



UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK

FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y AMBIENTALES

Trabajo de Fin de Carrera Titulado:

**“CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE LODOS DE DEPURACIÓN
PROVENIENTES DE LA PLANTA PILOTO DE TRATAMIENTO DE
AGUAS RESIDUALES DE LA EPMAPS - AGUA DE QUITO PARA SU
APROVECHAMIENTO EN LA GENERACIÓN DE ENERGÍA”**

Realizado por:

KAREM GABRIELA LARA PUGA

Director del proyecto:

MSC. WALBERTO EFRAÍN GALLEGOS ERAS

Como requisito para la obtención del título de:

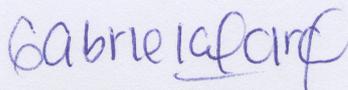
INGENIERA AMBIENTAL

Quito, 28 de julio de 2017

DECLARACION JURAMENTADA

Yo, KAREM GABRIELA LARA PUGA, con cédula de identidad # 171953579-9, declaro bajo juramento que el trabajo aquí desarrollado es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración, cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.



Karem Gabriela Lara Puga

C.I. 171953579-9

DECLARATORIA

El presente trabajo de investigación titulado:

**“CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE LODOS DE DEPURACIÓN
PROVENIENTES DE LA PLANTA PILOTO DE TRATAMIENTO DE
AGUAS RESIDUALES DE LA EPMAPS - AGUA DE QUITO PARA SU
APROVECHAMIENTO EN LA GENERACIÓN DE ENERGÍA”**

Realizado por:

KAREM GABRIELA LARA PUGA

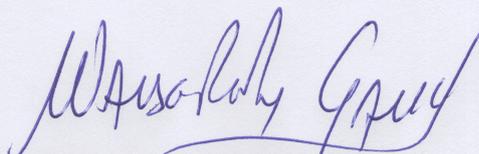
como Requisito para la Obtención del Título de:

INGENIERA AMBIENTAL

ha sido dirigido por el profesor

WALBERTO GALLEGOS ERAS

quien considera que constituye un trabajo original de su autor



MSc. Walberto Gallegos Eras

DIRECTOR

LOS PROFESORES INFORMANTES

Los Profesores Informantes:

MIGUEL MARTÍNEZ-FRESNEDA

KATTY CORAL

Después de revisar el trabajo presentado, lo han calificado como apto para su defensa oral ante el tribunal examinador



Miguel Martínez-Fresneda



Katty Coral

Quito, 28 de julio de 2017

DEDICATORIA

A todos los alumnos y profesores de la Facultad de Ciencias Ambientales de la
Universidad Internacional SEK.

A mi familia por su apoyo, fuerza y amor incondicional.

AGRADECIMIENTO

A Dios, por haberme ayudado a alcanzar esta meta.

A mis padres Vicente y Betty, por apoyarme en todo momento, por estar siempre pendientes de mí, por sus consejos, por su sacrificio diario, y por ser el pilar fundamental de todo lo que soy. Gracias por los valores que me han inculcado y por haberse esforzado tanto para que nunca me falte nada y pueda tener una excelente educación durante el transcurso de mi vida.

A mi novio Homero, por su apoyo incondicional, por su confianza, por su infinito amor y paciencia, pero sobre todo por darme la fortaleza y animo en momentos en lo que creía que me iba a rendir.

A Walberto Gallegos, Miguel Martínez-Fresneda y Katty Coral, por sus valiosas aportaciones y la guía que me han brindado a lo largo de la carrera universitaria y durante el desarrollo de este proyecto de investigación. Su profesionalismo no se compara a su inmensa calidad humana.

Y finalmente a la Universidad Internacional SEK por formarme como profesional y persona, sembrando conocimientos y ética en mi vida.

24/7/17 8:37 p.m.

Sometido a: Revista Internacional de Contaminación Ambiental

**CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE LODOS DE DEPURACIÓN
PROVENIENTES DE LA PLANTA PILOTO DE TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES DE LA EPMAPS - AGUA DE QUITO PARA SU
APROVECHAMIENTO EN LA GENERACIÓN DE ENERGÍA**

Karem Gabriela Lara Puga ¹

Walberto Efraín Gallegos Eras ^{1*}

¹ Universidad Internacional SEK, Facultad de Ciencias Naturales y Ambientales,
Quito, Ecuador.

* **Autor de correspondencia:** MSc. Walberto Efraín Gallegos Eras.

Universidad Internacional SEK, Facultad de Ciencias Naturales y Ambientales, Quito, Ecuador.

walberto.gallegos@uisek.edu.ec

Título corto: CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE LODOS DE DEPURACIÓN PARA
LA GENERACIÓN DE ENERGÍA

RESUMEN

La creciente demanda del agua en el planeta, ha ocasionado que existan mayores volúmenes de aguas servidas que deban ser tratadas para evitar el deterioro de los cauces naturales y públicos. La depuración de las aguas residuales urbanas, es un proceso de tratamiento físico y biológico que genera lodos ricos en materia orgánica, nutrientes, metales pesados, contaminantes orgánicos, y organismos patógenos. El adecuado manejo y tratamiento de estos residuos es vital para lograr un equilibrio en el ciclo del agua, disminuir su riesgo biológico y evitar impactos negativos en el ambiente. El presente trabajo tuvo como objetivo evaluar la calidad de los lodos de depuración provenientes de la Planta Piloto de Tratamiento de Aguas Residuales de la EPMAPS – Agua de Quito y establecer posibles métodos de gestión de los mismos para el aprovechamiento de su potencial energético. Durante la investigación, se recolectó doce muestras de lodos residuales de la planta piloto, seis quincenales y seis semanales, para su posterior análisis en el laboratorio. Se caracterizó parámetros fisicoquímicos, agronómicos, microbiológicos, energéticos y de metales pesados, buscando plantear una base conceptual que permitió determinar las características de composición de los lodos residuales generados en el Distrito Metropolitano de Quito. Adicionalmente, se compararon los resultados obtenidos con estudios previos realizados, normativas vigentes, y los valores límites establecidos para el aprovechamiento y reincorporación de dicho residuo en el ciclo energético de la planta. En general, los datos obtenidos demostraron que pese a no ser una alternativa rentable para esta planta desde el punto de vista económico, los lodos residuales tienen un gran potencial calorífico y de producción de energía a partir de la incineración de los mismos. Finalmente, se sugiere realizar un proceso previo de secado mecánico y térmico de los lodos que mejore su calidad y eficiencia durante la combustión.

Palabras clave: Lodos de depuración; Tratamiento de aguas residuales; Generación de energía; Poder calorífico; EPMAPS; Ecuador

ABSTRACT

The increasing demand for water on our planet has led to greater volumes of wastewater that must be treated to avoid the deterioration of natural and public channels. The purification of urban wastewater is a process of physical and biological treatment that generates sludge rich in organic matter, nutrients, heavy metals, organic pollutants, and pathogens. The proper management and treatment of these wastes, is vital to achieve a balance in the water cycle, reduce its biological risk and avoid negative impacts on the environment. The objective of this work is to evaluate the quality of the sludge from the wastewater treatment plant of the EPMAPS - Agua de Quito and to establish possible methods of sludge management using its energetic potential. During the investigation, twelve samples of residual sludge from the pilot plant were collected, six fortnightly and six weekly, for later analysis in the laboratory. It was characterized the physicochemical, agronomic, microbiological, energy and heavy metal parameters, seeking to establish a conceptual basis that allowed to determine the composition characteristics of the residual sludge generated in the Metropolitan District of Quito. In addition, the results obtained were compared with previous studies carried out, current regulations, and the limit values established for the use and reincorporation the sludge in the energy cycle of the plant. In general, the data obtained showed that although it is not a cost-effective alternative for this plant from the economic point of view, the residual sludge has a great calorific potential and of energy production when incinerating it. Finally, it is suggested to carry out a preliminary process of mechanical and thermal drying of the sludge that improves its quality and efficiency during the combustion.

Key words: Sewage sludge; Sewage treatment; Energy generation; Calorific value; EPMAPS; Ecuador

INTRODUCCIÓN

Debido al incremento de la población, el uso del agua sin el manejo y disposición adecuados se ha convertido en un problema que aumenta a un ritmo sin precedentes y que amerita un cambio en la concepción y la gestión del mismo. Este recurso básico para la vida humana se considera escaso y de creciente valor, debido a que los cauces naturales y públicos han perdido su capacidad auto depuradora, lo que pone en riesgo la calidad y disponibilidad del agua, y provoca que en la actualidad los retos medioambientales globales sean más acuciantes (Granados González, 2015).

Toda comunidad genera residuos líquidos denominados aguas residuales, que es esencialmente el agua que deshecha la misma, una vez que ha sido contaminada por los diferentes usos para los cuales ha sido empleada (Osorio & Peña, 2009). Se puede definir a las aguas residuales como “la combinación de los residuos líquidos, o aguas portadoras de residuos, procedentes tanto de residencias, como instituciones públicas y establecimientos industriales y comerciales, a los que pueden agregarse, eventualmente, aguas subterráneas, superficiales y pluviales” (Hierro Guilmain, 2003, p.495).

La depuración de las aguas residuales urbanas, es un proceso empleado para propiciar la calidad del agua en los cauces públicos. Como consecuencia del tratamiento físico y biológico de las aguas residuales en la depuración, se generan lodos excedentes ricos en materia y contaminantes orgánicos, nutrientes, metales pesados y organismos patógenos, que son producto de la concentración de sólidos contenidos en el efluente, sólidos suspendidos y sólidos disueltos en las aguas residuales (Campos Medina, García Rojas, Velásquez Rodríguez, & García Fabila, 2009, p.36).

