



**Estabilización y manejo de lodos residuales en la Planta de Tratamiento Municipal.
Portoviejo.**

Palacios Antón Ana Cristina

Vicerrectorado de Investigación, Innovación y Tránsito de Tecnología
Centro de Posgrados

Maestría en Sistemas de Gestión Ambiental

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Magíster en Sistemas de Gestión
Ambiental

Ing. Bolaños Guerrón Darío Roberto, Ph.D.

23 de noviembre de 2021



Ana Cristina Palacios Copyleaks 16-12-2021.pdf

Scanned on: 17:16 December 16, 2021 UTC



Overall Similarity Score



Results Found



Total Words in Text

Identical Words	442
Words with Minor Changes	37
Paraphrased Words	82
Omitted Words	0



Website | Education | Businesses



VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y
TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA

CENTRO DE POSGRADOS

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “Estabilización y manejo de lodos residuales en la Planta de Tratamiento Municipal, Portoviejo” fue realizado por la Ing. **Palacios Antón Ana Cristina**, el mismo que ha sido revisado y analizado en su totalidad, por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 08 de diciembre de 2021

Firma:



Ing. Bolaños Guerrón Darío Roberto, Ph.D.

Director

C.C.: 1715206593



VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y
TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA

CENTRO DE POSGRADOS

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Yo Palacios Antón Ana Cristina, con cédula de ciudadanía n° 1311739799, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Estabilización y manejo de lodos residuales en la Planta de Tratamiento Municipal. Portoviejo**, es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 29 de noviembre de 2021

Firma

Palacios Antón Ana Cristina
C.C.: 1311739799



VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y
TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA

CENTRO DE POSGRADOS

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Yo Palacios Antón Ana Cristina, con cédula de ciudadanía n° 1311739799, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Estabilización y manejo de lodos residuales en la Planta de Tratamiento Municipal Portoviejo**, en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi/muestra responsabilidad.

Sangolquí, 29 de noviembre de 2021

Firma



Palacios Antón Ana Cristina
C.C.: 1311739799

Dedicatoria

El presente trabajo de investigación lo dedico principalmente a Dios, por protegerme en todo momento y darme salud y sabiduría para realizar con éxito el presente documento.

A mi esposo e hijo que me apoyaron y me dieron fuerzas para continuar en todo momento, a mis padres, por su amor, y ayuda durante todos estos años, y a todas las personas que me han apoyado y han hecho que el trabajo se culmine a entera satisfacción, en especial a aquellos que me abrieron las puertas y compartieron sus conocimientos e información relevante para este trabajo.

Agradecimiento

De manera especial a la Empresa Publica Municipal de Agua Potable y Saneamiento de Portoviejo PORTOAGUAS E.P., por haberme dado la oportunidad de ocupar sus instalaciones y obtener información relevante para la elaboración de este trabajo de titulación.

A mi tutor de tesis, por haberme guiado, y brindado todo el apoyo para desarrollar y culminar mi trabajo de investigación.

Tabla de Contenidos

Dedicatoria	6
Agradecimiento	7
Tabla de Contenidos	8
Índice de Tablas	10
Índice de Figuras	11
Resumen	12
Abstract	13
Antecedentes	14
Introducción	16
Tratamiento de aguas residuales.	16
Justificación de la importancia de la investigación	17
Planteamiento del problema	22
Hipótesis	23
Objetivo General	23
Objetivos Específicos	23
Marco Teórico Referencial	24
Referencia normativa para la evaluación de lodos residuales.	24
Lodos generados en las depuradoras de aguas residuales en Ecuador.	24
Procedencia de los lodos	29
Lodos provenientes de tratamientos biológicos	29
Lodos provenientes de tratamiento físico - químicos	30
Digestión Anaerobia	33
a) Parámetros fisicoquímicos que influyen en el proceso de Digestión Anaerobia.	35
b) Ventajas y desventajas del proceso de digestión anaerobia	36
Materiales y Métodos	43

Caracterización físico-química y microbiológica del lodo generado en la PTAR	
Portoviejo.	43
Determinación de los tiempos de retención hidráulica y concentración de oxígeno.	47
Sistema de estabilización de lodos	48
Diseño del Biodigestor	49
Parámetros de procesos en el tratamiento	51
Etapas del proceso	54
Alternativa y mitigación de impactos	57
Cuantificación de la eficiencia del sistema	61
Resultados y Discusión.	62
Caracterización y cuantificación de los lodos.	62
Discusión	75
Conclusiones y recomendaciones	76
Conclusiones	76
Recomendaciones	78
Referencias bibliográficas	79
Anexos	85

Índice de Tablas

Tabla 1 Coordenadas Geográficas PTAR - Portoviejo_____	18
Tabla2 Caracterización de lodos generados en diferentes procesos de tratamientos de aguas residuales. _____	26
Tabla3 Concentraciones permisibles para los metales pesados en los lodos _____	28
Tabla4 Características del lodo residual según su origen _____	31
Tabla5 Características de los lodos antes y después de la digestión anaerobia _____	37
Tabla6 Diseño Experimental Aleatorio Comparativo _____	39
Tabla7 Diseño Experimental Aleatorio Comparativo de Optimización _____	40
Tabla8 Límites máximos permisibles para metales pesados en biosólidos _____	45
Tabla 9 Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos. _____	46
Tabla10 Digestión anaeróbica de lodos _____	54
Tabla11 Digestión anaeróbica de lodos etapa 2 _____	55
Tabla12 Composición media de Biogás generada en un reactor anaeróbico _____	56
Tabla13 Porcentaje de Nutrientes entre fertilizantes y lodos estabilizados _____	58
Tabla14 Concentración en el biosólido _____	60
Tabla15 Características de los lodos de la PTAR Portoviejo _____	63
Tabla16 Relación % entre SST y SSV _____	65
Tabla 17 _____	67
Tabla18 Relación DQO vs Número de días _____	68
Tabla19 Relación Ph vs Tiempo. _____	70
Tabla 20 Relación Tiempo en días vs Digestión en mg/l _____	72
Tabla21 Conteo de coliformes en lodos iniciales _____	73
Tabla22 Metales pesados _____	74

Índice de Figuras

Figura 1	<i>Mapa de ubicación del área de las lagunas de oxidación</i>	19
Figura 2	<i>Ubicación del área para el tratamiento de lodos</i>	20
Figura 3	<i>Cobertura de AASS de la ciudad de Portoviejo</i>	21
Figura 4	<i>Relación entre pH y alcalinidad digestión anaeróbica</i>	35
Figura 5	<i>Reducción de SST por día</i>	65
Figura 6	<i>Relación % entre SST y SSV</i>	66
Figura 7	<i>Relación DQO y tiempo en días</i>	68
Figura 8	<i>Relación pH y tiempo</i>	70
Figura 9	<i>Digestión de lodos en mg/l</i>	71
Figura 10	<i>Conteo de coliformes totales antes y después de la digestión anaerobia mesófila. Exploratorio.</i>	73
Figura 11	<i>Eficiencia de Remoción de metales</i>	74

Resumen

En la ciudad de Portoviejo, el tratamiento de los lodos producidos por la PTAR Portoviejo, es con base a lagunaje y genera lodos, los que deben ser retirados para mejorar la eficiencia del sistema de tratamiento. Este tratamiento se genera, en función que los lodos que obstruyen los conductos de agua implican problemas de operación y mantenimiento. Se realizó un análisis de la situación actual del manejo de los lodos generados. Iniciando con la caracterización y cuantificación del lodo existente en las lagunas que tributan al sistema de tratamiento. Bajo la normativa *Standard Methods* se realizarán los respectivos análisis físico-químicos, tales como conductividad, dureza total, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos, volátiles - fijos, sólidos totales, volátiles - fijos, y turbidez, estableciendo cuál es la composición fisicoquímica de los lodos y sedimentos generados, así como también el análisis de parámetros microbiológicos, tales como coliformes fecales, huevos de helmintos, salmonella y para monitorear la reducción de los mismos. Se evaluó técnicamente los procesos de biodigestión usados en la PTAR Portoviejo, describiendo que en los procesos comparativos se evidenciaron que las muestras analizadas al inicio y al finalizar el proceso de biodigestión presentaron una considerable reducción en los valores de sólidos suspendidos totales y volátiles y de coliformes totales principalmente en aquellas que fueron sometidas a tratamiento previos antes de ser llevadas a los biodigestores; debido a que esto ayudo reducir principalmente los tiempos de tratamiento.

PALABRAS CLAVE:

- **LODOS**
- **AGUA**
- **CARACTERIZACIÓN**

Abstract

In the city of Portoviejo, the treatment of sludge produced by the Portoviejo WWTP is based on lagooning and generates sludge, which must be removed to improve the efficiency of the treatment system. This treatment is generated because the sludge that clogs the water conduits involves operational and maintenance problems. An analysis of the current situation of sludge management was carried out. Starting with the characterization and quantification of the existing sludge in the lagoons tributary to the treatment system. Under the Standard Methods regulations, the respective physicochemical analyses will be carried out, such as conductivity, total hardness, settleable solids, suspended solids, volatile - fixed, total solids, volatile - fixed, and turbidity, establishing the physicochemical composition of the sludge and sediments generated, as well as the analysis of microbiological parameters, such as fecal coliforms, helminth eggs, salmonella, and to monitor their reduction. The biodigestion processes used at the Portoviejo WWTP were technically evaluated, describing that the comparative processes showed that the samples analyzed at the beginning and at the end of the biodigestion process showed a considerable reduction in the values of total suspended solids, volatile solids and total coliforms, mainly in those that were subjected to previous treatment before being taken to the biodigesters, since this helped to reduce treatment times.

KEY WORDS:

- **SLUDGE**
- **WATER**
- **CHARACTERIZATION**

Antecedentes

El tratamiento de las aguas residuales, tanto municipales como industriales, tiene como objetivo remover los contaminantes presentes con el fin de hacerlas aptas para otros usos o bien para evitar daños al ambiente. Sin embargo, los procesos traen como consecuencia la formación de lodos residuales, subproductos difíciles de tratar y que implican un costo extra en su manejo y disposición. El lodo, resultado de los procesos de tratamiento de aguas residuales debe someterse a análisis para determinar sus características corrosivas, de reactividad, explosividad, toxicidad y biológico- infecciosas, lo que permitirá precisar si el lodo es considerado como un residuo peligroso o como un residuo no peligroso y en base a este resultado plantear las alternativas para el manejo y disposición del mismo (Oropeza García, 2016).

La tecnología de lodos activos junto con el lagunaje y la digestión aerobia de lodos, son procesos de tratamiento de cultivo en suspensión. Esta tecnología promueve el desarrollo de un cultivo en suspensión de microorganismos aerobios capaces de llevar a cabo la degradación de la materia orgánica biodegradable tanto coloidal como disuelta presente en el agua residual.

Las investigaciones relacionadas con el manejo de los lodos provenientes de las plantas de tratamiento de aguas residuales, aparecen a comienzos del siglo XX con el surgimiento de los procesos para tratar las aguas servidas y la consecuente generación de grandes volúmenes de lodo. El manejo de los lodos ha evolucionado durante los últimos 50 años en la búsqueda de alternativas para la disminución de sus costos de tratamiento y disposición final, los que hoy representan el 50% del costo total del tratamiento de las aguas residuales

Los sistemas de lodos activados utilizan oxígeno para realizar el proceso oxigenación de la materia orgánica, lo que convierte a la aireación en un proceso con un fuerte

consumo energético, por lo tanto controlar la concentración de oxígeno disuelto que ingresa a un reactor aeróbico es esencial para este tipo de tratamientos, así pues una muy baja concentración de Oxígeno disuelto podría generar un pobre crecimiento del lodo y una baja remoción en los contaminantes, a su vez una alta concentración de Oxígeno Disuelto (OD) podría presentar una pobre eficiencia de sedimentación del lodo al igual que un bajo rendimiento en la remoción (Peña Guzman, 2012).

Introducción

Tratamiento de aguas residuales.

El tratamiento realizado a las aguas residuales genera dos tipos de subproductos, el agua tratada y los lodos residuales. Los lodos residuales generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales son subproductos de mucho mayor volumen, por lo que su manejo, transporte, tratamiento, aprovechamiento y disposición final son muchos más complicados. Adicionalmente estos lodos generados se caracterizan por estar compuestos de patógenos, metales pesados, materia orgánica y humedad; lo que representa en algunas ocasiones una serie de problemas para los administradores de las plantas de tratamiento debido a que en muchos casos no se cuentan con las alternativas necesarias para el manejo de estos lodos residuales (García Cardenas, 2016).

En años anteriores se han ido generando nuevas tecnologías y alternativas para el tratamiento de aguas potables y residuales; pero no se ha trabajado con el mismo énfasis en la generación de alternativas para el tratamiento de los lodos residuales generados en los procesos de tratamiento de aguas residuales. Esto se debe porque en la mayoría de los casos, los países en vías de desarrollo no consideran a los lodos residuales como un residuo a tratar, y por este motivo en el diseño de las plantas se considera como nula la inversión en la infraestructura para su tratamiento y disposición final (Pérez Zuñiga, 2016).

El proceso de los lodos producido en las plantas de tratamiento de aguas residuales es necesario, debido a que están por sustancias que son de tipo contaminante y a la vez peligroso para la salud. Los lodos de los procesos de tratamiento de las aguas residuales domésticas e industriales tienen un contenido sólido que varía entre el 0.25% y el 12% de su peso y es por mucho el constituyente de mayor volumen

eliminado en los tratamientos estabilizados y desinfectados antes de transportarlos a su disposición final (Van der Last & Lettings). Existen diversas alternativas para el tratamiento de los lodos residuales, que van desde la incineración, que es la que provoca un gran número de gases tóxicos, la deshidratación de los lodos, digestión aeróbica de lodos, tratamiento por químicos en donde el más utilizado es la cal y procesos electroquímicos poseen algunas ventajas con respecto a los anteriores como son: el empleo de áreas menores para su instalación; bajo costo en el uso de reactivos, mayor versatilidad en el manejo de las muestras, selectividad en el manejo del contaminante.

Justificación de la importancia de la investigación

La investigación se llevará a cabo en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas de la Ciudad de Portoviejo, provincia de Manabí, cuyas coordenadas de ubicación se mencionan en la tabla (1).

Al tener los lodos residuales una alta concentración de materia orgánica (alrededor del 40%), es importante establecer que este tipo de residuos pueden ser aprovechables para ser utilizados en otras actividades como abono o materiales de reúso para el acondicionamiento de suelos (Llivichuzca Guapisaca, 2016)

Considerando los problemas que en la actualidad están generando los lodos residuales en la planta de tratamiento de la ciudad de Portoviejo se hace necesario establecer un estudio detallado de las alternativas que pueden darse para el manejo de estos y de esta manera darle solución a esta problemática.

Estudios realizados en países como México y Brasil, que han llegado a la conclusión que los lodos residuales han significado un grave problema pueden ser reutilizados sin riesgos a la salud y al ambiente, demostrado que se ha llegado a incrementar del 10 al 85% el rendimiento de los cultivos en relación con fertilizantes comunes, así, estos

subproductos, como son los lodos residuales pueden ser aprovechados después de ser sometidos a diversos procesos de estabilización, generando biosólidos que podrían aplicarse como fertilizante dependiendo de las características del suelo (Pérez Zuñiga, 2016).

Es por este motivo que el tratamiento de lodos no solo genera beneficios de tipo ambientales a las plantas de tratamiento, sino que adicionalmente puede representar un ingreso económico como es el caso de la venta de abono por concepto del compostaje de estos lodos o por la producción de energías amigables como el biogás mediante procesos de digestión anaerobia de los lodos.

