



Diseño de dos humedales artificiales a escala de laboratorio para el tratamiento del lodo proveniente de una planta de tratamiento de agua residual doméstica

Betty Nayely España Bolaños¹

Tatiana Mañunga²

Paola Ortega Guerrero³

Resumen

Los humedales artificiales para tratamiento de lodos, conocidos como lechos de secado plantados, consisten en zanjas poco profundas, rellenas de grava y plantadas con macrófitas, las cuales representan una alternativa para plantas de tratamiento de agua residual que no tienen un tratamiento de lodos, como el caso de la vereda La Floresta, en Gualmatán, Nariño y, aunque han sido usados por más de 20 años, no existen guías estandarizadas para su diseño. Por lo descrito, a través de una búsqueda bibliográfica se identificó las variables para diseñar un humedal a escala laboratorio para el tratamiento del lodo generado en esta planta. Los resultados mostraron que este tipo de humedales se dimensiona a partir de la tasa de carga expresada en sólidos ($30 - 250 \text{ kg ST/m}^2 \cdot \text{año}$) o área per cápita ($1.5 - 4.0 \text{ hab/m}^2$). Finalmente, adoptando el criterio de área per cápita se estableció que, a escala real, se requiere un área de 1059 m^2 para tratar el lodo generado por la población de la cabecera municipal (2117 habitantes) que, llevado a escala laboratorio, es 0.50 m^2 (Población = 1.0 habitante).

Palabras clave: humedales; lodos de PTAR; totora; medio filtrante.

¹ Programa de Ingeniería ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad Mariana, Colombia. Correo. bespana@umariana.edu.co

² Docente, Universidad Mariana, Colombia. Correo tmanunga@umariana.edu.co

³ Programa de Ingeniería ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad Mariana. Correo electrónico: portega@umariana.edu.co



Introducción

La gestión de lodos provenientes de aguas residuales (AR) es importante debido a que estos subproductos representan del 1 % al 2 % del caudal de agua residual. Además, constituyen del 20 % al 60 % de los costos operativos de las plantas de tratamiento de aguas residuales convencionales (PTAR) (Uggetti et al., 2010).

Los lodos generados en una PTAR deben ser estabilizados antes de su disposición o uso final dado que, si son vertidos de forma directa en fuentes hídricas, pueden consumir gran cantidad de oxígeno disponible para la vida acuática en las aguas receptoras. Además, por su contenido de fósforo y nitrógeno, pueden generar un crecimiento excesivo de plantas acuáticas, conllevando la eutrofización de las fuentes hídricas receptoras (Brix, 2017). Por otro lado, si son entregados al relleno sanitario para su disposición final, incrementan los costos de mantenimiento de las PTAR y, además, se acelerará la colmatación del relleno sanitario, reduciendo su vida útil (Mancipe-Arias y Triviño-Restrepo, 2018).

A partir del tratamiento de lodos residuales, se promueve su aprovechamiento y uso eficiente ya que, al estar estabilizados, pueden ser empleados en actividades como agricultura, relleno de tierra, fertilizantes y silvicultura (Rojas y Espinosa, 2012).

Según Magloire y Tilley (2009), los lechos de secado plantados (LSP), conocidos como humedales artificiales para tratamiento de lodos, han sido empleados en Europa, África y Estados Unidos, como alternativa muy buena para secar y estabilizar los lodos en pequeñas comunidades; logran reducir entre el 30 y el 90 % de sólidos y agua y, de 59 a 99 % los nutrientes orgánicos; permiten el manejo de cargas elevadas, especialmente en climas de zonas tropicales. Además, el costo de inversión es bajo para plantas pequeñas y la operación es simple; solo requiere atención esporádica; pueden ser construidos y reparados con materiales disponibles localmente; no demandan energía eléctrica y presentan baja sensibilidad a la variación de los lodos.

Adicionalmente, los humedales artificiales proporcionan ventajas tales como el espesamiento y reducción del volumen del lodo, proceso que se da gracias a la presencia de plantas macrófitas en el humedal, las cuales absorben un porcentaje del agua y evapotranspiran otro porcentaje (Smart Water Summit, 2022). A esto se añade que, el movimiento natural de las plantas, generado por el viento, junto con el crecimiento de las raíces, provoca el drenaje del agua alrededor de los tallos; a medida que las plantas crecen, rompen y aflojan los lodos que se acumulan. Además, por la presencia de microorganismos benéficos, se produce la estabilización de la materia orgánica del lodo. Para el crecimiento de estos microorganismos, los rizomas son muy importantes, ya que la rizosfera es el área alrededor de las raíces, donde existe una mayor concentración de oxígeno; es un espacio amplio para el crecimiento de bacterias benéficas (Brix, 2017). En los humedales artificiales también se genera procesos de recuperación de nitrógeno



y fósforo, función de las plantas como la totora, ya que ellas facilitan el reciclaje de este tipo de macronutrientes (Magloire y Tilley, 2009).

Por sus características, los humedales artificiales representan una alternativa viable para el tratamiento de lodos generados en la PTAR ubicada en la vereda La Floresta en el municipio de San Francisco del Líbano de Gualmatán (Nariño). Esta PTAR inició su operación en el año 2018 y, actualmente, reporta eficiencias del 90 % en reducción de carga orgánica (Alcaldía Municipal de Gualmatán - Nariño, 2020). Sin embargo, los lodos son entregados a la Empresa Metropolitana de Aseo de Pasto SA ESP (EMAS) para su disposición final, dado que la planta no cuenta con una unidad o componente para su tratamiento y/o estabilización. Las actividades de operación indican que es necesaria una extracción periódica de lodos, dos veces al año o cuando se presenta un exceso; no hacerlo ha provocado que, en ocasiones, se haga una disposición incorrecta de este residuo en el suelo, generando un lixiviado altamente contaminante, que no solo emite malos olores, sino que incrementa la presencia de vectores y roedores, lo que puede ser nocivo para los ecosistemas y la salud de la población cercana a la PTAR (Alcaldía Municipio de Gualmatán, 2018).