La cantidad y calidad de estos lodos residuales varía de una planta de depuración a otra y dependen de varios factores de diseño y ambientales asociados a las características del agua residual afluyente, del tipo de tratamiento, las operaciones utilizadas y del metabolismo y

CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE LODOS DE DEPURACIÓN PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA

grado de crecimiento de los diferentes tipos de microorganismos presentes en el sistema (Donado, 2013).

Por lo general, los lodos se caracterizan por la presencia de microorganismos y una gran población bacteriana, que requieren oxígeno para vivir, crecer y multiplicarse consumiendo la materia orgánica presente en los mismos. Su color es café oscuro, y tiene un contenido en sólidos que varía entre 0,5% y 2%, según el tipo de tratamiento biológico, lo que representa un alto contenido de agua que oscila entre el 98,0% al 99,5%. El lodo residual activado se encuentra en forma de flóculos que contienen biomasa viva y muerta, además de partes minerales y orgánicas adsorbidas y almacenadas; que deben ser removidos en los sedimentadores secundarios para separar la biomasa del agua limpia. Este lodo extraído del proceso y que no ha sido sometido a tratamiento ni estabilización es conocido también como lodo crudo (Barrios, 2009; Collazos, 2008; Limón Macías, 2013; Oropeza García, 2006).

Actualmente, la gestión de estos residuos es vital para lograr impactos mínimos sobre el ambiente como consecuencia de la operación de las plantas de depuración de las aguas servidas. La USEPA (1996), ha establecido las potencialidades de reutilización y valoración de los lodos producidos, sometiéndolos a un proceso de tratamiento y estabilización que permita aprovechar este residuo, disminuyendo su riesgo biológico y generando recursos renovables (Leppe, López, & Nelson, 2002).

La gestión de lodos de depuración producidos en las plantas de tratamiento de aguas residuales o PTAR, es un proceso complejo en el que se deben considerar aspectos fundamentales como son el volumen y la composición de los lodos generados, los costos asociados al tratamiento y transporte de los mismos, así como las necesidades propias de la planta, de manera que sea posible manejarlos de forma segura, práctica y sostenible. En algunos casos, las actividades de estabilización y eliminación de lodos, supone hasta la mitad de los costos totales del tratamiento de aguas residuales, lo que representa el mayor problema

CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE LODOS DE DEPURACIÓN PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA

logístico y económico de las plantas (Blanco Jara, 2014; Granados González, 2015; Torres, 2005).

A escala mundial es común la práctica de eliminar los lodos de depuración por vertido al mar, disponerlos en vertederos sanitarios, o utilizarlos como fertilizantes en la agricultura. No obstante, existen ciertas dificultades asociadas a estos métodos de gestión debido a los grandes espacios que requieren y los posibles daños ambientales causados por el aumento en la concentración de metales pesados u otros contaminantes en el terreno (Arauzo & Permyu Vila, 2008).

Adicionalmente, es necesario considerar que las dosis de aplicación de estos lodos en la agricultura, deben fijarse en función de las características agronómicas y edafológicas del suelo, de la presencia de patógenos y de las exigencias nutricionales de los cultivos. Para estabilizar los lodos, se debe conocer previamente el contenido y las formas químicas de los elementos que contiene, ya que pueden ser tóxicos y tienden a acumularse a lo largo de la cadena alimentaria, lo que hace que estos residuos, en algunos casos, deban ser gestionados como peligrosos (Colomer, Carlos, Gallardo, Bovea, & Herrera, 2009)

Las posibles propuestas de mejora continua dentro de las plantas de tratamiento de aguas, se enfocan en la implementación de nuevas tecnologías para el manejo de lodos como una fuente de energía renovable (Mendoza, Alberola, Herrera, Gallardo, & Bovea, 2009). Esto permite mejorar la eficiencia de los procesos, ya que disminuye el volumen del residuo, destruye patógenos y compuestos tóxicos y controla las emisiones de gases de efecto invernadero inherentes al tratamiento de los lodos. Las tendencias actuales han ocasionado que este tipo de procesos sean cada vez más rentables, dado a que se obtienen productos con valor añadido que reducen los costos de operación y generan beneficios económicos cuando son reincorporados al ciclo energético de las plantas depuradoras (De Andrés, 2010; Pliego Bravo, García, Urrea, & Vergara, 2014; Rodríguez, Isac, Fernández, & Salas, 2004).

CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE LODOS DE DEPURACIÓN PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA

En cuanto al aprovechamiento de los lodos provenientes de la estación depuradora, su calidad como generador de energía o combustible dependerá de su origen o los procesos a los que se haya sometido. En función de su composición, poder calorífico y presencia de contaminantes, estos podrán ser sometidos a un proceso de reducción térmica que permita gestionar los mismos. Entre los métodos se encuentran la incineración, pirolisis, y gasificación. Cada uno responde a las características propias del lodo a tratar y se debe considerar el tipo de producto que se desea obtener (Conesa, 2014; Limón Macías, 2013).

Los procesos de valorización tienen como ventajas la reducción del volumen de los residuos, la recuperación de energía y la obtención de un residuo más estable que el de partida, ya que se destruyen todo tipo de microorganismos y compuestos orgánicos tóxicos. La vía más común de valorización energética es la incineración, debido a la facilidad de implementación, la reducción del volumen original, destrucción térmica de los compuestos orgánicos peligrosos y los elementos biológicos patógenos, así como la recuperación de energía térmica y/o eléctrica (De Andrés, 2010).

Se estima que en la actualidad el 8% de la energía generada en todo el mundo es utilizada para realizar el bombeo, transporte y tratamiento del agua urbana (Blanco Jara, 2014). El utilizar los lodos como fuente de energía no es un concepto nuevo en la industria, sin embargo está ganando importancia debido a cambios en la economía por el incremento en el costo de la electricidad y los combustibles. El aprovechamiento energético de lodos puede producir entre el 50% y 100% de la energía requerida en un tratamiento biológico convencional, sin la necesidad de emplear otros elementos como los combustibles fósiles (Arauzo & Permuy Vila, 2008).

Según Peñaherrera (2015):

En el Ecuador, los lodos residuales producidos por plantas de tratamiento de industrias se disponen en rellenos sanitarios, siendo la opción menos favorable ya que, además

CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE LODOS DE DEPURACIÓN PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA

de contribuir a disminuir la vida útil del relleno sanitario, puede existir una proliferación de microorganismos patógenos, poniendo en riesgo la salud pública. En cuanto a plantas municipales de tratamiento de aguas servidas, la mayoría de ciudades del país no cuentan con este proceso, por lo que se descargan las aguas directamente a los ríos. Esto ocurre en Quito, donde las aguas de los cuatro ríos principales: Machángara, Monjas, San Pedro y Guayllabamba no son aptas para ningún uso debido a su contaminación. (p.1).

Aproximadamente el 81% de la contaminación a estos cuerpos de agua se debe a la descarga directa de las aguas servidas de la ciudad y el 19% restante a la contaminación industrial y de escombros (Peñaherrera Proaño, 2015). Por esto, a partir del año 2014, la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento EPMAPS – Agua de Quito, cuenta con una Planta Piloto de Tratamiento de Aguas Residuales a pequeña escala como parte del *Programa para la Descontaminación de Ríos de Quito* (EPMAPS, 2016).

La problemática que enfrenta el Distrito Metropolitano de Quito, es que los lodos de depuración producidos en la Planta Piloto de Tratamiento de Aguas Residuales de la EPMAPS, son dispuestos directamente y sin tratamiento al canal de descarga “El Batán”, el cual desemboca en el Río Machángara (EPMAPS, 2016). Esta práctica, además de ser considerada como una pérdida de un recurso aprovechable de diversas maneras como es el lodo, evita la recuperación de los ríos y presenta problemas de contaminación y la proliferación de microorganismos patógenos que pueden poner en riesgo la salud pública (Peñaherrera Proaño, 2015).

Este estudio se considera de carácter preliminar y original, debido a que no existen antecedentes de análisis semejantes realizados a los lodos residuales producidos en el DMQ. En este proyecto de investigación, a través de un Convenio de Cooperación Científica y Tecnológica entre la Universidad Internacional SEK y la EPMAPS, se realizó la

CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE LODOS DE DEPURACIÓN PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA

caracterización de parámetros fisicoquímicos, agronómicos, microbiológicos, energéticos, y de metales pesados de los lodos de depuración procedentes de la Planta Piloto de Tratamiento de Aguas Residuales de la EPMAPS – Agua de Quito.

La importancia radicó en la evaluación de la calidad de los lodos producidos en la planta para obtener información sobre las características y composición de los mismos. Los resultados de los análisis ayudaron a determinar si estos son aptos para su aprovechamiento en la generación de energía y la cantidad de energía que podría ser generada anualmente en la planta piloto. Además, se identificaron y propusieron estrategias de posible gestión y mejoramiento de los lodos para la producción de energía.

