

Innovaciones en el tratamiento de lodos: un análisis del sistema diseñado para la empresa municipal de agua potable y alcantarillado de Guaranda

José Gerardo León Chimbolema*
Hernán Patricio Tixi Toapanta*
Rogel Alfredo Miguez Paredes*

Resumen

Este artículo detalla el desarrollo de un sistema de tratamiento para lodos recolectados por un vehículo hidrosuctionador en Guaranda, enfocándose en la integración de tecnología avanzada y prácticas sostenibles. La metodología incluye una caracterización exhaustiva de los lodos y pruebas de tratabilidad, como la prueba de jarras, para determinar la dosificación óptima de productos químicos para el acondicionamiento del lodo. El objetivo principal fue diseñar un sistema eficiente y ambientalmente sostenible para el tratamiento de lodos. Para lograr esto, se empleó un enfoque multidisciplinario que abarcó desde la ingeniería química hasta la biotecnología. El sistema desarrollado consta de un espesador por gravedad, filtros anaerobios de flujo ascendente para la estabilización del lodo, y un

* Doctor en Química, Máster en protección Ambiental. Docente investigador Escuela superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH) gerardo.leon@epoch.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0001-9202-8542>

* Doctor en Química Docente investigador Escuela superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH) htixi@epoch.edu.ec <https://orcid.org/0000-0002-9462-7052>

Ingeniero en Sistemas Informáticos, Magister en Interconectividad de Redes.

* Docente investigador Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH) rmiguez@epoch.edu.ec, <https://orcid.org/0000-0001-5063-1474>

Como citar APA: León, J., Tixi, H., Miguez, R. (2024) Innovaciones en el tratamiento de lodos: un análisis del sistema diseñado para la empresa municipal de agua potable y alcantarillado de Guaranda. *Repique*, 6(1), 15-50

proceso de acondicionamiento químico con Policloruro de aluminio, culminando en una unidad de deshidratación tipo filtro banda. Los principales resultados muestran que el sistema es capaz de tratar eficazmente los lodos, produciendo una torta de lodo apta para su evacuación final. Además, el lodo tratado se utiliza en procesos de vermicompostaje, sirviendo como abono o enmienda orgánica en terrenos, lo que representa un avance en la gestión de residuos y en prácticas ambientales sostenibles. En conclusión, el sistema no solo aborda de manera eficaz la gestión de lodos, sino que también contribuye positivamente al medio ambiente y a la sociedad, ofreciendo una solución práctica y respetuosa con el entorno.

Palabra clave: Tratamiento de lodos, Hidrosuccionador, Sostenibilidad, Vermicompostaje, Policloruro de aluminio.

Innovations in sludge treatment: an analysis of the system designed for the Guaranda municipal water and sewage company

Abstract

This article details the development of a sludge treatment system for sludge collected by a hydro-suction vehicle in Guaranda, focusing on the integration of advanced technology and sustainable practices. The methodology includes a comprehensive characterization of the sludge and treatability tests, such as the jar test, to determine the optimal dosing of chemicals for sludge conditioning. The main objective was to design an efficient and environmentally sustainable system for sludge treatment. To achieve this, a multidisciplinary approach was employed, covering everything from chemical engineering to biotechnology. The

developed system consists of a gravity thickener, upflow anaerobic filters for sludge stabilization, and a chemical conditioning process with Poly Aluminum Chloride, ending in a belt filter dehydration unit. The main results show that the system can effectively treat the sludge, producing a sludge cake suitable for final evacuation. Additionally, the treated sludge is used in vermicomposting processes, serving as fertilizer or organic amendment in lands, representing an advancement in waste management and sustainable environmental practices. In conclusion, the system not only addresses sludge management effectively but also contributes positively to the environment and society, offering a practical and respectful solution to the environment.

Keyword: Sludge Treatment, Hydro-Suction, Sustainability, Vermicomposting, Poly Aluminum Chloride

Recibido : 21-10-2023

Aprobado: 30 -11-2023

INTRODUCCIÓN

Esta investigación aborda un tema de vital importancia para el desarrollo sostenible y la gestión ambiental en el cantón Guaranda. Desde su creación en 2003, E.P. EMAPA-G ha asumido la responsabilidad de administrar eficientemente los recursos hídricos y sistemas de alcantarillado, adaptándose a las necesidades crecientes de la población. Una de las herramientas claves en su arsenal es el vehículo hidrosuccionador Vaccon, modelo V310, esencial en el mantenimiento y limpieza del sistema de alcantarillado, pozos sépticos y tuberías para prevenir obstrucciones y desbordamientos.

Sin embargo, la ciudad enfrenta un desafío significativo relacionado con el tratamiento de los lodos generados en este proceso. Estos residuos líquidos o semisólidos, recolectados por el

hidrosuccionador, actualmente son depositados en la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de la ciudadela Marcopamba, la cual ha estado inoperativa durante varios años. Esta práctica ha provocado problemas ambientales y de salud pública, afectando la calidad del suelo y las aguas del río Chimbo. La infiltración de lixiviados de estos residuos hacia el río ha generado malestar en la comunidad debido a los malos olores y la proliferación de vectores de enfermedades, afectando no solo a Guaranda sino a toda la provincia de Bolívar.

La justificación del proyecto radica en la ausencia de un sistema efectivo de tratamiento de lodos en E.P. EMAPA-G, lo que ha llevado a la necesidad urgente de encontrar una solución sostenible. Este proyecto se alinea con los principios de derecho a un ambiente sano, equilibrado y libre de contaminación, estipulados en la constitución del país, y busca abordar las regulaciones nacionales sobre la calidad ambiental y la descarga de efluentes. La iniciativa es una respuesta directa a los desafíos planteados por la contaminación del agua y suelo, siguiendo las directrices establecidas en la Norma de Calidad Ambiental y de descarga de efluentes al recurso agua de 2014.