Tabla 1

Coordenadas Geográficas PTAR - Portoviejo

Coordenadas (UTM WGS84) Zona 17S		
PUNTOS	X	Y
L1	557506.00	9884930.00
L2	558044.00	9885090.00
L3	558113.00	9885225.00
L4	557482.00	9885721.00
L5	557353.00	9885665.00
L6	557363.50	9885463.92

Nota: (Portoaguas, 2018)

El área de influencia directa abarca el sistema de tratamiento de aguas residuales, el cual ocupa un área de 37.64 m² aproximadamente cuyo caudal de ingreso es de 540 L /s (Portoaguas, 2018); está compuesto de un sistema de lagunaje, oficinas administrativas incluyendo un laboratorio de saneamiento (se adjuntan fotografías aéreas del área de influencia y de la cobertura del sistema de alcantarillado sanitario

de la ciudad), tal y como se describe en la Figura 1, lo cual representa aproximadamente el 80% del agua residual de todo el casco urbano de la ciudad de Portoviejo.

Figura 1

Mapa de ubicación del área de las lagunas de oxidación

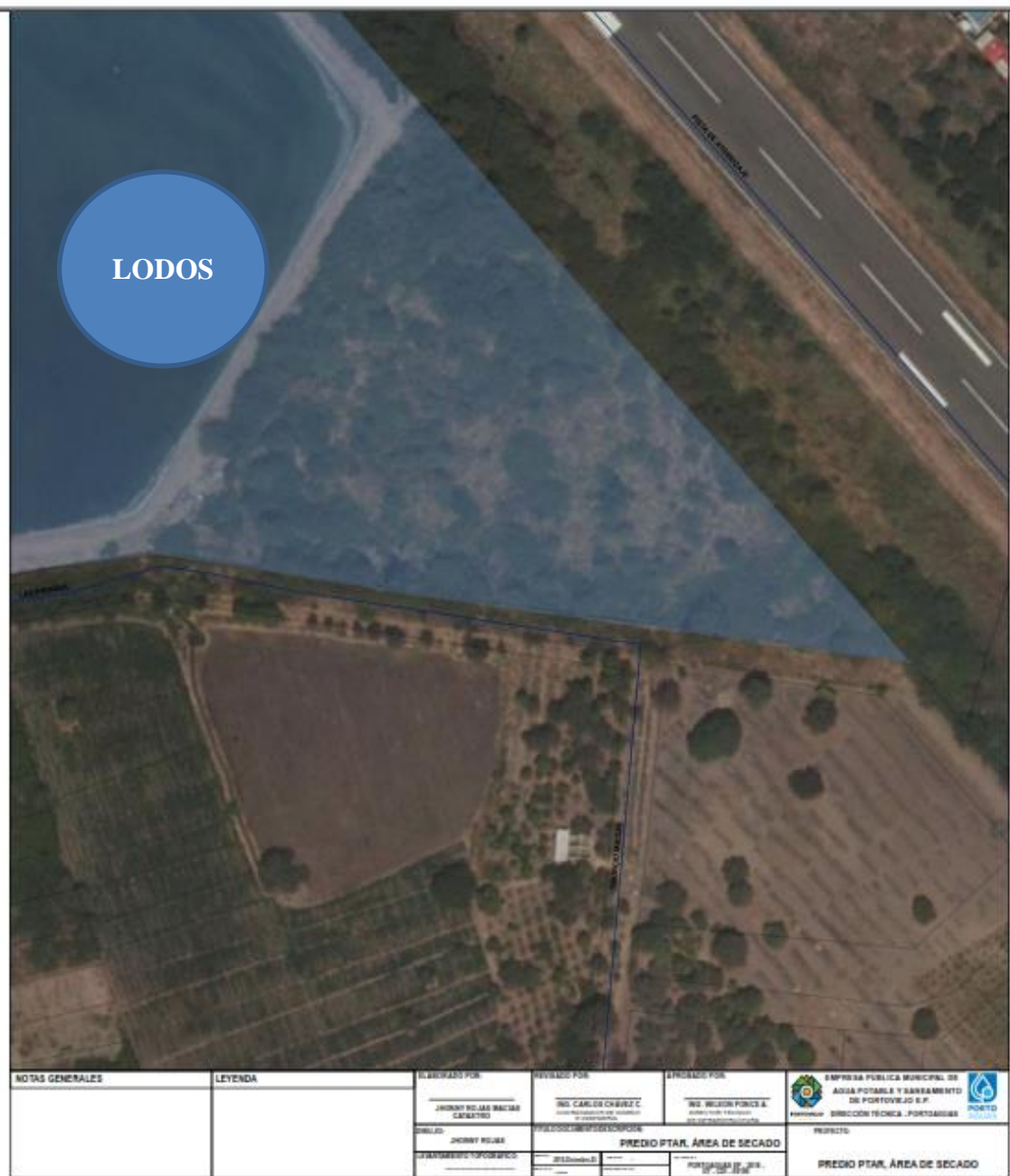


Nota: (Portoaguas, 2018)

En la figura 2 se observa un área sombreada, que el sitio que se ha dispuesto dentro de la PTAR para el tratamiento de los lodos que se generan en el proceso de tratamiento de aguas residuales domésticas.

Figura 2

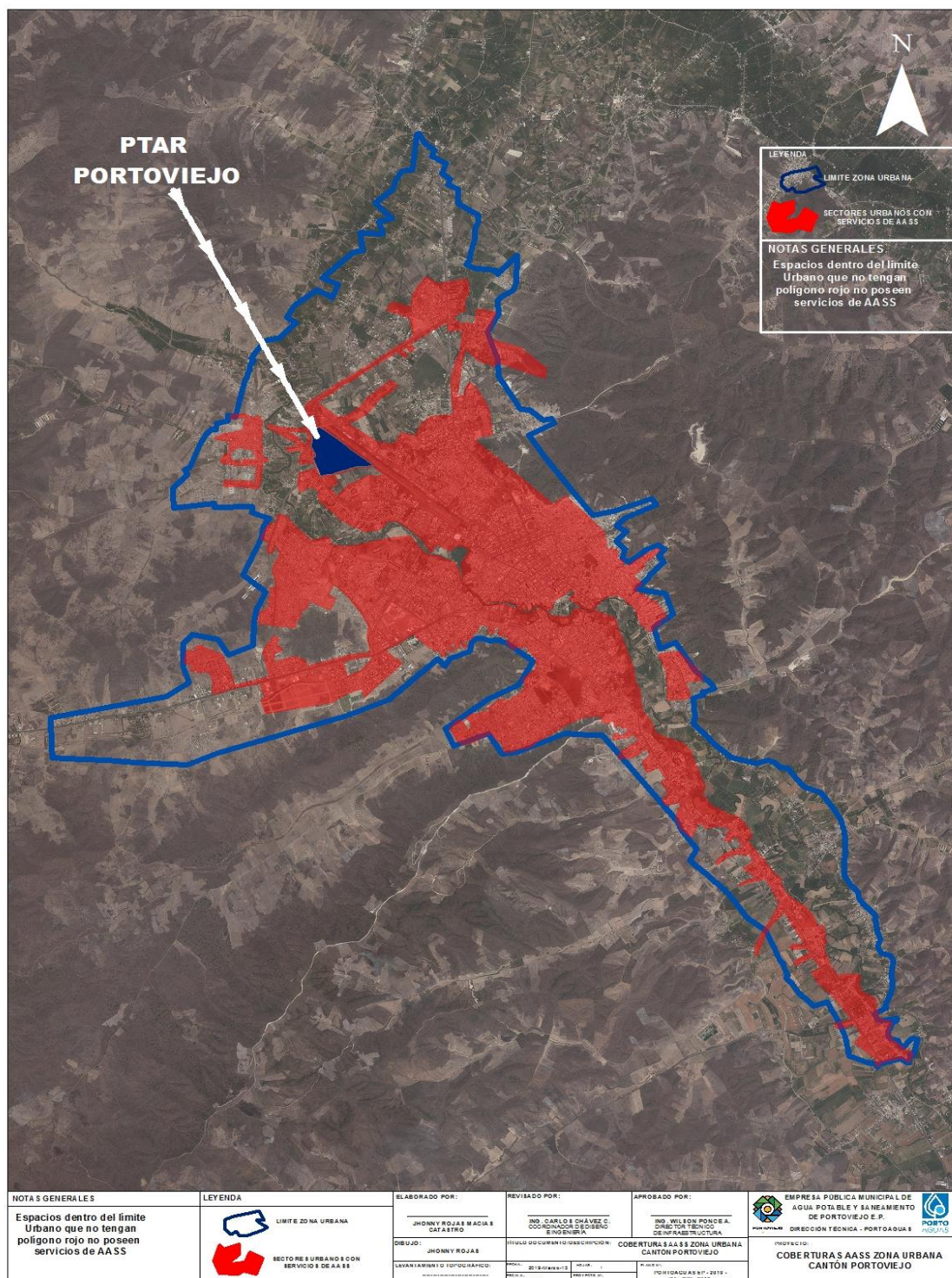
Ubicación del área para el tratamiento de lodos



Nota: (Portoaguas, 2018)

Figura 3

Cobertura de AASS de la ciudad de Portoviejo



Nota: (Portoaguas, 2018)

El presente proyecto tiene como finalidad establecer la alternativa tanto técnica como económica para el tratamiento de los lodos residuales.

Planteamiento del problema

La planta de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Portoviejo en su diseño presenta condicionantes que limitan el manejo adecuado de los lodos generados en el proceso tratamiento de aguas residuales; es por este motivo que en la actualidad existen problemas para la disposición, manejo y tratamiento de los lodos generados, esto está afectando el tiempo de retención para el tratamiento de las aguas residuales, lo que conlleva la producción de malos olores, problemas en la calidad del efluente y en la reducción de la eficiencia bacteriológica para los cuales fueron diseñadas las lagunas de oxidación de la ciudad de Portoviejo.

Según las características que presentan los lodos tales como su origen, su edad, tipo de proceso del cual provienen y de la fuente original de los mismos, se emplean procesos para su tratamiento que sirven para mejorar de alguna manera sus condiciones sanitarias y de esta manera poder reducir los impactos negativos a la salud de las personas y sobre todo al medio ambiente.

Estos lodos son de interés para este estudio, ya que estos deben ser tratados antes de que se les dé una ubicación final, debido a que muchos de ellos pueden contener microorganismos patógenos o sustancias tóxicas las que debido a sus características llevan procesos de putrefacción altos y estos pueden atraer vectores que son un problema para el ambiente y para la salud pública. Se consideran la digestión aerobia y la digestión anaerobia como posibles tratamientos a utilizar para la resolución del problema, sin embargo, el tratamiento que se acopla mejor al desarrollo de las actividades es la digestión anaerobia.

Hipótesis

En función de este análisis se plantea la siguiente hipótesis:

¿La aplicación del método de digestión anaeróbica en lodos residuales en la PTAR de Portoviejo, servirá para solucionar el problema ambiental y de funcionamiento que presenta la planta a consecuencia de estos lodos?

Objetivo General

- Diseñar un sistema de estabilización y manejo para los lodos residuales de la planta de tratamiento municipal del cantón Portoviejo.

Objetivos Específicos

- Caracterizar y cuantificar los lodos residuales procedentes del sistema de tratamiento de aguas residuales de la PTAR Portoviejo. Mediante muestreo aleatorio estandarizado y análisis físico – químico y microbiológicos acordes a la normativa ambiental vigente.
- Establecer un proceso para el tratamiento de los lodos residuales del sistema de la PTAR Portoviejo, basado en la estabilización por etapas de los lodos.
- Evaluar técnicamente la propuesta para la implementación del proceso de tratamiento de lodos residuales del sistema de la PTAR Portoviejo. Acorde a la demanda cuantificada de los lodos y las características del proceso a desarrollar.

Marco Teórico Referencial

Referencia normativa para la evaluación de lodos residuales.

Siguiendo la jerarquía (Pirámide de Kelsen en el Derecho Jurídico) como señala el Art. 425 de la constitución de la República del Ecuador, Registro Oficial 449 de 20/10/2008 (Asamblea Nacional del Ecuador, 2008), última modificación 13/07/2021, : El orden jerárquico de aplicación de leyes será el siguiente: Constitución Política, Tratados Internacionales, Leyes Orgánicas, Leyes Ordinarias, Normas Regionales y Ordenanzas Distritales, Decretos Legislativos (Asamblea constituyente), Reglamentos de Aplicación dictados por el Poder Ejecutivo, Ordenanzas Municipales y Provinciales, Acuerdos y resoluciones; y los demás actos y decisiones de los poderes públicos.

Al no contar con normativa ambiental nacional actualizada que abarque al agua como recurso natural (última actualización Reglamento al Código Orgánico del Ambiente de fecha 12 de junio de 2019 y Registro Oficial 097 A de fecha 04 de noviembre de 2015) en cuanto a límites máximos permisibles para comparación de parámetros obtenidos de caracterización de lodos, el presente documento utilizó normativas internacionales para una discusión de resultados de la investigación realizada.

Lodos generados en las depuradoras de aguas residuales en Ecuador.

La gestión de los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales es uno de los problemas ambientales más complejos asociados al tratamiento de las aguas residuales. La problemática fundamental en el país relacionada con los lodos de depuración tiene su origen en que, en la mayoría de los casos, constituyen un residuo que es necesario gestionar (Montes Morán & Menéndez, 2010). Esto lleva implícito la obligación de tratar los lodos procedentes de las PTARs, tratamiento que al menos en parte, está integrado hoy día en las propias instalaciones de depuración de aguas. Se dan, entonces situaciones en las que el coste operacional y/o de inversión del

tratamiento de los lodos supera a los asociados más directamente con el tratamiento del agua residual.

Las problemáticas relacionadas a un residuo antropogénico pueden ser descritas desde diversos aspectos que, a su vez, están relacionados entre sí. Por una parte, estarían los aspectos socio-políticos que llevan a tomar conciencia de que los lodos de las PTARs son un residuo. Los lodos constituyen un problema en las sociedades que se encuentran en procesos de expansión de sus habitantes, que son las que generan la necesidad del tratamiento de sus aguas residuales. Resulta de algún modo paradójico que el intento de dicha sociedad por mejorar su relación con el medio ambiente a través de la depuración de las aguas que ella contamina, termine generando un nuevo problema en forma de lodos. La paradoja, deja de ser tal cual cuando se toma conciencia de que el proceso de depuración no es, ni mucho menos, perfecto y que en los lodos se concentran sustancias responsables de las características ofensivas (olores), patógenos y tóxicas que proceden del agua residual a tratar.

La legislación nacional si bien ha tratado de controlar y llevar un registro de los procesos que son llevados a cabo en las plantas de tratamiento del país, estos esfuerzos se hacen infructuosos debido a que en la mayoría de los casos las plantas de tratamiento de aguas residuales ven limitados sus presupuestos para los procesos de tratamiento de lodos residuales lo que generen incumplimientos con las normas y las debidas sanciones económicas para dichas plantas.

Los lodos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales se originan en dos etapas, los primeros se generan en el tratamiento primario y los otros en el tratamiento secundario. En la etapa de sedimentación primaria es donde se generan los primeros lodos, es en donde se buscará eliminar los sólidos sedimentables. La cantidad generada de lodos dependerá de varios factores como el tiempo de retención

hidráulica o la carga superficial. En algunos casos se pueden utilizar ciertos productos químicos para los procesos de sedimentación como son floculantes y coagulantes lo cual producirá mayor cantidad de lodos (Carcelén Árcos, 2015).

Los lodos secundarios se producen en los reactores biológicos y se sedimentan o separan del agua en los sedimentadores secundarios. Estos sedimentadores tienen en su base una tolva para almacenar y concentrar los lodos sedimentados. La extracción del lodo sedimentado se efectúa por carga hidráulica y por el accionamiento mecánico de las rastras que “barren” el fondo del tanque, empujando los lodos sedimentados a la tolva para su extracción (Vasquez Aleman & Vargas Martinez, 2018).

