

Caracterización fisicoquímica y microbiológica para el aprovechamiento de lodos de dos plantas de tratamiento de aguas residuales de Acapulco, Guerrero, México

Sofía Ramírez-Calderón^{1*} , Luz Patricia Ávila-Caballero² , Justiniano González-González¹ , José Luis Rosas-Acevedo¹ , Maximino Reyes-Umaña¹ , Heriberto Hernández Cocoltzi³ .

¹ Centro de Ciencias de Desarrollo Regional, Universidad Autónoma de Guerrero, Acapulco, Guerrero, México.

² Facultad de Ciencias Químico-Biológicas, Universidad Autónoma de Guerrero, Chilpancingo, Guerrero, México.

³ Facultad de Ingeniería Química, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Av. San Claudio y 18 sur S/N CU San Manuel, 72570, Puebla México.

*Email autor corresponsal: sofia.ramirezcal@hotmail.com

Recibido: 26 marzo 2021. **Aceptado:** 07 agosto 2021

RESUMEN

Los residuos sólidos (RS) generan problemas ambientales, sociales y económicos si su disposición final y aprovechamiento no es el adecuado, por ejemplo, los lodos obtenidos en las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR). Dichos lodos podrían contribuir de manera significativa a la contaminación de la atmósfera, aguas nacionales y suelos, afectando los ecosistemas del área donde se depositen. El objetivo de este trabajo fue realizar la caracterización fisicoquímica y microbiológica del lodo de dos plantas de tratamiento de aguas residuales y verificar si, de acuerdo con las normas mexicanas NOM-004-SEMARNAT-2002 y NMX-AA-180-SCFI-2018, el lodo es aprovechable y útil para la fabricación de composta. Para este fin, se realizaron análisis fisicoquímicos y microbiológicos en los lodos y la composta resultante de la mezcla de lodo, fibra de coco (FC) y residuos de poda de jardín (RPJ). Los resultados mostraron que las concentraciones de nutrientes, metales pesados, coliformes fecales (CF) y *Salmonella* spp. no exceden los límites permisibles enunciados en la NOM-004-SEMARNAT-2002, pero el compost resultante, como producto final, no satisface la NMX-AA-180-SCFI-2018. Así, es posible sugerir que los lodos son aprovechables para: el mejoramiento del suelo, usos forestales y agrícolas. Además, se infiere que estos lodos no son aptos para usos urbanos con y sin contacto público directo durante su aprovechamiento.

Palabras clave: aguas residuales, compost, estabilización de contaminantes, nutrientes, metales pesados.

ABSTRACT

Solid waste (SW) generates environmental, social, and economic problems whether its final disposal and use is not adequate. An example of this is the sludge obtained from wastewater treatment plants (WWTP), which could significantly contribute to the pollution of the atmosphere, national waters, and soils, affecting the ecosystems of the area where they are deposited. The objective of this work was to carry out the physicochemical and microbiological characterization of the sludge from two wastewater treatment plants and verify if, in accordance to the Mexican standards NOM-004-SEMARNAT-2002 and NMX-AA-180-SCFI-2018, the mud is usable and useful for the manufacturing of compost. For this purpose, physicochemical and microbiological analyzes were carried out on the sludge and the compost resulting from the mixture of sludge, coconut fiber (CF), and garden pruning residues (GPR). The results showed the concentrations of nutrients, heavy metals, fecal coliforms (FC), and *Salmonella* spp. do not exceed the permissible limits outlined in NOM-004-SEMARNAT-2002. However, the resulting compost, as a final product, does not satisfy the NMX-AA-180-SCFI-2018. Taking this into account, it could be suggested that the sludge is only usable for soil improvement, forestry, and agricultural uses. In addition, it is inferred that these sludges are not suitable for urban uses with or without direct public contact during their uses.

Keywords: wastewater, compost, pollutant stabilization, nutrients, heavy metals.

INTRODUCCIÓN

Los lodos obtenidos en el desazolve de los sistemas de alcantarillado sanitario o pluvial, en la operación de las PTAR y las plantas potabilizadoras, sino son confinados de manera correcta podrían afectar de manera significativa la calidad de las aguas y de los ecosistemas circundantes de donde se depositen [1-3]. Estos lodos pueden contener componentes útiles para otros procesos, por ejemplo, materia orgánica y fitonutrientes (macro y micro), pero también

componentes problemáticos como: metales pesados, contaminantes orgánicos y patógenos [4-6]. Además, los lodos de las PTAR, dependiendo de su origen, pueden ser reservorios de diferentes contaminantes, incluyendo contaminantes emergentes como bacterias que tienen ciertos genes codifican proteínas implicadas en la resistencia a los antibióticos [7]. Así mismo, en los lodos de las aguas municipales se han encontrado sustancias

como estrógenos, progesterona y testosterona [8, 9], así como productos farmacéuticos [10, 11].

En México, los lodos generados en el tratamiento de las aguas residuales se consideran residuos peligrosos, de conformidad con la Norma Oficial Mexicana: NOM-004-SEMARNAT-2002 [12]. Por otro lado, dicha norma menciona que estos lodos tienen características benéficas que pueden ser explotadas, como el contenido de nutrientes y materia orgánica. Esto permite que una vez que los lodos han sido tratados, pueden ser utilizados como fertilizantes, mejoradores de suelos o como cobertura de vertederos. Recientemente han sido propuestos para la generación de metano [13].