Geográficamente, el proyecto se sitúa en la ciudadela Marcopamba, en San Pedro de Guaranda, conocida como la "ciudad de las 7 colinas". El objetivo general del proyecto es diseñar un sistema de tratamiento para los residuos recolectados por el vehículo hidrosuccionador de la E.P. EMAPA-G, con objetivos específicos que incluyen la caracterización de los residuos, la propuesta de procesos adecuados para su tratamiento y el dimensionamiento del sistema mediante herramientas como AutoCAD.

Por tanto, este artículo propone una solución innovadora y sostenible al problema de los residuos de lodos en Guaranda, ofreciendo un modelo que puede ser replicable en otras

comunidades con desafíos similares. La implementación de este proyecto no solo contribuirá a mejorar la calidad ambiental y de vida de los habitantes de Guaranda, sino que también marcará un hito importante en la gestión responsable de los recursos naturales en la provincia de Bolívar y más allá.

Para Vilanova et al., (2017) Una estación depuradora de aguas residuales (EDAR) tiene como objetivo principal mejorar la calidad del agua efluente a partir de aguas negras o mezcladas mediante una combinación de procesos físicos, químicos y biotecnológicos. Estos procedimientos se aplican para cumplir con ciertos parámetros de contaminación estandarizados. Por lo general, las EDAR tratan aguas residuales locales, que provienen principalmente del consumo de la población y de la escorrentía superficial de zonas urbanas desarrolladas. La composición de las aguas residuales urbanas es altamente variable y depende de diversos factores, como el consumo de agua, las descargas industriales en el sistema de alcantarillado, los hábitos alimentarios y las costumbres de la población local. Estas aguas residuales urbanas consisten principalmente en aguas domésticas, que presentan una contaminación predominantemente orgánica. Esto significa que son biodegradables y pueden ser tratadas eficazmente a través de procesos biológicos.

La caracterización del agua residual urbana implica la medición de una serie de parámetros que se utilizan para evaluar su nivel de contaminación. Estos parámetros desempeñan un papel fundamental en el diseño de una EDAR, ya que permiten determinar el grado de contaminación presente en una zona urbana específica, lo que a su vez determina los niveles de tratamiento requeridos. Asimismo, el propósito principal de los sistemas de tratamiento de aguas residuales es eliminar componentes como materia orgánica, nitrógeno y fósforo, que son fácilmente biodegradables (Jiménez Aldana, 2017).

El agua residual doméstica, en su mayoría, se compone de materia orgánica derivada de actividades humanas, principalmente carbono, hidrógeno y oxígeno, y en ocasiones, nitrógeno, grasas, aceites, agentes tensoactivos, fenoles y pesticidas (Gómez-Anaya et al., 2017) También contiene componentes inorgánicos como pH, cloruros, alcalinidad, nitrógeno, fósforo, azufre, compuestos tóxicos y metales pesados, así como gases resultantes de la descomposición de la materia orgánica en el agua residual. Algunos ejemplos incluyen:

- Proteínas, que tienen una estructura química compleja con carbono, oxígeno, hidrógeno, nitrógeno y, a veces, azufre, fósforo y hierro.
- Carbohidratos, cuyo principal componente es carbono, hidrógeno y oxígeno, incluyendo azúcares, almidones, celulosa y fibra de madera.
- Grasas animales y aceites, compuestos orgánicos estables y difíciles de descomponer por bacterias, que incluyen ésteres de alcohol o glicerina y ácidos grasos.
- Pesticidas y productos químicos agrícolas, que no son comunes en el agua residual, pero pueden ingresar debido a escorrentías de áreas agrícolas y tierras abandonadas.

Para evaluar el contenido orgánico en el agua residual, se utilizan parámetros como la demanda bioquímica de oxígeno (DBO5), que mide la cantidad de oxígeno requerida por las bacterias durante la descomposición de la materia orgánica en condiciones aerobias, y la demanda química de oxígeno (DQO), que determina la cantidad de oxígeno consumida por la oxidación química de sustancias orgánicas e inorgánicas en el agua (Gómez-Anaya et al., 2017; Rodríguez-González et al., 2013) El índice de biodegradabilidad, calculado como la relación DQO/DBO5, proporciona información sobre la biodegradabilidad del agua residual, donde una relación $DQO > DBO5$ (1:2) indica un potencial degradabilidad. Estos

parámetros son fundamentales para evaluar la contaminación del agua y dimensionar las instalaciones de tratamiento de aguas residuales (Edson Baltazar et al., 2013; Peña-Álvarez & Castillo-Alanís, 2015).

Por su parte, los lodos, que consisten en una mezcla de líquidos y sólidos con un contenido de sólidos que varía entre 0,25% y 12% en peso, son responsables de la desagradable naturaleza de las aguas residuales no tratadas. Estos lodos contienen una gran cantidad de materia orgánica que debe ser tratada para reducir el contenido de agua, la materia orgánica y, en última instancia, el volumen total de los lodos. Los lodos generan tres problemas fundamentales: 1) problemas de espacio debido a la cantidad de lodos producidos por habitante en aguas residuales urbanas; 2) problemas ambientales, ya que algunos lodos contienen metales pesados y nitratos que pueden causar contaminación de las aguas subterráneas; y 3) problemas de salud e higiene, ya que los lodos pueden contener organismos patógenos no eliminados (Espinosa-Rodríguez & Fall, 2015; Rojas-Morales et al., 2016).

Existen diferentes tipos de lodos, como los sólidos gruesos, arenas, espumas, lodos primarios, lodos químicos, sólidos suspendidos, lodos secundarios, lodos de compostaje y cenizas, cada uno con sus características específicas. Para el tratamiento de estos lodos, se aplican diversas técnicas, como el acondicionamiento, el espesamiento y la estabilización. El acondicionamiento implica procesos como la dilaceración del fango, el desarenado, el mezclado y el almacenamiento de los lodos. El espesamiento se utiliza para aumentar el contenido de sólidos en los lodos y reducir el volumen. Finalmente, la estabilización busca eliminar malos olores y patógenos mediante procesos como la estabilización con cal, el tratamiento térmico, la digestión anaerobia/aerobia y el compostaje (Cajacuri et al., 2013; Gómez-Anaya et al., 2017).