Al inicio de este proyecto, se esperó obtener resultados que se encuentren dentro de los rangos de valores establecidos en estudios internacionales previos y en normativas vigentes. Los lodos, en general, presentan alta concentración de materia orgánica, lo que les confiere un valor como combustible, siempre y cuando, se haya eliminado la suficiente cantidad de agua. Un lodo seco puede tener un valor promedio de poder calorífico de 32 500 kJ/kg, mientras que un lodo con un 90% de agua tendría un promedio de 2 300 kJ/kg (Conesa, 2014). Con el análisis de los lodos se determinó si los lodos cumplen con el valor mínimo de poder calorífico y las condiciones necesarias para su aprovechamiento energético.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La Planta Piloto de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de la EPMAPS – Agua de Quito está ubicada en la descarga del Colector Central Iñaquito “El Batán”. La misma, recoge el agua del centro-norte de Quito y vierte 131 235 m³/día de agua sin tratar directamente al Río Machángara, con un caudal de 1 518,9 L/s (Peñaherrera Proaño, 2015).

En la Planta Piloto se trata un volumen diario de aguas residuales de aproximadamente 2304 L/día y se realizan dos purgas de lodos de 40 L cada una, obteniendo así 80 L/día de lodos de depuración. Es decir, aproximadamente el 3,5% del volumen de agua tratada se convierte en lodo residual que necesita ser sometido a un proceso de estabilización o tratamiento. Sin embargo, en la actualidad, la planta piloto no cuenta con un método de gestión para los lodos generados, por lo que son dispuestos al Río Machángara sin recibir un tratamiento previo (Calderón, 2017).

Esta planta funciona a pequeña escala, cuenta con tecnología de lodos activados y un sistema de tratamiento primario y secundario que se compone de pantallas de cribado, tanque equalizador, una serie de reactores aeróbicos, tanques anóxicos, y un sedimentador secundario (Calderón, 2017).

Fase de campo y muestreo

En esta fase se realizaron visitas a las instalaciones de la Planta Piloto de Tratamiento de Aguas de las EPMAPS – Agua de Quito, con el fin de conocer el funcionamiento de la planta y las características de sus procesos para poder definir los métodos a ser utilizados durante el muestreo y los análisis en el laboratorio.

Se tomaron 12 muestras de los lodos de recirculación de la planta piloto de tratamiento de aguas residuales de la EPMAPS – Agua de Quito entre enero y mayo del 2017. Las seis primeras muestras fueron tomadas de forma quincenal, y las seis muestras restantes fueron

CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE LODOS DE DEPURACIÓN PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA

realizadas semanalmente. Esta variación en la frecuencia de toma de muestras permitió evaluar si existen cambios significativos en las características y volumen de los lodos que puedan estar relacionados a factores climáticos, estacionales o que varíen con el tiempo.

Número de muestra	Fecha del muestreo
1	5-ene-17
2	19-ene-17
3	6-feb-17
4	20-feb-17
5	6-mar-17
6	20-mar-17
7	27-mar-17
8	3-abr-17
9	10-abr-17
10	17-abr-17
11	8-may-17
12	15-may-17

Los parámetros de potencial de hidrógeno, temperatura, conductividad eléctrica, y oxígeno disuelto, fueron analizados in-situ con el equipo multi paramétrico HQ40d, marca HACH®.

En cada muestreo se recolectó un volumen de lodos de aproximadamente 80 L, los cuales fueron almacenados en recipientes de polietileno de 0,6 L. Cumpliendo con los requerimientos para la preservación de cada parámetro analizado, la mitad de las botellas estuvieron previamente preparadas con agua destilada y el resto con 3 mL de H₂SO₄, se las refrigeró a 4°C para posteriormente ser analizadas en el laboratorio.

CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE LODOS DE DEPURACIÓN PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA

Fase de laboratorio

En el laboratorio, parte de las muestras destinadas para la determinación de los parámetros de humedad, porcentaje de sólidos sedimentables y densidad de los lodos, fueron etiquetadas y refrigeradas hasta su posterior análisis. El resto de las muestras fueron sometidas a un proceso de pre tratamiento en el que se pre-espesaron los lodos residuales tomados en la planta (*Lodo 1*) por decantación utilizando embudos de separación. Se dejó reposar la muestra de lodos por un periodo aproximado de 30 minutos y una vez cumplido el tiempo de decantación se retiró el líquido sobrenadante. A este lodo pre-espesado se lo sometió a un proceso de filtración utilizando papel filtro para eliminar el exceso de agua aún presente en las muestras, de esta manera se obtuvo un lodo espesado (*Lodo 2*), el cual fue utilizado en dos partes, una para analizar parámetros microbiológicos, densidad, porcentaje de cenizas, y humedad.

La otra parte se utilizó para el análisis de metales, materia orgánica total, nitrógeno total, carbono total, potasio y poder calorífico. Para esto, se colocó el resto del lodo espesado (*Lodo 2*) en bandejas de aluminio, las cuales fueron ubicadas sobre placas calefactoras a 105°C. Se las dejó calentar por un periodo de 4 horas revolviendo ocasionalmente, siempre bajo la campana de extracción de gases con el fin de retirar los olores y vapores producidos durante el proceso de calentamiento y evaporación de los lodos.

Una vez concentrados los lodos y para su secado total, se los colocó en la estufa por 12 horas a una temperatura de 105°C. Transcurrido el tiempo de secado, se sacó las bandejas de la estufa y se dejó enfriar. Posteriormente, se retiró el lodo seco (*Lodo 3*) de las bandejas de aluminio y se lo trituroó en un mortero.

Una vez que las muestras de lodos 1, 2 y 3, se encontraban preparadas y listas para ser analizadas, se utilizaron los métodos de ensayo para cada parámetro que se enlistan en la siguiente tabla:

CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE LODOS DE DEPURACIÓN PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA

Tabla 2. Métodos de ensayo y tipos de lodos empleados para el análisis de lodos de depuración.

Parámetro	Método	Tipo de lodo	Referencia
% Sólidos sedimentables	Método con cono Imhoff.	Lodo 1 (líquido)	(Norma Mexicana, 2013)
Densidad real	Determinación de masa (g) y el volumen en centímetros cúbicos (cm ³).	Lodo 1 y 2 (líquido y espeso)	(Peñaherrera Proaño, 2015)
Contenido de humedad	Método de determinación de la humedad higroscópica.	Lodo 1 y 2 (líquido y espeso)	(Melgratti, 2005)
<i>Escherichia coli</i>	BBL Agar Endo con dilución seriada y siembra en medio.	Lodo 2 (espeso)	(Becton, Dickinson and Company, 2013)
<i>Salmonella choleraesuis</i>			
<i>Shigella flexneri</i>			
<i>Enterococcus faecalis</i>			
Huevos de helminto	Método cualitativo de McMaster con solución azucarada de Sheater.	Lodo 2 (espeso)	(Sixtos, 2011)
Porcentaje de cenizas	Método establecido en la norma UNE 32-004-84.	Lodo 2 y 3 (espeso y seco)	(Mendoza et al., 2009)
Materia orgánica total	Método de Walkley y Black.	Lodo 3 (seco)	(Cáceres, 2013)
Carbono orgánico total			
Nitrógeno total	Método de Nitrógeno Kjeldahl, Pro-Nitro I, Selecta	Lodo 3 (seco)	(Barrena, 2006)
Potasio total	Método EPA 3050B para su digestión y determinación en horno de grafito y espectrofotómetro de absorción atómica.	Lodo 3 (seco)	(Peñaherrera Proaño, 2015)
Análisis de metales pesados (Cd, Cr, Cu, Ni, Hg, Pb, Zn)			
Poder calorífico inferior y superior	Método con bomba calorimétrica de oxígeno No. 204M, establecido por Parr Instrument Company.	Lodo 3 (seco)	(Cabrera, 2016)
% Sólidos volátiles	Método gravimétrico.	Lodo 3	(Peñaherrera Proaño, 2015)

Cálculos energéticos

Los cálculos sobre gastos energéticos de la planta piloto se realizaron mediante la utilización del software de simulación dinámica *BioWin 5.1*. Este programa tiene implementado conceptos del ASM1 propuesto por el grupo de trabajo de la IWA, *Internacional Water Association*. La calibración y validación experimental de los datos para la operación de este software es un trabajo complejo que requiere de cuidado y precisión para garantizar la validez de los resultados (Egevasa, 2008).

CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE LODOS DE DEPURACIÓN PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA

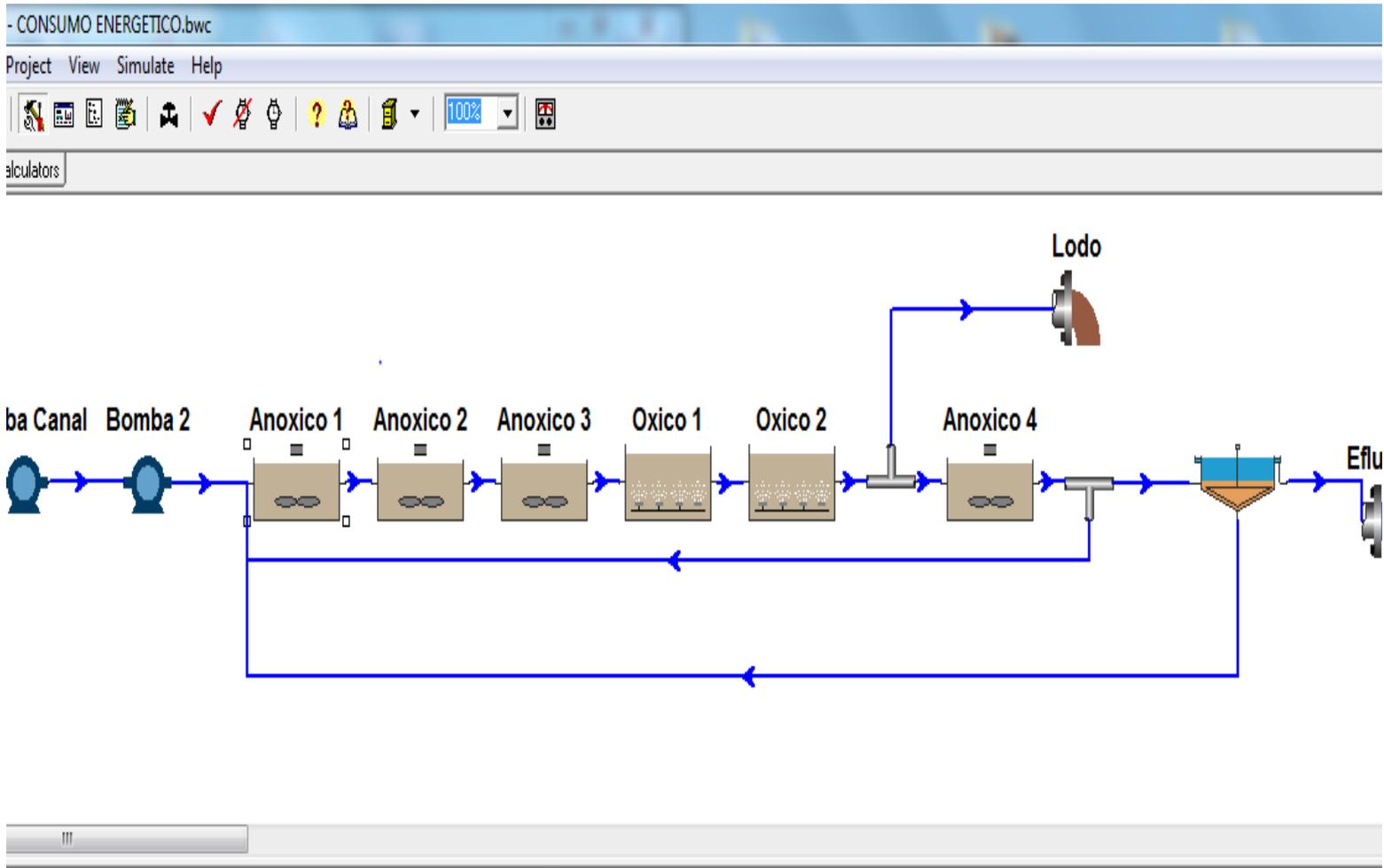
Se ajustó el software con las características de la PTAR piloto y se especificaron los datos de potencia y energía de los elementos esenciales en el proceso de tratamiento, como son los agitadores mecánicos, bombas, y aireadores. En el *Gráfico 1*, se puede observar el esquema de la planta piloto que se utilizó para el análisis de los gastos energéticos.

Se utilizó el valor de 0.12 USD/kWh, establecido en el pliego tarifario de la Empresa Eléctrica Quito vigente desde el año 2016 para indicar el precio medio del kWh en el DMQ. De esta manera, se obtuvieron los gastos energéticos (kWh) y costos operativos (USD) de cada equipo y globales de la planta, sin considerar gastos de energía por iluminación.

Asimismo, *BioWin 5.1* permitió conocer la cantidad de lodos residuales producidos diariamente en la planta y que podrían ser utilizados para la generación de energía. Se realizaron cálculos matemáticos con los datos conocidos de volumen de purga y porcentaje de sólidos de los lodos residuales (*Lodo 1*), la densidad del lodo espeso (*Lodo 2*), y poder calorífico inferior, para obtener un valor estimado sobre la cantidad de energía que puede ser producida al someter estos lodos a una gestión adecuada y aprovechar su potencial calorífico.

IZACIÓN Y EVALUACIÓN DE LODOS DE DEPURACIÓN PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA

Gráfico 1. Planta piloto de tratamiento de aguas residuales de la EPMAPS en el simulador *BioWin 5.1*.



RESULTADOS

Parámetros fisicoquímicos

En la *Tabla 3* se observan los resultados obtenidos de los parámetros fisicoquímicos analizados in-situ y en el laboratorio, temperatura (T), potencial de hidrógeno (pH), conductividad eléctrica (CE), oxígeno disuelto (OD), porcentaje de sólidos sedimentables (SS) y sólidos volátiles (SV), densidad real (ρ), y porcentaje de humedad higroscópica (H).

La temperatura de los lodos de depuración, al momento de la toma de muestras, se mantuvo dentro del rango de 16,2 a 19,1°C, con promedio de 18,1°C. Los valores de pH se mantuvieron dentro del rango neutro con valor promedio de 7. La conductividad eléctrica en los lodos tuvo valor promedio de 5860,8 $\mu\text{S}/\text{cm}$, con una variación significativa entre resultados, siendo esta mayor en las muestras 3 y 4 de los días 6 y 20 de febrero respectivamente. El oxígeno disuelto presentó promedio de 0,4 mg/L, siendo 0,23 mg/L el valor mínimo y 0,620 mg/L el valor máximo.

El porcentaje promedio de sólidos sedimentables en las muestras de lodo residual (*Lodo 1*) es de 2,5%, siendo 3% el valor más alto; en sólidos volátiles un promedio de 73%. Asimismo, el promedio de la densidad real de este lodo es de 1 g/cm³, y su humedad es del 99,8%.

Por otro lado, el lodo espeso (*Lodo 2*) presenta un valor de densidad promedio de 1,04 g/cm³, y 93,6% de humedad.

IZACIÓN Y EVALUACIÓN DE LODOS DE DEPURACIÓN PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA

ultados de los parámetros fisicoquímicos.

T (°C)	pH	CE ($\mu\text{S/cm}$)	OD (mg/L)	% SS (v/v)	% SV	ρ Lodo 1 (g/cm^3)	ρ Lodo 2 (g/cm^3)	Humedad Lodo 1 (%)
18,80	7,27	6400	0,29	2,81	76,50	1,00	1,05	99,8
18,60	6,81	5060	0,26	2,56	81,50	1,01	1,04	99,9
18,90	6,82	10830	0,37	1,99	76,00	0,99	1,04	99,7
18,40	7,03	11340	0,36	2,78	75,50	1,00	1,03	99,80
19,10	7,09	9670	0,34	1,68	77,50	1,00	1,04	99,80
16,20	7,02	9740	0,52	2,48	65,50	1,01	1,08	99,80
18,20	6,81	3420	0,62	2,98	67,00	1,00	1,09	99,70
18,60	7,15	2490	0,25	2,96	70,00	1,00	1,03	99,90
17,90	7,01	2580	0,35	2,68	66,50	0,99	1,02	99,90
18,10	7,15	3060	0,23	3,00	75,50	0,99	1,01	99,90
16,90	7,01	2600	0,42	2,16	73,00	1,00	1,05	99,80
17,40	7,20	3140	0,31	2,24	71,50	1,00	1,03	99,90
16,20- 19,10	6,81 -7,20	2490-11340	0,23 – 0,62	1,68 – 3,00	65,50-81,50	0,99 – 1,01	1,01 – 1,09	99,70 – 99,90
18,10	7,00	5860,80	0,40	2,50	73,00	1,00	1,04	99,80
0,87	0,15	3556,92	0,11	0,43	4,97	0,01	0,02	0,08

Parámetros agronómicos

En la *Tabla 4*, se presentan los datos sobre el contenido de materia orgánica total (MOT), nutrientes encontrados en los lodos residuales, potasio (K), carbono (C), nitrógeno total Kjeldalh (NTK) y la relación entre carbono-nitrógeno (C/N). Se obtuvo un promedio de materia orgánica total de 36,2%, siendo 41,27% la concentración más alta encontrada, específicamente en las muestras 1, 3, y 5. Los datos de potasio indican concentración promedio de 0,12%, con un rango de variación mínimo entre muestras. El promedio de carbono es de 21%, y de NTK de 5,3%, siendo la relación entre los mismos de aproximadamente 4,1.s

Muestra	MOT (%)	K (%)	C (%)	NTK (%)	Relación C/N
1	41,27	0,1224	23,94	4,79	5,00
2	37,83	0,1204	21,95	5,81	3,78
3	41,27	0,1214	23,94	5,92	4,04
4	34,39	0,1182	19,95	6,97	2,86
5	41,27	0,1195	23,94	4,20	5,70
6	36,20	0,1176	21,00	5,11	4,11
7	34,39	0,1183	19,95	4,97	4,01
8	37,83	0,1191	21,95	4,62	4,75
9	31,32	0,1180	18,00	4,54	3,96
10	26,50	0,1178	15,38	5,07	3,03
11	37,92	0,1145	22,00	5,25	4,19
12	34,48	0,1171	20,00	6,02	3,32
Rango	26,5 – 41,27	0,115 -0,122	18 – 23,94	4,2 – 6,97	2,86 – 5,7
Promedio	36,2	0,12	21,0	5,3	4,1
Desviación estándar	4,4	0,002	2,6	0,8	0,8

Parámetros microbiológicos

En la *Tabla 5*, se presentan los valores promedio de la concentración de parámetros microbiológicos que se obtuvieron en los análisis de las muestras lodo espeso (Lodo 2) son de, $2,97 \times 10^8$ UFC/g para *Salmonella cholerasuis*; $3,86 \times 10^8$ UFC/g para *Escherichia coli*; $2,47 \times 10^8$ UFC/g para *Shigella flexneri*; y $4,87 \times 10^8$ UFC/g para *Enterococcus faecalis*. En cuanto a los organismos patógenos, se obtuvieron datos cualitativos de la presencia o ausencia

CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE LODOS DE DEPURACIÓN PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA

de los parásitos huevos de helminto en las muestras de lodo, lo que dio como resultado la observación y presencia de los mismos en la mayoría de las muestras.

