

Characterization of the Residual Sludge Generated by the Servicio Aguas de Comayagua (SAC) Water Treatment Plant for Productive Use Proposal

Anna Kristina Agüero Hernández¹, Ilene Alejandra Jiménez Velásquez¹

¹Centro Universitario Tecnológico, CEUTEC, Universidad Tecnológica Centroamericana, UNITEC, Tegucigalpa, Honduras

ABSTRACT

The proposal for the productive use of residual sludge was carried out in collaboration with Servicios Aguas de Comayagua (SAC). The objective was to characterize and analyze the potential for reusing residual sludge from the water treatment plant as a substitute material for fine aggregate in the production of fired clay bricks and/or as fertilizer in school gardens. This initiative aims to promote sustainability and reduce pollution in the department of Comayagua, Honduras. For the research development, a total of four residual sludge samples were obtained. Despite containing nutrients and organic matter, the analysis determined that they are not a viable option as fertilizer for school gardens due to the presence of pathogens that hinder seedling growth. However, they were found to be an excellent substitute for fine aggregate in the production of fired clay bricks, as the analyzed results indicate that one of the mixtures possesses characteristics close to the classification of ASTM C62-23 standards.

Keywords: Sustainable development, Environmental engineering, Environmental management.

Caracterización de los Lodos Residuales Generados en la planta Potabilizadora Servicios Aguas de Comayagua (SAC) para Propuesta de uso Productivo

Anna Kristina Agüero Hernández¹, Ilene Alejandra Jiménez Velásquez¹

¹Centro Universitario Tecnológico, CEUTEC, Universidad Tecnológica Centroamericana, UNITEC, Tegucigalpa, Honduras

Resumen– La propuesta de uso productivo de los lodos residuales se realizó en colaboración con Servicio Aguas de Comayagua (SAC). Con el objetivo de caracterizar y analizar el potencial de reutilización de los lodos residuales provenientes de la planta potabilizadora, como material suplente de agregado fino en la formación de ladrillos cocidos de tierra y/o como fertilizante en huertos escolares. Con la finalidad de fomentar la sostenibilidad y disminuir la contaminación en el departamento de Comayagua, Honduras. Para el desarrollo de la investigación, se obtuvo un total de cuatro muestras de lodo residual, identificado que estas a pesar de contar con nutrientes y carga orgánica, no son una opción como fertilizante para huertos escolares debido a la presencia de patógenos que evitan el desarrollo de las plántulas. Sin embargo, son un excelente suplente del agregado fino en la fabricación de ladrillos cocidos de tierra, ya que los resultados analizados indican que una de las mezclas posee características próximas para la clasificación de la Norma ASTM C62-23.

I. INTRODUCCIÓN

Las Plantas de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) o comúnmente plantas potabilizadoras están compuestas por una serie de operaciones unitarias de carácter fisicoquímico cuya finalidad es reducir la presencia de contaminación en el agua. En el proceso se encargan de prevenir la propagación de enfermedades y sustancias peligrosas, garantizando la seguridad y la salud de las personas. Sin embargo, también representan un gran desafío en la gestión ambiental, puesto que el proceso de potabilización del agua tiene como consecuencia la generación de lodos residuales, producto de la retención de las partículas contenidas en el agua. Este tipo de residuos debe de recibir un acondicionamiento, de modo que no puedan causar graves impactos en los ecosistemas y en el ser humano.

A nivel mundial el manejo que se le ha dado a los lodos residuales de PTAP en su mayoría incluye el almacenamiento en lechos de secado por periodos de tiempo indefinido, y la deshidratación, en estas últimas se obtienen reducciones de humedad entre 30-40% para llevar a su disposición final. [1] Los lodos residuales son residuos sólidos o semisólidos con un contenido variable de humedad, generados durante el proceso de potabilización del agua. Su composición química depende de su fuente de agua, productos químicos y las condiciones

operativas de la planta, generalmente se cuenta con la presencia de materia orgánica, metales pesados, nutrientes elevados, microorganismos e incluso patógenos potenciales, por lo cual la presencia de estos componentes representa un riesgo para la salud y el medio ambiente si no son gestionados de manera correcta.