Cada proceso de tratamiento de lodos tiene sus propias características y requisitos, y se selecciona en función de los objetivos del tratamiento, el caudal a tratar y las características de los lodos. Estos procesos son esenciales para la gestión eficaz y segura de los lodos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales (Rojas-Morales et al., 2016).

METODOLOGÍA

El estudio empleó una metodología mixta que combinó enfoques cualitativos y cuantitativos. Fue aplicada y exploratoria descriptiva, orientada a encontrar soluciones prácticas a problemas específicos (Sampieri et al., 2014). Se clasificó como cuasi-experimental debido a la manipulación de variables en un entorno no completamente controlado. Además, fue una investigación deductiva, basándose en teorías generales para llegar a conclusiones específicas. También fue longitudinal, involucrando un seguimiento en el tiempo. El estudio se llevó a cabo en la ciudadela Marcopamba, en la vía Guaranda-Babahoyo, Ecuador, utilizando las pautas de muestreo de la Norma Oficial Mexicana, adaptadas a las condiciones locales.

Las técnicas de muestreo se realizaron de manera integral, prestando atención a la selección del sitio de muestreo, homogeneidad y representatividad de las muestras, su grado de degradación y accesibilidad al sitio de muestreo (Guevara Alban et al., 2020). Se utilizaron frascos de vidrio identificados y equipos de protección personal para recoger muestras de lodo. Los análisis de laboratorio se realizaron en el Laboratorio de control de la calidad del agua de la E.P. EMAPAG y en LABCESTTA S.A.

Las pruebas de tratabilidad, como la prueba de jarras, se llevaron a cabo para determinar la dosificación adecuada del coagulante en el acondicionamiento químico. Se utilizó un floculador portátil para

facilitar el mezclado y se estableció la dosificación óptima del coagulante considerando factores como el gradiente de velocidad. Para la caracterización de los lodos, se emplearon procedimientos HACH aprobados por el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Se analizaron parámetros como cobre, cromo, hierro, níquel, nitratos, nitritos, plomo, zinc, sólidos suspendidos, demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno y coliformes fecales.

Los resultados de los análisis se compararon con los valores límites permisibles según las normativas aplicables, identificando excesos en varios parámetros. Se diseñó un sistema de tratamiento de lodos que incluyó espesamiento, digestión anaerobia, acondicionamiento químico y deshidratación. Finalmente, la torta de lodo resultante se utilizó como abono o enmienda orgánica en áreas cercanas a la planta de tratamiento, cumpliendo con las regulaciones ambientales y técnicas.

Cálculos

Caudal: 0,00469 m³/s

Concentración del sólido: 2,855 kg/m³

Carga superficial de sólidos: 112 kg/m²d

Pendiente del fondo del espesador: 80 mm/m

Diámetro de la
cámara de
reparto: 20% D

Tiempo de
retención
hidráulica: 2
horas

$$\text{Ecuación 1-3 } C_s = \frac{Q}{A_s}$$

$$Q \quad \text{Ecuación 2-3 } A_s = \frac{Q}{C_s}$$

Donde:

As: área superficial, m²

Cs: carga superficial de sólidos, kg/ m²d

Q: caudal del lodo, m³/s

$$As = \frac{0,00469 \frac{m^3}{s} (2,855 \frac{Kg}{m^3})}{112 \frac{Kg}{m^2 d} (\frac{1 d}{86400 s})}$$
$$As = 10 m^2$$

$$As = \frac{\pi D^2}{4}$$

Donde:

As: área superficial, m²

D: diámetro del espesador circular, m

$$D = \sqrt{\frac{4 As}{\pi}}$$

Ecuación 3-3

$$D = \sqrt{\frac{4 (10 m^2)}{\pi}}$$
$$D = 3,63 m$$

Ecuación 4-3

$$V = Q * trh$$

Donde:

V: volumen del espesador, m³

C: caudal de lodo, m³/s

Trh: tiempo de residencia hidráulica, s

$$V = 0,00469 \frac{m^3}{s} (7200 s)$$

$$V = 34 m^3$$

$$H = \frac{V}{As}$$

Ecuación 5-3

Donde:

H: altura útil del espesador circular, m

V: volumen del espesador, m³

As: área superficial, m²

$$H = \frac{34 m^3}{10 m^2}$$

$$H = 3,4 m$$

D

$$Hl = \frac{D}{2}$$

Ecuación 6-3

Donde:

Hl: altura de la zona de lodos, m

S: pendiente de fondo, mm/m

D: diámetro del espesador circular, m

$$Hl = 80 \frac{mm}{m} \left(\frac{3,63m}{2} \right)$$

$$Hl = 145,2 \text{ mm} \cong 0,15 \text{ m}$$

$$H_T = H + Hl + Hs \quad \text{Ecuación 7-3}$$

Donde:

H_t: altura total del espesador, m

H: altura, m

Hl: altura de la zona de lodos, m

H_s: altura de seguridad, m

$$H_T = 3 \text{ m} + 0,15 \text{ m} + 0,35 \text{ m} = 3,76 \text{ m} \cong 4 \text{ m}$$

$$D_c = 20 \% D \quad \text{Ecuación 8-3}$$

Donde:

D_c: diámetro de la cámara de reparto, m

D: diámetro del espesador circular, m

$$D_c = 0,20 (4 \text{ m}) = 0,7 \text{ m}$$

$$H_c = \frac{1}{5} H_T \quad \text{Ecuación 9-3}$$

Donde:

H_c: altura de la cámara de reparto, m

H_t: altura total del espesador, m

$$H_c = \frac{1}{5} (4 \text{ m}) = 0,80 \text{ m}$$

Datos de Diseño del Filtro Anaerobio de flujo ascendente (FAFA):