Una forma de deshacerse adecuadamente del lodo y darle valor añadido es a través de su estabilización mediante el compostaje [14, 15]. El compostaje es un proceso biológico aeróbico de oxidación de la materia orgánica, llevado a cabo por una sucesión dinámica de microorganismos cuya actividad genera calor, provocando temperaturas superiores a 50 °C durante varios días, esto destruye los patógenos y da lugar a un producto estable e inofensivo, de color marrón oscuro, inodoro o con olor a *humus*, llamado compost [16]. Esta metodología se ha utilizado para mejorar la calidad del suelo en países como Canadá,

España, Australia, Estados Unidos, Argentina y Chile [14].

En México no se dispone de cifras oficiales sobre la producción de lodos generados en las PTAR. Las PTAR que realizan algún proceso de estabilización son pocas, ya que por lo general carecen de instalaciones y metodologías para llevar a cabo su tratamiento y adecuada disposición final. En el puerto de Acapulco existen diecisiete PTAR, la mayoría tiene un sistema de tratamiento de lodos activados por aeración, que genera un subproducto catalogado como residuo peligroso para la salud humana y el medio ambiente [17]. Este lodo es tratado a través de los “lechos de secado”; este método consiste en deshidratar el lodo dejándolo secar en patios de la planta tratadora y una vez secos son depositados en el relleno sanitario de Paso Texca (Longitud: -99.811944 y Latitud: 16.977500). Mientras que, en otras, el lodo pasa por un acondicionador y por un filtro prensa, pero todos los lodos de las PTAR tienen la misma disposición final (CAPAMA, 2018). De modo que su disposición final, no es la más segura y adecuada. Debido a esto, en este trabajo se pretende comprobar si los lodos generados en las PTAR de Acapulco pueden ser aprovechables para su uso en la agricultura, horticultura o acondicionador de suelos.

En este trabajo se propone analizar las

características fisicoquímicas y microbiológicas de los lodos generados en diferentes PTAR del puerto de Acapulco, Guerrero, México y establecer su calidad y aprovechamiento de acuerdo con la NOM-004-SEMARNAT-2002. Además, utilizar los lodos como material de soporte para la elaboración de compost y analizar en qué proporción de lodo/FC y lodo/RPJ, del compost resultante, se obtienen mejores resultados para su aprovechamiento y aplicación de acuerdo con la NMX-AA-180-SCFI-2018.

METODOLOGÍA

Área de estudio y muestreo

El puerto de Acapulco se ubica en las coordenadas $16^{\circ} 55' 20''$ de latitud, $99^{\circ} 49' 15''$ de longitud Oeste y tiene una población de 810,669 habitantes [18]. La PTAR Coloso se ubica en avenida tecnológico de la colonia el Coloso, se localiza entre los paralelos $16^{\circ} 41'$ y $17^{\circ} 13'$ de latitud Norte y en los $99^{\circ} 31'$ y $99^{\circ} 58'$ de longitud Oeste, tiene una capacidad de 90 L/s y captura el 2% de las aguas residuales municipales. La planta de tratamiento de aguas residuales Aguas Blancas está situada, entre los paralelos $16^{\circ} 49' 47''$ de latitud Norte y $99^{\circ} 46' 42''$ de longitud Oeste y se localiza a una altitud de 24 m s.n.m., en la calle Río grande esquina 16 de septiembre, colonia Carabali / Hogar Moderno y su capacidad es de 1,350 L/s. Esta

última es la de mayor capacidad del puerto de Acapulco y captura el 70% de sus aguas residuales (Figura 1).



Figura 1. Ubicación de las PTAR Coloso y Aguas Blancas en Acapulco, Guerrero, México. Imagen obtenida de Google Earth 2020.

Una muestra de lodo fue recolectada en cada una de las PTAR en septiembre de 2016, con un recipiente de plástico de 20 L de acuerdo con el Anexo II de la NOM-004-SEMARNAT-2002 [12] y colocadas en recipientes de polietileno de boca ancha de 120 mL y llenados completamente. De acuerdo con el Anexo VI de la NOM-004-SEMARNAT-2002 [12], las muestras fueron refrigeradas inmediatamente a 4°C para su traslado a laboratorio. Durante la toma de muestras las PTAR: Coloso y Aguas Blancas, estuvieron en funcionamiento con una eficiencia de eliminación de DBO del 95% y 96% respectivamente.

Caracterización fisicoquímica y microbiológica

Para la identificación y determinación de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, de los lodos y el compost resultante de la mezcla de lodo/FC y lodo/RPJ, los parámetros fueron divididos en: nutrientes, metales pesados, microbiológicos y temperatura (T). Los nutrientes determinados fueron: nitrógeno total (NT), nitratos (NO_3^-), nitritos (NO_2^-), fósforo total (FT); los metales pesados analizados fueron: arsénico (As), cadmio (Cd), cobre (Cu), cromo (Cr), mercurio (Hg), níquel (Ni), plomo (Pb) y zinc (Zn). Los parámetros

microbiológicos considerados en este estudio fueron: coliformes fecales y *Salmonella* spp. Las técnicas analíticas para la identificación y determinación de los metales pesados, CF y *Salmonella* spp. están descritas en los Anexos III, IV y VI de la NOM-004-SEMARNAT-2002 [12], respectivamente. El resto de las técnicas y su referencia se muestran en la Tabla 1. La caracterización fisicoquímica y microbiológica del lodo de las PTAR y el compost se llevó a cabo en el laboratorio Ingeniería en los Sistemas de Tratamientos de Agua S.A. de C.V. (ISTA).