Los lodos procedentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales generan problemas cuando no reciben el debido tratamiento y una disposición final adecuada. Estos lodos en la mayoría de los casos representan un problema tanto para el ambiente como para la salud pública, debido principalmente a la composición microbiológica y química de dichos lodos.

Uno de los principales problemas que presentan los lodos residuales para poder ser reutilizados en diversos procesos es su alto contenido de agentes patógenos es por este motivo que estos lodos deben ser estabilizados para reducir los microorganismos. A continuación, en la Tabla 2 se detallará la composición típica que presentan los lodos residuales en las plantas de tratamiento de aguas residuales del país.

Tabla2

Caracterización de lodos generados en diferentes procesos de tratamientos de aguas residuales.

Parámetros	Lodos primarios	Lodos secundarios	Lodos digeridos (mezcla)
------------	-----------------	-------------------	--------------------------

Parámetros	Lodos primarios	Lodos secundarios	Lodos digeridos (mezcla)
PH	5,5-6,5	6,5-7,5	6,8-7,6
Contenido de agua	92-96	97.5-98	94-97
SSV (% SS)	70-80	80-90	55-65
Grasas (% SS)	12-14	3-5	4-12
Proteína (%SS)	4-14	20-30	10-20
Carbohidratos (%SS)	8-14	6-8	5-6
Nitrógeno (%SS)	2-5	1-6	3-7
Fósforo (%SS)	0,5-15	1,5-2,5	0,5-15
Bacterias Patógenas (NMP/100 ml)	103-105	3-5	10-100
Metales pesados (Zn, Cu, Pb)	0,2-2	0,2- 2	0,2-2

SSV: Sólidos suspendidos volátiles. NMP: Número más probable SS: Sólidos suspendidos

Nota: (Donado, 2013)

Otro indicador que debe valorarse en la caracterización de los lodos es el contenido de metales pesados, los cuales están representados por un grupo de elementos químicos que poseen una elevada toxicidad para los seres vivos, aunque se presentan en concentraciones permisibles en los lodos para su manejo de forma segura. En la tabla 3 se aprecian las concentraciones permitidas de metales pesados en los lodos residuales según el Código Orgánico Ambiental de fecha 12 de junio de 2019, sin embargo, es importante mencionar que el mismo no menciona modificación en las tablas de los límites máximos permisibles por lo que se toma como referencia la última

actualización de las mismas establecidos en el Acuerdo Ministerial N° 097 A – Edición Especial 387 del 4/11/2015., que son aplicables en el país.

Se pueden identificar además que los tipos de minerales presentes, se caracterizan por ser metales pesados que pueden estar presentes en actividades industriales o doméstica, provenir de desechos de lubricadoras (estaciones de servicios de vehículos), los cuales tienen sistemas de tratamientos que son evaluados y fiscalizados por los organismos estatales, como es el caso de las municipalidades.

Tabla3

Concentraciones permisibles para los metales pesados en los lodos

Metal	Concentración (mg/kg de lodo seco)	NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-052-SEMARNAT-2005
Cadmio	20-40	39.00
Cobre	1000-1750	150.00
Níquel	300-400	420.00
Plomo	750-1200	300.00
Zinc	2500-4000	2800.00
Mercurio	16-25	17.00
Cromo	1000-1500	1200.00
Arsénico	20-40	41.00
Selenio	50-100	---
Molibdeno	10-25	---

Nota. Esta tabla muestra las Concentraciones permisibles para los metales pesados en los lodos discutidos con la norma oficial mexicana nom-052-semarnat-2005, que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos. Tabla 2 límites máximos permisibles para los constituyentes tóxicos en el extracto pect (Diario Oficial de la Federación, 2005).

Procedencia de los lodos

Los lodos provenientes de las PTAR presentan diferentes composiciones en relación con la procedencia de las aguas. Estos pueden ser generados durante el tratamiento de las aguas residuales domésticas o de las aguas industriales (Amador Díaz, Veliz Lorenzo, & Bataller Venta, 2015).

Además, las características de los lodos están estrechamente vinculadas al proceso empleado en las PTAR, que influirá en las características y propiedades de los biosólidos y la viabilidad de la alternativa a emplear en la gestión.

Lodos provenientes de tratamientos biológicos

Los lodos de las PTAR son el resultado de la concentración de los sólidos contenidos en el efluente (lodos primarios) o de la formación de nuevos sólidos suspendidos (lodos activados) resultantes de los sólidos disueltos. Los tratamientos de las PTAR pueden ser sin digestión, basado en procedimientos de separación física, secundarios con digestión, que comprenden procedimientos físicos y biológicos, en los cuales se reduce la presencia de patógenos, parásitos y el contenido de compuestos carbonados, a los cuales se suman los tratamientos químicos. Por tanto, la calidad de los lodos, en cuanto a su nivel de estabilización, está determinada en gran medida por el régimen de tratamiento al que son sometidos (Amador Díaz, Veliz Lorenzo, & Bataller Venta, 2015).

El proceso de lodos activados incluye su crecimiento y desarrollo en el tanque de aireación, su posterior paso al tanque de sedimentación y su recirculación al tanque de aireación, proceso que se repite en reiteradas ocasiones hasta el momento que estos son purgados y eliminados del sistema. Entre sus características presentan un color marrón y una apariencia floculante, y si no ha comenzado a degradarse, tiene un olor a tierra húmeda (Amador Díaz, Veliz Lorenzo, & Bataller Venta, 2015).

La fracción de lodo generado en los tratamientos biológicos de las PTAR está compuesta principalmente por microorganismos, y una parte del lodo está compuesto por materia sólida (Amador Díaz, Veliz Lorenzo, & Bataller Venta, 2015). Pueden presentar un color marrón o marrón oscuro, si es muy oscuro puede estar próximo a volverse séptico, si es más claro de lo normal puede estar poco aireado. También pueden adquirir una apariencia, poco olor. Se deshidratan fácilmente en áreas de secado, o adquieren un color marrón oscuro-negro su olor es relativamente débil (Amador Díaz, Veliz Lorenzo, & Bataller Venta, 2015).

Lodos provenientes de tratamiento físico - químicos

La aplicación del tratamiento físico químico a los lodos a principios del siglo veinte era muy difundida, pero las elevadas dosis de coagulantes utilizadas, generaban una gran cantidad de lodos, por lo que empezaron a ser desplazados por tratamientos biológicos, que originan menos lodos y tienen una mejor eficiencia en términos de remoción de contaminantes. Actualmente, el tratamiento físico químico utiliza menores dosis de coagulantes, acompañado en ocasiones con una mínima dosis de polímeros, lo que implica bajos costos de operación y un ligero aumento en la cantidad de lodos generados respecto a los tratamientos convencionales.

Con el uso del hidróxido de sodio se produce un lodo de color café para dosis bajas de coagulante y de color blanco para dosis elevadas. El flóculo formado sedimenta a gran velocidad en los primeros diez minutos. El lodo generado tiene un aspecto homogéneo (Amador Díaz, Veliz Lorenzo, & Bataller Venta, 2015). El sulfato de aluminio disuelto en agua produce hidróxido de aluminio, que provoca la formación de flóculos de forma prácticamente instantánea. El flóculo formado sedimenta con bastante facilidad y rapidez. Al usar este coagulante se genera un lodo de color oscuro (López Torres, Véliz, Fernández García, & Espinosa Llorénz, 2010).

El lodo generado, al usar el cloruro férrico, adquiere un color café claro para dosis menores de 40 mg/L, entre 40 mg/L y 100 mg/L el color se hace cada vez más oscuro y para dosis superiores a 100 mg/L presenta un color rojizo.

El flóculo presenta buena sedimentación y se asienta generando capas bien diferenciadas (Carrasco Quiroz, 2007). El policloruro de aluminio (PAC) presenta diferentes fases sólidas en las reacciones hidrolíticas, los flóculos forman grupos de pequeñas esferas o estructuras tipo cadena o ambas. Esta diferencia estructural produce una menor turbidez en las aguas (Sinha, Yoon, & Yoon, 2004). El sulfato férrico se usa como coagulante inorgánico para retirar del agua por coagulación y floculación, las partículas suspendidas coloidales. Se prepara por medio de sulfato ferroso como agente oxidante o por óxido férrico disolvente en ácido sulfúrico (Chicon, 2003).

Tabla4

Características del lodo residual según su origen

Lodo	Descripción
Tamizado	Todo tipo de basura, material orgánico e inorgánico removido en rejillas o tamices
Grasas y aceites	Provenientes de la superficie de los sedimentadores primarios y secundarios. Pueden ser grasas minerales y vegetales, detergentes, desechos de alimentos, desechos plásticos, papel, algodón y materiales similares. Gravedad específica entre 1.0 y 0.95

Lodo	Descripción
Lodo primario	Alta concentración de materia orgánica, tiene un olor extremadamente ofensivo
Lodos de estabilización anaerobia	Son de color oscuro o negro y contienen altas cantidades de gases. Estos lodos según su origen producen gas metano.

Nota. En la tabla 4 se mencionan algunas características de los lodos residuales según su origen (Metcalf, 2003)

Procesos de estabilización de lodos en PTARs del Ecuador

El proceso de estabilización tiene como finalidad el impedir la putrefacción de la materia orgánica y de esta manera impedir que se presenten malos olores y la atracción de vectores.

Los lodos que se generan en los procesos de tratamiento de aguas residuales son considerados como residuos peligrosos; pero después de ser sometidos a procesos de estabilización, estos lodos pueden ser reutilizados con el debido beneficio para el ambiente. Mediante la estabilización se consigue que el volumen y la masa de los lodos sea reducido, y de esta manera se elimina su potencial de fermentación y putrefacción; evitando situaciones molestas o riesgosas para la salud pública al momento de disponer este material al ambiente (Scholz, 2006). Adicionalmente con la producción de biosólidos se reduce la presencia de organismos patógenos y malos olores.

Para identificar el grado de estabilización de un lodo se puede evaluar la reducción de los microorganismos patógenos, debido a que estos son los que generan riesgo (los

coliformes fecales deben reducirse por valores menores de 1000/g de materia seca y los parásitos menores a 1 huevo viable) (Metcalf, 2003).

El grado de estabilización también puede ser medido relacionando los sólidos volátiles y totales, debido a que representan la fracción de materia orgánica que se busca reducir; esta relación SV/ST debe ser menor o igual a 0,6. Para poder lograr estabilizar los lodos residuales en las PTARs se emplean diversos métodos que van a depender del destino final seleccionado para el biosólido. A continuación, se detallarán los más utilizados.

Digestión Anaerobia

La aplicación de procesos biológicos en el tratamiento de desechos orgánicos remonta al siglo pasado, cuando sistemas rústicos como la fosa séptica comenzaron a ser utilizados para el control de la contaminación y de los riesgos sanitarios asociados. Posteriormente, nuevos procesos fueron desarrollados sobre bases puramente empíricas, como el sistema de lodos activados. Sin embargo, es hasta el siglo pasado que las bases teóricas comenzaron a ser planteadas, al utilizarse los resultados de investigaciones sobre crecimiento bacteriano y 16 fermentaciones. Hoy en día, el avance en el conocimiento de los fundamentos y aplicación de los procesos biotecnológicos para el tratamiento de residuos orgánicos es considerable. A ello ha contribuido el auge de la biotecnología en general y la necesidad de ejercer cada vez un control más estricto sobre efluentes contaminantes, ya sean municipales o industriales (Sanz Valencia, 2014).

La digestión anaerobia es un sistema de estabilización de lodos que se emplea en la eliminación de una parte importante de la fracción volátil de los fangos que se generan en las plantas de tratamiento de aguas residuales. Los lodos sin estabilizar generan olores por putrefacción y riesgo de proliferación de bacterias infecciosas. Los sistemas

de estabilización o inertización de los lodos son variados, desde la incineración, la oxidación total, o la digestión aerobia. Esta técnica es la más utilizada a nivel mundial en donde el lodo es estabilizado por microorganismos en un ambiente anóxico (Lorenzo Acosta & Obaya Abreu, 2005).

El lodo que se introduce en la digestión anaerobia es el proveniente de la línea de aguas, tanto el lodo primario, como el lodo biológico. En ambos casos se realiza un espesado previo a la digestión para aumentar la concentración y reducir los volúmenes de reactor (digestor) necesarios. La digestión anaerobia se diseña mediante uno (o varios) digestor(es) primario(s) y un digestor secundario o tampón. Puede ser de dos tipos según la temperatura a la que se realice, bien mesófilas (óptimo en torno a 35-37°C) o termófila (temperatura 55-60°C) (Sanz Valencia, 2014).

Aunque las especies microbianas involucradas son distintas en cada caso, las fases en ambos casos son iguales. Comienza con la hidrólisis de la materia orgánica y la biomasa proveniente del sistema de lodos activos y del lodo primario que realizan las bacterias fermentativas. Posteriormente las bacterias ácido génicas generan ácidos de cadena corta en la ácido génesis. Algunas bacterias acetogénicas pueden derivar estos ácidos en acetato, mientras que otras producen CO₂ y H₂. Finalmente, en la última fase, las bacterias metanogénicas utilizan estos compuestos para generar gas metano (CH₄), bien a partir de hidrógeno (bacterias metanogénicas hidrogenotróficas), bien a partir del acetato (bacterias metanogénicas acetoclásticas). Se da la circunstancia de que las bacterias que realizan las fases de hidrólisis y acidogénesis son más rápidas que las metanogénicas, que les cuesta más tiempo realizar la metanogénesis (Sanz Valencia, 2014).

a) Parámetros fisicoquímicos que influyen en el proceso de Digestión Anaerobia.

Estos factores que se mencionan a continuación, son importantes para evitar que se presente cualquier error en el proceso y tener conocimiento para tomar medidas correctivas necesarias cuando así se requiera.

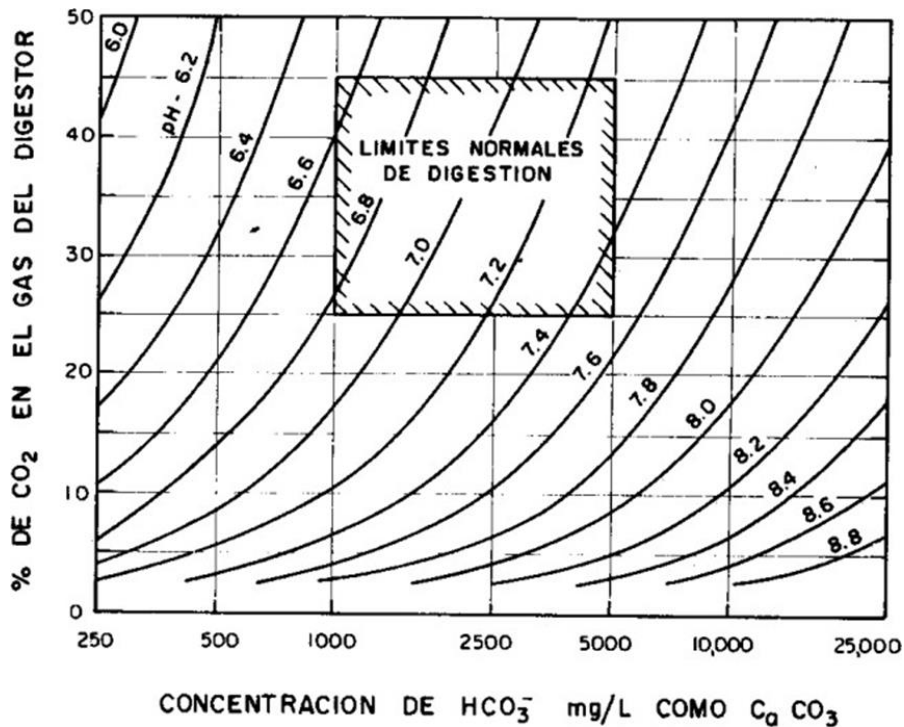
El **pH**: La digestión anaerobia puede llevarse a cabo dentro de un intervalo de pH comprendido entre 6.2 y 7.8 siendo el óptimo entre 7 y 7.2. Fuera de este último, la digestión puede continuar, aunque en forma ineficiente hasta un pH de 6.2, en donde las bacterias metanogénicas son afectadas severamente; a niveles de pH alcalinos, se afecta principalmente a las bacterias metanogénicas acetoclásticas (Malina & Pohland, 1992).