Caudal: 0,00469 m³/s o 405,216 m³/d

Carga hidráulica superficial: 10,5 m³/m² d

Carga orgánica volumétrica: 0,5 kg DBO m³/ d

$$A = \frac{Q}{CHS} \quad \text{Ecuación 10-3}$$

Donde:

A: área superficial del medio filtrante, m²

Q: caudal de lodos a tratar, m³/d

CHS: carga hidráulica superficial, m³/ m²d

$$A = \frac{405,216 \frac{m^3}{d}}{10,5 \frac{m^3}{m^2 d}}$$

$$A = 39 m^2$$

$$L = \sqrt{A} \quad \text{Ecuación 11-3}$$

Donde:

L: longitud del filtro, m

A: área superficial del medio filtrante, m²

$$L = 6,2 m$$

$$V = \frac{Q * S_0}{COV} \quad \text{Ecuación 12-3}$$

Donde:

V: volumen del lecho filtrante, m³

Q: caudal de lodos a tratar, m³/d

COV: carga orgánica volumétrica en el lecho filtrante, kg DBO m³/d

S₀: DBO máxima, media y mínima, kg DBO/ m³

DBO máxima

$$V = \frac{405,216 \frac{m^3}{d} (3,752 \frac{kg DBO}{m^3})}{0,5 \frac{kg DBO}{m^3 d}}$$

$$V = 3041 m^3$$

DBO media

$$V = \frac{405,216 \frac{m^3}{d} (2,71 \frac{kg DBO}{m^3})}{0,5 \frac{kg DBO}{m^3 d}}$$

$$V = 2196 m^3$$

DBO mínima

$$V = \frac{405,216 \frac{m^3}{d} (2,103 \frac{kg DBO}{m^3})}{0,5 \frac{kg DBO}{m^3 d}}$$

$$, m^3 d$$

$$V = 1704 m^3$$

$$hm = \frac{V}{A}$$

Ecuación 13-3

Donde:

Hm: altura del lecho filtrante,
m

V: volumen del empaque, m³

A: área superficial del filtro, m²

$$hm = 7,9 \text{ m} \cong 8 \text{ m}$$
$$H = hm + b + d$$

**Ecuación
14-3**

Donde:

H: altura total del filtro, m Hm: altura del lecho filtrante, m b:
altura del borde libre, m d: altura del bajo dren, m

$$H = 7,9 \text{ m} + 0,75 + 1 = 9,6 \text{ m}$$

$$Vt = A \cdot H$$

**Ecuación
15-3**

Donde:

Vt: volumen total del filtro, m³

A: área superficial del filtro, m²

H: altura total del filtro, m

$$Vt = 39 \text{ m}^2 * 9,6 \text{ m} = 372 \text{ m}^3$$

$$COV_t = \frac{Q S_o}{V_t} \quad \text{Ecuación 16-3}$$

Donde:

COV_t : carga orgánica volumétrica, kg DBO/ m³/d

Q: caudal del lodo a tratar, m³/d

S_o : DBO máxima, kg DBO/ m³

V_t : volumen total del filtro, m³

$$COV_t = \frac{405,216 \frac{m^3}{d} (0,44 \frac{kg DBO}{m^3})}{372 m^3}$$

$$kg DBO \quad COV_t = 0,49 \cong 0,50 \frac{kg DBO}{m^3 d}$$
$$TRH = \frac{V}{Q}$$

Donde:

TRH: tiempo de residencia hidráulica, d

V: volumen del medio filtrante, m³

Q: caudal de lodos a tratar, m³/d

$$TRH = 7,5 d$$

$$E = 100 [1 - 0,87 (TRH^{-0,5})]$$

Ecuación
18-3

Ecuación 17-3

Donde:

E: eficiencia del filtro anaerobio, en porcentaje

TRH: tiempo de residencia hidráulica, d

0,87: coeficiente empírico del sistema

0,50: coeficiente empírico del medio filtrante

$$E = 100 [1 - 0,87 (7,5^{-0,5})]$$

$$E = 94 \%$$

$$DBO_{ef} = S_0 - \frac{E S_0}{100}$$

Ecuación 19-3

Donde:

DBO_{ef} : concentración total de DBO en el efluente, mg/l

S_0 : concentración total de DBO en el efluente, mg/l

E: eficiencia de remoción, en porcentaje

$$DBO_{ef} = 3041 - \frac{94 (3041)}{100} = 197 \frac{mg}{l}$$

$$DBO_{ef} = 2196 - \frac{94 (2196)}{100} = 142 \frac{mg}{l}$$

$$DBO_{ef} = 1704 - \frac{94 (1704)}{100} = 110 \frac{mg}{l}$$

Datos de Diseño del Acondicionamiento químico:

Caudal: 0,00469

m³/s a (Dt/D): 3

b (H/D): 3,5

Tiempo de mezcla: 7 s

$$V = Q * t$$

Ecuación
20-3

Donde:

V: volumen de la cámara de mezcla, m³

Q: caudal de lodos a tratar, m³/s

T: tiempo de mezcla, s

$$V = 0,00469 \frac{m^3}{s} (7 s)$$

$$V = 0,03 m^3$$

$$D_T = 1,08 \sqrt[3]{aV/b}$$

Ecuación 21-3

Donde:

D_T: diámetro de la cámara de
mezcla, m a y b: * asumidos para
el diseño

$$D_T = 1,08 \left[\left(\frac{3}{3,5} \right) (0,03) \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$D_T = 0,01 m$$

$$H = D_T b/a$$

Ecuación 22-3

Donde:

H: profundidad de la cámara de
mezcla, m a y b: * asumidos para el
diseño

$$H = 0,01 m \left(\frac{3,5}{3}\right)$$

$$H = 0,012 m$$

$$P = \mu V G^2$$

Ecuación 23-3

Donde:

P: potencia
aplicada al agua,
kg m / s μ :
viscosidad del
lodo, kg s / m² V:
volumen de la
cámara de mezcla,
m³
G: gradiente de velocidad, s⁻¹

$$P = 0,0001167 \frac{kg s}{m^2} (0,03 m^3) (1000 s^{-1})$$

$$P = 3,83 \frac{kgm}{s}$$

$$D = \frac{D_T}{3}$$

Ecuación 24-3

Donde:

D: diámetro de la turbina, m

D_t: diámetro de la cámara de mezcla, m

$$D = \frac{0,01 m}{3} , \quad m$$

$$D = 0,003$$

$$B = \frac{D}{4}$$

Ecuación 25-3

Donde:

B: dimensiones de las paletas, m

D: diámetro de la turbina, m

$$B = \frac{0,003 m}{4}$$

$$B = 0,00084 m$$

$$W = \frac{D}{4}$$

Ecuación 26-3

Donde:

W: dimensiones de las paletas, m

D: diámetro de la turbina, m

$$W = \frac{0,003 \text{ m}}{4}$$

$$W = 0,00075 \text{ m}$$

Ecuación 27-3
$$n = \sqrt[3]{\frac{gP}{K\rho D^5}}$$

Donde:

n: velocidad de

rotación, rpm

g: coeficiente

gravedad, m²/s

P: potencia

aplicada al agua,

kg m / s

K: constante del impulsor

69

$$n = [9,81 (3,83)/5(1000)(0,003)]^{\frac{1}{3}}$$

$$n = 5,10 \text{ rps} \approx 306 \text{ rpm}$$

Datos de Diseño del Filtro Banda:

Caudal: 405,216 m³/d

Ciclo operativo: 5 y 7 d/semana

Peso específico del lodo: 2,76

Peso específico de la torta: 1,86

Peso específico del líquido filtrado: 1,01

Contenido total de sólidos: 0,25

Sólidos Suspendidos: 0,09

Caudal de agua de lavado: 96 l/min

Carga de aplicación: 100 kg/m.h

Carga punta correspondiente a 3d: 810,432 m³/ d

Fango húmedo = Q (*Ciclo*)(*densidad*)(*peso del lodo*)

Ecuación 28-3

Donde:

Q: caudal de lodos a tratar, m³/d

Ciclo operativo: d/sem

Peso específico del lodo: 2,76

$$\begin{aligned} \text{Fango húmedo} &= 405,216 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \left(7 \frac{\text{d}}{\text{sem}} \right) \left(1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) (2,76) \\ \text{Fango húmedo} &= 7829 \frac{\text{kg}}{\text{semana}} \end{aligned}$$

Sólidos seco = Fango h. (contenido de solidos)

**Ecuación
29-3**

Sólidos secos = 7829 (0,03)

$$\text{Sólidos secos} = 235 \frac{\text{kg}}{\text{semana}}$$

Tasa diaria = solidos secos (*ciclo operativo*)

**Ecuación
30-3**

$$\text{Tasa diaria} = 235 \frac{\text{kg}}{\text{sem}} \left(5 \frac{\text{d}}{\text{sem}}\right)$$

$$\text{Tasa diaria} = 47 \frac{\text{kg}}{\text{d}}$$

$$\text{Tasa horaria} = \frac{\text{tasa diaria}}{\text{horas diarias}}$$

Ecuación 31-3

$$\text{Tasa horaria} = 6 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$\text{Anchura de banda} = \frac{\text{tasa horaria}}{\text{carga de aplicacion}}$$

Ecuación 32-3

$$\text{Anchura de banda} = \frac{6 \frac{\text{kg}}{\text{h}}}{100 \frac{\text{kg}}{\text{m h}}}$$

$$\text{Anchura de banda} = 0,06 \text{ m}$$

$$\text{Sólidos} = \text{S.en la torta} + \text{S.en el líquido filtrado}$$

Ecuación 33-3

$$47 \frac{\text{kg}}{\text{d}} = \left(S \frac{\text{m}^3}{\text{d}}\right) \left(1000 \frac{\text{kg}}{\text{d}}\right) (1,7)(0,25) + \left(F \frac{\text{m}^3}{\text{d}}\right) \left(1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) (1,86)(0,009)$$

$$47 = 425 * S + 16,74 * F$$

$$\text{Caudal diario de fango} = 405,216 \frac{m^3}{d} * \frac{7}{5} \quad \text{Ecuación 34-3}$$

$$\text{Caudal diario de fango} = 567 \frac{m^3}{d}$$

$$Q = 0,09 \frac{m^3}{\text{min m}} * 0,06 \text{ m} * 60 \frac{\text{min}}{h} * 8 \frac{h}{d} \quad \text{Ecuación 35-3}$$

$$\text{Caudal de agua de lavado a contracorriente} = 3 \frac{m^3}{d}$$

$$\text{Caudal total} = 567 + 3 = 570 \frac{m^3}{d}$$

$$F = 290 m^3 \quad \text{Ecuación 36-3}$$

$$\% \text{ solidos} = \frac{S. \text{ en la alimentacion} - S. \text{ en el líquido filtrado}}{\text{Sólidos en la alimentación}} \times 100$$

71

Ecuación 37-3

$$\text{Captura de sólidos} = 53 \%$$

$$\text{Sólidos secos / d} = \left(810,4 \frac{m^3}{d} \right) \left(1 \frac{kg}{m^3} \right) (1,01)(0,03)$$

d m

Ecuación 38-3

$$\text{Sólidos secos} = 25 \frac{kg}{d}$$

$$\text{Tiempo de funcionamiento} = \frac{25 \frac{kg}{d}}{100 \frac{kg}{d}}$$

d

Ecuación 39-3

$$\text{Tiempo de funcionamiento} = 0,25 d \cong 6 h$$

RESULTADOS

Una vez concluidas las pruebas de tratabilidad se realizaron los análisis finales del lodo para saber sus características, los cuales se presentan a continuación:

Tabla 1: *Primera caracterización final de los lodos*

Ensayo	Unidad	Resultado	Método/Norma	Valor límite permisible
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	5175	Espectrofotométrico	-
Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días)	mg/L	2281	Espectrofotométrico	-
Coliformes fecales	NMP/g	< 1500	Fermentación en tubos múltiples	-
Arsénico	mg/L	0,92	AN-EMAPAG-10	-
Cadmio	mg/L	4,78	AN-EMAPAG-15	-
Cobre	mg/L	6,35	AN-EMAPAG-08	-
Cromo total	mg/L	8,00	AN-EMAPAG-13	-
Fosfatos	mg/L	9,75	AN-EMAPAG-17	-
Hierro total	mg/L	6,43	AN-EMAPAG-18	-
Níquel	mg/L	20,52	AN-EMAPAG-21	-
Nitratos	mg/L	39,43	AN-EMAPAG-22	-
Nitritos	mg/L	17,24	AN-EMAPAG-23	-
Plomo	mg/L	< 21	AN-EMAPAG-28	-
Zinc	mg/L	36,51	AN-EMAPAG-34	-
Sólidos totales	mg/L	730	AN-EMAPAG-33	-

La Tabla 1 presenta los resultados de la primera caracterización de los lodos recolectados, abarcando una serie de parámetros críticos para evaluar su calidad. Entre estos parámetros se incluyen la Demanda Química de Oxígeno, la Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días), la concentración de Coliformes fecales, así como la presencia de diversos metales y compuestos químicos en el lodo. Cada ensayo se llevó a cabo siguiendo un método o norma específica, y los resultados se expresan en unidades pertinentes, como mg/L o NMP/g. Además, se incluyen los valores límites permisibles establecidos por las regulaciones aplicables. Esta tabla, elaborada por Ibeth Bucheli en 2022, proporciona una instantánea de la calidad inicial de los lodos y sirve como punto de referencia para la evaluación posterior.

Tabla 2: Segunda caracterización final de los lodos

Ensayo	Unidad	Resultado	Método/Norma	Valor límite permisible
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	3045	Espectrofotométrico	-
Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días)	mg/L	2187	Espectrofotométrico	-
Coliformes fecales	NMP/g	< 1000	Fermentación en tubos múltiples	-
Arsénico	mg/L	0,92	AN-EMAPAG-10	-
Cadmio	mg/L	4,78	AN-EMAPAG-15	-
Cobre	mg/L	6,35	AN-EMAPAG-08	-
Cromo total	mg/L	8,00	AN-EMAPAG-13	-
Fosfatos	mg/L	9,75	AN-EMAPAG-17	-
Hierro total	mg/L	6,43	AN-EMAPAG-18	-

Níquel	mg/L	20,52	AN-EMAPAG-21	-
Nitratos	mg/L	39,43	AN-EMAPAG-22	-
Nitritos	mg/L	17,24	AN-EMAPAG-23	-
Plomo	mg/L	< 21	AN-EMAPAG-28	-
Zinc	mg/L	36,51	AN-EMAPAG-34	-
Sólidos totales	mg/L	900	AN-EMAPAG-33	-

La Tabla 2 exhibe los resultados de la segunda caracterización de los lodos, que repite los mismos parámetros y ensayos que se presentaron en la Tabla 1. Estos incluyen la Demanda Química de Oxígeno, la Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días), la concentración de Coliformes fecales y la presencia de varios metales y compuestos químicos. Al igual que en la primera caracterización, se emplearon métodos y normas específicas para llevar a cabo los ensayos, y los resultados se presentan en unidades adecuadas. Además, se comparan los valores obtenidos con los límites permisibles establecidos. La tabla, también realizada por Ibeth Bucheli en 2022, proporciona una visión actualizada de la calidad de los lodos después de la aplicación de algún proceso o tratamiento.

Tabla 3: Comparación de los resultados obtenidos con el Anexo I del libro XI del TULSMA

Parámetros	Límite máximo permisible	Resultado de análisis	Unidad
Comparación de límites permisibles de la primera caracterización			
Arsénico total	0,1	0,92	mg/l
Cadmio	0.02	4,78	mg/l
Zinc	5,0	36,51	mg/l

Cobre	1,0	6,35	mg/l
Coliformes fecales	2000	< 1500	NMP/ 100 ml
Cromo total	0,5	8,00	mg/l
Demanda Bioquímica de oxígeno	100	2281	mg/l
Demanda química de oxígeno	200	5175	mg/l
Níquel	2,0	20,52	mg/l
Plomo	0,2	39,43	mg/l
Potencial hidrógeno	6-9	6,42	
Sólidos suspendidos totales	130	-	mg/l
Sólidos totales	1600	730	mg/l
Temperatura	Condición natural +/- 3	14	°C
Comparación de límites permisibles de la segunda caracterización			
Arsénico total	0,1	0,92	mg/l
Cadmio	0.02	4,78	mg/l
Zinc	5,0	36,51	mg/l
Cobre	1,0	6,35	mg/l
Coliformes fecales	2000	< 1000	NMP/ 100 ml
Cromo total	0,5	8,00	mg/l

Demanda Bioquímica de oxígeno	100	2187	mg/l
Demanda química de oxígeno	200	3045	mg/l
Níquel	2,0	20,52	mg/l
Plomo	0,2	< 21	mg/l
Potencial hidrógeno	6-9	6,54	
Sólidos suspendidos totales	130	-	mg/l
Sólidos totales	1600	900	mg/l
Temperatura	Condición natural +/- 3	13	°C

La Tabla 3 tiene como objetivo principal contrastar los resultados de las caracterizaciones de los lodos, tanto la primera como la segunda, con los límites máximos permisibles establecidos por el Anexo I del libro XI del TULSMA u otras normativas relevantes. Los parámetros evaluados incluyen la presencia de diversos metales, la concentración de Coliformes fecales, la Demanda Bioquímica de Oxígeno, la Demanda Química de Oxígeno, el Potencial de Hidrógeno y otros. Los valores obtenidos se comparan con los límites máximos permitidos, permitiendo determinar si los lodos cumplen con los estándares establecidos por la normativa ambiental vigente. La tabla presenta los resultados en diferentes unidades, como mg/L, NMP/100 ml y oC (grados Celsius). Esta información es crucial para evaluar la conformidad ambiental de los lodos y tomar decisiones informadas sobre su gestión.