En Honduras, la gestión de estos residuos consiste principalmente en su almacenamiento en lechos de secado. Posteriormente, los lodos son transportados al relleno sanitario o, en algunos casos vertidos en los ríos, generando impactos significativos al medio ambiente y salud. En la Planta Potabilizadora Servicio Aguas de Comayagua el manejo de los lodos generados consiste en el almacenamiento en lechos de secado y su disposición en sacos en un plantel asignado para tal fin.

Si bien los lodos residuales representan un gran desafío ambiental, estos pueden ser aprovechados en diferentes actividades y el uso de ellos depende de las características físicas, químicas y biológicas que presenten. Por lo tanto, el proyecto se centró en la caracterización de este residuo, en donde se analizaron parámetros fisicoquímicos para determinar potencialidades y generar propuestas de uso sostenible que permitan el aprovechamiento y valorización de lodos. [2]

En este sentido, para evaluar la alternativa más viable en el aprovechamiento de los lodos, se utilizaron diferentes instrumentos legales, con el fin de proteger la salud pública y el medioambiente. Sin embargo, ante la ausencia de reglamentos específicos nacionales, se recurrió a normas internacionales para el desarrollo práctico de la investigación. En el análisis de los lodos residuales se trabajó con la Norma Oficial Mexicana NOM-004 SERMANAT-2002, la cual establece los valores permisibles de contaminantes para lodos y biosólidos, con el fin de posibilitar su aprovechamiento o disposición final. [3] Por otro lado, para la fabricación de los ladrillos cocidos de tierra se trabajó con la Norma Estadounidense ASTM C62-23 para ladrillos de construcción, que expone los requisitos físicos que deben de cumplir según su resistencia a la meteorización, asegurando así el rendimiento y calidad del producto. [4]

A. Marco Teórico

La planta potabilizadora Servicio Aguas de Comayagua, ubicada en Comayagua, Honduras, se encuentra en función desde el 2020 y provee agua de calidad a un aproximado 18, 000 usuarios (60% de la ciudad)- El agua proviene de la microcuenca de Matasano y Majada, los cuales proporcionan alrededor de 118 L/S cada una, esta agua se trata directamente con cloro gas y sulfato de aluminio. Cuenta con dos componentes principales que son: la planta potabilizadora para 179.40 L/S (15,500 m³/ día) y el tanque de almacenamiento con capacidad de 5,000 m³ que funciona por gravedad. Cuenta con una población beneficiada de 90,000 pobladores, con una capacidad de almacenaje de 5,000 m³ y un caudal de agua tratada: 15,000 m³/día.

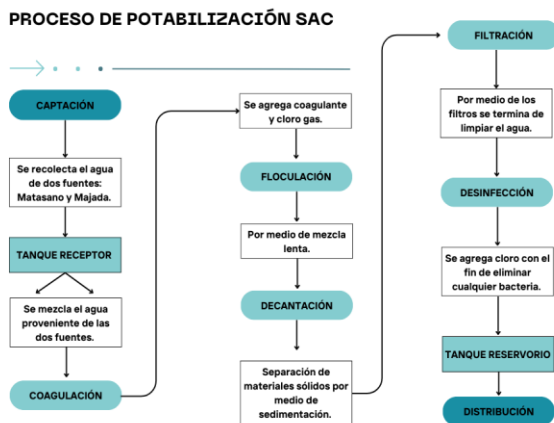


Fig. 1. Diagrama de Procesos de PTAP de Servicios Aguas de Comayagua.

La planta cuenta con los procesos de coagulación, precloración, floculación (por medio de mezcla lenta), decantación, sedimentación, filtración (con 8 filtros conectados entre sí), 6 camas de secado con una duración de 21-30 días del proceso (depende de las condiciones climáticas). Estos lodos que se almacenan en sacos reciclados los cuales contenían el sulfato de aluminio, carecen de un lavado extra para su uso y son almacenados al aire libre.