Tabla 1. Técnicas analíticas para la determinación de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos. NMP = Número más probable.

| Parámetro | Técnica analítica | Método |
|------------------------|---|--------|
| Metales pesados | Espectrofotometría de absorción atómica | [12] |
| NT | Kjeldahl | [19] |
| NO_3^- | Espectrometría UV | [20] |
| NO_2^- | Fotometría UV | [21] |
| FT | Espectrometría UV | [22] |
| T | Termómetro | [23] |
| CF | Ausencia/presencia | [12] |
| <i>Salmonella</i> spp. | NMP | [12] |

Instalación de pilas

Para obtener el compost, los lodos de las dos PTAR, previamente caracterizados físicoquímica y microbiológicamente, fueron mezclados. Nueve pilas de prueba fueron construidas con recipientes de plásticos y con diferentes concentraciones de lodo/FC y lodo/RPJ. Para este fin, 11 kg de FC, 11 kg de RPJ y 68 kg de lodo fueron utilizados. La capacidad de cada pila fue de 10 kg. Cada pila fue etiquetada de P1 a P9. Todas las pilas fueron mantenidas al aire libre y a temperatura ambiente como se muestra en la Figura 2.

Las diferentes concentraciones de lodo/FC y lodo/RPJ utilizadas en cada pila de compost se muestran en la Tabla 2. La temperatura de las pilas del compost fue monitoreada cada tercer

día durante los meses de septiembre, octubre y noviembre de 2016, con un termómetro de vidrio marca Brannan de -5 a 100 °C. El producto final fue pesado con una báscula digital Torrey de 10 kg previamente calibrada y se estableció su calidad de acuerdo con la NMX-AA-180-SCFI-2018 [24].

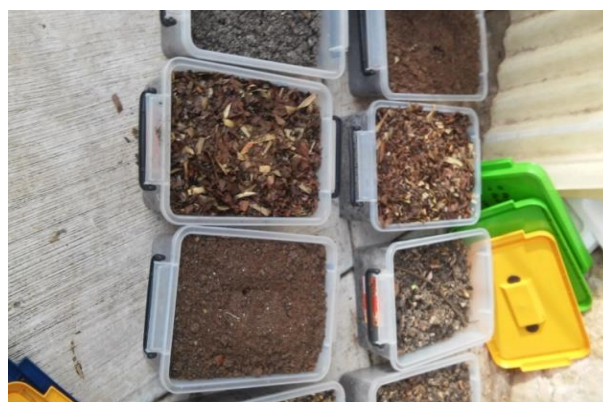


Figura 2. Pilas estáticas aireadas.

Tabla 2. Porcentajes de la composición de cada pila de compost

| Pila | FC | RPJ | Lodo | Unidad | Total |
|------|------|------|------|--------|-------|
| P1 | - | - | 100% | kg | 10 kg |
| P2 | 50 % | - | 50 % | | |
| P3 | 30 % | - | 70 % | | |
| P4 | 20 % | - | 80 % | | |
| P5 | 10 % | - | 90 % | | |
| P6 | - | 50 % | 50 % | | |
| P7 | - | 30 % | 70 % | | |
| P8 | - | 20 % | 80 % | | |
| P9 | - | 10 % | 90 % | | |

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características fisicoquímicas de los lodos

Los valores obtenidos de los nutrientes y

metales pesados de los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales se muestran en la Tabla 3 y 4, respectivamente.

Tabla 3. Nutrientes identificados y cuantificados en los lodos biológicos de las PTAR: Aguas Blancas y Coloso. Los valores aquí mostrados se expresan en g/kg.

| Parámetro | Valores | |
|------------------------------|---------|---------------|
| | Coloso | Aguas Blancas |
| NT | 61.00 | 72.26 |
| NA | 34.72 | 42.21 |
| NO ₃ ⁻ | 8.54 | 9.69 |
| NO ₂ ⁻ | 10.04 | 18.56 |
| FT | 7.99 | 15.56 |

Tabla 4. Valores obtenidos en la cuantificación de los metales pesados de acuerdo con la NOM-004-SEMARNAT-2002 [12], su tipo. Los valores aquí mostrados se expresan en mg/kg en base seca.

| Parámetro | Valores | | Tipo | |
|-----------|----------|---------------|-----------|---------------|
| | Coloso | Aguas Blancas | Coloso | Aguas Blancas |
| As | 17.70 | 15.23 | Excelente | Excelente |
| Cd | 18.42 | 16.35 | Excelente | Excelente |
| Cr | 780.12 | 623.25 | Excelente | Excelente |
| Cu | 999.21 | 725.34 | Excelente | Excelente |
| Pb | 142.27 | 150.23 | Excelente | Excelente |
| Hg | 4.92 | 5.02 | Excelente | Excelente |
| Ni | 140.08 | 154.20 | Excelente | Excelente |
| Zn | 1,410.27 | 1,526.20 | Excelente | Excelente |

Los valores obtenidos en los nutrientes analizados (Tabla 3) indican que los vertidos de agua que llegan a las PTAR son principalmente de origen doméstico. Estos contaminantes se han encontrado en mayor cantidad en las zonas donde hay asentamientos industriales, como en la Bahía de Petacalco, Guerrero, donde las cantidades de fósforo se incrementaron 10 veces más [25].