Tabla 4: Comparación de los resultados obtenidos con la Norma Oficial Mexicana N04004-SERMANAT-2002

Contaminante	Excelente (mg/Kg)	Bueno (mg/Kg)	Resultado	
Arsénico	41	75	0,92	0,92
Cadmio	39	85	4,78	4,78
Cromo	1200	3000	8,00	8,00
Cobre	1500	4300	6,35	6,35
Plomo	300	840	< 21	< 21
Mercurio	17	57	-	-
Níquel	410	420	20,52	20,52
Zinc	2800	7500	36,51	36,51

La Tabla 4 presenta una comparación detallada de los resultados obtenidos en el análisis de diversos contaminantes presentes en los lodos con los estándares establecidos por la Norma Oficial Mexicana N04004-SERMANAT-2002. Se evalúan varios contaminantes, incluyendo Arsénico, Cadmio, Cromo, Cobre, Plomo, Mercurio, Níquel y Zinc. Para cada contaminante, se indican los rangos de calidad definidos por la norma, que van desde "Excelente" a "Bueno" en términos de concentración (mg/Kg). Luego, se presentan los resultados obtenidos en los lodos, mostrando si se encuentran dentro de los límites aceptables. Es importante destacar que en el caso del Plomo y el Mercurio, los resultados son inferiores a los límites permitidos, lo que indica una conformidad satisfactoria con la normativa ambiental. Esta tabla proporciona una evaluación precisa de la calidad de los lodos en relación con los parámetros específicos establecidos por la normativa mexicana aplicable.

Tabla 5: *Tabla comparativa de resultados bacteriológicos*

Clases	Indicador Bacteriológico de contaminación	Primera caracterización	Segunda caracterización
	Coliformes fecales NMP/g		
A	Menor de 1000	< 1500	
B	Menor de 1000		< 1000
C	Menor de 2 000 000		

En la Tabla 5 se muestra una comparativa de los resultados bacteriológicos obtenidos en las dos caracterizaciones realizadas. Se evalúa el indicador bacteriológico de contaminación, que corresponde a la concentración de Coliformes fecales, expresada en NMP/g (número más probable por gramo). Los valores se presentan para las Clases A, B y C. En la primera caracterización, los valores se encuentran dentro de las Clases A y B, mientras que en la segunda caracterización, los resultados también están en las Clases A y B, indicando niveles aceptables de contaminación bacteriológica en ambos casos.

La tabla 6 presenta las clases de aprovechamiento de los lodos y biosólidos, con sus respectivos tipos y descripciones de uso asociadas a cada clase. Las clases se denominan "Excelente" o "Excelente o Bueno," y se asignan a diferentes usos urbanos, usos forestales, mejoramiento del suelo y usos agrícolas. Las condiciones y restricciones de uso varían según la clase asignada.

Tabla 6: *Aprovechamiento de los lodos y biosólidos*

Tipo	Clase	Aprovechamiento
Excelente	A	Usos urbanos con contacto publico directo durante su aplicación Los establecidos para la clase B y C
Excelente o Bueno	B	Usos urbanos sin contacto publico directo durante su aplicación Los establecidos para la clase C
Excelente o Bueno	C	Usos forestales Mejoramiento de suelo Usos agrícolas

Fuente: (Norma Ofical Mexicana N04-004-SERMANAT-2002, 2003).

Tabla 7: *Eficiencia remocional de los procesos de tratamiento*

Proceso	Eficiencia remocional							
	SS	DBO	DQO	NH3	Norg	NO3	PO4	STD
Asimilación bacteriana	80-50	75-95	60-80	30-40	30-40	30-40	10-20	
Precipitación química	60-80	75-90	60-70	5-15	60-50		90-95	20
Aplicación en suelo	95-98	80-98	80-90	60-80	80-95	5-15	60-90	

Fuente: (Muñoz Tobar, 2017).

La Tabla 7 presenta información sobre la eficiencia de remoción de diferentes contaminantes en procesos de tratamiento de lodos y biosólidos. Cada fila de la tabla corresponde a un proceso de

tratamiento específico, mientras que las columnas representan diferentes contaminantes o parámetros evaluados.

CONCLUSIONES

Mediante la realización de caracterizaciones exhaustivas del lodo recolectado por el vehículo hidrosuccionador de la E.P. EMAPA-G, se ha posibilitado una evaluación en profundidad en comparación con los límites permisibles para la descarga de agua en cuerpos de agua dulce, específicamente el río Chimbo. Este último, se ha visto afectado por procesos de lixiviación, lo que motiva la necesidad de comprobar la idoneidad de los parámetros analizados. Se ha constatado que varios de estos parámetros, tales como la demanda química de oxígeno, la demanda bioquímica de oxígeno, los sólidos totales y la presencia de metales como arsénico, cadmio, cobre, zinc, cromo, plomo y coliformes fecales, exhiben valores que superan los límites permisibles estipulados por las normativas pertinentes. En contraste, el potencial de hidrógeno y la temperatura se mantienen dentro de los rangos considerados normales en este contexto.

La comparación adicional de los valores obtenidos con los límites fijados por la Norma Oficial Mexicana, particularmente en relación a los metales pesados presentes y los indicadores biológicos, arroja resultados más favorables en cuanto a la presencia de metales, ya que ninguno de ellos excede los límites permisibles establecidos. Sin embargo, persiste la problemática relacionada con los coliformes fecales, que, en calidad de indicadores biológicos, aún superan los valores aceptables. La mencionada norma constituye un marco regulatorio que busca evaluar las características del lodo con el propósito de proporcionar un tratamiento adecuado que permita su uso y aprovechamiento posterior.