En concordancia con lo anterior, el objetivo de esta investigación fue diseñar un humedal artificial a escala laboratorio, para ser evaluado como alternativa para la reducción de humedad, coliformes fecales y totales, conductividad, sólidos volátiles, sólidos totales, sólidos disueltos, nitrógeno total, nitritos, nitratos y aumento del pH en lodo generado por la PTAR.

Materiales y Métodos

Descripción de la Zona de Estudio

La PTAR de la quebrada Philisipi (Figura 1), se localiza en la vereda La Floresta, municipio de Gualmatán; tiene un área aproximada de 1600 metros cuadrados. Dada su ubicación en lo alto de los Andes, se puede distinguir dos tipos de clima: el frío, entre los 2.450 y 3.000 m s.n.m., con temperaturas de entre 10 °C y 11,6 °C y con un régimen de lluvias de entre 500 mm y 1000 mm anuales; y el páramo, de más de 3.000 m s.n.m., con una temperatura de entre 6 °C y 10 °C y lluvias que van desde los 1000 mm hasta los 1100 mm anuales; la población de la cabecera municipal de Gualmatán es de 2257 habitantes (Alcaldía Municipal de Gualmatán - Nariño, 2020).



Figura 1

Fotografía de la PTAR de Gualmatán



La PTAR es de tipo convencional; funciona por gravedad; recibe las AR provenientes de un alcantarillado combinado, producto del 87 % de la totalidad de aguas servidas del municipio de Gualmatán; el caudal de ingreso es de 7.6 l/s. La PTAR presenta diferentes procesos químicos, físicos y biológicos, para eliminar los contaminantes presentes en el agua efluente del uso humano (Alcaldía Municipio de Gualmatán, 2018).

El tren de tratamiento es un sistema de tratamiento preliminar y primario compuesto por unas rejillas, un desarenador y un tanque séptico; y, como tratamiento secundario, un filtro anaerobio de flujo ascendente; posee unos lechos de secado, como se aprecia en la Figura 2. Sin embargo, actualmente no están en funcionamiento de forma eficiente, debido a que el medio filtrante se encuentra colmatado.

Figura 2

Lechos de secado



En cuanto a su estructura, sus dimensiones son: 2.10 m de ancho, 3.70 m de largo y 1,70 m de profundidad. La extracción de lodos se realiza dos veces en el año, para evitar su colmatación y dar paso a que el porcentaje de lodo tratado sea mayor.

Descripción del muestreo del lodo de la PTAR de Gualmatán

Para el desarrollo del proyecto, se hizo una caracterización inicial, donde se dividió el lecho en tres secciones; se tomó tres muestras superficiales y otras tres muestras a una profundidad de 50 cm (Figuras 3 y 4). Luego fueron homogenizados los tres puntos tomados en superficie y, depositados en un recipiente que ya había sido purgado; lo mismo se hizo para los tres puntos tomados a profundidad. Para la determinación de los parámetros fisicoquímicos en laboratorio se tomó tres muestras: una, correspondiente a la superficie, otra de profundidad y una tercera muestra de mezcla entre profundidad y superficie.

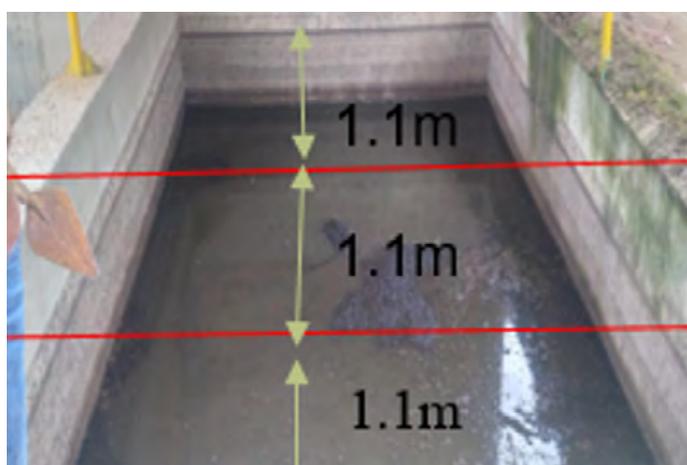
Figura 3

Lodo proveniente de la PTAR de Gualmatán



Figura 4

Muestreo del lodo





Caracterización del lodo

Posteriormente, se realizó la determinación de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del lodo (Figuras 5 y 6) en el campus Alvernia de la Universidad Mariana, ubicado a 1 km de la ciudad de Pasto, en el corregimiento de Mapachico. Con los resultados obtenidos se llevó a cabo la caracterización del lodo, teniendo en cuenta el Decreto 1287 de 2014, en cuanto al manejo de biosólidos.

Para la determinación de estos parámetros se siguió la metodología estándar de métodos sobre calidad del agua; los parámetros fueron: porcentaje de humedad, coliformes fecales y totales, conductividad, sólidos volátiles, sólidos totales, sólidos suspendidos, nitrógeno total, nitritos, nitratos y el pH.

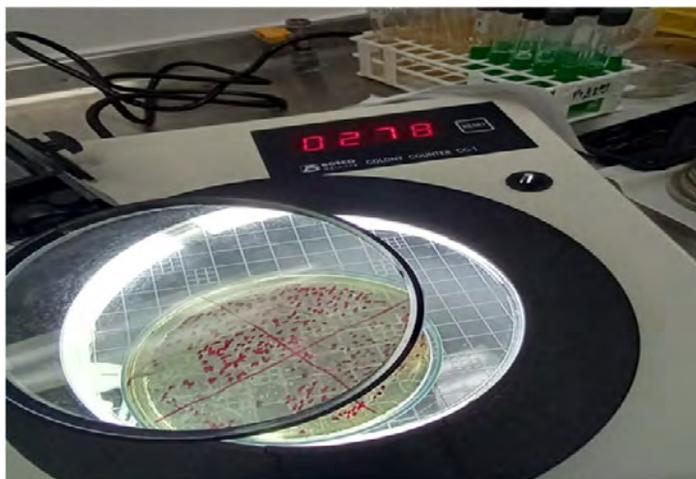
Figura 5

Caracterización fisicoquímica del lodo



Figura 6

Caracterización microbiológica del lodo





Metodología para la identificación de variables de diseño

La identificación de las principales variables de diseño para el lecho plantado se realizó a través de las bases de datos de Redalyc, Scopus, Science direct; las frases clave de búsqueda fueron: *drying beds for sludge with plants* y *wetlands for sludge treatment*. Posteriormente, para el dimensionamiento de los lechos plantados, se tuvo en cuenta los resultados obtenidos en la identificación de las principales variables de diseño, en donde se encontró el valor del área de los lechos plantados mediante la ecuación tasa de carga basada en el área per cápita.