El manejo de los lodos residuales generados durante el proceso de la potabilización del agua representa un desafío operativo y ambiental a nivel global. Este es un subproducto del proceso del tratamiento de agua, en los cuales se incluyen procesos como coagulación, floculación, decantación, sedimentación y filtración, las cuales son técnicas fundamentales del proceso que tienen como objetivo la eliminación de patógenos e impurezas que se encuentran en el agua que está destinada para consumo humano. La planta potabilizadora SAC, no se encuentra exenta de esta problemática, ya que tiene la necesidad de gestionar de manera adecuada los lodos residuales que se generan a diario.

Tradicionalmente este tipo de subproducto es depositado en vertederos o manejadas para remediación de tierras

agrícolas, sin un tratamiento pueden provocar una contaminación en el suelo e incluso puede llegar hasta el agua subterránea.

Esta investigación adoptó un enfoque cuantitativo y cualitativo, se centró en la búsqueda de alternativas para el uso productivo de lodos generados durante el proceso de tratamiento del agua potable mediante la recolección y análisis de datos en campo y laboratorios.

II. RECOLECCIÓN DE DATOS

A. Toma de muestras de lodos residuales

Durante la visita a SAC se llevó a cabo la recolección de cuatro sacos de lodos residuales generados en la planta: dos correspondientes al mes de diciembre de 2023 y dos del mes de julio de 2024. Los lodos residuales se mantuvieron a una temperatura de 21°C durante la movilización al laboratorio de CEUTEC. Para la toma de muestra se siguieron los siguientes pasos:

- Se mezcló 5 kg de cada muestra (longeva y actual) en un total de 10 kg para conseguir una mezcla homogénea.
- Se dividió según lo solicitado en cada laboratorio.
- Se distribuyó en los laboratorios seleccionados.



Fig. 2. Manejo de muestras de lodos en el Laboratorio Químico de CEUTEC para análisis.

B. Bioensayo de Siembra de Frijol en Lodos Residuales

El objetivo del bioensayo fue analizar el nivel de desarrollo de las plántulas de los frijoles, identificando posibles deficiencias de nutrientes o presencia de contaminantes en los lodos residuales provenientes del SAC y el suelo fértil. Un bioensayo de siembra de frijol se utiliza para entender cómo diferentes factores influyen en la germinación y desarrollo, ayudando a tomar decisiones informadas en áreas como la agricultura, ecotoxicología y manejo ambiental.



Fig. 3. Comparación de germinación en suelo fértil y lodos residuales de la Planta Potabilizadora (SAC).

El bioensayo con frijoles es una prueba estática de toxicidad y nivel de germinación, con un nivel de exposición de 192 h, en los cuales se evaluaron los efectos fitotóxicos en las muestras, de las cuales se obtuvieron los niveles de germinación de las semillas y desarrollo de las plántulas.

Para la toma de muestra se siguieron los siguientes pasos:

1. Recolección de muestras (suelo fértil y lodo residual).
2. Distribución de frijoles en un recipiente (20).
3. Etiquetar la bandeja (M01- lodos residuales, M02- suelo fértil).
4. Relleno de 10 espacios de cada muestra en la bandeja de siembra.
5. Medición de los orificios con las palillas de madera, 2.5cm de profundidad.
6. Distribución de los frijoles en cada espacio de bandeja, uno por espacio.
7. Recubrimiento de cada espacio.
8. Riego por aspersión, 3 descargas en cada uno.
9. Extracción de las plántulas para medición.
10. Medición de cada una de las plántulas.

C. Ladrillos Cocidos de Tierra

La elaboración de ladrillos cocidos se llevó a cabo de manera experimental y sistemática mediante un enfoque de prueba y error, evaluando diferentes mezclas en las que el lodo residual se utilizó como sustituto del agregado fino. Asimismo, se realizaron pruebas según la norma Estadunidense ASTM C62-23 de ladrillos de construcción con el fin de evaluar la viabilidad de utilizar los lodos residuales en material de construcción.

