a la fuente de apoyo financiero del proyecto, pero están disponibles de los autores correspondientes a solicitud razonable y con el permiso institucional de quien administró el estudio.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

FINANCIACIÓN

No aplicable.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización, metodología, escritura: preparación del borrador original y edición: J.P.F.M. Recursos, revisión, administración del proyecto: F.J.N.S.

AGRADECIMIENTOS

Gracias al Banco de Desarrollo de América del Norte y Junta Municipal de Agua y Saneamiento de Ciudad Juárez por el financiamiento del estudio; a la Dirección de parques y jardines del Municipio de Juárez, Chihuahua; Ing. Edmundo Urrutia Beall; Biol. José Francisco López Morales, M.C. María Zulema Poncio Acosta, M.C. Luz del Carmen Agüero Reyes, a los alumnos tesisistas incluidos en el proyecto: Daniela Gutiérrez Herrera, Miguel Hidrogo Cardona, María Paula Torres de la O y Rafael Rosado Nieto.

LITERATURA CITADA

- Acosta, Y., Zárraga, A., Rodríguez, L., & El Zauahre, M. (2012). Cambios en las propiedades fisicoquímicas en el proceso de compostaje de lodos residuales. *Multiciencias*, 12, 18-24.
- Aguilar, S. A., Etchevers-Barra, J. D., & Castellanos-Ramos, J. Z. (1987). Análisis químico para evaluar la fertilidad del suelo. México: Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo.
- Bremner, J. M. (1996). Nitrogen-Total. In: D. L. Sparks (Ed.). *Methods of soil analysis, part 3. Chemical methods* (pp. 1085-1121). Madison, WI, USA: Soil Science Society of America.
- Cai, L., Chen, T. B., Gao, D., Liu, H. T., Chen, J., & Zheng, G. D. (2013). Time domain reflectometry measured moisture content of sewage sludge compost across temperatures. *Waste Management*, 33(1), 12-17.
- Černý, R. (2009). Time-domain reflectometry method and its application for measuring moisture content in porous materials: A review. *Measurement*, 42(3), 329-336.
- Cogger, C. G., Bary, A. I., Fransen, S. C., & Sullivan, D. M. (2001). Seven years of biosolids versus inorganic nitrogen applications to tall fescue. *Journal of Environmental Quality*, 30(6), 2188-2194.
- Coutino, V., Wrobel, K., Wrobel, K., Navarro, R., Godínez, L. A., Teutli-Leon, M., & Rodríguez, F. (2013). Evaluation of the composting process in digested sewage sludge from a municipal wastewater treatment plant in the city of San Miguel de Allende, Central México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 29(3), 89-97.
- Figueroa, V. U., Flores, M. A., Palomo, M., Corral, B., & Flores, J. P. (2008). Uso de biosólidos estabilizados con cal como fertilizante orgánico en algodónero para el Valle de Juárez, Chihuahua. *Ciencia en la Frontera: Revista de Ciencia y Tecnología de la UACJ*, 8(2), 35-43.
- Flores-Márgez, J. P., Shukla, M. K., & Deb, S. (2014). Mapping of airborne particulate matter collected using two sensors along US-Mexico border. *Journal of Environmental & Analytical Toxicology*, 4(2), 1. <http://dx.doi.org/10.4172/2161-0525.1000206>
- Flores-Márgez, J. P., Corral-Díaz, B., & Sapien-Mediano, G. (2007). Mineralización de nitrógeno de biosólidos estabilizados con cal en suelos agrícolas. *Terra Latinoamericana*, 25(4), 409-417.
- Flores-Márgez, J. P., Poncio-Acosta, M. Z., Salas-Galván, E., Pérez-Casio, F., Corral-Avitia, A. Y., Salazar-Sosa, E., & Trejo-Escareño, H. I. (2010). Mineralización de nitrógeno en biosólidos estabilizados con cal. *Terra Latinoamericana*, 28(4), 307-317.
- Flores-Márgez, J., Jaramillo-López, E., Assadian, N., Di Giovanni, G., Pérez-Casio, F., & Shukla, M. K. (2013). Heavy metals in oat and soil treated with lime-stabilized biosolids and reclaimed wastewater. *Environmental & Analytical Toxicology*, 1, 1-9. <http://dx.doi.org/10.4172/2161-0525.S6-001>
- García, S. R. (2021). *Producción de compostas con estiércol y residuos de cosecha*. Celaya, Guanajuato, México: INIFAP.
- Hernández, M., Juárez, B., de la Rosa, I., & Carreño, M. (2014). Revalorización de residuos sólidos y biosólidos mediante composteo. In: M. Ramos, V. Aguilera (Eds.). *Handbook* (pp. 103-113). Valle de Santiago, Guanajuato, México: ECORFAN.
- IBM SPSS Statistics (2016). *Statistical Package for the Social Sciences User's Guide, version 25*. Armonk, NY, USA: IBM Corp.
- JMAS (Junta Municipal de Agua y Saneamiento de Juárez). (2021). Reportes de las plantas de tratamiento de la Junta Municipal de Agua y Saneamiento de Ciudad Juárez, Chihuahua. Consultado el 21 de noviembre, 2023, desde <https://www.jmasjuarez.gob.mx/vMain/index.php>
- Kamal, A., Wichuk, K., McCartney, D., Londry, K., & Felske, C. (2017). Effect of treated wood on biosolids composting. *Compost Science & Utilization*, 25(3), 178-193.