La construcción del humedal a escala laboratorio se realizó en el campamento de suelos en la Universidad Mariana, Campus Alvernia, el cual tiene una extensión aproximada de ocho hectáreas y consta de cinco bloques y diez espacios deportivos.

Resultados y análisis sobre la caracterización del lodo

Con relación a la caracterización fisicoquímica y microbiológica del lodo, se obtuvo los siguientes resultados:

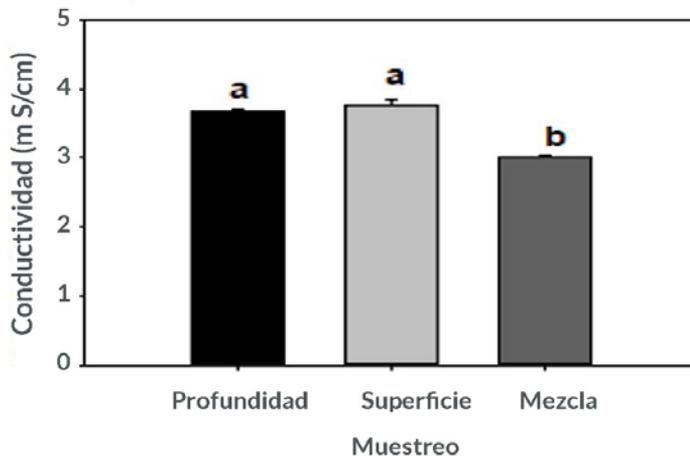
- **Conductividad y pH**

La conductividad indica la cantidad de sales solubles; si hay demasiadas sales en los suelos, las plantas no pueden absorber el agua o nutrientes. El estudio es de suma importancia para las plantas de totora dado que, si existen grandes cantidades de sales a estas se les dificultará la asimilación de nutrientes y de agua; además, si se quiere utilizar el lodo tratado en cultivos, esta variable puede ser un limitante. En algunas caracterizaciones de lodo, la conductividad va desde los 0.88-6.7 mS/cm, (Castellanos-Rozo et al., 2018); si se sobrepasa los 4 mS/cm, se puede limitar el desarrollo de algunas plantas (Intagri, 2018). La conductividad en la Figura 7 no presenta grandes variaciones; los rangos oscilan entre los 3 a 4 mS/cm; sin embargo, en los tres puntos de muestreo hubo diferencias significativas, según el análisis de Tukey: los puntos de profundidad y superficie no evidenciaron diferencias significativas, pero, el punto de mezcla sí, debido a que la muestra de mezcla se tuvo almacenada en un recipiente con mayor volumen y hermeticidad, respecto al recipiente de profundidad y superficie.

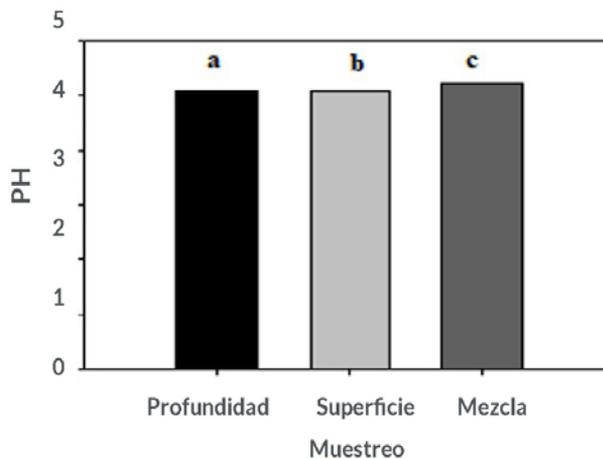
El pH del lodo es la medida de la acidez o basicidad del mismo; afecta directamente la disponibilidad de nutrientes en el lodo (Kluepfel et al., 2012). La determinación del pH es esencial en este estudio, debido a que, generalmente, los lodos provenientes de las PTAR presentan valores de pH muy ácidos que deben ser estabilizados, incrementado el valor del pH (Galvis y Rivera, 2013); los rangos de pH del lodo van de 5.5 a 9 (Castellanos-Rozo et al., 2018). En la Figura 8 se observa que hay diferencias significativas en los tres puntos de muestreo; considerando el análisis de Tukey, se presentó un rango de pH de 5 a 5.2. El valor más alto de pH estuvo en la muestra de mezcla; es decir, que el lodo presenta un pH ácido, el cual, según Ruiz y Quevedo (2017) debe encontrarse entre 6.5 y 8.