Tabla 5. Parámetros microbiológicos.

Muestra	<i>Salmonella choleraesuis</i> (UFC/g)	<i>Escherichia coli</i> (UFC/g)	<i>Shigella flexneri</i> (UFC/g)	<i>Enterococcus faecalis</i> (UFC/g)	Huevos de helminto
1	1,78x10 ⁷	6,80x10 ⁷	3,00x10 ⁷	3,40x10 ⁶	ausencia
2	7,13x10 ⁷	1,81x10 ⁷	9,15x10 ⁷	5,27x10 ⁶	presencia
3	7,40x10 ⁷	5,40x10 ⁷	6,00x10 ⁷	7,30x10 ⁷	presencia
4	1,26x10 ⁹	6,95x10 ⁸	3,42x10 ⁸	1,54x10 ⁹	presencia
5	1,64x10 ⁸	2,35x10 ⁸	4,41x10 ⁸	5,97x10 ⁸	ausencia
6	1,48x10 ⁸	5,68x10 ⁸	1,76x10 ⁸	3,20x10 ⁸	presencia
7	1,40x10 ⁷	1,74x10 ⁸	3,00x10 ⁷	2,80x10 ⁷	presencia
8	7,60x10 ⁸	1,52x10 ⁹	1,60x10 ⁸	1,36x10 ⁹	presencia
9	3,20x10 ⁸	4,16x10 ⁸	9,60x10 ⁸	6,40x10 ⁸	presencia
10	3,20x10 ⁸	4,10x10 ⁸	3,20x10 ⁸	6,40x10 ⁸	presencia
11	1,20x10 ⁸	5,80x10 ⁷	1,20x10 ⁸	1,70x10 ⁸	ausencia
12	2,88x10 ⁸	4,20x10 ⁸	2,37x10 ⁸	4,73x10 ⁸	presencia
Rango	1,4x10 ⁷ - 1,26x10 ⁹	1,81x10 ⁷ - 1,52x10 ⁹	3x10 ⁷ - 9,60x10 ⁸	3,40x10 ⁶ - 1,54x10 ⁹	ausencia - presencia
Promedio	2,97x10 ⁸	3,86x10 ⁸	2,47x10 ⁸	4,87x10 ⁸	presencia

Metales pesados

En la *Tabla 6*, se muestran los valores de metales pesados presentes en los lodos, cromo (Cr), cobre (Cu), níquel (Ni), plomo (Pb), y zinc (Zn). El cadmio encontrado en las muestras está comprendido entre los valores de 1,4 a 38,1 mg/kg, con un promedio de 14,28 mg/kg. La concentración promedio de cromo en las muestras es de 40,88 mg/kg, con un valor máximo de 67,3 mg/kg en la muestra 8 del 3 de abril. Para cobre, el valor promedio fue de 17,36 mg/kg con un rango de variación mínimo, siendo 18,45 mg/kg la concentración mayor. También se tiene mercurio en concentración promedio de 0,0019 mg/kg, con extremos de 0,0004 mg/kg y 0,005 mg/kg. El promedio de níquel es de 6 mg/kg, con el máximo de 13,52 mg/kg. El promedio de los niveles de plomo y su límite son de 2,86 y 5,47 mg/kg respectivamente. Finalmente, los valores obtenidos de zinc son en promedio de 303,11 mg/kg y de 625,1 mg/kg máximos en la muestra 4 del 20 de febrero.

CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE LODOS DE DEPURACIÓN PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA

Tabla 6. Concentración de metales pesados.

Muestra	Cd (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Hg (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Zn (mg/kg)
1	4,40	41,30	18,04	0,0018	13,52	1,98	268,90
2	3,20	40,10	17,95	0,0021	7,14	2,34	396,20
3	9,60	49,40	18,45	0,0015	6,18	2,78	443,90
4	8,20	44,30	18,35	0,0011	5,59	3,69	625,10
5	12,50	28,30	16,46	0,0039	3,44	2,46	299,80
6	9,00	29,30	16,00	0,0050	4,95	3,24	164,30
7	14,45	34,60	16,32	0,0006	3,96	2,76	196,30
8	21,70	67,30	18,31	0,0015	5,72	5,47	464,60
9	19,10	55,50	16,56	0,0030	5,28	1,81	234,70
10	1,40	51,60	17,01	0,0015	6,34	1,81	209,20
11	38,09	29,90	16,92	0,0007	4,72	3,22	202,80
12	29,70	18,90	17,95	0,0004	5,13	2,71	131,50
Rango	1,40 - 38,09	18,90 - 67,30	16,00 - 18,45	0,0004 - 0,005	3,44 - 13,52	1,81 - 5,47	131,50 - 625,10
Promedio	14,28	40,88	17,36	0,0019	6,00	2,86	303,11
Desviación estándar	11,12	13,64	0,90	0,0014	2,57	1,01	148,66

Poder calorífico y cenizas

Se obtuvieron valores sobre parámetros relacionados al potencial calorífico y de incineración (Tabla 7), como son el poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI), porcentaje de cenizas en base húmeda (BH), en base seca (BS), y porcentaje de azufre (S). El valor promedio de PCS que se obtuvo en las muestras fue de 3 525 kcal/kg entre un rango de 3 212 a 3 925 kcal/kg. El promedio de PCI fue de 2 964 kcal/kg entre un rango de 2 684 a 3352 kcal/kg. El porcentaje promedio de cenizas en base húmeda y en base seca fue de 3,7% y 27% respectivamente. Finalmente, el porcentaje promedio de azufre que se encuentra en los lodos es de 0,3% entre un rango de 0,2 a 0,44%.

CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE LODOS DE DEPURACIÓN PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA

Tabla 7. Parámetros relacionados a la incineración y obtención de energía a partir de los lodos residuales.

Muestra	PCS (kcal/kg)	PCI (kcal/kg)	Cenizas BH (%)	Cenizas BS (%)	S (%)
1	3616	3058	1,49	23,50	0,37
2	3630	3066	3,47	18,50	0,37
3	3605	3040	3,50	24,00	0,34
4	3866	3307	4,44	24,50	0,31
5	3925	3352	1,69	22,50	0,44
6	3212	2648	5,15	34,50	0,30
7	3272	2726	4,50	36,00	0,20
8	3254	2710	4,02	40,00	0,33
9	3240	2676	2,89	33,50	0,34
10	3416	2855	4,78	12,50	0,21
11	3728	3165	3,32	27,00	0,25
12	3535	2969	4,65	28,50	0,26
Rango	3212 - 3925	2648 - 3352	1,49 – 5,15	12,50 – 40,00	0,20 – 0,44
Promedio	3525	2964	3,66	27,08	0,31
Desviación Estándar	247	243	1,18	7,87	0,07

Consumo energético de la planta piloto

Los datos de energía que se obtuvieron mediante el uso de *Biowin 5.1.*, los valores de potencia de los equipos, tiempo de funcionamiento diario y costo medio del kWh de USD 0.12, fueron los indicados en el siguiente cuadro:

Tabla 8. Consumo energético en la planta y los costos económicos por hora, día, mes y año.

Equipo	Potencia	Energía consumida				Costo por consumo de energía			
	hp	kWh	kWh/ día	kWh/ mes	kWh/ año	USD/ hora	USD/ día	USD/ mes	USD/ año
Bomba Canal	1,36	0,40	10,10	304,20	3701,70	0,05	1,20	36,50	444,20
Bomba 2	0,99	0,70	17,70	531,50	64670	0,09	2,10	63,80	776,00
Anóxico 1	0,15	0,10	2,70	80,50	979,80	0,01	0,30	9,70	117,60
Anóxico 2	0,15	0,10	2,70	80,50	979,80	0,01	0,30	9,70	117,60
Anóxico 3	0,15	0,10	2,70	80,50	979,80	0,01	0,30	9,70	117,60
Anóxico 4	0,15	0,10	2,70	80,50	979,80	0,01	0,30	9,70	117,60
Óxico 1	6,70	5,00	119,90	3597,30	43766,60	0,60	14,40	431,70	5252,00
Óxico 2									
	6,6	158,50	4 755,20	57854,69	57854,69	0,79	19,02	570,62	6 942,56

CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE LODOS DE DEPURACIÓN PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA

Diariamente, los equipos de planta presentan consumo de 159 kWh, lo cual tiene un costo de USD 19 diarios. En promedio, para la operación anual la planta de tratamiento se consumen 57 855 kWh, lo que representa para la EPMAPS – Agua de Quito un gasto económico de USD 6 943 al año.

Producción de energía a partir de los lodos residuales

En la *Tabla 9*, se observan datos que permiten estimar la cantidad anual de energía que puede ser generada a partir de la incineración de los lodos de depuración provenientes de la planta piloto de tratamiento de aguas residuales de la EPMAPS – Agua de Quito.