TABLA I
DISEÑO DE MEZCLAS PARA LA FABRICACIÓN DE LADRILLOS

Prueba	Porcentaje	Peso
Prueba I	50%-50%	Barro 14lb
		Lodos Residuales 14 lb
Prueba II	75%-25%	Barro 21lb
		Lodos Residuales 7lb
Prueba III	100%	Lodos Residuales 28lb

El proceso de fabricación de los ladrillos cocidos de tierra consistió en los siguientes pasos:

1. Preparación de la mezcla: se inició con la elaboración de las diferentes mezclas de acuerdo con sus porcentajes, usando como materias primas el barro/arcilla y los lodos residuales.
2. Moldeado del ladrillo: en esta etapa se empleó un molde cuádruplo, el cual fue relleno completamente y alisado hasta alcanzar la forma estéticamente deseada.
3. Secado de ladrillos: los ladrillos se colocaron al aire libre durante un periodo de tiempo de 2 a 3 días para un secado uniforme.
4. Horneado de ladrillos: los ladrillos se colocaron en un horno fabricado de adobe, en donde se sometieron a un proceso de cocción de 24 horas en una temperatura que osciló entre los 900°C-1200°C.
5. Pruebas de resistencia: Se define como el límite de esfuerzo que soporta un ladrillo bajo una carga de aplastamiento [5]. En esta prueba los ladrillos se colocaron en la máquina de compresión y se aplicó la carga hasta que llegaron a su punto máximo de ruptura.
6. Absorción del agua en ebullición: en esta prueba los ladrillos se colocaron en un calentador de agua a una temperatura en ebullición (100°C) por 5 horas. Posteriormente se secó la superficie de los ladrillos con una toalla y se registró su peso. Finalmente, se trasladaron al horno de enfriamiento por 24 horas a una temperatura de 110 °C y se procedió a pesarlos nuevamente.
7. Absorción de agua fría: se colocaron los ladrillos en una pila con agua a temperatura entre 15 a 30 °C por 24 horas. Se secó la superficie con una toalla y se registró su peso para posteriormente llevar al horno de enfriamiento por 24 horas con temperatura de 110 °C y nuevamente se pesa en su estado seco.



Fig. 4. Pruebas de absorción en agua en el laboratorio de Ingeniería Civil de UNITEC.

III. DISCUSIÓN

Caracterización de lodos residuales

Para la caracterización de los lodos residuales se tomó como referencia la Norma Oficial Mexicana NOM-004 SERMANAT-2002 de lodos y biosólidos, que establece los valores permisibles de contaminantes en lodos para su aprovechamiento y reutilización. [3]

TABLA II
CARACTERÍSTICAS FÍSIOQUÍMICAS DE LOS LODOS RESIDUALES

	Parámetro	Valor de Referencia NOM-004-2002	Resultados de Análisis
1	pH	6-8	7
2	Humedad	-----	12.00%
3	Huevos de Helmintos	<1 HH/g (viable)	13 HH/g
4	Cloro residual	-----	0.28 mg/L
5	Zinc	2800 mg/k	<0.10
6	Óxido de Sílice	-----	17.33
7	Titanio	-----	0.68
8	Óxido de Fósforo	-----	0.16
9	Óxido de Magnesio	-----	ND
10	Óxido de Manganeseo	-----	1.15
11	Hierro	-----	5.94
12	Óxido de Potasio	-----	ND
13	Óxido de Aluminio	-----	5.82
14	Óxido de Calcio	-----	0.32
15	Arsénico	41 mg/K	ND
16	Mercurio	17 mg/K	ND
17	Materia orgánica	-----	1.72%
18	Fósforo		0.87 ppm
19	Potasio		0.05
20	Calcio		19.38
21	Magnesio		1.80
22	Aluminio		0.03
23	Manganeseo		133.70
24	Cobre		0.22
25	Acidez intercambiable		0.04

Los análisis fueron realizados en los laboratorios del IHCAFE, Sello Verde e INHGEOMIN, de los cuales se obtuvieron los siguientes resultados:

El pH de las muestras, como se puede observar en la tabla II, se encuentra dentro de los parámetros normales entre 6-8, además, tiene una humedad de 12% que mejora su manejo laboratorial. En la tabla se visibiliza que el cloro residual y materia orgánica se encuentran en bajas concentraciones. No existe presencia de metales pesados como mercurio o arsénico lo cual favorece el uso productivo de los lodos. Sin embargo, se encontró presencia de huevos de helmintos fuera del valor permisible por la norma NOM-004 SERMANAT-2002. La presencia de huevos de helmintos es perjudicial para la salud y uno de los contaminantes más difíciles de controlar, ya que cuentan son resistentes a diversas condiciones ambientales, como pH, humedad e incluso desinfección con cloro. La destrucción de huevos de helminto se da a temperaturas aproximadamente de 55-70°C durante unos minutos, ya que estos no tienen mucha resistencia a las altas temperaturas. Igualmente, con temperaturas bajas (-4/-20°C) se puede llegar a la destrucción, sin embargo, es más efectivo aplicando calor. [6] [10]

B- Bioensayo de Semillas de Frijol en Lodos Residuales

El bioensayo de frijoles fue exitosamente ejecutado, su evolución en la germinación reveló índices de crecimiento importantes, lo cual muestra una variación bastante relevante entre las dos muestras.

TABLA III
RESULTADO DEL BIOENSAYO DE FRIJOL

Tipo de solución	Número de Réplicas	Promedio Ponderado de Replica
<i>Lodos Residuales (M-01)</i>	Réplica 1	1.77
<i>Tierra Negra (M-02)</i>	Réplica 1	5

Como se evidencia en la tabla III, la muestra M-01, correspondiente a los lodos residuales provenientes de SAC, obtuvo una germinación en 7 de 10 frijoles, sin embargo, su germinación se dio en escala reducida ya que no mostró desarrollo de los mismos.

En la muestra M-02, correspondiente al suelo fértil, se obtuvo una germinación del 90% de los frijoles (9 de 10), lo cual indica una tasa de germinación alta con desarrollo exitoso de las plántulas.

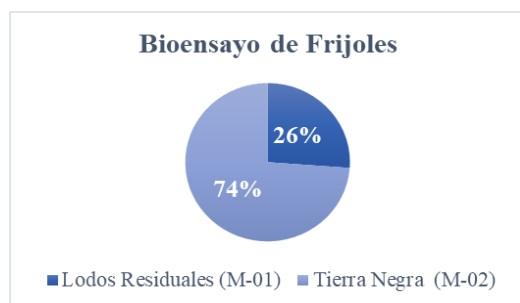


Fig. 5. Resultados de germinación del Bioensayo de Semillas de Frijol

El bioensayo nos reveló una diferencia amplia entre las dos muestras, predominando positivamente en su germinación la M-02 con un 74% de productividad, mientras tanto la M-01 con un 26% ya que su germinación no fue apta, debido a que la mayoría de los frijoles se desarrollaron en menor escala, en donde su hipocótilo se observaba curvado en la tierra y ninguno de los frijoles desarrolló hojas primarias.

C- Fabricación de Ladrillos Cocidos de Tierra

En el proceso de fabricación se obtuvieron un total de doce ladrillos, cuatro unidades por cada mezcla probada. Los ladrillos fueron sometidos a diferentes pruebas, siguiendo los requisitos físicos que establece la Norma Internacional ASTM C62-23 para ladrillos de construcción.

TABLA IV

REQUISITOS FÍSICOS PARA LADRILLOS DE CONSTRUCCIÓN ESTABLECIDOS EN LA NORMA ASTM C62-23

	Resistencia mínima a la compresión, área total, MPa (psi)	Absorción de agua máxima por ebullición durante 5 horas, %	Coefficiente máximo de saturación.
Calidad	Individual	Individual	Individual
1. SW	17,2 (2500)	20,0	0,80
2. MW	15,2 (2200)	25,0	0,90
3. NW	8,6 (1250)	Sin límite	Sin límite

Nota: fuente Norma ASTM C62-23

1. Meteorización severa (SW)
2. Meteorización moderada (MW)
3. Meteorización despreciable (NW)

Tomando como referencia la Norma ASTM C62 -23 para ladrillos de Construcción, se realizaron pruebas de resistencia mínima a la compresión, absorción de agua máxima por ebullición por 5-h y coeficiente máximo de saturación, para evaluar si los ladrillos elaborados clasificaban en alguna de las categorías expuestas.