**Figura 7**

Conductividad de los lodos provenientes de la PTAR

**Figura 8**

pH de los lodos provenientes de la PTAR

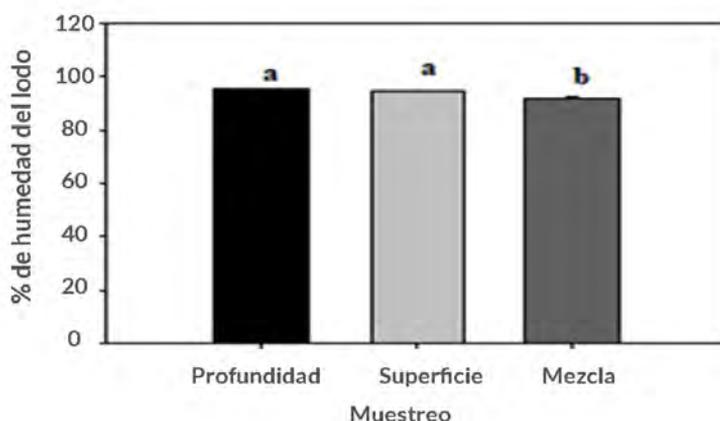


- **Humedad**

Cualquier materia está compuesta por dos fracciones primarias: materia seca y, cierta cantidad de agua. En los lodos, la cantidad de agua es fundamental para la determinación de la reducción del volumen de los mismos, debido al espacio que ocupan en el tratamiento; y, sirven para la determinación de la eficiencia del lecho de secado en presencia de plantas (Galvis y Rivera, 2013). Los rangos de porcentaje de humedad van del 72 al 97 % (Torres-Lozada et al., 2015; Castellanos-Rozo et al., 2018).

Figura 9

Humedad de los lodos provenientes de la PTAR



El parámetro de humedad es significativo ya que, al reducir la humedad, se reduce el volumen del lodo, ya que este tiene un coste/ m³; por lo tanto, se generaría una reducción de costos significativos (Martínez, 2008).

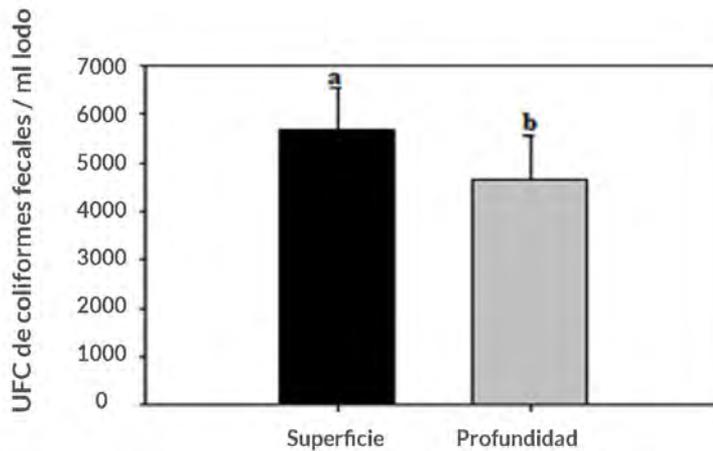
En la Figura 9 se observa que el porcentaje de humedad en el lodo es mayor al 90 %, lo que concuerda con los estudios de Torres-Lozada et al. (2015) y Castellanos-Rozo et al. (2018) sobre los rangos de humedad. Según el análisis de Tukey, en los puntos de superficie y profundidad no hubo diferencias significativas en el porcentaje de humedad.

- **Coliformes totales y fecales**

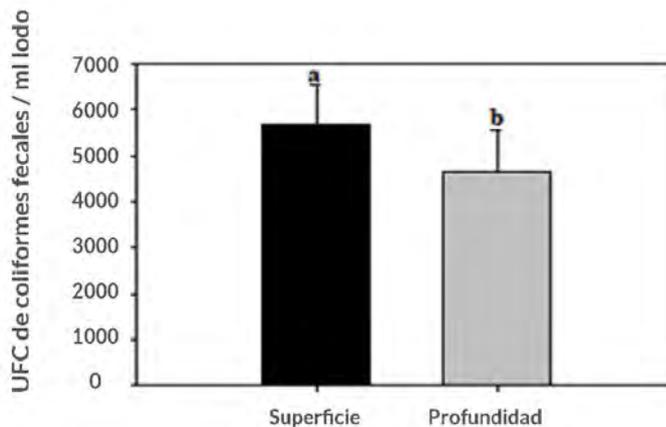
Son bacterias aerobias y anaerobias facultativas; tienen forma de bacilos cortos; son patógenas; están presentes en los lodos provenientes de AR; pueden ser dispersadas por la acción del viento y vectores; pueden habitar en el intestino de los humanos y otros mamíferos, razón por la cual, en varias oportunidades han desatado brotes de infecciones a nivel mundial (Galvis y Rivera, 2013). Su determinación en laboratorio se realizó según el estándar de métodos: se tomó 10 ml de muestra de superficie y 10 ml de muestra del lodo a profundidad; para efectuar el conteo en cajas Petri se hizo cinco diluciones de la muestra, que fueron sembradas en dos medios y con dos técnicas de siembra. La determinación del número más probable de colonias se ejecutó en tubos de ensayo. La presencia de organismos patógenos en este estudio, las coliformes fecales, implica que se dificultó el aprovechamiento y disposición final de los lodos (Mancipe-Arias y Triviño-Restrepo, 2018).

**Figura 10**

Coliformes fecales de los lodos provenientes de la PTAR

**Figura 11**

Coliformes totales de los lodos provenientes de la PTAR



En el parámetro de coliformes fecales (Figura 10) se evidencia que las unidades formadoras de colonias sobrepasan el límite máximo permisible que es de, 2000 UFC/g, según el Decreto 1287 de 2014. También se observa que, la cantidad de coliformes fecales fue mayor en el punto de superficie.

En cuanto a coliformes totales (Figura 11), se aprecia que hubo una menor cantidad de UFC/ml en el muestreo de la superficie del lodo, respecto al muestreo de profundidad; esto se debe a que puede haber mayor acumulación de sustrato en la profundidad del lodo, lo que genera mejores condiciones para las bacterias.

- **Sólidos totales y volátiles**

Los sólidos totales (Figura 12) son los que quedan como residuos después de una evaporación de 103 a 105 °C; es la cantidad de fracción sólida que sale de cada tratamiento en la PTAR.



Por otra parte, los sólidos volátiles, como son presentados en la Figura 13, indican la fracción orgánica de los sólidos contenidos en los lodos y el grado de digestión que estos ostentan; su medición es importante debido a que la materia orgánica es un sustrato para el crecimiento de microorganismos y la proliferación de fauna nociva (Mancipe-Arias y Triviño-Restrepo, 2018).