Cabe señalar que los cambios en el uso del suelo también son determinantes en la concentración de estos contaminantes, como en el caso de los lodos residuales de las PTAR procedentes de los pastizales del Parque Nacional Nevado de Toluca, que son de baja fertilidad, debido a la pérdida de micronutrientes por la alteración del suelo y la actividad antrópica del lugar [26].

La cantidad de NT encontrado en los lodos de ambas PTAR es alta (Tabla 3). Dado que este elemento es el principal nutriente de los suelos, debido a esto, el lodo de ambas PTAR puede considerarse adecuado para su uso en la agricultura y la mejora del suelo [24]. Gran parte del éxito en los campos de uso forestal y agrícola depende de la disponibilidad de nitrógeno [26]. Por otro lado, el bajo contenido de fósforo en los lodos es favorable (Tabla 3), ya que cuando está en exceso, provoca la proliferación incontrolada de macro y microorganismos nocivos, como bacterias,

hongos y algas que producen toxinas, afectando al medio ambiente y ocasionando trastornos en el equilibrio biológico [25].

Al analizar la concentración de nutrientes de los lodos de las dos PTAR, se puede observar que, los nutrientes de la PTAR Coloso son menores que los obtenidos en la PTAR Aguas Blancas. Lo anterior es debido a la diferencia de materia orgánica que capta cada planta, la PTAR Aguas Blancas recibe el 70% y la PTAR Coloso 2%, de las aguas residuales. En relación con los metales pesados, los valores de la PTAR Aguas Blancas son menores que los de la PTAR Coloso (Tabla 4), esto se explica porque el método de estabilización de los lodos es diferente. En la PTAR Coloso, los lodos, llegan al reactor biológico, pasan al clarificador y al lecho de secado. Mientras que en la PTAR Aguas Blancas su proceso es más moderno, contando con acondicionador de lodos y filtro prensa que permite extraer alrededor del 70% del agua. Por último, los lodos se estabilizan con cal para su depósito en el relleno sanitario municipal.

Los lodos de ambas PTAR contienen concentraciones de metales pesados menores a lo establecido en la NOM-004-SEMARNAT-2002 y les corresponde una clasificación excelente en función de contenido de metales pesados (ver Tabla 1 de [12]).

En cuanto a los CF y la presencia de *Salmonella*

spp. en base seca fue menor de 2,000,000 y 300 NMP/g en base seca, respectivamente. Esto permite inferir que los lodos analizados son de clase C de acuerdo con lo establecido en la Tabla 2 de la NOM-004-SEMARNAT-2002 [12]. Finalmente, estos resultados permiten inferir que los lodos de ambas PTAR son excelentes y de clase C, así es posible sugerir su aplicación para: el mejoramiento del suelo, usos forestales y agrícolas. Además, se infiere que estos lodos no son aptos para usos urbanos con y sin contacto público directo durante su aprovechamiento [12]. Dado que los lodos de ambas PTAR pueden ser aprovechados de acuerdo con la norma utilizada como referencia, los lodos de ambas PTAR fueron mezclados y utilizados como material de soporte para la fabricación de compost.

Nutrientes de la composta

Obsérvese que el NT en todas las muestras del producto final superan el 3% MS (Figura 3). De acuerdo con la Norma Mexicana NMX-AA-180-SCFI-2018 [24], estos resultados sugieren que no cumple con las características de los productos finales.

La cantidad de nutrientes en el compost se redujo en comparación con la obtenida en los lodos extraídos directamente de la planta de tratamiento de aguas residuales (Tabla 3); esta disminución está asociada al proceso de

compostaje, debido a que parte del nitrógeno se consumió en él.

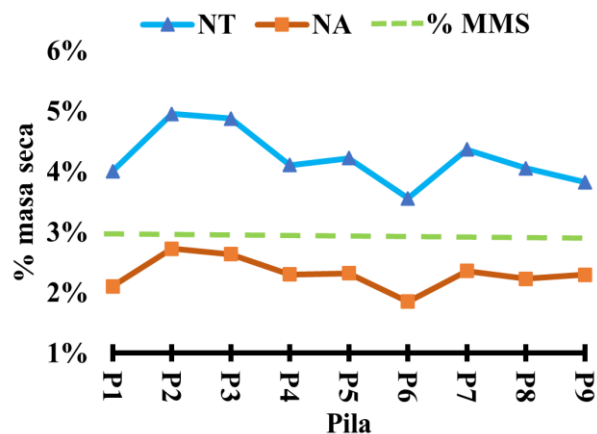


Figura 3. Porcentajes en masa seca, del producto final, del nitrógeno total y nitrógeno amoniacal (NA). La línea verde punteada representa el porcentaje máximo en masa seca (% MMS) permisible por la NMX-AA-180-SCFI-2018 [24].

El contenido de NT es superior a 35 g/kg en todas las composiciones preparadas, esto debido a la proporción de las mezclas, en las nueve muestras la cantidad de lodo fue mayor en relación al material de soporte (FC y RPJ), para bajar la cantidad de nitrógeno es necesario aumentar la combinación de la mezcla, para cumplir con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), que menciona que por cada 1 kilogramo de compost orgánico debe haber de 3 a 15 g de nitrógeno total [27]. La cantidad de fósforo encontrada está en el rango de 4.97 – 6.91 g/kg valores recomendados por la FAO. El contenido de nutrientes del compost tiene una

gran variabilidad, dependiendo de la materia prima, el compost con mayor contenido de nutrientes (nitrógeno, nitratos, nitritos y fósforo) es el que contiene 50% de lodo y 50% de fibra de coco (P2 en las Figuras 3 y 4). Además, la temperatura más baja se registró en este compost (Fig. 5).