La **Alcalinidad**: Es la capacidad que puede tener un sistema para mantener un pH determinado; es una medida de la capacidad amortiguadora de un sistema. Si la calidad es mayor se podrá mantener un pH a pesar del aumento en la generación de H. En los sistemas donde se realiza digestión anaerobia, el sistema buffer se debe a la presencia de carbonato, en particular la capacidad tampón de la especie bicarbonato.

Estudios realizados por Heukelekian y Heinemann en 1934, demostraron que el pH óptimo para el desarrollo de los microorganismos metanogénicos está en el rango de 6,5 y 7,5, siendo un valor óptimo de 7,0, lo cual influirá en la tasa de crecimiento de la biomasa. El valor de pH del digestor dependerá de la relación de la concentración de ácidos volátiles, alcalinidad bicarbonatada y el porcentaje de dióxido de carbono en el biogás, el nivel de alcalinidad mínimo que se debe mantener es de 1000 mg/L como carbonato de calcio (Malina & Pohland, 1992).

Figura 4

Relación entre pH y alcalinidad digestión anaeróbica



Nota: (Yanez Cossio, 1992)

Nota. La temperatura en ambientes anaeróbicos es la que va a definir cuáles serán las especies predominantes. Las especies psicrófilas (6-20 °C), mesófilas (20-40 °C), termófilas (50-65 °C); tienen intervalos de temperatura que es considerada como óptima para el crecimiento y actividad definida. La temperatura óptima de crecimiento de las bacterias metanogénas mesofílicas es de 37 °C (Yanez Cossio, 1992).

La concentración de Ácidos Grasos Volátiles (AGVs), producto del proceso de fermentación, tiene una gran importancia en el proceso de digestión anaerobia. Estos compuestos pueden llegar a acidificar el reactor provocando que se generen fallos en el proceso (Chicon, 2003).

b) Ventajas y desventajas del proceso de digestión anaerobia

Entre las ventajas del proceso de digestión anaerobia se pueden mencionar las siguientes:

- Eliminación de SV (40-60%)

- Reducción de la masa de lodo (destrucción de 25-45% de sólidos). Esto reduce los costos de disposición final.
- Lodo final muy rico en nutrientes.
- Producción de biogás (55-70% gas metano).
- Se eliminan malos olores (70-95%).
- Reducción logarítmica de patógenos (coliformes) de 0.5 a 4.
- Degrada compuestos tóxicos y contaminantes orgánicos.
- Costo de operación bajos.
- Simplicidad de operación y mantenimiento.
- Método rentable para grandes volúmenes

Por otro lado, este proceso también posee ciertas desventajas que serán detalladas a continuación:

- Los cambios bruscos de temperatura pueden ocasionar un desbalance en la población microbiana y afectar el proceso.
- Sobrenadante con alto nivel de nitrógeno DBO y DBQ.
- Problemas de seguridad (gas inflamable).
- Tiene una lenta tasa de degradación biológica por lo que el tratamiento puede tardar más que la digestión aerobia.

Tabla5

Características de los lodos antes y después de la digestión anaerobia

Parámetros	Lodos primarios	Lodos secundarios	Lodos digeridos

Parámetros	Lodos primarios	Lodos secundarios	Lodos digeridos
Sólidos suspendidos volátiles (% SS)	70-80	80-90	55-65
Bacterias patógenas (nº / 100ml)	$10^3 - 10^5$	$10^2 - 10^3$	$10^1 - 10^2$
Parásitos (nº / 100ml).	8-12	1-3	1-3
Nitrógeno, N (% SS)	2-5	1-6	3-7
Fósforo, P (% SS)	0,5-1,5	1,5-2,5	0,5-1,5
Metales pesados	0,2-2	0,2-2	0,2-2
Humedad	92-96	97,5-98	94-97
Ph	5,5-6,5	6,5-7,5	6,8-7,6
Grasas (% SS)	12-16	3-5	10-20
Proteínas (% SS)	4-14	20-30	3-7

Nota. En la tabla 5 se puede apreciar una comparación de las características de los lodos generados en el proceso de tratamiento de aguas residuales y los lodos que han sido sometidos al proceso de estabilización mediante la digestión anaeróbica (Metcalf, 2003).

Como subproducto de la digestión anaerobia se obtiene el biogás, que es la mezcla de varios gases (70% de metano y 30% de una mezcla de dióxido de carbono, nitrógeno, hidrógeno, amoníaco y sulfuro de hidrógeno).

El biogas generalmente se utiliza para la generación de energía en una planta de tratamiento, fomentando la auto-sustentabilidad (Vigueras Carmona, Zafra Jimenez, García Rivero, Martínez Trujillo, & Pérez Vargas, 2013).

Diseño de sistemas de tratamiento para lodos generados en PTARs

El diseño de un sistema para la estabilización de un lodo en particular depende de varios factores, tales como: la cantidad y calidad de lodos a tratar, las condiciones particulares del sitio y la situación financiera en cada caso.

Para el presente trabajo investigativo se realizará dos diseños experimentales completamente aleatorios de carácter comparativos. El primero fue un diseño experimental exploratorio, que consistió en 4 tratamientos: un testigo y tres tratamientos, cada uno con una réplica. Los factores constantes utilizados en este diseño son la tierra de bosque o de tierra de monte y el lodo residual, mientras que la variable independiente es el tipo de tratamiento complementario que fue aplicado que en caso de la tierra de monte fue un proceso previo de pasteurización y en el caso de los lodos se le aplicó una dosificación nutritiva (fósforo, potasio y nitrógeno).

Es importante destacar que se trabajará con dos tipos de diseños experimentales para de esta manera tener un espectro mayor de análisis y tener un registro de valores que permita hacer mucho más confiables los análisis muestrales realizados.

En la siguiente tabla se detalla cómo está estructurado el diseño experimental para el primer caso de las muestras.

Tabla6

Diseño Experimental Aleatorio Comparativo

Tratamiento	Reactor		Lodo (g)	Tierra (g)	Tratamiento
	R1	R2			
Testigo	A	A'	480 g	-	
1	B	B'	480 g	317.4 g	Dosificación nutritiva
2	C	C'	480 g	317.4 g	Pasteurización

Tratamiento	Reactor		Lodo (g)	Tierra (g)	Tratamiento
	R1	R2			
3	D	D'	480 g	317.4 ml	

Nota. En esta tabla se aprecia el Diseño Experimental Aleatorio Comparativo de los diferentes tratamientos y reactores empleados en la investigación (Portoaguas, 2018) El segundo diseño experimental así mismo con R1 y R2 como reactores experimentales, fue de optimización para mejorar el tratamiento sobresaliente obtenido con el diseño exploratorio. De la misma forma fue estructurado, en 4 tratamientos: un testigo y tres tratamientos, cada uno con una réplica. En este caso, se varió entre tratamientos las concentraciones de tierra y lodo, además se adicionó diferentes tipos de dosificación: nutritiva o nutritiva salina. En la tabla 7 se evidencia como fue el desarrollo del segundo diseño experimental.

Tabla7

Diseño Experimental Aleatorio Comparativo de Optimización

Tratamiento	Reactor		Lodo	Tierra	Tipo de Nutrición
	R1	R2			
Testigo	E	E'	660 g	-----	
1		F'	480 g	317.4 g	Dosificación nutritiva
2	F	G'	480 g		
3		H'	660 g	317.4 g	Dosificación nutritiva salina
	G			152 g	Dosificación nutritiva
	H				

Nota. En esta tabla se aprecia el Diseño Experimental Aleatorio Comparativo de los diferentes tratamientos y reactores empleados en la investigación (Portoaguas, 2018)

Las concentraciones de lodo y tierra de los tratamientos biológicos B, C, D, F, G y sus respectivas réplicas, fueron calculadas mediante un balance de masa con el fin de obtener un porcentaje de humedad final del 60%, ya que estudios han demostrado que un lodo semi-seco (entre 15% - 40% de materia seca) ayuda a optimizar el proceso de digestión anaerobia mesófila

Para calcular la cantidad de lodo y tierra que serán agregados en los dos diseños de reactores, tanto R1 y R2 se realizaron balances de masa utilizando volúmenes requeridos y la densidad de los componentes.

El lodo debe ser sometido a un proceso previo de deshidratación o secado de lodos, debido a que su composición es mayoritariamente de agua (>90%) por su baja concentración de sólidos. Es importante realizar esta operación previa debido a que se lograrán reducir costos al reducir el tamaño del digestor, cantidad de reactivos químicos a utilizar, de equipos, tamaño de las tuberías y bombas. Además, el lodo espeso necesita menor tiempo de retención para que pueda estabilizarse.

Una mayor reducción de lodos es necesaria antes del espesamiento de los mismos. El líquido de los lodos tiene que drenarse consiguiendo un lodo seco y poroso. La deshidratación puede producirse de manera natural (mediante camas secas, secado solar), durante un largo periodo de tiempo. Más rápidamente, aunque en más pequeñas cantidades (y también más costoso) son las máquinas de proceso como las prensas (filtros de prensa) y centrifugación.

Para una buena deshidratación, el tamaño y firmeza de los aglomerados del lodo son un factor importante, de manera que el lodo permanezca poroso durante la compresión. Se suele utilizar floculantes para alcanzar mayores niveles de materia

seca en las máquinas de deshidratación y deben ser especialmente coordinados con el lodo.

La opción del proceso más apropiado de deshidratación es importante la consideración las condiciones limitantes como: cantidad, estructura del lodo, disposición, regulaciones, disponibilidad, personal, etc.

En la planta de tratamiento de aguas residuales de Portoviejo los lodos son secados procedentes de la laguna Facultativa, en un área destinada para ello y esto se realiza mediante exposición del lodo al ambiente. (Ver anexo 2)

Para este proceso de investigación este lodo deshidratado fue recolectado en diferentes puntos y luego filtrado con papel de celulosa, para así eliminar el contenido del agua y reducir mucho más la muestra. Luego, a este lodo se lo mezcló con tierra de bosque, como bioespesante y bioacelerador, para mantener una carga orgánica estable en el digestor y para aumentar la macrofauna benéfica según balances de masa que serán presentados más adelante.

Adicionalmente a las muestras se les realizó un tratamiento complementario que consistió en la pasteurización del lodo antes de su digestión biológica. Para ello la mezcla del lodo final se pasteurizó en una estufa a 70°C durante 30 minutos. Luego de esto las muestras fueron llevadas a los digestores para empezar el proceso de digestión anaeróbica.

Para lograr recibir estos tratamientos previos los lodos serán sometidos a un proceso de digestión anaeróbica en un digestor biológico diseñado a escala de laboratorio para poder realizar muestreos de los lodos y comprobar la eficiencia del sistema en la reducción de microorganismos patógenos para de esta manera dar una disposición final a los lodos ya sea para agricultura o como relleno.

Materiales y Métodos

Caracterización físico-química y microbiológica del lodo generado en la PTAR Portoviejo.

La caracterización de los lodos es la clave para cuantificar las concentraciones de nutrientes para su aplicación en los suelos y de los compuestos dañinos que deben ser eliminados. Para el adecuado manejo de lodos se debe evaluar la composición química (incluida la concentración de metales pesados), así como el contenido de patógenos y parásitos que posean (Marambio & Ortega, 2003).

Los elementos que se toman como referencia para la caracterización de lodos son muy diversos, pero para el caso de este estudio se consideraran los metales pesados, conductividad, mineralización, sólidos suspendidos totales, sólidos suspendidos volátiles, demanda bioquímica de oxígeno y demanda química de oxígeno.

Para la determinación de las demandas química y bioquímica de oxígeno DQO y DBO, se utilizan técnicas espectrofotométricas, mientras que para los sólidos se utiliza el método gravimétrico o el volumétrico. En el caso del nitrógeno total se emplea el método de Kjeldahl y para determinar el fósforo total el de cloruro de estaño. Los metales pesados se analizan mediante absorción atómica. Todas las técnicas que se pueden utilizar se encuentran descritas. Según estudios realizados, se ha establecido un grupo de indicadores que debe ser cuantificado, ya que establece el grado de contaminación que presentan los lodos. Existe un intervalo de valores para cada uno de esos indicadores (Tabla 6) información que permite realizar una adecuada elección de los procesos de tratamiento, desde el punto de vista económico y medioambiental, con el objetivo de permitir su reúso o disposición segura (Amador Díaz, Veliz Lorenzo, & Bataller Venta, 2015).

Para el cumplimiento del objetivo planteado de caracterización físico-química y microbiológica de los lodos generados en la planta de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Portoviejo, se tomó como referencia la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2 169:98 y el Código Orgánico Ambiental.

Que establece que la caracterización de lodos residuales es el proceso destinado al conocimiento integral de las características estadísticamente confiables del lodo residual, integrado por la toma de muestras y la identificación de los componentes físico, químico, biológico y microbiológico (Cisterna Osorio & Alvarado Mardones, 2003).

Si bien esta norma marca ciertos lineamientos; en el Ecuador en la actualidad no se cuenta con una normativa que establezca los rangos y parámetros de control para la disposición final de lodos provenientes de una planta de tratamiento de aguas residuales, es por esta razón que se tomaran para efectos del presente trabajo otras normativas internacionales y de esta manera tener una idea de cómo se debería proceder en el país. Aunque se podrían tomar normativas internacionales como las de los Estados Unidos o las Europeas estas no servirían ya que se aplican a países desarrollados e industrializados que presentan realidades distintas a las del Ecuador; por este motivo se tomaran como referencia la normativa Mexicana para la realización de este trabajo, ya que es la que más se asemeja a las costumbres, aspectos culturales, estilos de vida y características geográficas del país. Es aquí donde radica la importancia de tomar como referencia dicha norma para lodos en el presente trabajo de investigación. Para analizar la parte sólida del lodo se lo realizara con mediciones del pH, sólidos volátiles, sólidos totales y huevos de helmintos.

Para efectos de esta Norma Oficial Mexicana los biosólidos se clasifican en tipo: excelente y bueno en función de su contenido de metales pesados; y en clase: A, B y C en función de su contenido de patógenos y parásitos.

Otro indicador que debe valorarse en la caracterización de los lodos es el contenido de metales pesados, los cuales están representados por un grupo de elementos químicos que poseen una elevada toxicidad para los seres vivos, aunque se presentan en concentraciones permisibles en los lodos para su manejo de forma segura.

Tabla8

Límites máximos permisibles para metales pesados en biosólidos

Contaminante (determinados en forma total)	Excelente mg/Kg en base seca	Buenos mg/Kg en base seca	Norma oficial mexicana nom- 052-semarnat- 2005 (mg/kg base seca)
Arsénico	41	75	41.00
Cadmio	39	85	39.00
Cromo	1200	3000	1200.00
Cobre	1500	4300	1500.00
Plomo	300	840	300.00
Mercurio	17	57	17.00
Níquel	420	420	420.00
Zinc	2800	7500	2800.00

Nota. Los límites máximos permisibles de metales pesados en biosólidos o lodos en base a la norma se establecen en la tabla 8 que es la “Norma oficial mexicana nom-052-semarnat-2005, que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos” (Diario Oficial de la Federación, 2005).

Tabla 9

Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos.