Figura 12

Sólidos totales de los lodos provenientes de la PTAR

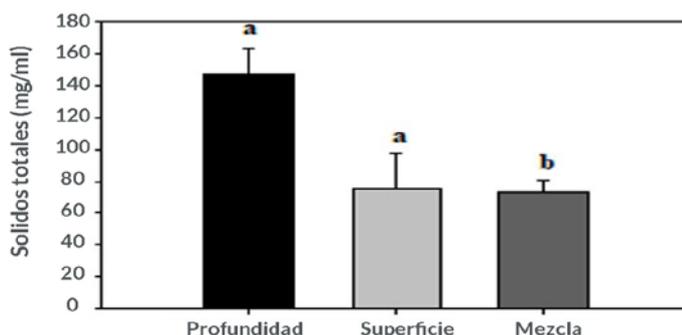
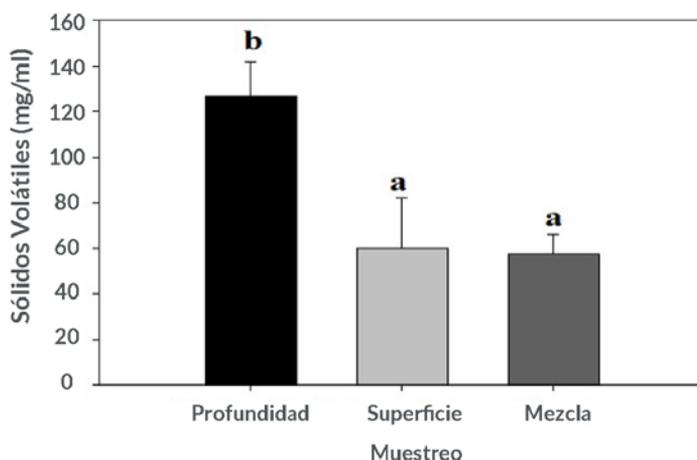


Figura 13

Sólidos volátiles de los lodos provenientes de la PTAR



En la Figura 13 se evidencia que, la concentración de sólidos volátiles en las muestras de superficie y de mezcla, contienen una menor concentración con respecto a la muestra de profundidad dado que, en la parte superficial del lecho de secado hay una menor concentración de sólidos.

Igualmente, se evidencia que la concentración de sólidos totales con respecto a un litro de muestra de lodo (Figura 12), fue mayor en la muestra de profundidad, debido a que en la profundidad del lecho hay mayor acumulación de sólidos.

- **Nitrógeno total Kjeldahl y nitratos**

Los lodos pueden contener materia orgánica biodegradable, nitrógeno, fósforo y otros micronutrientes, que lo convierten en enmienda orgánica, con un debido tratamiento. El nitrógeno total determina las oportunidades del uso final de los lodos y el tratamiento necesario para el efluente. Es factible recuperar el nitrógeno (N) y el fósforo (P) para usos benéficos, pero si son descargados de forma desordenada al ambiente, pueden causar daños al suelo y al agua. No obstante, en el estudio son fundamentales, ya que son nutrientes que ayudan al crecimiento de las plantas en el humedal artificial (Hanna Instruments, 2020).

Referente a los nitratos, aproximadamente el 90 % del nitrógeno que absorben las plantas está en forma de ellos. Estos pueden llegar al suelo de tres formas: a través de fertilizantes, por descomposición de materia orgánica y, por estiércol animal; en el caso del estudio, fue por el estiércol de humanos (Grupo Sacsá, 2015). Generalmente, en los lodos, los nitratos van de rangos de 0.18 a 4.81 mg/l. (Bari et al., 2012).

Figura 14

Nitrógeno total Kjeldahl de los lodos provenientes de la PTAR

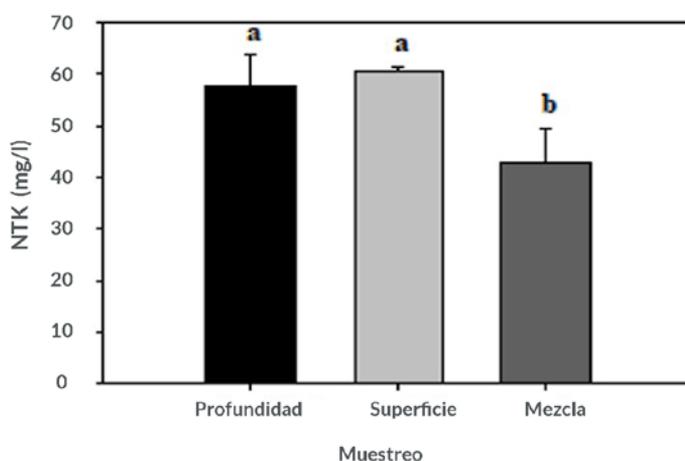
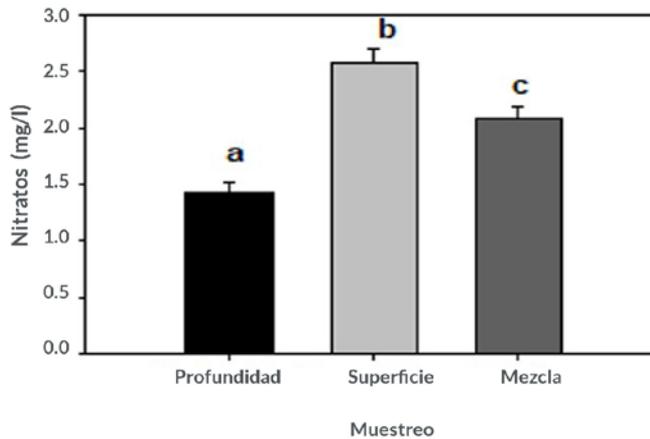




Figura 15

Nitratos en (mg/l) de los lodos provenientes de la PTAR



Según el análisis de Tukey, no hubo diferencias significativas en los tres puntos de muestreo en cuanto a la concentración del nitrógeno total Kjeldahl; es decir, que los dos puntos de superficie y profundidad tuvieron una buena concentración, la cual fue de 42 a 60 mg/l.