Tabla 9. Cantidad de energía generada kWh/año y posible ahorro económico anual por aprovechamiento de los lodos residuales de la planta piloto.		
Volumen diario de purga de lodos residuales (<i>Lodo 1</i>)	80 80000	L cm ³
Concentración de sólidos (<i>Lodo 2</i> contenido en el <i>Lodo 1</i>)	2,5	%
Volumen diario de lodo espeso (<i>Lodo 2</i>)	2000	cm ³
Densidad promedio del lodo espeso (<i>Lodo 2</i>)	1,04	g/cm ³
Cantidad de lodo espeso (<i>Lodo 2</i>) disponible para la incineración	2080 2,08	g kg
PCI promedio	2964,3 3,5	kcal/kg kWh/kg
Energía diaria	7,2	kWh/día
Energía anual	2619,2	kWh/año
Ahorro económico	314	USD/año

Debido al alto porcentaje de agua presente en los lodos residuales (*Lodo 1*) de la planta piloto, la cantidad aprovechable de los mismos es el 2,5% que representa la fracción sólida o de lodo espeso (*Lodo 2*). De esta manera se tiene una producción diaria promedio de 2,08 kg de lodos espesos que pueden ser aprovechados. La cantidad de energía que se puede producir a partir de los lodos residuales es de aproximadamente 7,2 kWh/día y 2619,2 kWh/año, lo que considerando el costo medio del kWh (USD 0,12) representa un ahorro para la EPMAPS por pago de consumo energético de 314 USD/año.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Parámetros fisicoquímicos

Como se observó en la *Tabla 3*, la temperatura y el pH de los lodos se mantuvieron dentro de un rango constante durante el tiempo de la investigación, lo que da estabilidad a los lodos. La conductividad eléctrica en los lodos tuvo valor promedio de 5860,8 $\mu\text{S}/\text{cm}$, y a pesar de tener ciertos valores elevados, se encontró dentro de los límites de establecidos en estudios previos, 2000 a 12000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino de España, 2009).

Los sólidos sedimentables por su decantación instantánea, pueden dar lugar al desarrollo de depósitos de fango y de condiciones anaeróbicas cuando se vierten los lodos sin tratar al entorno acuático (Pistonesi, Haure, & D'Elmar, 2013). El porcentaje promedio de sólidos sedimentables en el lodo analizado fue de aproximadamente 2,5%, siendo 3% el valor más alto. Estos valores se encuentran dentro del rango normal encontrado en lodos, entre el 0.25 y el 12% (Hammeken & Romero, 2005).

Debido al gran contenido de agua, el promedio de la densidad real de este lodo residual (*Lodo 1*) es de 1 g/cm^3 , muy similar a la densidad del agua. Su humedad es del 99,8%. Por otro lado, el lodo espeso (*Lodo 2*) presenta valor de densidad promedio de 1,04 g/cm^3 , y 93,6% de humedad. Estos valores de humedad son elevados en comparación al valor límite de 55% de humedad establecido para el correcto funcionamiento de las incineradoras. Además, se conoce que el poder calorífico aprovechable de un residuo tiende a disminuir con el grado de humedad ya que esta alarga el periodo endotérmico de la combustión y retarda la ignición, por lo que es necesario retirarla mediante un tratamiento mecánico o térmico (Conesa, 2014).

Los sólidos volátiles se emplean generalmente para evaluar la estabilidad del lodo y representan la materia orgánica presente en los mismos. Los lodos analizados tienen un

CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE LODOS DE DEPURACIÓN PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA

porcentaje promedio de 73%, con valores entre 65,5 y 81,5 % de sólidos volátiles. Esto es algo favorable para su aprovechamiento energético ya que los sólidos volátiles son aquellos con poder calorífico (Peñaherrera Proaño, 2015).

Parámetros agronómicos

Los parámetros agronómicos son considerados de gran importancia al momento de elegir un método de gestión adecuado para los lodos residuales de las PTARs, debido a que altos valores de los mismos puede significar problemas en los suelos, la vegetación y los cuerpos de agua que entren en contacto con este residuo. Los resultados obtenidos sobre el contenido de materia orgánica y nutriente en los lodos, pueden ser comparados con los porcentajes encontrados en fertilizantes comerciales de uso común, como se muestra en la siguiente tabla:

Muestra	MOT (%)	C (%)	NTK (%)	Relación C/N
Lodos residuales	26,5 - 41,27	18 - 23,94	4,2 - 6,97	2,86 - 5,7
Fertilizante comercial	40 - 50	5 - 20	0,5 - 2	10

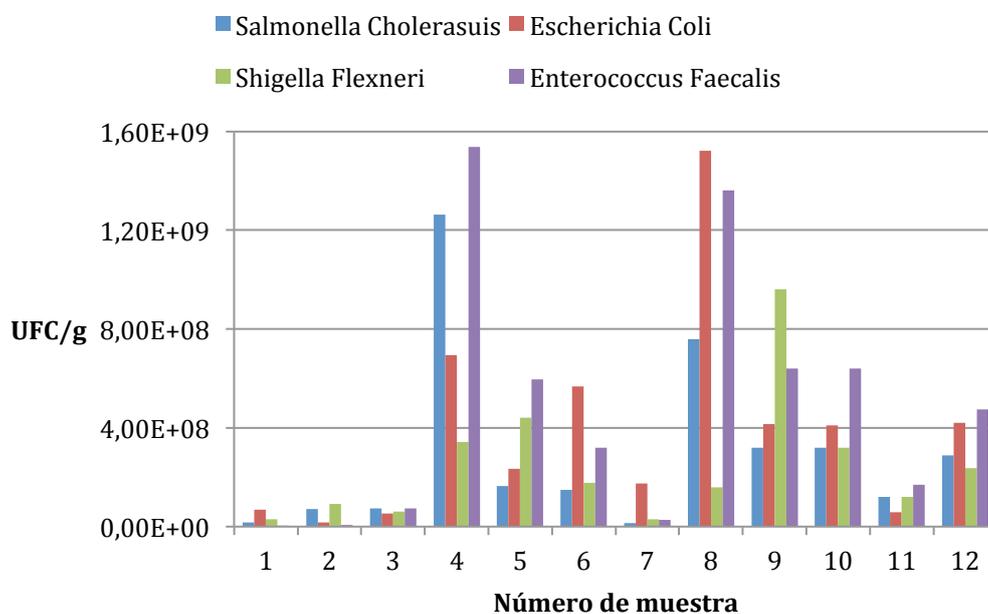
Los valores de materia orgánica se encuentran por debajo del rango adecuado para la aplicación de los lodos en el suelo, por lo que se confirma la importancia de direccionar este estudio al aprovechamiento de los lodos en la generación de energía.

Los valores de carbono (*Tabla 10*), pueden ser considerados como apropiados, ya que el promedio de este nutriente en los lodos es de 21%, similar al contenido en los fertilizantes. Por el contrario, el nitrógeno tiene un porcentaje de dos a tres veces mayor a la concentración de los fertilizantes comunes, lo que ocasiona una variación en la relación de C/N, siendo esta menor que el valor recomendado de 10.

Parámetros microbiológicos

En la *Tabla 5*, se presentan los valores obtenidos y el promedio de la concentración de parámetros microbiológicos en los lodos de la planta piloto. Se observa que existe gran carga bacteriana y la presencia de organismos patógenos, como son la *Salmonella cholerasuis*, *Escherichia coli*, *Shigella flexneri*, *Enterococcus faecalis*, y huevos de helminto. Estos valores se reducirán si los lodos son sometidos a un tratamiento térmico como la incineración, ya que se ha documentado que la *Salmonella cholerasuis* y los coliformes mueren al estar expuestos por 1 hora a 55 °C o 20 minutos a 60 °C (Pliego Bravo et al., 2014).

Gráfico 2. Microorganismos encontrados en los lodos de la planta piloto



En el *Gráfico 2*, se observan dos picos muy altos en el contenido de microorganismos en los lodos de las muestras 4 y 8 que corresponden a la fecha de muestreo del 20 de febrero y 3 de abril respectivamente. Este incremento puede deberse en parte a que durante los días previos al muestreo no se realizaron purgas de lodos residuales en la planta y se registraron escasas lluvias.

Metales pesados

La importancia del análisis de metales pesados en los lodos se debe a que son contaminantes tóxicos con gran capacidad de bioacumulación en el ambiente y que además resultan perjudiciales para la salud humana. Es esencial determinar la concentración de metales pesados en los lodos residuales con el fin de elegir un método adecuado de gestión para su aprovechamiento en la generación de energía que sea apto para los valores encontrados.

La presencia de los metales en el efluente gaseoso o cenizas, depende de su naturaleza química. A excepción del mercurio que se convierte en gas a 365 °C y se volatiliza con facilidad, los metales analizados se transforman en gas a altas temperaturas, empezando con el cadmio a 765 °C y siendo el níquel el metal que requiere la temperatura más alta de 2730 °C.

Los hornos incineradores trabajan por lo regular con temperaturas que oscilan entre 950 °C y 1200 °C. De esta manera, es posible que los metales Cd, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn se volatilicen durante la combustión, pero tienden a condensar rápidamente cuando los gases de salida se enfrían, por lo que generalmente se encuentran en las cenizas producidas durante la incineración.

Los valores límites expuestos en la normativa nacional e internacional no deben sobrepasarse, de hacerlo, se obliga a tratar los lodos por vía biológica, química o térmica, mediante almacenamiento a largo plazo o por cualquier otro procedimiento apropiado, de manera que se reduzcan significativamente sus valores e impactos al ambiente (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino de España, 2009).

CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE LODOS DE DEPURACIÓN PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA

Tabla 11. Comparación de metales pesados en los lodos residuales con los límites establecidos en la normativa vigente nacional e internacional.