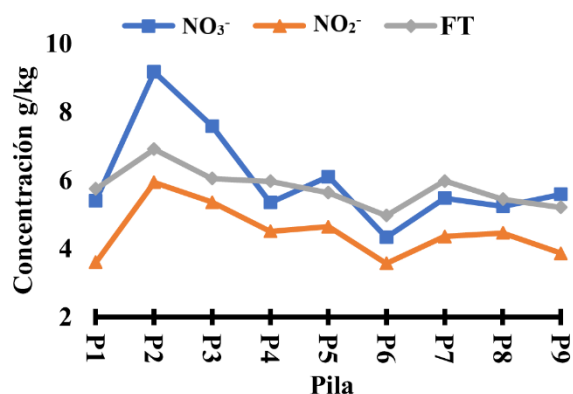


Figura 4. Concentraciones de nitratos, nitritos y fósforo total en el producto final

La pila P6 (50% de lodo y 50% de hojas) es la que contiene menos cantidad de nutrientes. Sin embargo, todos los compostes tienen una calidad aceptable [28]. Por otro lado, se han encontrado valores más bajos de estos nutrientes en los compostes hechos con lodos de PTAR de un rastro en combinación con hojarasca y lombrices de tierra [29]. Cabe mencionar que un exceso de fósforo no es problemático porque actualmente es posible extraerlo para utilizarlo en alguna aplicación en la que se requiera este nutriente [30].

Metales pesados de la composta

El alto contenido de metales pesados reduce la posibilidad de utilizar los lodos y/o el compost en la agricultura; en particular, cuando se superan los límites permisibles de Cd y Ni [31]. La mezcla más eficaz para la reducción de éstos es el compost en la pila P6 (Tabla 5). Los compostes con menor efectividad corresponden a las combinaciones en las pilas de compost P5, P8 y P9 (Tabla 5). Esta reducción en la concentración de metales está asociada a la presencia de biopolímeros presentes en el lodo [32]; los mismos RPJ contienen polímeros que cumplen esta función. Diferentes biopolímeros tienen diferentes eficiencias en la eliminación de metales. Recientemente, se han utilizado en tratamientos biológicos para eliminar productos farmacéuticos y personales [33]. De manera general la concentración de metales pesados en cada muestra de compost disminuye de manera significativa, pero si la FC y los RPJ son menores o iguales al 30%, entonces la concentración de Cr aumenta.

Al mezclar los lodos de ambas PTAR el promedio de la concentración de Cr, en las pilas piloto, aumentó en comparación con el promedio de las muestras iniciales de los lodos. El contenido de metales pesados en el producto final indica que no puede ser un producto comercializable de acuerdo con la NMX-AA-180-SCFI-2018, sin embargo, el producto final

puede ser aprovechable como lo indica la NOM-004-SEMARNAT-2002. Por lo tanto, se propone utilizar los lodos residuales de las PTAR para este fin. Asimismo, se sugiere aplicar el compost en el mejoramiento de los suelos forestales, el abono para plantas ornamentales y/o para la cobertura de rellenos sanitarios cerrados [34]. Además, existe la ventaja de que la disponibilidad de lodos es grande y en principio gratuita.

Los microorganismos en el compost

En cuanto, a la concentración de CF, se observó una reducción significativa; los valores más bajos se encontraron con las combinaciones de P2 y P6 con 184 NMP/g y 197 NMP/g, respectivamente. En ambos casos la reducción fue superior al 50%, en comparación con el

lodo puro (P1). En todos los casos, la concentración de *Salmonella* spp. fue inferior a 30 NMP/g. De acuerdo con los límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en los lodos y biosólidos establecidos en la NOM-004-SEMARNAT-2002 [12], estos compostes están en la clasificación del tipo C. Así, no se recomienda su uso urbano con y sin restricción de contacto público directo durante su aplicación, pero sí para usos forestales y agrícolas, y en el mejoramiento de los suelos. Por otro lado, de acuerdo con las especificaciones microbiológicas establecidas en la NMX-AA-180-SCFI-2018 [24], para los productos finales, todas las muestras de compost están dentro de los límites permisibles para los CF, pero no en *Salmonella* spp.

Tabla 1. Concentraciones de metales pesados en el compost final y su clasificación de acuerdo con la NMX-AA-180-SCFI-2018 y la NOM-004-SEMARNAT-2002.