- Lin, C., Cheruiyot, N. K., Bui, X. T., & Ngo, H. H. (2022). Composting and its application in bioremediation of organic contaminants. *Bioengineered*, 13(1), 1073-1089. <https://doi.org/10.1080/21655979.2021.2017624>
- Mahon, R., Gomez-Silvan, C., Andersen, G. L., Calvo, C., & Aranda, E. (2020). Assesment of bacterial and fungal communities in a full-scale thermophilic sewage sludges composting pile under a semipermeable cover. *Bioresource Technology*, 298, 12250.
- Municipio Juárez (2022). Estadísticas de material vegetal captado en la estación de transferencia en el parque El Chamizal durante 2021. Consultado el 21 de noviembre, 2023, desde <https://www.juarez.gob.mx/dependencias/>
- NMX-Ff-109-SCFI-2008 (Norma Oficial Mexicana). (2008). establece las especificaciones de calidad que debe cumplir el humus de lombriz que se produce o se comercializa en territorio nacional. Se excluye el humus de lombriz en presentación líquida, publicada el 10 de junio de 2008. *Diario Oficial de la Federación*. México, D. F.: SEGOB.
- NOM-NMX-AA-180-SCFI-2018 (Norma Oficial Mexicana). (2018). Establece los métodos y procedimientos para el tratamiento aerobio de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial, así como la información comercial y de sus parámetros de calidad de los productos finales, publicada el 25 de septiembre de 2018. *Diario Oficial de la Federación*. México, D. F.: SEGOB.
- NABD (Banco de Desarrollo de America del Norte) (2023). Frontera 2025: Programa fronterizo México-Estados Unidos. Consultada el 21 de noviembre, 2023, desde <https://www.nadb.org/es/nuestros-proyectos/proyectos-de-programa-frontera-2020#:~:text=El%20Programa%20Ambiental%20M%C3%A9xico%20DEE,lo%20largo%20de%20la%20frontera>
- Oremor (2024). Termómetros para compostas. Consultado el 21 de noviembre, 2023, desde <https://www.oremor.com/dm12120.html>.
- Orozco-Almanza, M. S. (2014). *El huerto urbano, cultivo ecológico. Modelos para su establecimiento en balcones, paredes, Terrazas y Azoteas*. Distrito Federal, México: Universidad Nacional Autónoma de México. ISBN: 978-607-02-6058-2
- Plan Estratégico de Juárez (2022). *Informe Medio Ambiente 2022*. Ciudad Juárez, México: Plan Estratégico de Juárez, A.C. Consultada el 21 de noviembre, 2023, desde <https://planjuarez.org/documentos/informe-medio-ambiente-en-juarez-2022/>
- Reotemp (2024). OxyTemp Oxygen & Temperature Probe. Consultada el 21 de noviembre, 2023, desde https://reotempcompost.com/oxytemp-oxygen-temperature-probe/?srsltid=AfmBOora-jlr6B9ei_zl6Fp6o61CiMdYWomFtrXlNF9WLTUfnOBcsRYm
- Rivera, M., Ibarra, F., Moreno, S., Martínez, R., & Rafael, R. (2019). Impacto económico de los biosólidos en la rehabilitación de praderas viejas de Zacate Boer en el norte de Sonora, México. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 44(2019), 158-168.
- Román, P., Martínez, M., & Pantoja, A. (2013). *Manual del Compostaje del Agricultor. Experiencias en América Latina*. FAO. Santiago de Chile, Chile: FAO. ISBN: 978-92-5-307844-8
- Sánchez-Monedero, M. A., Roig, A., Paredes, C., & Bernal, M. P. (2001). Nitrogen transformation during organic waste composting by the Rutgers system and its effects on pH, EC and maturity of the composting mixtures. *Bioresource Technology*, 78(3), 301-308. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00031-1](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00031-1)
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002. Que establece la protección ambiental, Lodos y biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. *Diario Oficial de la Federación*. D. F., México: SEGOB.

- Soilmoisture (2012). *6050X3K5B - MiniTrase Kit, Operating Instructions*. Santa Barbara, CA, USA: Soilmoisture Equipment CorP. Consultado el 21 de noviembre, 2023, desde https://soilmoisture.com/wp-content/uploads/2024/07/Resource_Instructions_0898-6050_6050-X3-Mini-Trase-Kit-Full-Ops.Nov2012.pdf
- USEPA (United States of Environmental Protection Agency). (2002). *Land application of biosolids. Chapter 2, A Plain English Guide to the EPA Part*. Washington, D.C. USA: USEPA.
- Uçaroğlu, S., & Alkan, U. (2016). Composting of wastewater treatment sludge with different bulking agents. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 66(3), 288-295.
- Vicencio-De La Rosa, M. G., Pérez-López, M. E., Medina-Herrera, E., & Martínez-Prado, M. A. (2011). Producción de composta y vericomposta a partir de los lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales de un rastro. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 27(3), 263-270.