Clase	Indicador Bacteriológico de Contaminación	Patógenos	Parásitos
	Coliformes fecales NMP/ g en base seca.	Salmonella spp, NMP/g en base seca. Menor de 3	Huevos de helmintos/ g en base seca. Menor de 1 (a)
A	Menor de 1000	Menor de 3	Menor de 10
B	Menor de 1000	Menor de 300	Menor de 35
C	Menor de 2000000 Según 12* Remoción > al 99,9 %	-----	-----

Nota. En esta tabla se aprecian los límites máximos permisibles de patógenos y parásitos en lodos y biosólidos, según la Norma oficial mexicana nom-004-semarnat-2002, protección ambiental. -lodos y biosólidos. - especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final (Diario Oficial de la Federación mexicana, 2002).

En lo que respecta a patógenos no se puede apreciar lo mismo puesto que los huevos de helmintos tienen un valor de 90 g / base seca y lo máximo permisible según la Norma oficial mexicana nom-004-semarnat-2002, protección ambiental. -lodos y biosólidos. - especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final, que es de 35 g / base seca. Con esto se deberá establecer si la digestión anaeróbica para la estabilización de los lodos generados será el sistema adecuado para reducir estos valores y establecerlos dentro de la norma técnica.

Los valores que se establecen en la norma mexicana serán comparados con estudios realizados a los lodos residuales de la planta de tratamiento de Portoviejo y estos servirán como punto de partida para establecer si el sistema escogido para estabilizar los lodos son los adecuados.

Determinación de los tiempos de retención hidráulica y concentración de oxígeno.

Las lagunas de estabilización constituyen una de las formas más simples para el tratamiento de aguas residuales. Hay diferentes combinaciones de lagunas que requieren diferentes niveles de operación y de área. Lagunas cuyo objetivo es la reducción de materia orgánica carbonácea.

La planta de tratamiento de aguas residuales presenta las siguientes condiciones:

- La estación de bombeo se encuentra construida para recibir las aguas residuales de los colectores E y E1. Las aguas residuales de los colectores N y Q serán bombeados directamente al cajón de llegada a las lagunas de estabilización.
- El caudal medio de tratamiento es de 573,2 l/s para condiciones del año 2020
- El nivel de bacterias deseado en el efluente final es de 1000 Coliformes fecales por 100 ml
- La temperatura media en el mes más frío es de 26,1°C.
- El contenido de nitrógeno amoniacal en el desecho crudo es de 44,2 mg/l, como nitrógeno.
- La carga orgánica de tratamiento es de 13085,5 Kg DBO/Ha/d para el año 2020 y 6428,8 Kg DBO/Ha/d para el año 2001.

El Tiempo de Retención Hidráulica es el tiempo que una unidad de fluido permanece en un recipiente, es decir, el tiempo que el líquido que entra en un recipiente tarda en salir del mismo. Esta relación se establece entre el volumen y el caudal que ingresa en un recipiente.

Con estas características la fórmula para calcular el tiempo de retención hidráulica

$$\text{sería la siguiente: TRH (días)} = \frac{V(m^3)}{Q(m^3)}$$

Durante la digestión anaerobia el tiempo de retención hidráulico y el tiempo de retención de sólidos, que en los sistemas de mezcla completa son iguales. Generalmente se trabaja con tiempos de retención entre 20 y 55 días. Para el caso específico de este estudio se trabajaron con tiempos de retención hidráulica de 35 a 40 días (Portoaguas, 2018).

Sistema de estabilización de lodos

Para la estabilización de los lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales de Portoviejo se empleará el sistema de digestión anaerobia mediante el uso de un biodigestor.

Con el propósito de aprovechar los lodos producidos en la planta de tratamiento de aguas residuales, es indispensable realizar un tratamiento por digestión anaeróbica para así poder darle una buena disposición final como, por ejemplo, se puede dar uso en el área de la agricultura.

La digestión anaeróbica de tasa baja es el tratamiento más utilizado y a la vez el más antiguo, y se lo conoce como convencional o estándar; en este proceso no se utiliza calentamiento ni mezcla, la adición de los lodos se lo hace de manera intermitente, es por esta razón que se lo utiliza en plantas pequeñas como la de este estudio (Metcalf, 2003).

Para un mejor resultado de la digestión anaerobia se debería hacer un pre acondicionamiento de los lodos primarios y los lodos de desecho, esto dará lugar a un mejoramiento en el rendimiento de la digestión de los sólidos desde el punto de vista de la descomposición de los sólidos volátiles, una mejor deshidratación de los lodos, aumento en la producción de biogás, y en general un lodo de mejor calidad para su disposición final.

En este proceso se produce la descomposición de la materia biodegradable o de materia orgánica en ausencia de oxígeno para dar como resultado productos como el biogás, que en su mayoría está compuesto por metano y el segundo producto es el lodo estabilizado conocido también como lodo digerido.

Durante este proceso se pretende obtener un biosólido o un compuesto más estable para su disposición final y la eliminación de microorganismos que están presentes en los lodos.

Diseño del Biodigestor

Para el presente trabajo investigativo se considera el diseño de un digestor de carga intermitente, discontinuo (Tipo Batch), de una etapa, en paralelo, es decir, solo se alimenta a los reactores con un sustrato bajo en sólidos, por una vez hasta la finalización del proceso. Se produce una digestión mesófila por la temperatura de operación de alrededor de 20°C.

Esta clase de biodigestor, se carga una vez, y una vez finalizado el proceso de fermentación y de producción de biogás, se renueva la materia prima o la materia orgánica. Se caracteriza por tener un solo orificio para la carga y descarga. La duración de la fermentación puede variar entre 2 a 4 meses, todo depende de ciertos factores como la temperatura que por ser un catalizador que aumenta o disminuye las

velocidades de reacciones químicas y biológicas en el biodigestor influenciará en el proceso de biodegradación de la materia orgánica (Rittmann & McCarty, 2001)

Se adicionó tierra de bosque con el fin de aumentar la actividad microbológica en la digestión y de reducir la humedad. Por lo tanto, de ahora en adelante en el documento se conocerá a este componente como bioacelerador. Debido que se usó un elemento biológico para el tratamiento, éste será referido como un proceso de bioestabilización.

En el proceso de digestión anaerobia los lodos son separados en tres fases, la primera en una fase sólida que son los lodos sedimentados que se encuentran en el fondo del reactor, la segunda es la fase líquida que es licor mezcla, y la tercera fase que es donde se genera el biogás o gas metano (Rittmann & McCarty, 2001).

Para el diseño del digestor y para recolectar el volumen de muestra que va a ser sometidas al proceso de digestión anaeróbica se toma en cuenta que la planta piloto de aguas residuales de la ciudad de Portoviejo presenta en la laguna norte un volumen de lodos 19.863,00 m³ con un 27% de azolve, y en la laguna sur, su volumen de lodos es de 34.052,00 m³ con un porcentaje azolve del 46%. En este caso se tomarán muestras tanto en la Laguna Norte como en la Laguna Sur.

Para cada reactor se utilizó un matraz de Erlenmeyer de 1000 ml cerrado con un corcho para crear un medio anaerobio y con un tubo de vidrio para la salida del biogás. Cada reactor estaba compuesto de lodo y tierra de bosque (Lodo 4), a excepción del reactor testigo, el cual solo contenía lodo (Lodo 3).

Los reactores fueron aislados térmicamente de manera individual con tela aislante térmica y todos fueron ubicados en una caja de cartón aislada con la misma tela. Se realizó todo esto con el fin de evitar los cambios bruscos de temperatura y la inhibición de la actividad microbiana.

Según el diseño experimental, se añadió a los respectivos tratamientos 4ml de una solución al 0.1% de nutrientes compuesta por 10% nitrógeno, 40% fósforo y 10% de potasio. Esto se realizó dos veces al día (una dosis en la mañana y una en la noche).

Se preparó la solución salina al 1.0% utilizando 1 gramo de cloruro de sodio (sal común de mesa) y 100 ml de agua destilada.

Se adicionó cada día 4 ml de la solución al 0.1% de nutrientes en la mañana y 4 ml de una solución salina al 1.0% en la noche, a los tratamientos correspondientes.

Todos los reactores dos veces al día fueron homogenizados lentamente durante el tiempo de digestión, utilizando un agitador de vidrio.

Parámetros de procesos en el tratamiento

Los parámetros que serán evaluados en el presente proceso son el pH, sólidos suspendidos totales, sólidos suspendidos volátiles, DQO, trazas de metales, Nitrógeno Total Kjeldahl, Fósforo, Temperatura, micronutrientes para valorar su posible aplicación en la agricultura.

- Para la medición del pH Las muestras a ser analizadas no deben ser preservadas y deben ser leídas in situ. Para verificar el equipo, antes de cada medición, se realiza la determinación de una la solución de pH 7.00 conocido, manteniendo los criterios de aceptación. Si hay alguna desviación durante la verificación, se suspenden los análisis y se procede a una verificación del método y a la calibración del equipo.
- Para determinar el porcentaje de sólidos suspendidos totales en el lodo, se utilizó el método ISO 11465:1993. Se pesó aproximadamente 20 g de lodo en una cápsula de porcelana seca (a) y tarada (c) en una balanza analítica (Ohaus Adventurer). Esta muestra se secó en una estufa (Wiseven Wof 165) a 105°C durante 24 horas y se la transporta a un desecador para posteriormente

pesarla (b). Este análisis se lo hizo una vez por semana a muestras de todos los tratamientos con sus respectivas réplicas.

- Para la medición de la alcalinidad se empleó el método titulométrico. Este procedimiento se aplica a muestras de agua potable y agua cruda (superficial y subterránea) agua residual y lodos residuales, es utilizado para la determinación de la alcalinidad. El principio de este método es el siguiente: Los iones hidroxilo presentes en una muestra, como resultado de disociación o hidrólisis de solutos, reacciona con adición de ácidos estándar y puede ser determinada por titulación o potenciométricamente observando puntos de inflexión en el pH a través de un indicador. Las muestras fueron tomadas según Procedimiento Operativo tomar al menos 100ml de muestra, transportar las muestras bajo baño de hielo. Para almacenar la muestra refrigerar. Realizar el análisis en un tiempo recomendado de 24h y un máximo de 14 días después de la toma de la muestra. Para la estandarización del ácido: 25 ml de solución patrón de H_2SO_4 0.02N se deben titular con aproximadamente 25 ml de solución patrón de Na_2CO_3 0.02N, utilizando como indicador heliantina o utilizar el método potenciométrico, esto según lo establecido por el Standard Methods.

Valoración: Medir una alícuota de 50 ml de muestra para aguas residuales y 100mL de muestra para agua cruda o potable, para esto utilizar una pipeta volumétrica (calibrada a la temperatura ambiente), y colocar en un Erlenmeyer de 250 ml de capacidad.

- Según lo establecido por el Standard Methods, para el procedimiento de determinación de NTK (Nitrógeno Total Kjeldahl) (4500 C Standard Methods 21th Ed, 2005 y para el fósforo total se utilizó el método HACH - 8191 que consisten en kits ya preparados con los reactivos listos para su uso, sólo se

tiene que seguir las instrucciones que ahí se detallan, y al final de los procedimientos como digestión y a adición de otros reactivos se producen reacciones colorimétricas que son directamente proporcionales a la concentración del analito que se está buscando y van a ser leídas en un espectrofotómetro dentro del rango de luz visible.

- Para obtener el contenido de sólidos volátiles (SV) mediante gravimetría, se colocó la cápsula con lodo seco proveniente del método 2.6.2, en una mufla (Snol E5CN) a una temperatura de 550°C, por 2 horas (calcinación). Una vez fría la cápsula se la volvió a pesar (b) en una balanza analítica (Ohaus Adventurer).
- Para el análisis microbiológico del lodo se analizaron dos parámetros microbiológicos: coliformes totales y huevos de helmintos. Los helmintos son los parásitos más comunes dentro del lodo residual, y es muy resistente a los tratamientos de estabilización por lo que es un buen indicador de eficiencia (Wang, 2012). Los coliformes son un buen indicador sobre la eficiencia de los procesos de tratamiento de destrucción de bacterias; también son indicadores de la concentración de Salmonella, por lo tanto, si se reducen los coliformes refleja un decrecimiento de Salmonella (Castrejon, y otros, 2002). El conteo de coliformes totales se realizó mediante las placas para recuento de coliformes. Estas placas están formadas por un medio de Violeta Rojo Bilis modificado, que es un agente gelificante soluble en agua fría, y un indicador de tetrazolio que facilita la enumeración de colonias. Además, cuenta con un film superior que atrapa el gas producido por la fermentación de la lactosa por los coliformes. Este mecanismo permite que se puedan observar las colonias de coliformes, haciendo posible su conteo, fue necesario realizar dos diluciones debido a que el lodo tiene un color oscuro. La primera dilución consistió en

colocar 1 ml de lodo en 9 ml de agua peptonada estéril. En la segunda dilución se colocó 1 ml de la primera dilución en otros 9 ml de agua peptonada, y se dejó reposar por 15 minutos. Se prosiguió a inocular, colocando la placa en una superficie plana, colocando con una pipeta 1 ml de esta preparación en el centro de la placa. Una vez listas las placas, se las situó con la cara arriba en la incubadora a 37°C durante 48 horas, para posteriormente, realizar el conteo de todas las colonias presentes en la placa, reflejando el número de coliformes totales. Este resultado fue multiplicado por 100 debido a la doble dilución preparada.

Etapas del proceso

El proceso de digestión anaerobia se divide en dos fases; en la primera fase denominada fermentación ácida y ésta inicia con la producción de ácidos por acción de microorganismos saprofiticos que son encargados de realizar la fermentación. Estos microorganismos son los que realizan la degradación de los compuestos complejos contenidos en la materia orgánica como carbohidratos, grasas y proteínas, y los transforma en compuestos intermedios más simples como los ácidos volátiles y otros compuestos orgánicos. Durante este proceso las bacterias sintetizan el sustrato presente en el lodo crudo para mantener el balance de población microbiana (Malina & Pohland, 1992).

Tabla10

Digestión anaeróbica de lodos

Etapas del proceso			
Etapas del proceso			
Lodo crudo	Microorganismos – A	Productos Intermedios de Degradación	Más Microorganismos –A
	-		-

Etapa 1: Fermentación ácida

Complejos orgánicos			
Substrato	Formadores de	Orgánicos simples	Y otros productos intermedios
Carbohidratos	ácidos Saprofíticos	Ácidos orgánicos	
Grasa	Facultativas	CO ₂ , H ₂ O	
Proteína			

Nota. En la presente tabla se logra apreciar la etapa 1 de la fermentación ácida de los lodos crudos (Yanez Cossio, 1992).

La segunda fase es donde se va a dar la producción de metano (CH₄), aquí están implicados bacterias netamente anaerobias. Estas bacterias utilizan productos intermedios del proceso anterior y producto de este metabolismo se producirán gases los cuales están constituidos principalmente por metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂), ácido sulfúrico (H₂S), Nitrógeno (N₂) y otros gases en menores cantidades.

La reducción del parámetro sólidos volátiles es el criterio para verificar el rendimiento del proceso. En el proceso de digestión se deben reducir el contenido volátil a cerca del 50% y los sólidos a cerca de un 70% de los valores iniciales.

El proceso de digestión anaeróbica se realiza en dos etapas, la primera con calentamiento y mezcla donde se producirá la mayor cantidad de biogás, mientras que en la segunda etapa es donde se produce el asentamiento, que se usa para almacenar y espesar el lodo digerido dando origen a la formación de un sobrenadante claro. La digestión anaeróbica también se puede realizar en digestores convencionales de una sola etapa ejecutándose el proceso en un solo tanque como es lo que se va a realizar en el presente estudio.