Muestra	Cd (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Hg (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Zn (mg/kg)
Lodos residuales	1,4 - 38,1	18,9 - 67,3	16,0 - 18,5	0,0004 - 0,005	3,4 - 13,5	1,8 - 5,5	131,5 - 625,1
Normativa ecuatoriana ^{1,2} y mexicana ³	39 -85	1200 - 3000	1500 - 4300	17 - 57	420	300 - 840	2800 - 7500
Normativa española ⁴	20 - 40	1000 - 1500	1000 - 1750	16 - 25	300 - 400	750 - 1200	2500 - 4000

^{1.} Norma Técnica de Desechos Peligrosos y Especiales NT005. (2016). *Secretaría de Ambiente del DMQ.*

^{2.} Manejo ambientalmente adecuado de lodos provenientes de plantas de tratamiento. (1999). *Municipio Metropolitano de Quito, Dirección de Medio Ambiente.*

^{3.} Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002 para lodos y biosólidos: Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. (2002).

^{4.} Real Decreto 1310/1990 para la utilización de los lodos de depuración en el sector agrario. (1990).

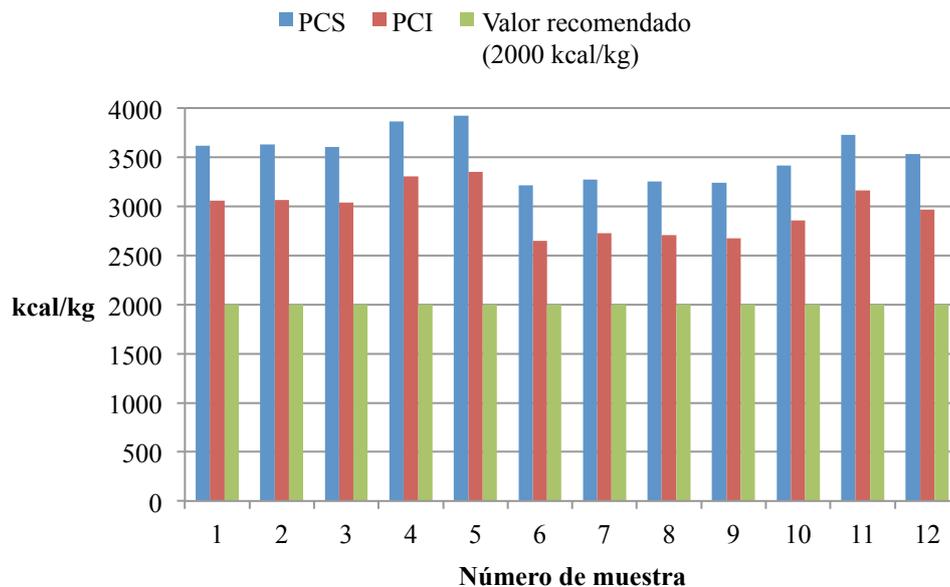
En la *Tabla 6*, se encuentran los valores de metales pesados presentes en los lodos, cromo (Cr), cobre (Cu), níquel (Ni), plomo (Pb), y zinc (Zn). En la *Tabla 11*, se realiza la comparación de los valores de metales pesados encontrados en los lodos residuales de la planta piloto con los establecidos en la normativa para lodos residuales de Ecuador, México y España. Los valores obtenidos en los análisis se encuentran debajo del rango de valores límites permitidos por la normativa indicada, lo que demuestra que los lodos residuales de la planta piloto no presentan ningún problema relacionado a metales pesados, ni toxicidad para el ambiente.

Poder calorífico

En los análisis calorimétricos, se obtuvieron valores de PCS (*Tabla 7*) entre 3 212 a 3 925 kcal/kg y de PCI entre 2 684 a 3 352 kcal/kg. Estos resultados se presentan en el *Gráfico 3* en el cual se demuestra que se encuentran dentro del rango de valores recomendados en estudios previos para la incineración de lodos de depuración, que se sitúa entre 2 000 a 3 000 kcal/kg (Mendoza et al., 2009).

CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE LODOS DE DEPURACIÓN PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA

Gráfico 3. Comparación de valores obtenidos de PCI y PCS vs. valores adecuados para la incineración de lodos residuales



De hecho, en la *Tabla 12* se demuestra que la valorización térmica de lodos con ese poder calorífico presenta una energía igual o mayor a la del lignito que es un combustible usado comúnmente en centrales térmicas (Mendoza et al., 2009). También se compara con combustibles fósiles utilizados en este tipo de instalaciones como la antracita (PCI = 6.700 kcal/kg) y el diesel (PCI = 9 934 kcal/kg).

Tabla 12. Comparación del poder calorífico inferior de los lodos residuales de la planta piloto vs. el PCI de combustibles fósiles.

Lodos residuales (kcal/kg)	Lignito ⁵ (kcal/kg)	Antracita ⁵ (kcal/kg)	Fuel Oil 1 ⁶ (kcal/kg)	Diesel ⁶ (kcal/kg)	Gas Propano ⁶ (kcal/kg)
2964	2 177	6 700	9 465	9 934	11 055

⁵ Colomer, F. J., Carlos, M., Gallardo, A., Bovea, M. D., & Herrera, L. (2009). Posibilidades de valorización de diferentes lodos de depuradoras. *XIII Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos*, pp. 1–12. Badajoz.

⁶ Ricardo García (2001). *Teoría de la combustión: Combustión y combustibles*.

Porcentaje de azufre

La determinación del azufre en los lodos se realiza mediante un análisis químico del lavado de la bomba calorimétrica y es necesaria llevarla a cabo debido a que estos compuestos liberan pequeñas cantidades de calor durante la combustión, las cuales deben ser

CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE LODOS DE DEPURACIÓN PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA

corregidas en el resultado final (Cabrera, 2016). La presencia del azufre únicamente tiene plena potencia calorífica cuando se encuentra en estado libre.

La presencia del azufre en los lodos de depuración se debe principalmente a su concentración en las aguas residuales. El azufre se encuentra en forma de ión en la naturaleza, en los sedimentos y rocas, en la biomasa de organismos vivos y muertos y en efluentes de industrias de papel, baterías, entre otros. En ausencia de oxígeno, los compuestos de azufre presentes en los lodos producen olores desagradables.

En porcentajes elevados puede formar escorias muy perjudiciales y óxidos, que corroen piezas en hornos y calderas, siendo además sus emisiones contaminantes a la atmósfera. El porcentaje promedio de azufre generado en la combustión de los lodos residuales es de 0,31% y varía entre un rango de 0,2 a 0,44%.

En la *Tabla 13*, se realiza una comparación entre el contenido de azufre en los lodos de la planta piloto y el de combustibles fósiles comúnmente utilizados en Latinoamérica. Se puede observar que la concentración de azufre en los lodos es de 3 100 ppm (0,31%), inferior a la presente en los combustibles, lo que sugiere que existirá menor contaminación por emisiones a la atmósfera durante el proceso de incineración de los lodos para obtención de energía que con el uso de comburentes alternos.

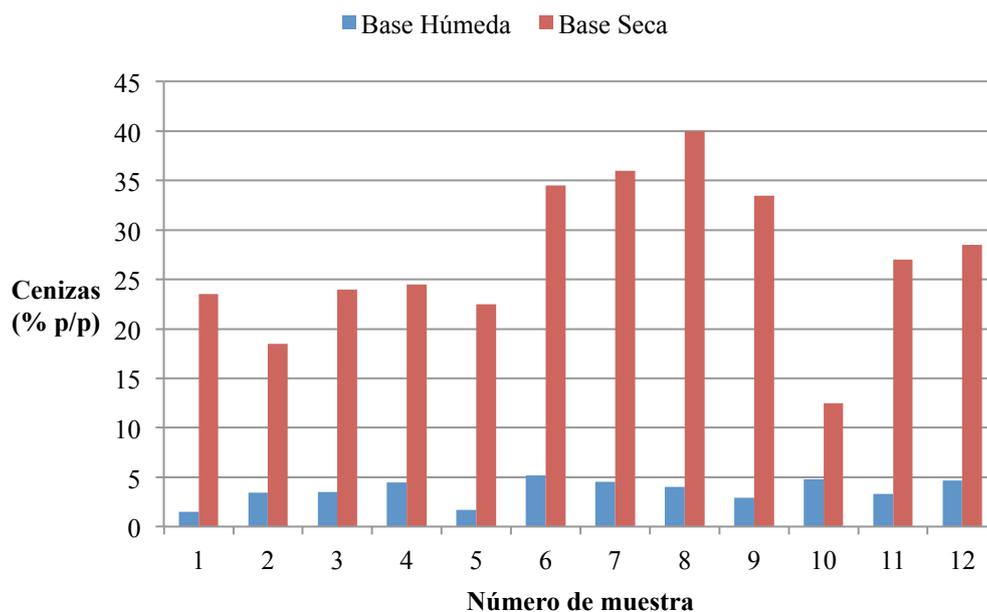
Tabla 13. Comparación de la concentración de azufre en los lodos residuales vs. azufre contenido en combustibles de uso común en Latinoamérica ⁷ .		
País	Tipo de combustible	Azufre (ppm)
Planta piloto	Lodos residuales	3 100
Bolivia	Diesel Oil	5 000
Brasil	Diesel B	1 800
Ecuador	Diesel 2	7 000
Perú	Diesel 2	5 000
Uruguay	Gas Oil	7 000
Venezuela	Medium Fuel Oil	5 000

⁷ Special Report Latin America: Regional Fuel Quality Overview (focus on South America). *Hart Energy*. July 25, 2011.