| Pila | As | Cd | Cr | Cu | Hg | Ni | Pb | Zn | Tipo NOM-004-SEMARNAT-2002 | Tipo-Nivel NMX-AA-180-SCFI-2018 |
|------|------|------|-------|-------|-----|-------|-------|---------|----------------------------|---------------------------------|
| P1 | 17.2 | 18.5 | 974.1 | 998.4 | 4.9 | 140.0 | 141.0 | 1,409.6 | Excelente | Incumple |
| P2 | 11.1 | 13.2 | 654.5 | 519.9 | 1.6 | 129.8 | 109.9 | 650.1 | Excelente | Incumple |
| P3 | 13.2 | 14.9 | 719.2 | 632.2 | 2.7 | 135.0 | 115.0 | 805.7 | Excelente | Incumple |
| P4 | 14.3 | 17.3 | 875.6 | 887.3 | 3.0 | 150.2 | 128.5 | 1,264.5 | Excelente | Incumple |
| P5 | 15.0 | 17.1 | 908.2 | 913.5 | 3.6 | 129.1 | 132.1 | 1,294.7 | Excelente | Incumple |
| P6 | 10.7 | 12.7 | 623.1 | 524.1 | 1.8 | 127.3 | 102.1 | 623.5 | Excelente | Incumple |
| P7 | 12.9 | 14.2 | 705.2 | 625.1 | 2.7 | 132.6 | 111.9 | 856.1 | Excelente | Incumple |
| P8 | 14.3 | 17.5 | 869.5 | 890.1 | 2.8 | 154.6 | 127.9 | 1,245.6 | Excelente | Incumple |
| P9 | 15.2 | 17.5 | 915.1 | 914.5 | 3.3 | 128.3 | 135.5 | 1,325.9 | Excelente | Incumple |

Temperatura del compost

La temperatura de las nueve pilas de compost durante septiembre estuvo entre el rango de 26.8 a 38.56 °C y un promedio de 32.30 ± 2.04 °C, en octubre la temperatura mínima y máxima fue de 34 y 46.8 °C, respectivamente, con un promedio de 41.53 ± 2.88 °C, el rango de 35 a 46.5 °C y una temperatura promedio de 37.55 ± 5.12 °C fueron medidos durante el mes de noviembre. La temperatura mínima y máxima registrada durante los tres meses fue de 26.8 y 46.8 °C con una temperatura promedio de 37.24 ± 4.44 °C. En la Figura 5 se muestran las temperaturas registradas de las nueve pilas de compost (P1-P9).

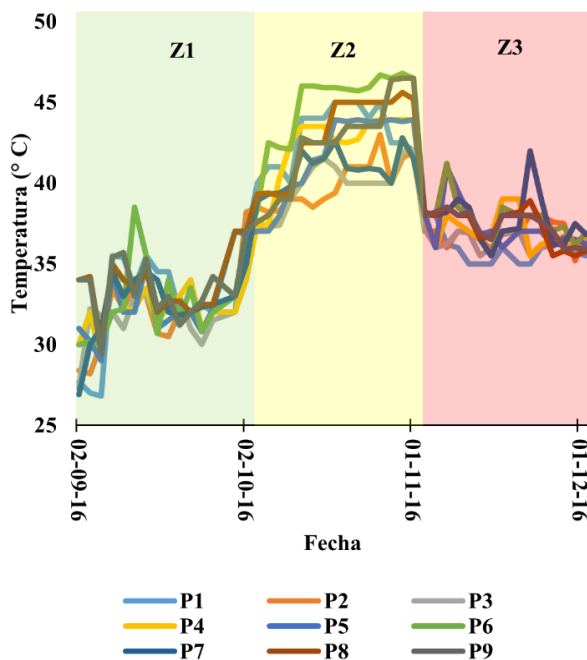


Figura 5. Temperaturas alcanzadas de las nueve pilas durante el periodo de compostaje.

De acuerdo con la Norma Mexicana NMX-AA-180-SCFI-2018 [24] e Ivankin, Pandya y Saraf [35], la temperatura alcanza tres fases: mesófila (máximas entre 40 – 55 °C), termófila (mayor o igual a 70 °C) y de enfriamiento (temperatura ambiente). En este estudio, conforme pasa el tiempo, se distinguen tres intervalos etiquetados con Z1, Z2 y Z3 (Figura 5), con temperaturas promedio de 32.6, 41.5 y 37 °C, respectivamente. Esto permite inferir que el efecto térmico necesario para que una composta sea eficiente está presente, pero en rangos menores debido al tamaño de las pilas.

La temperatura máxima (46.8 °C) en las pilas se alcanzó en el mes de octubre, correspondiente a la pila P6. En pilas de mayor tamaño (tambos de plástico de 200 litros) se han alcanzado temperaturas hasta de 50 °C. Este resultado fue obtenido en composta proveniente de lodos de la Planta Piloto de Tratamiento de Aguas Residuales de la UAM-Azcapotzalco [28]. En Acapulco la temperatura no varió significativamente durante el periodo de estudio, por esta razón, podríamos decir que la temperatura ambiente no influye en los resultados obtenidos, ya que los cambios incontrolables de temperatura suelen ser condicionantes de la proliferación de microorganismos en las compostas [4]. Por otro lado, la temperatura mínima requerida para eliminar algunos microorganismos patógenos

debe ser mayor que 50 °C [36]. Por ejemplo, las especies bacterianas *Salmonella typhi*, *Salmonella* spp. y *Escherichia coli* son destruidas a 55 °C en una hora. Por lo tanto, podría ser necesario tratar térmicamente las compostas obtenidas con el fin de satisfacer la norma correspondiente

Masa del compost

La masa inicial de cada pila de compost fue de 10 kg. Este parámetro al final del compostaje fue menor en todos los casos. Una reducción considerable fue observada, en algunos aproximadamente del 40%. Estos resultados permiten concluir que el compostaje, además de ser una alternativa para la estabilización de los lodos de las PTAR, favorece la reducción y transporte de este residuo. Con técnicas diferentes, pero más complejas (biorreactor de membrana), se ha logrado reducir la cantidad de lodo hasta un 74% [37]; sin embargo, el contenido de nutrientes también se reduce en un 63%. La mayor parte de esta tecnología (tratamientos químicos, mecánicos, térmicos y eléctricos, entre otros métodos) se ha probado a nivel de laboratorio; y su aplicación a gran escala es todavía limitada [38].