Tabla11
Digestión anaeróbica de lodos etapa 2

Etapa 2: Fermentación del Metano

Etapa 2: Fermentación del Metano

Productos Intermedios de Degradación +	Microorganismos –B	Productos Finales y Gas +	Más Microorganismos –B
Organismos simples Ácidos orgánicos CO ₂	Formadores de metano anaeróbicos obligados	Metano CH ₄ Bióxido de Carbono CO ₂ Sulfuro de Hidrógeno H ₂ S Otros productos de degradación	Y otros productos finales

Nota. Esta tabla muestra la etapa 2 de Fermentación del Metano en productos intermedios de degradación (Yanez Cossio, 1992).

La existencia de oxígeno dentro del proceso anaerobio podría interrumpir o influir en el crecimiento de la población bacteriana y por lo tanto afectar el proceso de digestión, la presencia de nitratos o sulfatos en el proceso retardarán la acción de los microorganismos metanogénicos produciendo acumulación de ácidos grasos volátiles (Romero Rojas, 1999).

Tabla12

Composición media de Biogás generada en un reactor anaeróbico

Compuesto	%	Compuesto	%
CH ₄	60-80	CO	0-0,1
	20-40	N ₂	0,5-3
CO ₂	1-3		0,5-1
	0,1-1	NH ₃ H ₂ S	Variable
H ₂		Agua	

Compuesto	%	Compuesto	%
O_2			

Nota. En esta tabla se puede identificar cual es la composición que presenta el biogás en un reactor anaeróbico (Portoaguas, 2018).

Alternativa y mitigación de impactos

El Sistema Único de Información Ambiental (SUIA) del Ministerio de Medio Ambiente (MAE), señala que toda construcción y operación de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (que incluye sistemas de alcantarillado), responde a un trámite de licencia ambiental que es de obligación para las instalaciones que, en su operación, superen los 5000 m³/ de agua por día (Portoaguas, 2018). La planta de tratamiento de aguas residuales de Portoviejo en la actualidad, trabaja con un promedio de 44064 m³/día de captación de agua residual, lo que está por encima de los rangos establecidos. Uno de los principales problemas que presenta la planta es la emisión de malos olores por efecto de emisiones gaseosas debido a la descomposición de la materia orgánica, lo que genera un descontento del 76% de la población según un estudio realizado por la Universidad Estatal del Sur de Manabí en el año 2017; este estudio indica que siente los olores emitidos por la PTAR obteniendo un radio de influencia a los 600 m, el 57% mencionan que los olores son fuertes, el 83% los percibe como fecal. Las horas a las cuales se sienten más los olores son: 6:00 a 9:00, 15:00 a 18:00 y 18:00 a las 21:00, y en la época lluviosa es donde se perciben más los olores. Una de las soluciones que se podrían plantear es la utilización de un sistema filtrante biológico. También se establece otro tipo de soluciones como son los usos de microorganismos efectivos

como una alternativa de reducción de materia orgánica en la laguna facultativa y para la eliminación de malos olores.

Otro inconveniente que presenta la planta es la disposición de los lodos residuales y que son el objeto de esta investigación. Como ya se planteó la alternativa será la aplicación de un sistema de digestores biológicos para el tratamiento de dichos lodos, y así, convertirlos en biosólidos que pueden ser empleados en la agricultura sin presentar mayor inconveniente.

Los biosólidos son materiales de composición sólida o semisólida que son el producto del tratamiento de aguas residuales urbanas que deben ser lo adecuadamente tratados, los cuales tendrán efectos benéficos cuando son incorporados al mismo y así proveerlo de los nutrientes necesarios para renovar la materia orgánica y ayudar al crecimiento y proliferación de microorganismos benéficos, todo esto contribuirá a mejorar las características de los suelos como textura y la capacidad de filtración y absorción de agua que permitirá un mejor crecimiento de las raíces favoreciendo a que las plantas tengan mayor absorción de nutrientes y más rápido crecimiento. Los biosólidos se pueden utilizar en diferentes clases de suelos como son suelos agrícolas, bosques, campos de pastoreo, o en terrenos alterados que necesitan recuperación (Limón, 2013).

Otra ventaja de los biosólidos es suministrar nitrógeno y fósforo, así como algunos micronutrientes esenciales, tales como el níquel, el zinc y el cobre, siendo su manejo de mayor ayuda que los fertilizantes químicos por ser menos dañinos sin mencionar su alto costo. Los biosólidos pueden ser añadidos al suelo paulatinamente para que las plantas en crecimiento asimilen sus nutrientes y así evitar que los lixiviados pasen y contaminen las aguas subterráneas (Limón, 2013).

Tabla13

Porcentaje de Nutrientes entre fertilizantes y lodos estabilizados

Porcentaje de Nutrientes entre fertilizantes y lodos estabilizados	Nutrientes %		
	Nitrógeno	Fósforo	Potasio
Fertilizantes para usos Agrícolas típicos	5	10	10
Lodos de agua residual estabilizados	3.3	2.3	0.3

Nota. En esta tabla se puede apreciar la comparación entre fertilizantes comerciales y lodos estabilizados mediante proceso de biodigestor anaeróbica (Limón, 2013).

Para la utilización de los biosólidos en la agricultura deben considerarse algunos aspectos como lo son:

- Tomar en cuenta la concentración de metales presentes en los biosólidos.
- Tener un límite de aplicación de los biosólidos.
- Considerar la composición física, química y biológica del suelo en el cual se aplicarán los biosólidos.

La utilización de los lodos de depuradora debe tener en cuenta las necesidades en nutrientes de las plantas, pero no debe perjudicar la calidad de los suelos ni la de las aguas superficiales y subterráneas (Mahamud, Lavín, & Herminio, 1996).

Los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales deberían utilizarse en agricultura siempre que esté regulada su utilización y se deben prohibir su utilización cuando la concentración de uno o de varios metales pesados en los suelos supere los valores límite que se fijen en las aguas superficiales. No se debe permitir la utilización de biosólidos en pastos o en cultivos que serán utilizados para alimentación de animales, utilización en cultivos hortícolas y frutícolas durante el período de vegetación, con la excepción de los cultivos de árboles frutales. El uso en suelos destinados a cultivos de hortalizas o frutas que estén en contacto directo con el suelo y que por sus características se consuman crudas, esto deberá hacerse durante un período de diez meses antes de la cosecha y durante la cosecha misma (Mahamud, Lavín, & Herminio, 1996).

Se deben realizar muestreos y análisis periódicos de los biosólidos y de los suelos sobre los que se han utilizado para evitar cualquier clase de impacto ambiental o problema de salud pública o algún problema animal. De esta manera si se lograra presentar algún tipo de impacto realizar las debidas correcciones al proceso o uso de los biosólidos.

Tabla14

Concentración en el biosólido

Metal	Concentración en el biosólido (mg/kg)		Aporte contaminante (kg/ha/año)		Norma oficial mexicana nom-052-semarnat-2005
	CE	EUA	CE	EUA	
ARSÉNICO		75		2.0	5.0
CADMIO	20-40	85	0.15	1.9	1.0
CROMO	1000-1500	3000	3.0	150	5.0
COBRE	1000-1750	4300	12	75	---
PLOMO	750-1200	840	15	15	5.0
MERCURIO	16-25	57	0.1	0.85	0.2
MOLIBDENO		75		0.9	--
NÍQUEL	300-400	420	3	21	--
SELENIO		100		5.0	1.0
ZINC	2500-4000	7500	30	140	---

Nota. En esta tabla se hace una comparación de los valores máximos permitidos de presencia de metales pesados en biosólidos para ser utilizados en la

agricultura Norma oficial mexicana nom-052-semarnat-2005, que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos.

Cuantificación de la eficiencia del sistema

Se considera más eficiente un sistema de tratamiento de lodos residuales aquel que ha logrado garantizar una mayor descontaminación de estos con la debida reducción de agentes patógenos en ellos.

Este proceso representa un área de oportunidad en el saneamiento de las aguas por presentar las siguientes ventajas: Produce biogás, el cual puede ser empleado en el calentamiento y mezclado del reactor. Otro uso es en la producción de electricidad o como gas combustible. Se reduce la cantidad de sólidos totales para disposición final. Los sólidos totales son destruidos del 30 a 40% y del 40 al 60% los sólidos volátiles. En la estabilización anaerobia se genera un lodo estabilizado que está libre de fuertes olores. Durante este proceso se destruye en alguna medida el número de microorganismos patógenos del lodo.

De la misma manera buscar la estabilización anaerobia con la finalidad de disminuir los costos de operación y mantenimiento cobra importancia, si se tiene en cuenta que el manejo de los lodos de una planta de tratamiento de lodos activados de tipo convencional es costoso e intensivo, y puede llegar a representar entre el 25 y el 60% del costo total de la operación de la planta.

Resultados y Discusión.

Caracterización y cuantificación de los lodos.

Para iniciar el proceso de digestión anaerobia, hay que referirse a la concentración inicial de sólidos suspendidos totales y sólidos suspendidos volátiles que fueron de 30.600,00 mg/l y 21.800,00 mg/l respectivamente y con una demanda química de oxígeno o DQO de 36.440,00 mg/L. Se debe considerar que un factor que influye en la producción y concentración de los lodos y biomasa de la planta piloto, es el factor climático, ya que en periodos lluviosos el agua residual se diluye y las concentraciones de contaminantes bajan.

En la tabla 15, se realizaron análisis físicos como pH, conductibilidad, mineralización, sólidos suspendidos totales, análisis orgánicos – biológico como demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO5), mientras que entre los tratamientos químicos se realizaron aluminio, amoníaco, bario, cloruros, cobre, cromo hexavalente, manganeso, nitritos, sulfatos y fosfatos. Se recomendando sustituir la DBO5 por otros mecanismos de control que sean más rápidos (Cisterna Osorio & Alvarado Mardones, 2003).

Para los análisis de datos se tomaron en cuenta los parámetros realizados y se los comparó en función del tiempo para medir la eficiencia del digestor anaerobio y su proceso de descomposición de materia orgánica como se seguirá viendo más adelante.

Tabla15*Características de los lodos de la PTAR Portoviejo*

PARÁMETROS	RESULTADOS				
	AIREADA	AIREADA A	AIREADA B	AIREADA	Unidad
	A P1	P2	P1	B P2	es
FÍSICOS					
CONDUCTIBILIDAD ($\mu\text{s/cm}$)	37300	37400	36200	36300	$\mu\text{s/cm}$
MINERALIZACIÓN (mg/L)	28293,69	28369,55	27459,29	27535,15	mg/l
pH	7,8	7,7	7,7	7,9	
SÓLIDOS TOTALES SUSPENDIDOS, STS (mg/L)	23200	23100	13700	14500	mg/l
QUÍMICOS					

ALUMINIO, Al (mg/L)	1,36	1,29	0,92	0,75	mg/l
AMONIACO, NH ₃ (mg/L)	2,6	2,4	3,5	3	mg/l
BARIO, Ba (mg/L)	270	250	300	280	mg/l
CLORUROS, Cl (mg/L)	1010	970	1060	1020	mg/l
COBRE, Cu (mg/L)	2,3	2,1	1,9	1,7	mg/l
CROMO HEXAVALENTE, Cr (mg/L)	8,71	7,83	10,5	9,3	mg/l
MANGANESO, Mn (mg/L)	44	40	41	40	mg/l
NITRITOS, NO ₂ (mg/L)	270	250	300	270	mg/l
SULFATOS SO ₄ (mg/L)	100	95	140	110	mg/l
FOSFATOS, PO ₄ (mg/L)	191	175	54	45	mg/l

ORGÁNICOS – BIOLÓGICOS					
DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO ₅)	2060	2030	630	606	mg/l
DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO)	3930	3850	1190	1150	mg/l

Nota. En la tabla 15 se presentan los valores de las caracterizaciones de lodos realizados en la PTAR de Portoviejo en octubre del 2018 (Portoaguas, 2018)

Reducción de los Sólidos Suspendidos Totales (SST) por día

En la figura 7, se puede apreciar que el porcentaje de digestión de los sólidos suspendidos totales.

Figura 5

Reducción de SST por día

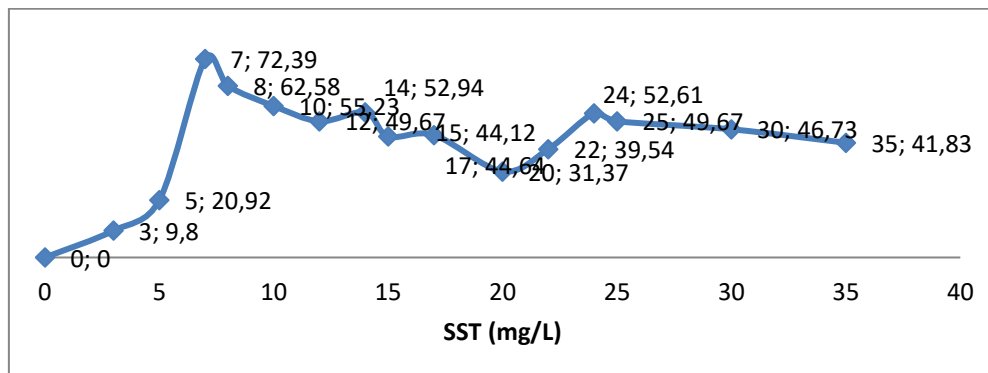


Tabla16

Relación % entre SST y SSV

Digestión en N de días	Solidos Solubles Totales (mg/L)
0	0,00
3	9,8
5	20,92
7	72,39
8	62,58
10	55,23
12	49,67
14	52,94
15	44,12
17	44,64

Digestión en N de días	Sólidos Solubles Totales (mg/L)
20	31,37
o22	39,54
24	52,61
25	49,67
30	46,73
35	41,83
40	

Nota. En la tabla 16 se aprecian valores que se mantiene a lo largo del proceso de digestión anaerobia en los rangos del 31% al 55% con respecto al valor de los sólidos suspendidos totales iniciales, excepto en los primeros días, es así que al tercer día existe solo una disminución del 9,8%, al quinto día es del 20,92% y al séptimo día el porcentaje de digestión aumenta drásticamente al 72,39% y empieza a descender un poco al noveno día al 62,58% y a partir de este punto se mantienen en los rangos antes mencionados.

Relación Sólidos Suspendidos Totales y Sólidos Suspendidos Volátiles

En la Figura 6, se presenta la relación entre SST y SSV.

Figura 6

Relación % entre SST y SSV

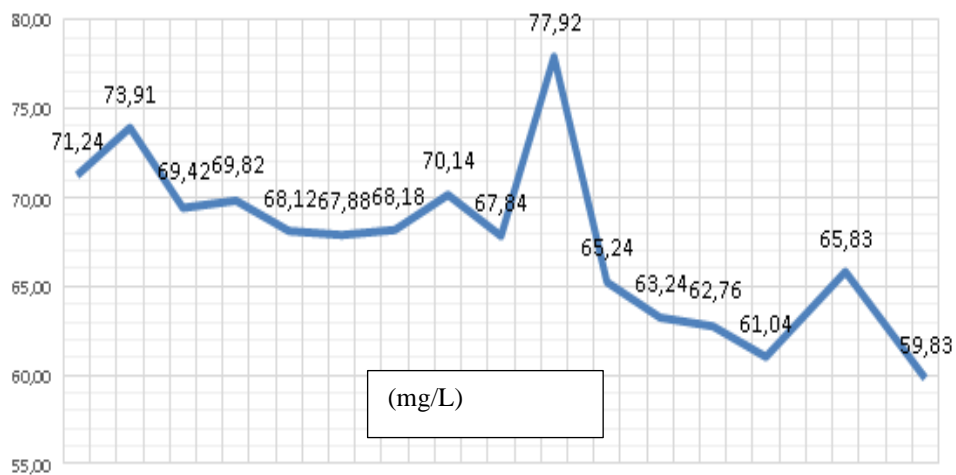


Tabla 17

Relación % entre SST y SSV

Mayo y Junio 2018	Relación % entre SST y SSV
5/5/2018	71,24
7/5/2018	73,91
8/5/2018	69,42
10/5/2018	69,82
12/5/2018	68,12
14/5/2018	67,88
16/5/2018	68,18
19/5/2018	70,14
21/5/2018	67,84
23/5/2018	77,92
25/5/2018	65,24
26/5/2018	63,24
28/5/2018	62,76
31/5/2018	61,04
3/6/2018	65,83
6/6/2018	59,83

Nota. En la tabla 17 se evidencia que existe un punto más alto en el porcentaje de reducción de sólidos suspendidos totales de un 72,39 % alrededor del día 9; para luego establecerse un descenso en los porcentajes de reducción llegando 59,83 % el día 20 con una reducción de sólidos suspendidos total del 30%. A partir del día 20 se puede observar que existen fluctuaciones mínimas en los porcentajes de reducción de los sólidos suspendidos totales.