TABLA V
RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

	Compresión (LB)	Área (IN) ²	Resultados (psi)
Ladrillo I	42,140.00	53.10	793.67
Ladrillo II	51,740.00	52.59	983.90
Ladrillo III	8,430.00	41.26	204.30
Ladrillo Patrón	95,380.00	52.58	1,813.92

La tabla muestra los resultados de las pruebas realizadas a los ladrillos. Para las pruebas de resistencia se obtuvo que el ladrillo II con un porcentaje de 75% de Barro y 25% de lodo residual mostró mejores valores de resistencia a la compresión con un índice de 983.90 psi. Sin embargo, no se encuentra clasificado en ninguna categoría. El ladrillo I con un porcentaje de 50-50% obtuvo un valor de 783.67 psi y finalmente el ladrillo III elaborado solamente a base de lodo residual arrojó el resultado más bajo de resistencia con un índice de 204.30 psi.

TABLA VI
RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE ABSORCIÓN EN AGUA EN EBULLICIÓN POR 5 HORAS

Tipo de Ladrillo	Ebullición por 5 - h Peso L. Húmedo	Ebullición por 5 -h Peso LS	% de Absorción
Ladrillo I	10.28	7.68	33.85
Ladrillo II	10.48	8.11	29.22
Ladrillo III	9.55	6.37	49.92
Ladrillo Patrón	10.05	8.38	19.93

Para el requisito físico de Absorción Máxima de Agua en Ebullición por cinco horas, como resultado se observó que el ladrillo II obtuvo el mejor índice de absorción con un 29 %, lo que demuestra que tiene un nivel de porosidad bajo, catalogándose como un material con óptima durabilidad. En cambio, el ladrillo I y III mostraron porcentajes de absorción altos, lo que demuestra un nivel de porosidad alto, convirtiéndolos en un material con poca durabilidad.

TABLA VII
RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE ABSORCIÓN

Tipo de Ladrillo	Absorción por 5 -h	Absorción por 24 - h	Coefficiente Máximo de Saturación
Ladrillo I	33.85	28.22	0.83
Ladrillo II	29.22	25.71	0.92
Ladrillo III	49.92	47.75	0.90
Ladrillo Patrón	19.93	15.63	0.75

Finalmente, se determinó el coeficiente máximo de saturación, donde se obtuvo que el ladrillo I con 0.83% clasifica en la categoría MW ($0.83\% < 0.90\%$), el ladrillo II con 0.92% clasifica en la categoría NW (no hay máximo) y el ladrillo III clasifica en la categoría MW ($0.90\% \leq 0.90\%$).

Es importante destacar que un ladrillo con bajo coeficiente estaría más cerca de una cualidad de impermeable, y un ladrillo con alto coeficiente estaría más cerca de una cualidad permeable (más propensa a permitir la entrada y acumulación de agua al interior).

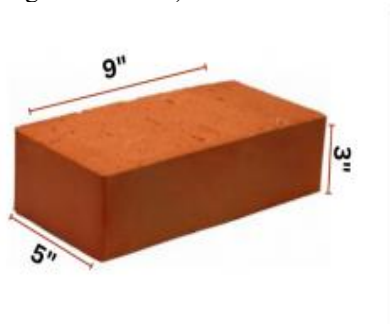


Fig.6. Diseño de Ladrillo de cocido de Tierra

De acuerdo a los resultados obtenidos en la presente investigación se plasma una afinidad según (Torres, Hernández, & Paredes, 2012), en donde existen diversas aplicaciones de estos lodos para uso en actividades agrícolas, no obstante, sus muestras no se consideran un material óptimo debido a un déficit de nutrientes, siendo su uso limitado básicamente a actividades silvícolas y recuperación de suelos degradados y de minas (sin actividad). En el sector de la construcción, el lodo es utilizado como remplazo parcial en la producción de ladrillos cerámicos que conlleva a beneficios ambientales como disposición segura para los residuos peligrosos, minimizar la contaminación hídrica por causa de su vertimiento, reducción de gastos y recursos naturales. [7]