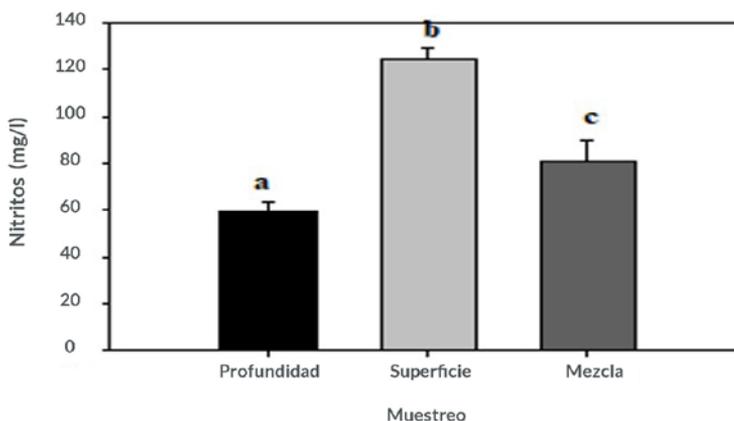
Los nitratos son necesarios para el crecimiento de las plantas. En el caso del estudio, para el crecimiento de las plantas de totora, el rango de nitratos fue de 1.4 a 2.5 mg/l; la mayor concentración de los mismos se presentó en la muestra de superficie.

- **Nitritos y sólidos suspendidos**

Generalmente, los nitritos no se acumulan, pues varios microorganismos los transforman rápidamente a nitratos (Grupo Sacsá, 2015); estos van de rangos de 0 a 0.82 mg/l (Bari et al., 2012).

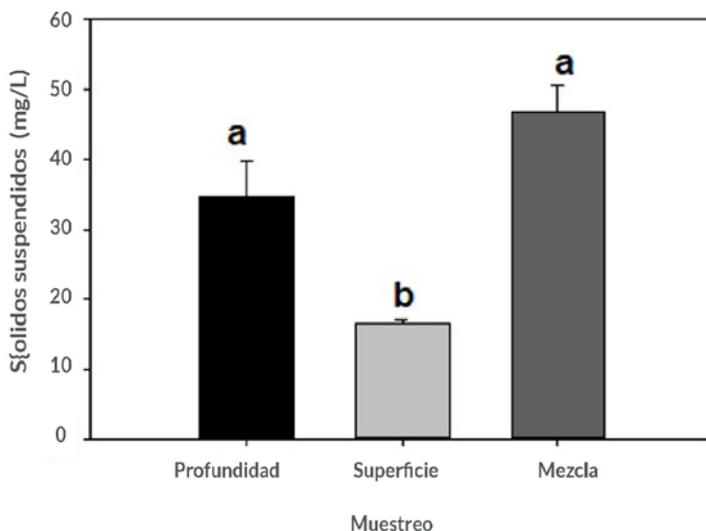
Figura 16

Nitritos en (mg/l) de los lodos provenientes de la PTAR



**Figura 17**

Sólidos suspendidos (mg/l) de los lodos provenientes de la PTAR



Los nitritos son compuestos del nitrógeno que es usado por las plantas. En el caso de estudio, por las plantas de totora, las cuales lo absorben y, posteriormente, lo devuelven en forma de gas al aire; el rango de nitritos fue de (mg/l); los rangos van de 59 a 124 mg/l.

Encuanto a los sólidos suspendidos, se evidencia que hubo una mayor concentración en la muestra de mezcla; se aprecia diferencias significativas en las muestras de profundidad y superficie, con respecto a la muestra de mezcla.

Resultados y análisis de la caracterización del lodo

Como se evidencia en el Decreto 1287 de 2014 en cuanto a coliformes fecales, los lodos caracterizados no se ubican en ninguna categoría, ya que sobrepasan las 2000 UFC/g en base seca de biosólido; el objetivo de la implementación del lecho plantado es llevar a estos lodos a una categoría B, en la cual pueden ser empleados: en agricultura, plantaciones forestales, en la recuperación, restauración o mejoramiento de suelos degradados, como insumos en procesos de elaboración de abonos o fertilizantes orgánicos o productos acondicionadores para suelos a través de tratamientos físicos, químicos y biológicos que modifiquen su calidad original. Sin embargo, para utilizarlos en estas actividades se debe reducir la cantidad de UFC de coliformes fecales, para que su valor esté entre el rango de lo que exige la norma, como se presenta en la Tabla 1.

**Tabla 1**

Valores máximos permisibles, categoría A y B en cuanto a coliformes fecales

Parámetro	Unidad de medida	Valores Máximos permisibles
Coliformes fecales	UFC/g biosólido en base seca	Categoría A. $<1 \cdot 10^3$
		Categoría B $<2 \cdot 10^3$

Nota: Manejo de biosólidos a raíz de la nueva normatividad en la PTAR río Frío, Bucaramanga (Santander).

Fuente: López (2015)

El tipo de lodo generado en la PTAR de Gualmatán es un lodo digerido, pues presentó un color negro, con olor a tierra; este se da en los procesos de digestión anaerobia y, en la PTAR se encuentra un filtro anaerobio de flujo ascendente. En cuanto a la cantidad de materia orgánica de los lodos digeridos, está entre un 45 y un 60 % (Lenntech, s.f.). En el estudio se observó valores de materia orgánica del 50 al 70 %. Estos resultados evidencian que los lodos contienen un buen porcentaje de materia orgánica; además, los parámetros de humedad cumplen con los valores típicos, que van por encima del 90 % (Metcalf y Eddy, 2014).

Resultados y análisis del diseño de los dos humedales artificiales a escala laboratorio

Con los resultados obtenidos en la identificación de las principales variables de diseño se encontró el valor del área de los humedales artificiales mediante la ecuación tasa de carga basada en el área per cápita (Tabla 2).