CONCLUSIONES

Según los resultados obtenidos de la caracterización fisicoquímica y microbiológica

de los lodos de las PTAR: Aguas Blancas y Coloso, en Acapulco Gro. México y de conformidad con la NOM-004-SEMARNAT-2002, dicho residuo es de calidad excelente y de tipo C, es decir, estos lodos son aprovechables para: el mejoramiento del suelo, usos forestales y agrícolas, pero no aptos para usos urbanos con y sin contacto público directo.

La caracterización y determinación del compost resultante de la mezcla de lodo, FC y RPJ mostró que, de conformidad con la NMX-AA-180-SCFI-2018 el producto final no es comercializable. Por otro lado, si se utiliza el compostaje como método de estabilización de los lodos y de acuerdo con la NOM-004-SEMARNAT-2002, los lodos son aprovechables ya que las concentraciones de nutrientes, metales pesados, coliformes fecales y *Salmonella* spp. se redujeron significativamente. Además, dichas concentraciones están dentro de los límites establecidos para ser utilizados en el compostaje, pero con algunas restricciones para otras aplicaciones.

La composición de la pila P6 mostró ser la más efectiva para la estabilización de los lodos ya que se redujeron las concentraciones de metales pesados y microorganismos, y también hubo reducción en la masa. Por lo tanto, el compostaje es una opción viable para estabilizar y reutilizar los lodos generados en

las PTAR, así como de darle valor agregado a este residuo que es gratuito. Por otro lado, los tres meses que se invierten para obtener el compost, permiten la reducción del residuo y disminuyen los riesgos a la salud y al medio ambiente.

A partir de los resultados obtenidos se propone estabilizar los lodos de las PTAR: Coloso y Aguas Blancas, de manera independiente y buscar alternativas para el material de soporte que ayuden a mejorar los resultados para obtener un producto final comercializable.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a VIEP-BUAP y PROMEP por el apoyo para el desarrollo de este trabajo. A Enrique Flores Munguía por sus observaciones y sugerencias.

REFERENCIAS

- [1]. Young-Sun L, Sunggyu L, Jae-Eun L, Hyo-Bang M. Occurrence and emission of phthalates and non-phthalate plasticizers in sludge from wastewater treatment plants in Korea. *Science of The Total Environment* 2019; 692: 354-60.
- [2]. Eljarrat E, Marsh G, Labandeira A, Barceló

D. Effect of sewage sludges contaminated with polybrominated diphenylethers on agricultural soils. *Chemosphere* 2008; 71(6): 1079-86.

[3]. Rolsky C, Kelkar V, Driver E, Halden RU. Municipal sewage sludge as a source of microplastics in the environment. *Current Opinion in Environmental Science and Health* 2020; 14: 16-22.

[4]. Cota Espericueta AD, Ponce Corral C. Elimination of pathogenic bacteria in sewage sludge during the solar drying. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental* 2008; 24(4): 161-70.

[5]. Amador-Díaz A, Veliz-Lorenzo E, Bataller-Venta M. Tratamiento de lodos, generalidades y aplicaciones. *Revista CENIC Ciencias Químicas* 2015; 46: 1-10.

[6]. Tytła M. Assessment of heavy metal pollution and potential ecological risk in sewage sludge from municipal wastewater treatment plant located in the most industrialized region in Poland—case study. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 2019; 16(13): 2430.

[7]. Guo J, Li J, Chen H, Bond PL, Yuan Z. Metagenomic analysis reveals wastewater treatment plants as hotspots of antibiotic resistance genes and mobile genetic elements. *Water Research* 2017; 123: 468-78.

- [8]. Kostich M, Flick R, Martinson J. Comparing predicted estrogen concentrations with measurements in US waters. *Environmental Pollution* 2013; 178: 271-7.
- [9]. Vymazal J, Březinová T, Koželuh M. Occurrence and removal of estrogens, progesterone and testosterone in three constructed wetlands treating municipal sewage in the Czech Republic. *Science of the Total Environment* 2015; 536: 625-31.
- [10]. Radjenović J, Petrović M, Barceló D. Fate and distribution of pharmaceuticals in wastewater and sewage sludge of the conventional activated sludge (CAS) and advanced membrane bioreactor (MBR) treatment. *Water Research* 2009; 43(3): 831-41.
- [11]. Gao P, Munir M, Xagorarakis I. Correlation of tetracycline and sulfonamide antibiotics with corresponding resistance genes and resistant bacteria in a conventional municipal wastewater treatment plant. *Science of the Total Environment* 2012; 421: 173-83.
- [12]. DOF. Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, PROTECCIÓN AMBIENTAL.-LODOS Y BIOSÓLIDOS. ESPECIFICACIONES Y LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES PARA SU APROVECHAMIENTO Y DISPOSICIÓN FINAL. ÚNICA SECCIÓN. 2003.
- [13]. Zhang M, Yang C, Jing Y, Li J. Effect of energy grass on methane production and heavy metal fractionation during anaerobic digestion of sewage sludge. *Waste Management* 2016; 58: 316-23.
- [14]. García Oropeza N. Lodos residuales: estabilización y manejo. *Caos Conciencia* 2006; 1(1): 51-8.
- [15]. Khwairakpam M, Bhargava R. Vermitechnology for sewage sludge recycling. *Journal of Hazardous Materials* 2009; 161(2-3): 948-54.
- [16]. Jiménez EI, García VP. Evaluation of city refuse compost maturity: a review. *Biological Wastes* 1989; 27(2): 115-42.
- [17]. DOF. Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005, QUE ESTABLECE LAS CARACTERÍSTICAS, EL PROCEDIMIENTO DE IDENTIFICACIÓN, CLASIFICACIÓN Y LOS LISTADOS DE RESIDUOS PELIGROSOS. 2006.
- [18]. INEGI. División municipal Guerrero, Información por Entidad 2015. Disponible desde: http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/gro/territorio/div_municipal.aspx. (Accedido el: 4 de enero de 2018).
- [19]. DOF. NORMA MEXICANA NMX-AA-026-SCFI-2010 ANÁLISIS DE AGUA - MEDICIÓN DE NITRÓGENO TOTAL