De igual manera, según (Lozada, Arango, & Torres, 2023) la aplicación de los lodos aluminosos, es posible la preparación de materiales más sostenibles y amigables con el ambiente para la elaboración de bloques de adobe, alcanzando una mayor resistencia a la compresión que los bloques de adobe conformados de manera tradicional. [8] No obstante, es importante mencionar que se debe tomar en cuenta la procedencia de los lodos residuales. En la planta potabilizadora SAC se detectó por medio de análisis microbiológicos la presencia de huevos del helminto, debido a

esto, no es factible la fabricación de bloques de adobe y/o el uso como fertilizante, en vista de que la presencia de estos patógenos en el subproducto es perjudicial para la salud y su eliminación conlleva temperaturas que oscilan entre 55 a 70 °C, lo que nos indica que la alternativa más viable es la elaboración de ladrillos de cocidos de tierra. [6]

III. CONCLUSIONES

En Honduras existen muchas plantas potabilizadoras de agua que generan una cantidad significativa de lodos residuales diariamente. Usualmente estos son almacenados o descargados en ríos o rellenos sanitarios municipales produciendo alteración del ecosistema. [9] Por lo que es necesario la implementación de nuevas tecnologías en la gestión integral de estos residuos.

Los análisis y el bioensayo de frijol permitieron identificar que la fabricación de ladrillos es la alternativa más viable para el aprovechamiento de los lodos residuales. En cambio, no es recomendable su uso en la agricultura esto se debe a que se detectó una concentración elevada de huevos del helminto, lo que impide su uso como fertilizante en huertos escolares, debido al riesgo significativo que representan para la salud humana y el medioambiente. La presencia de huevos de helmintos es de gran importancia, ya que cuentan con una alta resistencia a diversas condiciones de temperatura, ambiental, pH, humedad y desinfección de cloro. [10]

Partiendo de los resultados obtenidos en la investigación, se recomienda también el uso de los lodos en fabricación de adobes, tejas o artesanía (maceteras, adornos, etc.), ya que en el proceso de la fabricación de estos al utilizar calor se eliminan los huevos del helminto, haciendo una gestión integral de los residuos.

La fabricación de ladrillo cocido de tierra tiene un nivel óptimo de resistencia y absorción, pero aún no cumplen a cabalidad con la norma estadounidense ASTM C62-23 para ladrillos de construcción; no obstante, el ladrillo II con un porcentaje de 75% de barro y 25% de lodos residuales, mostró los mejores resultados en los ensayos realizados (resistencia a la compresión, absorción de agua y coeficiente máximo de absorción) con un nivel mínimo de error del 11.82%, con un acercamiento favorable para su aprovechamiento en construcción como muros divisorios, tejas, maceteras, entre otros.

Además, el uso productivo de ladrillos cocidos de tierra promueve la economía circular al integrar la gestión de los residuos y tecnología sostenible, con un enfoque de reutilización y reciclaje mediante la optimización de recursos.

IV. RECOMENDACIONES

Se recomienda profundizar en los análisis físicos, químicos y biológicos siendo más exhaustivos para obtener

información precisa y detallada sobre la composición de los lodos residuales, esto permitirá identificar las alternativas de uso más eficientes y sostenibles, optimizando su potencial como recurso y minimizando tanto su impacto ambiental como los riesgos asociados a la salud humana.

En el caso del bioensayo de siembra de frijol en lodos residuales, se recomienda no utilizar estos lodos en huertos escolares o como fertilizantes para cultivos de poca altura que tengan contacto directo con el lodo, debido a que carecen de suficientes nutrientes para un buen desarrollo de las plantas y cuentan con la presencia de huevos del helminto, lo que representa un peligro para la salud humana. Sin embargo, se sugiere aprovecharlos como relleno de suelos irregulares o incluso coadyuvar en la estabilización de suelos, donde pueden ofrecer beneficios importantes sin comprometer la seguridad sanitaria.