Con respecto a los sólidos suspendidos volátiles, se ve que los SSV son en mayor porcentaje a los SST, representan el 60 y 70% de los SST. Estas cifras revelan que la materia orgánica es en su gran mayoría volátil y digerible dentro de los biodigestores.

Relación DBO vs Tiempo en Días

En la Figura 7, se presenta la relación entre DBO y tiempo.

Figura 7

Relación DQO y tiempo en días

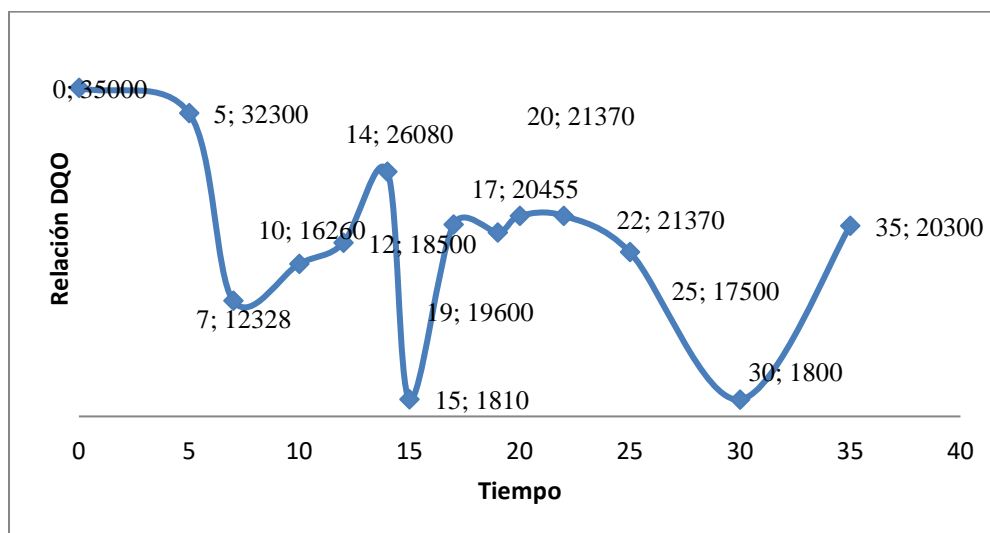


Tabla18

Relación DQO vs Número de días

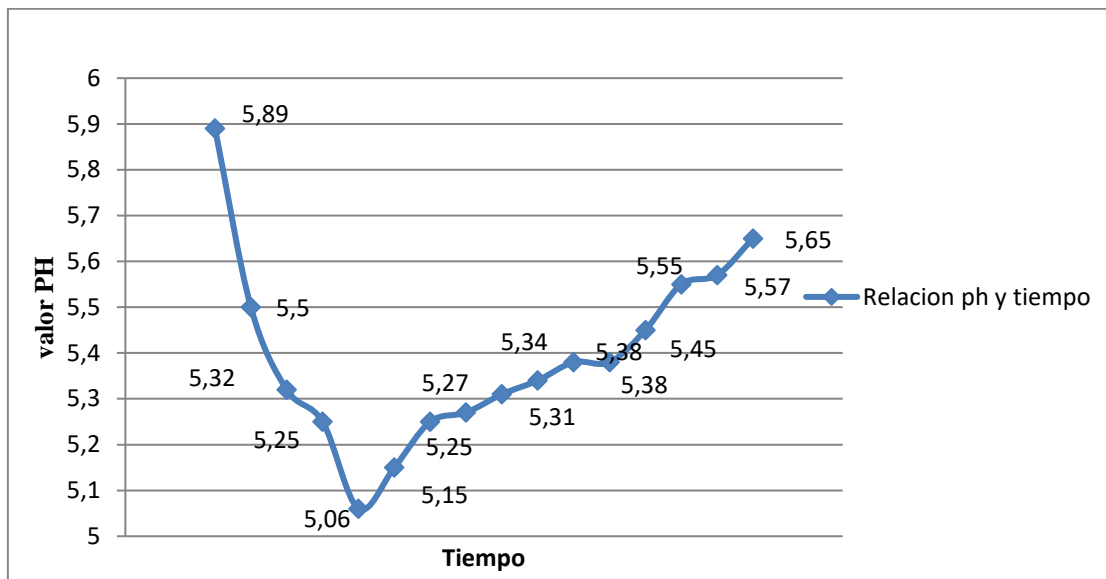
Digestión en N de días	Relación DQO y tiempo en días

Digestión en N de días	Relación DQO y tiempo en días
0	35000
5	32300
10	12328
10	16260
10	18500
10	26080
15	1810
15	20455
15	19600
20	21370
20	21370
25	17500
30	1800
35	20300

Nota. En la tabla 18 se hace referencia a la DQO o Demanda Química de Oxígeno, se puede ver claramente que existe una disminución progresiva en los primeros días hasta el día séptimo, al igual que en los casos de los Sólidos suspendidos totales y sólidos suspendidos volátiles ocurre una disminución drástica de la DQO, y a partir de ahí los valores de la DQO se mantienen entre los 16.000,00 mg/L hasta los 26.000,00 mg/l con una media de 21.938,00 mg/l, ya que los microorganismos estaban cumpliendo su función de degradación de materia orgánica e inorgánica pero su metabolismo bacteriano había disminuido posiblemente por la presencia de algún compuesto inorgánico de difícil digestión presente en los lodos, pero la eficiencia en la digestión se mantuvo.

Relación pH vs Tiempo

En la Figura 8, se presenta la relación entre pH y tiempo.

Figura 8*Relación pH y tiempo***Tabla19***Relación Ph vs Tiempo.*

Mayo y Junio 2018	Relación pH y tiempo
5/5/2018	5,89
7/5/2018	5,5
9/5/2018	5,32
11/5/2018	5,25
13/5/2018	5,06
15/5/2018	5,15
17/5/2018	5,25
19/5/2018	5,27
21/5/2018	5,31
23/5/2018	5,34
25/5/2018	5,38

Mayo y Junio 2018	Relación pH y tiempo
27/5/2018	5,38
29/5/2018	5,45
31/5/2018	5,55
2/6/2018	5,57
4/6/2018	5,65

Nota. Según la tabla 19, para el caso del pH se observa cómo actúan las bacterias acidogénicas, ya que en los primeros días existió un descenso brusco de pH hasta un cierto nivel y a partir de este punto el valor del potencial hidrógeno empezó a subir paulatinamente, esto indica que puede ser el inicio de la fase de acetogénesis, y como se aprecia en el gráfico, el pH tiende a subir, asumiendo que el pH subirá hasta un valor óptimo para que se den los procesos de producción de metano o metanogénesis. Cabe destacar que los primeros días del mes de junio se observó un nuevo aumento en el valor del pH hasta el momento en el que fue suspendido el proceso en los biodigestores.

Digestión vs Tiempo

En la Figura 9, se presenta la digestión versus el tiempo.

Figura 9

Digestión de lodos en mg/l

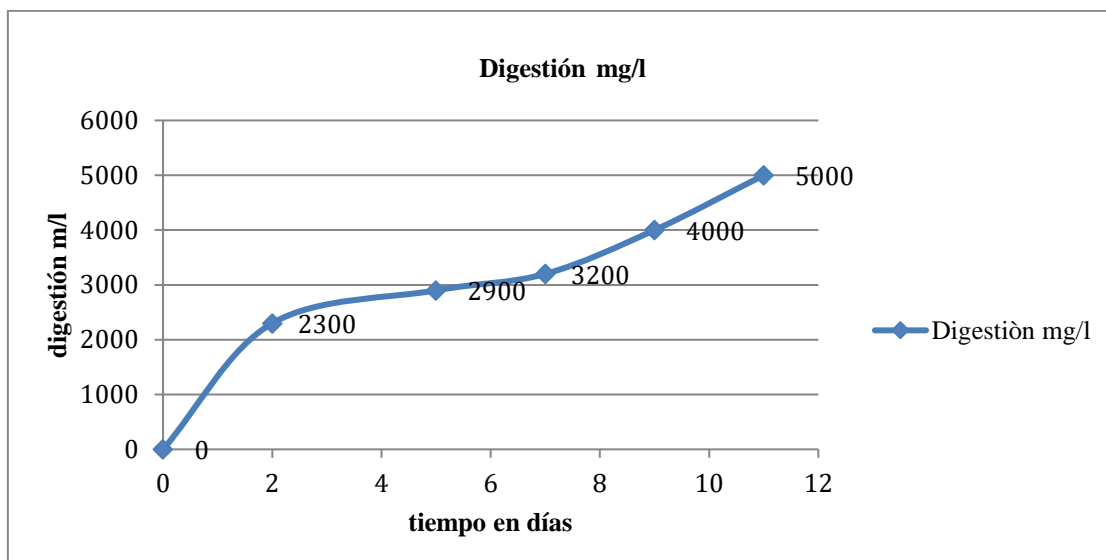


Tabla 20

Relación Tiempo en días vs Digestión en mg/l

Tiempo en días	Digestión mg/l
0	0
2	2300
5	2900
7	3200
9	4000
11	5000

Nota. En la tabla 20 se puede evidenciar el comportamiento que tienen las muestras de lodo durante 11 días de observación, en donde se evidencia que existe un aumento en los valores de digestión de cada una de estas. Cabe destacar que la muestra que no obtuvo ningún tipo de tratamiento previo (testigo), antes de ser sometido al proceso de biodigestión fue la que presentó menor avance en el proceso de digestión con relación a las otras muestras.

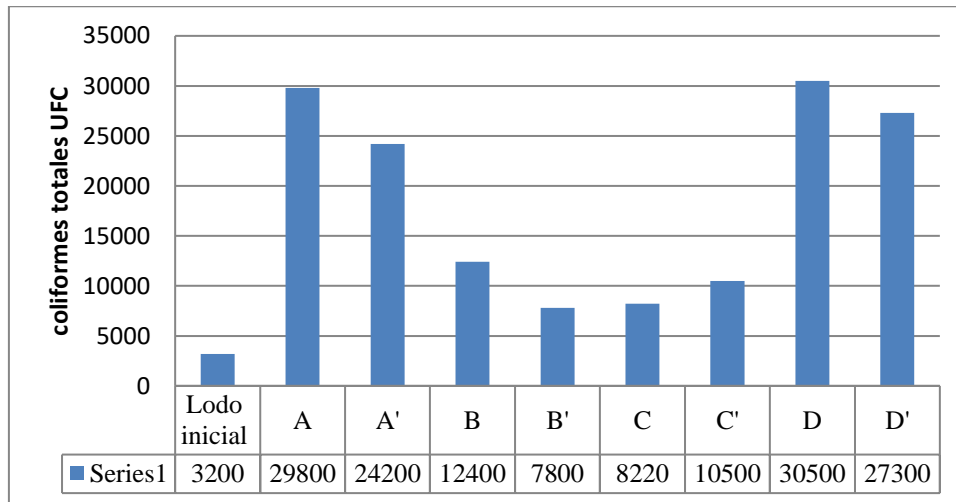
Conteo de Coliformes

En la Figura 10, se presenta el conteo de coliformes.

Figura 10

Conteo de coliformes totales antes y después de la digestión anaerobia mesófila.

Exploratorio.

**Tabla21**

Conteo de coliformes en lodos iniciales

Lodo inicial	A	A'	B	B'	C	C'	D	D'
3200	29800	24200	12400	7800	8220	10500	30500	27300

Nota. En la tabla 21 observamos que los productos que pueden ser del biosólido reutilizable conocido como clase B (el esperado en un tratamiento de digestión anaerobia mesófila), es aquel que se somete a los tratamientos B y C. La muestra A corresponde al tratamiento testigo, por lo tanto, esta tendrá muy poca reducción de coliformes. Por otro lado, se demuestra que la adición de bioacelerador a las muestras B y C ayuda a potenciar la reducción de microorganismos patógenos y reduce los tiempos en los procesos de bioestabilización. Adicionalmente se puede evidenciar que la muestra D fue sometida al proceso de pasteurización presenta un crecimiento inusual de salmonella.

Con este resultado se confirma que el tratamiento en la muestra C presenta una mayor reducción de patógenos (hasta el 71% de coliformes) y mejor tiempo de estabilización (7 días), transformando el lodo en un biosólido clase B. Por esta razón, a partir de dicho tratamiento en la muestra C, se realizó el diseño experimental comparativo de optimización, buscando reducir los coliformes en, al menos, un 71%. La reducción de patógenos puede ser atribuida principalmente al agotamiento de los nutrientes en el medio que se produce gracias a la digestión anaerobia mesófila.

Metales Pesados

En la Figura 11, se presenta el % de remoción de metales pesados.

Figura 11

Eficiencia de Remoción de metales

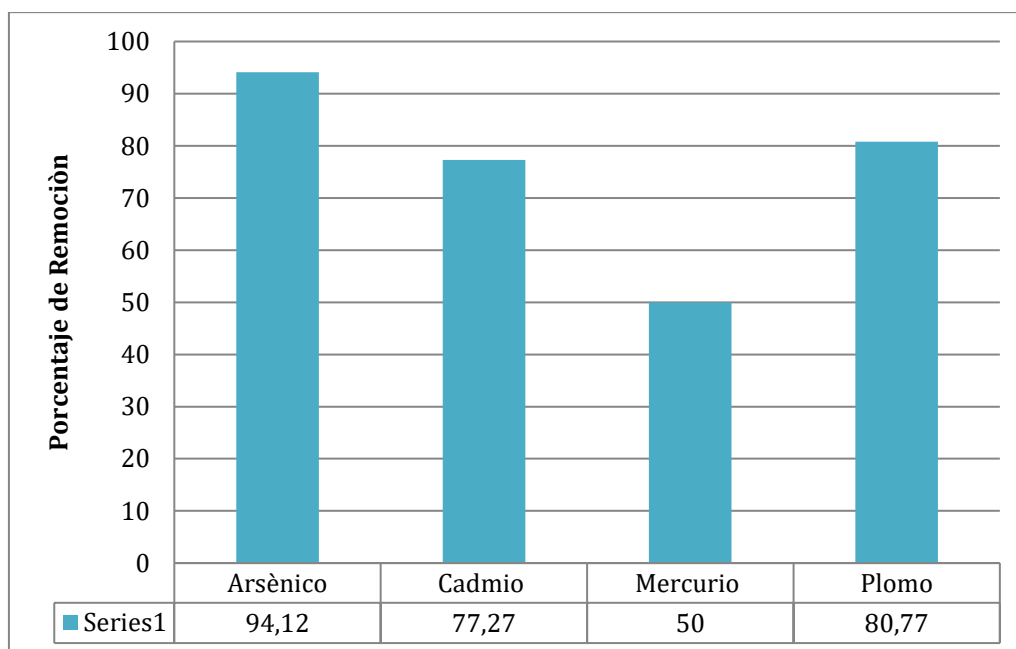


Tabla22

Metales pesados

Arsénico	Cadmio	Mercurio	Plomo
94,12	77,27	50	80,77

Nota. La tabla 22 hace referencia a la remoción de los metales pesados en el proceso de biodigestión se da principalmente por adsorción y gracias a que se trata de un proceso biológico. Esto se dio por la interacción entre materia orgánica, metales pesados y los microorganismos. Los metales pesados son absorbidos por los microorganismos y por las proteínas en su materia celular, o por la interacción entre los iones del metal y la carga negativa de la superficie microbiana.