Tabla 2

Principales variables para el lecho plantado

Variables de diseño	Autor				
	Dotro et al. (2017)	Magri et al. (2016)	Panvatvarich et al. (2009)	Peruzzi et al. (2008)	Tshrinitzis y Stefanakis (2012)
Tasa de carga basada en área	200 a 250 kg ST/m ² *año	150 kg de sólidos totales/m ² *año	250 kg/m ² *año	30,60,75 kg/m ² *año	30, 60 y 75 kg dm/m ² /año



Tasa de carga basada en área per cápita	1.5 a 4 hab-eq/m ²	0.8 m ²	0.6 m ²	75 m ²	Tanques cilíndricos plásticos de 1.5 m de altura, diámetro de 0.82 m
Profundidad aproximada	2.5 m				
Medio filtrante	0.6 a 0.7 m	0.75 m			
Acumulación de lodos	1.7 a 1.8 m	50 cm			
Periodo de vaciado	8 a 10 años				
Reducción de sólidos luego de tratamiento	20 a 40 %				
Reducción de volátiles	25 a 30 %				

Finalmente, se realizó el dimensionamiento del lecho plantado a escala real, teniendo en cuenta la población de la cabecera municipal de Gualmatán, obteniendo el área requerida del lecho plantado, mediante el parámetro de tasa de carga basada en área per cápita.

Tabla 3

Criterios de diseño para el lecho planteado a escala real.

Criterio	Rango recomendado	
Área equivalente	4	1.5 a 4 hab-eq/m ²
Población (Cabecera)	2257	Habitantes
Población (Laboratorio)	0,15	
Área requerida a escala real	564	m ²
Área requerida (laboratorio)	0,0375	m ²
Diámetro	0,22	M



Para el dimensionamiento del medio filtrante a escala laboratorio, se tuvo en cuenta una relación entre la altura total del lecho plantado a escala piloto, en torno al medio filtrante y, la altura de la capa de acumulación de lodos, en donde la capa de lodos representa un 70 % de la altura total del lecho plantado y el medio filtrante, el 30 %, como se presenta en la Tabla 4. Posteriormente, se aplicó esta relación a escala laboratorio, en donde se obtuvo que, la altura total del lecho a escala laboratorio, la acumulación de lodos y la capa filtrante, obtuvieron las dimensiones presentadas en la Tabla 5.

Tabla 4

Relación altura total del lecho plantado a escala piloto con la altura del medio filtrante y la altura de la capa de acumulación de lodos.

H (altura típica total del lecho plantado)	2,5	m
h1 medio filtrante	0,8	m
h2 acumulación de lodos	1,7	m
Relación h1/H	0,3	
Relación h2/H	0,7	

Tabla 5

Dimensiones lechos plantados a escala laboratorio

Dimensiones de los lechos plantados a escala laboratorio	Dimensiones	Unidades
Altura lechos plantados	0,4	m
Altura lechos plantados		
Diámetro	0,27	m
Área	0,06	m ²
Altura capa de acumulación de lodos (h2)	0.24	m
Altura medio filtrante (h1)	0.12	m
Altura total del lecho plantado(H)	0.36	m
Borde libre	0.04	m

Después, se hizo una relación de las capas de medio filtrante a escala piloto, considerando fuentes bibliográficas en donde se determinó que la capa de grava gruesa tenía un porcentaje aproximado del 57 % del espesor total del medio filtrante, un 29 % para el espesor de grava media y, un 14 % de grava fina, lo que a escala laboratorio representa unas dimensiones para el medio filtrante de 7 cm de grava gruesa, 3 cm de grava media y 2 cm de grava fina, como se presenta en la Tabla 6.

**Tabla 6**

Capas de medio filtrante, porcentaje espesor capa filtrante y diámetro de la granulometría y dimensiones a escala laboratorio del lecho plantado

Tipo de capa filtrante y diámetro de la granulometría	Escala piloto	Unidades	Porcentaje del espesor de la capa del medio filtrante	Dimensiones a escala laboratorio
Capa de drenaje, adoquín o piedras, diámetro 30 mm	40	cm	57 %	0.07 m
Grava mediana, diámetro 15 mm	20	cm	29 %	0.03 m
Grava fina, diámetro 6 mm	10	cm	14 %	0.02 m
h1 (Altura total medio filtrante)	70	cm	100 %	0.12 m
PVC de aireación	50	mm	Diámetro	0,00635

Con las dimensiones calculadas se realizó los planos del humedal a escala laboratorio en la herramienta AutoCAD. La implementación de los humedales se hizo en el campus de la Universidad Mariana, como se evidencia en la Figura 18.

Figura 18

Planos de los humedales en el software AutoCAD. Vista lateral del humedal

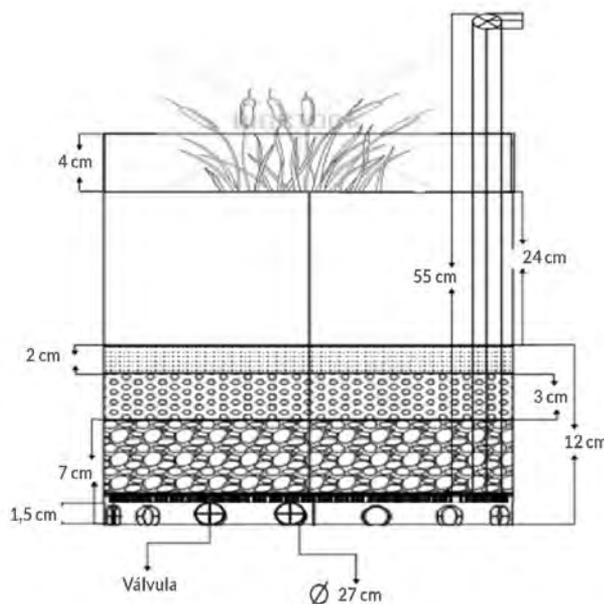




Figura 19

Humedales plantados a escala laboratorio



Conclusiones

El lodo proveniente de la PTAR del municipio de Gualmatán no cumple con los límites máximos permisibles, según el Decreto 1287 de 2014, en cuanto a coliformes fecales, por lo cual es necesario aplicar el tratamiento propuesto. La tasa de carga basada en área per cápita permite el dimensionamiento del lecho plantado. La construcción y funcionamiento del lecho es sencilla; no requiere gran inversión; se puede encontrar los materiales de forma fácil dentro del entorno local y, se puede ser utilizar en comunidades pequeñas.