En última instancia, se concluye que, una vez sometido a los procesos de tratamiento propuestos, este lodo resultante puede

destinarse con provecho a un uso de índole urbana, lo que contribuirá al mejoramiento de las propiedades del terreno donde sea aplicado, dado su contenido rico en nutrientes.

Las caracterizaciones iniciales, realizadas con detenimiento, han permitido la formulación de procesos adecuados para reducir la presencia de contaminantes presentes, respaldados por pruebas de tratabilidad, lo que ha facilitado la posterior implementación de un sistema de tratamiento de lodos diseñado para manejar un caudal de 405,216 m³/d, cantidad que es recolectada en su totalidad por el vehículo de recolección. Este sistema comprende un proceso de espesamiento, llevado a cabo mediante un espesador por gravedad con una capacidad de 34 m³, seguido por una etapa de estabilización, que se materializa mediante la digestión anaerobia con la utilización de dos unidades de filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA), con una capacidad conjunta de 372 m³ y una estimación de remoción del 94%. Posteriormente, se ejecuta un proceso de acondicionamiento químico, que involucra la utilización de Policloruro de aluminio y cloro gas, con la ayuda de un tanque mezclador de turbina radial. A continuación, el lodo es sometido a un proceso de deshidratación mediante un filtro banda adquirido con ese propósito, lo que conduce a la obtención de una torta de lodo lista para su evacuación definitiva. Dicha torta de lodo se aplicará al terreno, con la particularidad de que ha sido sometida a procesos de estabilización y acondicionamiento, lo que la hace apta para ser utilizada en un proceso posterior de vermicompostaje, destinado a su uso como abono o enmienda orgánica en áreas contiguas a la planta de tratamiento.

Por último, tras la obtención de los cálculos de ingeniería pertinentes para las unidades de tratamiento, el sistema de tratamiento de lodos ha sido dimensionado de manera minuciosa y precisa mediante el empleo de la herramienta informática AutoCAD.

REFERENCIAS

- Edson Baltazar, E.-A., Petia, M.-N., Gabriela, M.-C., Gabriela, M.-M., Norma, R.-S., & Manuel, S.-Z. (2013). Presencia y tratamiento de compuestos disruptores endócrinos en aguas residuales de la Ciudad de México empleando un biorreactor con membranas sumergidas. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 14(2), 275–284. [https://doi.org/10.1016/S1405-7743\(13\)72242-X](https://doi.org/10.1016/S1405-7743(13)72242-X)
- Espinosa-Rodríguez, M. A., & Fall, C. (2015). Optimization de la producción de lodos en un sistema de lodos activados a través de la calibración del modelo ASM1. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 16(1), 93–104. [https://doi.org/10.1016/S1405-7743\(15\)72110-4](https://doi.org/10.1016/S1405-7743(15)72110-4)
- Gómez-Anaya, J. A., Novelo-Gutiérrez, R., & Astudillo-Aldana, M. R. (2017). Efecto de las descargas domésticas y de beneficio de café sobre la calidad del agua y la diversidad de larvas de Odonata (Insecta) en un arroyo de bosque mesófilo de montaña en Veracruz, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 88(2), 372–380. <https://doi.org/10.1016/J.RMB.2017.03.004>
- Guevara Alban, G. P., Verdesoto Arguello, A., & Castro Molina, N. E. (2020). Metodologías de investigación educativa (descriptivas, experimentales, participativas, y de investigación-acción). *RECIMUNDO*, 4(3), 163–173. [https://doi.org/10.26820/RECIMUNDO/4.\(3\).JULIO.2020.163-173](https://doi.org/10.26820/RECIMUNDO/4.(3).JULIO.2020.163-173)
- Jiménez Aldana, M. (2017). Integral Network Management: A Case Study of Bogotá and the Empresa de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Bogotá, EAB ESP. *Procedia Engineering*, 186, 654–665. <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2017.03.282>
- Cajacuri, M. P., Rincón, N., Behling, E., Colina, G., Marín L, J. C., & Araujo, I. (2013). Diversidad microbológica del lodo anaerobio durante el tratamiento de aguas de producción petroleras

- venezolanas. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 14(3), 325–334. [https://doi.org/10.1016/S1405-7743\(13\)72247-9](https://doi.org/10.1016/S1405-7743(13)72247-9)
- Rodríguez-González, M. R., Molina-Burgos, J., Jácome-Burgos, A., & Suárez-López, J. (2013). Humedal de flujo vertical para tratamiento terciario del efluente físico-químico de una estación depuradora de aguas residuales domésticas. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 14(2), 223–235. [https://doi.org/10.1016/S1405-7743\(13\)72238-8](https://doi.org/10.1016/S1405-7743(13)72238-8)
- Peña-Álvarez, A., & Castillo-Alanís, A. (2015). Identificación y cuantificación de contaminantes emergentes en aguas residuales por microextracción en fase sólida-cromatografía de gases-espectrometría de masas (MEFS-CG-EM). *TIP*, 18(1), 29–42. <https://doi.org/10.1016/J.RECQB.2015.05.003>
- Rojas-Morales, J. L., Gutiérrez-González, E. C., & Colina-Andrade, G. de J. (2016). Obtención y caracterización de carbón activado obtenido de lodos de plantas de tratamiento de agua residual de una industria avícola. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 17(4), 453–462. <https://doi.org/10.1016/J.RIIT.2016.11.005>
- Sampieri, R. H., Collado, C. F., Lucio, P. B., Valencia, S. M., & Torres, C. P. M. (2014). *Metodología de la investigación* (6th ed.). McGraw-Hill Education.
- Vilanova, R., Santín, I., & Pedret, C. (2017). Control en Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales: Estado actual y perspectivas. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 14(4), 329–345. <https://doi.org/10.1016/J.RIAI.2017.09.001>