Discusión

Existen muchas variables que necesitan ser controladas tales como temperatura, homogenización, agitación o mezcla, tiempos de retención, pH y alcalinidad, etc. Todos estos deben tener un control adecuado ya que influyen en el producto final del proceso de digestión anaeróbica.

Con los resultados obtenidos se puede comprobar que se realizó un proceso óptimo de bioestabilización por digestión anaerobia mesófila. Sin embargo, para poder reutilizar dicho biosólido, es necesario conocer el estado de los factores limitantes: microorganismos patógenos y metales pesados (Amador Díaz, Veliz Lorenzo, & Bataller Venta, 2015).

Se puede notar que el nitrógeno aumentó después del tratamiento. Se presume que, en la digestión anaerobia de lodos, la oxidación de la materia orgánica es incompleta, por lo que se genera nitrógeno amoniacal (30% del total de nitrógeno formado), y nitrógeno en formas orgánicas insolubles, aumentando su valor (Luciano Parrales & Basurto Loor, 2019).

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

- Se diseñó un sistema de estabilización y manejo para los lodos residuales de la PTAR Portoviejo, en el que se establece como parte medular un sistema de digester de carga intermitente y discontinua de digestión mesófila (anaerobia), con capacidad de carga de 1000 ml para cada reactor para un total de 8 reactores, correspondientes a las muestras y testigos de referencia para las pruebas de laboratorio. Obteniendo el porcentaje de reducción de sólidos suspendidos totales de 72,39 % alrededor del día 9; para luego establecerse un descenso en los porcentajes de reducción llegando al 59,83 % el día 20 con una reducción de sólidos suspendidos totales del 30%. Describiendo de esta forma un proceso de reconversión de los valores a los estándares permitidos por la legislación vigente.
- Los lodos residuales procedentes del sistema de tratamiento de la PTAR Portoviejo, tuvieron una concentración inicial de sólidos suspendidos totales y sólidos suspendidos volátiles de 30.600,00 mg/L y 21.800,00 mg/L respectivamente, con una DQO de 36.440,00 mg/l. De tal manera que se realizaron análisis de laboratorio relacionados con los SST (una media de 12.293,00 mg/l con una reducción del 59,83%) y SSV (una media de 15.260,00 mg/l con una reducción del valor inicial del 30%), así como también la DQO con una media de 21.938,00 mg/l. En el caso de los valores de pH, se obtuvieron valores medios de todas las mediciones diarias, los cuales pasaron de valores de pH de 5,89, con temperaturas cercanas a los 35° C en la época de invierno, hasta un pH de 5,15, con una temperatura de 25° C promedio en la época de verano. Para lograr un valor final de Ph de 5.65, al concluir los experimentos.

Los valores de nitritos de 250 mg/l y trazas de metales pesados (Aluminio 1,08 mg/l; Bario 275 mg/l; Cobre 2 mg/l; Cromo 9,08 mg/l; Manganesio 41,25 mg/l).

- Se estableció un proceso para el tratamiento de los lodos residuales en el sistema PTAR Portoviejo, para la estabilización de los lodos por etapas. De tal manera que, en el sistema de los microorganismos anaerobios, se presentan resultados en los que poseen un mayor rendimiento en el proceso termofílico, pero este tipo de proceso tiene un consumo considerable de energía. En la DQO, se da una disminución progresiva en los primeros días con un valor inicial de 36.440,00 mg/l hasta el día séptimo que ocurre una disminución drástica de la DQO, y a partir de ahí los valores de la DQO se mantienen entre los 16.000,00 hasta los 26.000,00 mg/L con una media de 21.938,00 mg/l.
- El proceso de estabilización fue monitoreado diariamente para todos los parámetros antes mencionados, lo que estableció un procedimiento de investigación y se trabajó con un diseño experimental exploratorio de tipo comparativo en el que se pudo observar que en la muestra C fue la que mejores resultados presentó en la optimización del proceso de estabilización. A continuación, se realizó otro diseño experimental completamente aleatorio comparativo, esta vez de optimización, observándose que las condiciones de optimización apropiadas son lodo + bioacelerador + dosificación nutritiva, correspondientes al tratamiento F. Debido a la acción del bioacelerador se logró reducir la humedad del lodo, acelerar el proceso de estabilización y ayudar a reducir la cantidad de microorganismos presentes en el lodo, en general, a optimizar el proceso. Los resultados de esta investigación son satisfactorios para poder ejecutar el proyecto dentro de la PTAR de la ciudad de Portoviejo. La realización de este proyecto implica un beneficio al ambiente, al evitar que estos lodos que presentan malos olores y problemas de lixiviados

para el suelo sean desechados a los ríos o dispuesto en rellenos sanitarios; y un beneficio a la ciudad de Portoviejo, al obtener biosólidos que son un material que se puede aprovechar de varias maneras.

Recomendaciones

- La medición del pH es recomendable realizarla de 3 a 5 para evitar los efectos que puede causar el oxígeno al proceso debido a las continuas interrupciones.
- Para poder ser implementado este proceso a gran escala es recomendable e importante, controlar que el pH inicial no baje de 6.5 para que el proceso de la digestión anaerobia trabaje de manera adecuada y se produzca biogás. Esto se lo puede hacer mediante soluciones buffers; además que para la medición del biogás se debería utilizar un medidor de flujo de gases o gasómetro para medir su producción, además se sugiere que se debería hacer la caracterización del biogás para determinar la composición y los porcentajes de gases presentes en él. Un método sencillo de comprobación de producción de metano es encender con cuidado el gas que se está desprendiendo por la válvula de salida y enseguida se producirá la combustión del gas.
- Los biosólidos generados en el proceso de biodigestión pueden ser comercializados para ser utilizados en la agricultura y esto podría ser una fuente de ingreso y trabajo dentro de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Portoviejo, contribuyendo a la labor social de esta.

Referencias bibliográficas

- Amador Díaz, A., Veliz Lorenzo, E., & Bataller Venta, M. (2015). Tratamiento de lodos, generalidades y aplicaciones. Revista CENIC, 46, 1-10. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/1816/181642434003.pdf>
- Carcelén Árcos, R. D. (2015). Tratamiento de lodos por digestión anaerobia de la planta piloto de aguas residuales del colector "El Batán" del Distrito Metropolitano de Quito y su posible aplicación en la agricultura. Quito, Ecuador: Universidad Internacional SEK. Obtenido de <https://repositorio.uisek.edu.ec/bitstream/123456789/1468/1/TESIS%20DIGESTION%20ANAEROBIA%20DE%20LODOS%20DE%20UNA%20PPTAR%2006082015.pdf>
- Carrasco Quiroz, C. A. (2007). Tratamiento físico químico de aguas residuales. Chile: Universidad de Chile. Obtenido de http://www.tesis.uchile.cl/tesis/uchile/2007/carrasco_c/pdf/carrasco_c.pdf
- Castrejon, A., Barrios, A., Jiménez, B., Maya, C., Rodríguez, A., & González, A. (2002). Evaluación de la calidad de lodos residuales de México. Conference: XIII COngreso Nacional de la Federeación Mexicana de Ingeniería Sanitativa y Ciencias Ambientales. México, I, 251-255. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/228368946_Evaluacion_de_la_calidad_de_lodos_residuales_de_Mexico
- Chicon, L. (2003). Especiación de metales pesados en lodos de aguas residuales de origen urbano y aplicación de lodos digeridos como mejorados de suelos. España: Universidad de Málaga. Obtenido de https://www.pilcomayo.net/media/uploads/biblioteca/libro_902_MA-271.pdf

- Cisterna Osorio, P., & Alvarado Mardones, V. (2003). Gradientes de estabilización de lodos de acuerdo a los regímenes de procesos de fangos activos - teoría y práctica. España: XXVII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental.
- Donado, R. (2013). Plan de gestión para lodos generados en las PTAR-D de los municipios de Cumural y San Martín de los Llanos en el Departamento del Meta. Bogotá, Colombia: Pontificia Universidad Javeriana. Obtenido de <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/13496/DonadoHoyosRoger2013.pdf>
- García Cardenas, M. I. (2016). Tratamiento de lodos residuales procedentes de plantas de tratamiento de aguas residuales mediante procesos electroquímicos para la disminución de la concentración de coliformes fecales y totales. Cuenca, Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana. Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/12044/1/UPS-CT005866.pdf>
- Grajales, S. J., Monsalve, J. A., & Castaño, J. M. (2006). Programa de manejo integral de los lodos generados en la planta de Tratamiento de aguas residuales de la Universidad Tecnológica de Pereira. *Scientia Et Technica*, XII(31), 285 - 290. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/849/84911639049.pdf>
- Limón, J. (2013). Los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales ¿Problema o recurso? Guadalajara: Academia de Ingeniería de México. Obtenido de https://www.ai.org.mx/ai/images/sitio/201309/ingresos/jglm/doc_ingreso_gualberto_limon_trabajo_de_ingreso.pdf
- Llivichuzca Guapisaca, M. N. (2016). Tratamiento de lodos residuales procedentes de plantas de tratamiento de aguas residuales mediante procesos electroquímicos para la disminución de la concentración de huevos helmintos. Cuenca,

- Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana. Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/12048/1/UPS-CT005871.pdf>
- López Torres, M., Véliz, E., Fernández García, L., & Espinosa Llorénz, M. (2010). Tratamiento de lodos. Una etapa necesaria dentro del proceso tecnológico. *Revista CENIC*, 41, 1-6. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/1816/181620500036.pdf>
- Lorenzo Acosta, Y., & Obaya Abreu, M. C. (2005). La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I. *ICIDCA. Sobre los derivados de la Caña de Azúcar*, XXXIX(1), 35 - 48. Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223120659006>
- Luciano Parrales, E., & Basurto Loor, A. E. (2019). Diseño del sistema de alcantarillado sanitario para la Comunidad El Tigre - Pimpiguasi, Parroquia Calderon, Cantón Portoviejo. Universidad Estatal del Sur de Manabí. Obtenido de <http://repositorio.unesum.edu.ec/bitstream/53000/2001/1/UNESUM-ECUADOR-ING.CIVIL-2019-84.pdf>
- Mahamud, M., Lavín, A., & Herminio, A. (1996). Biosólidos generados en la depuración de aguas (I): planteamiento del problema. *Ingeniería del Agua*, 3(2). doi:10.4995/ia.1996.2698
- Malina, J. F., & Pohland, F. G. (1992). Diseño de procesos anaeróbicos para el tratamiento de residuos industriales y municipales. *Biblioteca de gestión de la calidad del agua*, 214. Obtenido de <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US9408787>
- Marambio, C., & Ortega, R. (2003). Uso potencial de lodos derivados del tratamiento de aguas servidas en la producción de cultivos en Chile. *Revista Agronómica y Forestal*(20), 20 - 23. Obtenido de [Uso potencial de lodos derivados del tratamiento de aguas servidas en la producción de cultivos en Chile](#)

- Metcalf, E. (2003). Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, Vertido y Reutilización. Madrid: McGraw - Hill. Obtenido de https://www.academia.edu/35963101/Ingenier%C3%ADa_de_aguas_residuales_Volumen_1_3ra_Edici%C3%B3n_METCALF_and_EDDY_FREELIBROS_ORG_pdf
- Montes Morán, M., & Menéndez, J. Á. (2010). El problema de la gestión de los lodos en EDARs. Instituto Nacional del Carbón. Obtenido de <http://digital.csic.es/bitstream/10261/95474/1/EI%20problema%20de%20la%20gestion%20de%20lodos%20en%20EDARs.pdf>
- Oropeza García, N. (2016). Lodos residuales: Estabilización y Manejo. Estructplan. Obtenido de <https://estructplan.com.ar/lodos-residuales-estabilizacion-y-manejo/>
- Peña Guzman, C. A. (2012). Control de oxígeno disuelto en un tanque de aireación de una planta piloto de lodos activos. Bogotá, Colombia: Pontificia Universidad Javeriana. Obtenido de <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/2104/PenaGuzmanCarlosAndres2012.pdf?sequence=1>
- Pérez Zuñiga, M. E. (2016). Tratamiento de lodos residuales procedentes de plantas de tratamiento de aguas residuales mediante procesos electroquímicos para la disminución de metales pesados (Pb). Cuenca, Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana. Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/12045/1/UPS-CT005868.pdf>
- Portoaguas. (2018). Ecuador.
- Rittmann, B., & McCarty, P. (2001). Biotecnología del Medio Ambiente. Principios y Aplicaciones. Dialnet, 25. Obtenido de <http://bibliotecasibe.ecosur.mx/sibe/book/000039182>

- Romero Pareja, P. M. (Noviembre de 2011). Caracterización de la actividad de lodos de digestión anaerobia y su influencia sobre la reducción de producción de lodos. Cádiz, España: Universidad de Cádiz. Obtenido de <https://rodin.uca.es/xmlui/bitstream/handle/10498/14617/Proyecto%20Fin%20de%20M%C3%A1ster%20Romero%20Pareja-PabloM.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Romero Rojas, J. R. (1999). Tratamiento de aguas residuales. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería. Obtenido de https://www.academia.edu/41246680/Tratamiento_de_Aguas_Residuales_Romero_Rojas
- Sanz Valencia, M. (Octubre de 2014). Digestión anaerobia de fangos de EDAR, problemas y soluciones. Obtenido de <https://www.aguasresiduales.info/revista/blog/digestion-anaerobia-de-fangos-de-edar-problemas-y-soluciones>
- Scholz, M. (2006). Sistemas de humedades para controlar la escorrentía urbana. Reino Unido: Ciencia de Elsevier. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52734-9.X5000-2>
- Sinha, S., Yoon, Y., & Yoon, J. (2004). Determining the effectiveness of conventional and alternative coagulants through effective characterization schemes. *Chemosphere.*, 57(9), 1115-22. doi:10.1016/j.chemosphere.2004.08.012.
- Van der Last, A., & Lettings, G. (s.f.). Calidad del agua, tecnología de saneamiento para las Américas. Recuperado el Julio de 2021, de <http://cepis.org.pe/anaerobic-treatment-sewage-dutch/>
- Vasquez Aleman, J. P., & Vargas Martinez, G. (2018). Aprovechamiento de lodos planta de tratamiento de aguas residuales Municipio de Funza, como insumo de cultivo y mejoramiento del suelo. Bogotá, Colombia: Universidad Católica de

Colombia. Obtenido de

<https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/16425/1/Trabajo%20de%20Grado%20-%20%20Lodos%20Funza.pdf>

Vigueras Carmona, S. E., Zafra Jimenez, G., García Rivero, M., Martínez Trujillo, M.

A., & Pérez Vargas, J. (2013). Efecto del pretratamiento sobre la biodegradabilidad anaerobia y calidad microbiológica de lodos residuales secundarios. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 12(2), 293 - 301.

Obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-27382013000200009

Wang, J. (2012). *Fundamentals of Biological Processes for Wastewater Treatment*.

China: Wiley Online Library. doi:<https://doi.org/10.1002/9781118309643.ch1>

Yanez Cossio, F. (1992). *Evaluación de Lagunas de Estabilización*. Centro

Panamericano de la Salud. Obtenido de

<http://www.ingenieroambiental.com/4014/012837.pdf>

Anexos