Se recomienda también, la mezcla que muestra la mayor aproximación a los estándares, como el caso del Ladrillo II (75% barro-25% lodo residual) que demostró los mejores resultados en las pruebas de laboratorio en términos de resistencia, se recomienda ser utilizado como material de construcción para muros divisorios, y que se fabrique en áreas cercanas a la planta debido a que los materiales se encontrarían en un radio cercano.

Para futuras investigaciones, ampliar los análisis físicos en donde se verifique la estabilidad de los ladrillos a largo plazo considerando factores como la durabilidad estructural en diversas condiciones climáticas. Además, se recomienda desarrollar y probar nuevas mezclas con el objetivo de que los ladrillos producidos puedan clasificar en una de las categorías establecidas en la norma internacional ASTM C62-23 para ladrillos de construcción. Esto permitirá que los ladrillos de lodo residual cumplan con los estándares de calidad y rendimiento requeridos, facilitando su aceptación y uso como material de construcción.

AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

Agradecemos primeramente a Dios por guiarnos en cada etapa y a nuestros familiares, Idalia Hernández y Lilia Agüero, Zonia Velásquez y José Jiménez, por su apoyo incondicional en cada paso. A todo el personal de Servicio Aguas de Comayagua por su colaboración durante el desarrollo de esta investigación.

Finalmente, cada uno de los docentes de la Ingeniería en Gestión de Ambiente y Desarrollo, en especial a la Ing. Karina Turcios por su estímulo y asesoramiento que han sido un pilar importante en todo nuestro desarrollo académico. Con profunda estima y reconocimiento, agradecemos al Ing. Julio López y el Ing. Juan Reyes por su inestimable guía que ha sido fundamental en la dirección y consolidación de esta investigación, agradecemos su disponibilidad e invaluable

consejo al artesano Ever Zuniga por su colaboración en este estudio.

REFERENCIAS

- [1] J. A. Gutiérrez-Rosero, Á. I. Ramírez-Fajardo, R. Rivas, B. Linares y D. Paredes, "Tratamiento de lodos generados en el proceso convencional de potabilización de agua" *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, vol. 13, no.25, pp. 14-27, 2014.
- [2] K. H. Franco, "Caracterización Fisicoquímica de lodos provenientes de una planta de tratamiento por tipo de residuo," Repositorio Institucional del Tecnológico Nacional de México, Veracruz, 2021.
- [3] SERMANAT, "Norma Oficial Mexicana Nom-004-Semarnat-2002, Protección Ambiental.- Lodos y Biosólidos.-Especificaciones y Límites Máximos Permisibles De," 2002.
- [4] ASTM, "Norma ASTM C62-23- Especificaciones Estandar para Ladrillos de Construcción,," 2023.
- [5] G. S. Soto y L. P. Sánchez, "Estudio comparativo de la resistencia a la compresión, absorción y dimensionamiento del ladrillo rafón producido en Quimistán, Chamelecón y Florida, Honduras," *Innovare*, vol 6, no. 1, pp. 97-116, 2012.
- [6] Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo, "Ascaris lumbricoides". <https://www.insst.es/agentes-biologicos-basebio/parasitos/ascaris-lumbricoides>. Consultado el: (21 de septiembre de 2024).
- [7] P. Torres, D. Hernández y D. Paredes, "Uso productivo de lodos de plantas de tratamiento de agua potable en la fabricación de ladrillos cerámicos.,2 *Revista Ingeniería de Construcción*, vol. 27, no.23, pp. 145-15, 2012.
- [8] P. T. Lozada, L. A. Arango y W. A. Torres, "Evaluación del aprovechamiento de lodos de plantas de tratamiento de agua potable en la preparación de adobe como material de construcción sostenible," *Revista ELA*, pp. 1-18, 2023.
- [9] Hernandez, "Gestión de residuos sólidos en Honduras. Revista Centroamericana de Sostenibilidad,,"pp. 90-105, 2021.
- [10] M. C. Campos, M. Beltrán, N. Fuentes y G. Moreno, "Huevos de helmintos como indicadores de contaminación de origen fecal en aguas de riego agrícola, biosólidos, suelos y pastos," vol. 38, 2017.