Referencias

- Alcaldía Municipio de Gualmatán. (2018). Aguas residuales PTAR Floresta. <https://colombialicita.com/licitacion/84241547>
- Alcaldía Municipal de Gualmatán - Nariño. (2020). Plan de Desarrollo 2020-2023. <http://www.gualmatan-narino.gov.co/normatividad/plan-de-desarrollo-20202013>
- Bari, M., Shipon, A., Shuvo, B., Tathun, F., & Rasel, H. (2012). Characterization of septic tank sludge for using as a potential substrate for bio-products. *1st International Conference on Advances in Civil Engineering*. https://www.researchgate.net/publication/308306387_CHARACTERIZATION_OF_SEPTIC_TANK_SLUDGE_FOR_USING_AS_POTENTIAL_SUBSTRATE_FOR_BIO-PRODUCTS
- Brix, H. (2017). Sludge dewatering and mineralization in sludge treatment reed beds. *Water* 9(3), 2-9. <https://doi.org/10.3390/w9030160>



- Castellanos-Rozo, J., Merchán, N. A., Galvis, J. y Manjarres, E. H. (2018). Deshidratación de los lodos en lecho de secado y su influencia sobre la actividad biológica de los microorganismos. *Gestión y Ambiente*, 21(2), 242-251. <https://doi.org/10.15446/ga.v21n2.75876>
- Decreto 1287 de 2014. (2014, 10 de julio). Presidencia de la República de Colombia. <https://minvivienda.gov.co/normativa/decreto-1287-2014>
- Galvis, J. y Rivera, X. (2013). *Caracterización fisicoquímica y microbiológica de los lodos presentes en la planta de tratamiento de aguas residuales industriales (PTARI) de la empresa Jugos Hit de la ciudad de Pereira* [Tesis de Pregrado, Universidad Tecnológica de Pereira]. <https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/2157dcb6-205c-44ae-abfc-90b4c65d53e3/content>
- Grupo Sacsa. (2015). *Importancia de los nitratos y fosfatos*. <https://www.gruposacsa.com.mx/importancia-de-los-nitratos-y-fosfatos-en-las-plantas/>
- Hanna Instruments. (2020). Determinación de nitrógeno total Kjeldahl. <https://www.hannacolombia.com/blog/post/85/determinacion-nitrogeno-total-kjeldahl>
- Intagri. (2018). La conductividad eléctrica del suelo en el desarrollo de los cultivos. <https://www.intagri.com/articulos/suelos/la-conductividad-electrica-del-suelo-en-el-desarrollo-de-los-cultivos>
- Kluepfel, M., Lippert, B., y Williamson, J. (2012). Cambiando el pH del Suelo. <https://hgic.clemson.edu/factsheet/cambiando-el-ph-del-suelo/>
- Lenntech. (s.f.). Tratamiento biológico. <https://www.lenntech.es/tratamiento-biologico.htm>
- López, A. (2015). *Manejo de biosólidos a raíz de la nueva normatividad en la PTAR río Frío, Bucaramanga (Santander)*. [Tesis de Especialización, Universidad Militar Nueva Granada]. <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/6296/Trabajo%20final%20UMNG.pdf;jsessionid=8F04F89022A7E7769E51AA37FC31C567?sequence=1>
- Magloire, I. y Tilley, E. (2009). Lechos de secado con plantas. https://www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/Abteilungen/sandec/publikationen/EWM/FSM_Libro_low_res/manejo_fsm_cap8_120ppi.pdf
- Mancipe-Arias, L. M. y Triviño-Restrepo, M. P. (2018). Valoración de lodos de planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) como materia prima para la extracción de lípidos en la obtención de biodiesel. *Revista ION*, 31(1), 74-75 <http://dx.doi.org/10.18273/revion.v31n1-2018012>

- Martínez, A. (2008). *Reducción de volumen de lodos de planta de tratamiento de aguas urbanas vía filtración* [Tesis de Pregrado, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso]. http://opac.pucv.cl/pucv_txt/txt-8500/UCI8575_01.pdf
- Metcalfe & Eddy. (2014). *Solutions Manual. Wastewater engineering: Treatment and Resource* (5th ed.). McGraw-Hill Education.
- Rojas, R. y Espinosa, L. (2012). Utilización de biosólidos para la recuperación energética en México. *Producción Más Limpia*, 7(2), 74-94.
- Ruiz, A. P. y Quevedo, L. A. (2017). *Análisis de los lodos provenientes del proceso de tratamiento de aguas residuales del municipio de Guatavita* [Tesis de Pregrado, Universidad Católica de Colombia]. <https://repository.ucatolica.edu.co/handle/10983/14811>
- Smart Water Summit. (2022). Los humedales artificiales, un potencial para el tratamiento de lodos en pequeñas poblaciones. <https://www.iagua.es/noticias/dam-aguas/humedales-artificiales-potencial-tratamiento-lodos-pequenas-poblaciones>
- Torres-Lozada, P., Silva-Leal, J. A., Parra-Orobio, B. A., Cerón-Castro, V. y Madera-Parra, C. A. (2015). Influencia de la aplicación de biosólidos sobre el suelo, la morfología y productividad del cultivo de caña de azúcar. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 18(1), 69-79. <https://doi.org/10.31910/rudca.v18.n1.2015.455>
- Uggetti, E., Ferrer, I., Llorens, E., & Garcia, J. (2010). Sludge treatment wetlands: A review on the state of the art. *Bioresource Technology*, 101(9), 2905-2912. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.11.102>