KJELDAHL EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS - MÉTODO DE PRUEBA - (CANCELA A LA NMX-AA-026-SCFI-2001). 2010.

[20]. DOF. NORMA MEXICANA NMX-AA-079-SCFI-2001. ANÁLISIS DE AGUAS - DETERMINACIÓN DE NITRATOS EN AGUAS NATURALES, POTABLES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS - MÉTODO DE PRUEBA (CANCELA A LA NMX-AA-079-1986) 2001.

[21]. DOF. NMX-AA-099-SCFI-2006. ANALISIS DE AGUA-DETERMINACION DE NITROGENO DE NITRITOS EN AGUAS NATURALES Y RESIDUALES-METODOS DE PRUEBA (CANCELA A LA NMX-AA-099-1987). 2006.

[22]. DOF. NMX-AA-029-SCFI-2001. ANÁLISIS DE AGUAS - DETERMINACIÓN DE FÓSFORO TOTAL EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS - MÉTODO DE PRUEBA (CANCELA A LA NMX-AA-029-1981) 2001.

[23]. DOF. NMX-AA-007-SCFI-2013. ANÁLISIS DE AGUA-MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS-MÉTODO DE PRUEBA (CANCELA LA NMX-AA-007

SCFI-2000). 2014.

[24]. DOF. Norma Mexicana NMX-AA-180-SCFI-2018. QUE 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. 2018.

[25]. de la Lanza Espino G, Penié-Rodríguez I, Hernández-Pulido S. Variación espaciotemporal del fósforo y el efecto de las corrientes locales en su distribución en la Bahía de Petacalco, Guerrero, México. *Ciencias Marinas* 2004; 30(2): 311-322.

[26]. Campos-Medina E, García-Rojas N, Velásquez-Rodríguez A, García-Fabila M. Análisis básico del reúso de lodos residuales de una planta de tratamiento de aguas residuales en suelos de pradera del Parque Nacional Nevado de Toluca. *Quivera. Revista de Estudios Territoriales*, 2009; 11(2): 35-51.

[27]. Román P, Martínez MP, Pantoja A. Manual de compostaje del agricultor. *Experiencias en América Latina*. 2013.

[28]. García BA. Composteo de los lodos generados en la planta piloto de tratamiento de aguas residuales de la UAM-Azcapotzalco.

Maestría, Universidad Autónoma Metropolitana (México), México, 2016.

[29]. Vicencio-de-la-Rosa M, Pérez-López M, Medina-Herrera E, Martínez-Prado M. 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* 2011; 27(3): 263-70.

[30]. Ebberts B, Ottosen LM, Jensen PE. Electrolytic treatment of municipal wastewater and sludge for the removal of heavy metals and recovery of phosphorus. *Electrochimica Acta* 2015; 181: 90-9.

[31]. Ting Y, Huang H-j, Lai F-y. Pollution hazards of heavy metals in sewage sludge from four wastewater treatment plants in Nanchang, China. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 2017; 27(10): 2249-59.

[32]. Zhou Y, Zhang Z, Zhang J, Xia S. Understanding key constituents and feature of the biopolymer in activated sludge responsible for binding heavy metals. *Chemical Engineering Journal* 2016; 304: 527-32.

[33]. Park J, Yamashita N, Park C, Shimono T, Takeuchi DM, Tanaka H. Removal characteristics of pharmaceuticals and personal

care products: Comparison between membrane bioreactor and various biological treatment processes. *Chemosphere* 2017; 179: 347-58.

[34]. Medina Ortíz AI. Estudio microbiológico de la calidad de lodos residuales y biosólidos para usarlos como mejoradores de suelos y zonas agrícolas. 2008.

[35]. Ivankin A, Pandya U, Saraf M. Intensification of aerobic processing of the organic wastes into compost. *Composting for Sustainable Agriculture*: Springer; 2014.

[36]. Haug, R. T. *The Practical Handbook of Compost Engineering*. Boca Raton, Fla.: Lewis Publishers. 1993.

[37]. de Oliveira TS, Corsino SF, Di Trapani D, Torregrossa M, Viviani G. Biological minimization of excess sludge in a membrane bioreactor: effect of plant configuration on sludge production, nutrient removal efficiency and membrane fouling tendency. *Bioresource Technology* 2018; 259: 146-55.

[38]. Wang Q, Wei W, Gong Y, Yu Q, Li Q, Sun J, et al. Technologies for reducing sludge production in wastewater treatment plants: state of the art. *Science of the Total Environment* 2017; 587: 510-21.