Porcentaje de cenizas

El porcentaje promedio de cenizas presentes en los lodos analizados en base húmeda y en base seca fue de 3,7% y 27% respectivamente. Esto sugiere que al someter los lodos a un proceso de incineración, se reducirá aproximadamente el 96,3% de su volumen para base húmeda y 73% para base seca. Esta reducción de volumen en los lodos resulta beneficiosa al momento de gestionar los residuos producidos en la incineración como son las cenizas.

Gráfico 4. Comparación del porcentaje de cenizas de los lodos en base seca y en base húmeda.



Consumo energético y cantidad de energía producida

En promedio, para la operación anual, la planta de tratamiento utiliza 57 854 kWh, lo que tiene un costo aproximado de USD 6 943. El volumen de lodos aprovechables producidos en la planta piloto se ve afectado debido al alto porcentaje de agua presente en los mismos. Anualmente, en la PTAR piloto se purgan 29 200 L de lodos de depuración, de los cuales se obtienen 759 kg de lodos aprovechables para la generación de 2 619 kWh/año con costo relativo de 314,31 USD/año.

CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE LODOS DE DEPURACIÓN PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA

En estudios previos se ha establecido que los lodos provenientes de depuradoras a gran escala contienen un potencial energético que podría llegar a cubrir más del 50% de las necesidades energéticas de la planta de tratamiento de aguas residuales. Por el contrario, los lodos residuales analizados en este trabajo llegan a cubrir hasta el 5% de los gastos energéticos de la planta (Redacción AINIA, 2012).

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Con el análisis de los lodos residuales de la planta piloto de la EPMAPS se logró conocer la composición, calidad y volumen de los mismos.
- La producción diaria de lodos residuales en la planta piloto es de 80 L, de los cuales únicamente el 2,5% representa a la fracción de sólidos que forman el lodo espeso (*Lodo 2*) con el cuál se realizará la incineración.
- La cantidad de lodos residuales aprovechables para la generación de energía en la planta piloto es de 2,08 kg/día.
- La determinación de la humedad de los lodos en la cuantificación del poder calórico es un aspecto fundamental, ya que a mayor humedad es más difícil producir combustión y por ende el aprovechamiento energético será de menor eficiencia. El porcentaje promedio de humedad en los lodos purgados diariamente en la planta es de 99,8 %.
- Los lodos residuales presentan valores de poder calórico que permiten que su energía liberada sea aprovechada en procesos de valorización energética. La media del poder calórico de los lodos, 2964 kcal/kg, supera el valor óptimo establecido para la incineración que es de 2000 kcal/kg.
- El consumo energético anual de los equipos en la planta es de 57 855 kWh lo que representa un costo económico de USD 6 943 para la EPMAPS.
- La planta piloto es capaz de generar 2 619,2 kWh/año de energía eléctrica a partir de sus lodos residuales.
- La planta piloto funciona a pequeña escala por lo que es capaz de cubrir únicamente hasta el 5% de los gastos energéticos necesarios para su operación. Esto sucede debido a que por su alto porcentaje de agua, la producción de lodos en la planta piloto no es representativa para un proceso de incineración adecuado. Sin embargo, en plantas de mayor escala se puede llegar a generar la energía necesaria para cubrir más del 50% de estos valores.

CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE LODOS DE DEPURACIÓN PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA

- Los valores obtenidos de carga microbiológica en los lodos residuales fueron altos. No obstante, la incineración es un método de gestión que nos permite disminuir estas concentraciones y estabilizar los lodos de manera que no existan riesgos para la salud humana o el ambiente.
- Durante el tiempo de investigación, los valores obtenidos en los diferentes parámetros demuestran una tendencia a permanecer constantes o dentro de un rango poco variable. No obstante, existen ciertas variaciones dentro del rango que pueden deberse en gran parte a cambios estacionales con mayor presencia de lluvias y a factores de funcionamiento de la planta como es la frecuencia de las purgas llevadas a cabo por los operadores.
- La gestión de lodos residuales por incineración puede generar mayores costos a la EPMAPS que los que se tienen actualmente con su errada disposición final en el Río Machángara.
- La concentración de azufre contenido en los lodos residuales es inferior a la encontrada en algunos combustibles fósiles utilizados comúnmente en Latinoamérica y que producen emisiones que afectan a la calidad ambiental.
- Los valores obtenidos de materia orgánica y nutrientes no coinciden con aquellos indicados en fertilizantes para la enmienda agrícola y pueden generar cambios en las propiedades del suelo, por lo que se confirma la importancia de direccionar este estudio al aprovechamiento de los lodos en la generación de energía u otro tipo de aprovechamiento.
- El análisis realizado a los lodos residuales permitió conocer la concentración de metales pesados en los mismos, de manera que se realice una gestión adecuada.
- Durante el periodo de investigación, los lodos no superaron los límites permitidos para metales pesados según la normativa nacional e internacional, por lo que no se realizó un análisis de las emisiones de contaminantes generados durante el proceso de incineración, ni de su concentración en las cenizas producidas.

CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE LODOS DE DEPURACIÓN PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA

- El TULSMA, Libro VI, Anexo 3: Norma de emisiones al aire desde fuentes fijas de combustión, regula la incineración de residuos y establece los límites permisibles, disposiciones y prohibiciones para la emisión de contaminantes del aire. Se recomienda analizar las emisiones de contaminantes a la atmósfera durante la incineración de los lodos residuales para verificar que se cumpla con la normativa y de ser necesario incorporar un sistema de depuración de gases en el proceso de combustión.
- Se recomienda implementar un sistema de secado mecánico y térmico que reduzca el porcentaje de humedad a un valor máximo de 10%, valor óptimo para la incineración.
- Para una planta a gran escala, es recomendable mejorar el proceso de deshidratación de los lodos utilizando un filtro prensa, lecho de secado u otro.
- Se plantea la posibilidad de almacenar los lodos de la planta por un periodo largo de tiempo para incrementar su volumen, o recuperar los lodos de varias plantas de tratamiento para reunir la cantidad necesaria de lodos residuales para que un proceso de incineración sea factible desde un punto de vista económico y de operación. Sin embargo, esta actividad de almacenamiento por largos periodos, puede generar contaminación atmosférica por los fuertes olores que desprenden los lodos.
- Se recomienda a los operadores de las PTARs mantener un control adecuado en el funcionamiento de las mismas para evitar tener malos olores y presencia de vectores.
- Se sugiere realizar estudios sobre la estabilización de los lodos por digestión anaerobia que permita estabilizar los lodos residuales y analizar el poder calorífico del metano producido en este proceso. Se conoce que el metano tiene un poder calorífico cercano a 8 551 kcal/kg, lo que puede representar mayores beneficios en la generación de energía vs. el valor de 2 964 kcal/kg presentes en los lodos analizados en esta investigación.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de investigación se llevó a cabo gracias al Convenio de Cooperación Científica entre la UISEK y la EPMAPS, el cual se encuentra a cargo del representante del Programa de Saneamiento Ambiental, PhD. Alberto Calderón.

Se agradece también al MSc. Walberto Gallegos, MSc. Katty Coral, y PhD. Miguel Martínez-Fresneda, por su dirección y guía durante la realización de este proyecto.

REFERENCIAS

- Arauzo, I., & Permuy Vila, D. (2008). La gestión de lodos y el protocolo de Kioto . El secado térmico y la valorización en cementera. *VII Coloquios de Directores Y Técnicos de Fábricas de Cemento: “Desarrollo, Innovación Y Sostenibilidad: Los Tres Pilares de La Industria Cementera,”* 12.
- Barrena, R. (2006). *Compostaje de residuos sólidos orgánicos. Aplicación de técnicas respirométricas en el seguimiento del proceso.* Universitat Autònoma de Barcelona.
- Becton, Dickinson and Company. (2013). BD Endo Agar: Instrucciones de uso - medio en placas listo para su uso. Alemania. Retrieved from <https://www.bd.com/resource.aspx?IDX=8766>
- Blanco Jara, P. A. (2014). *Aprovechamiento de lodos residuales para cerrar el ciclo urbano del agua, mejorar la eficiencia energética y reducir los GEI: caso de la PITAR Nuevo Laredo.* *Journal of Chemical Information and Modeling.* Colegio de la Frontera Norte.
- Cabrera, M. (2016). *Cuantificación del poder calorífico superior e inferior de los residuos sólidos urbanos: papel, cartón, madera y materia orgánica de la Parroquia Limoncocha. Año 2015 - 2016.* Universidad Internacional SEK.
- Cáceres, L. (2013). Determinación de Materia Orgánica en Suelos y Sedimentos. Procedimiento operativo estándar. *Química Analítica Aplicada Inorgánica QMC-613,* 1–7.
- Calderón, A. (2017). *Caudales planta piloto de tratamiento de aguas de EPMAPS - Agua de Quito.* Quito.
- Campos Medina, E., García Rojas, N., Velásquez Rodríguez, A., & García Fabila, M. (2009). Análisis básico del reúso de lodos residuales de una planta de tratamiento de aguas residuales en suelos de pradera del Parque Nacional Nevado de Toluca. *Universidad Autónoma Del Estado de México, 11(2),* 35–51.

CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE LODOS DE DEPURACIÓN PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA

- Colomer, F. J., Carlos, M., Gallardo, A., Bovea, M. D., & Herrera, L. (2009). Posibilidades de valorización de diferentes lodos de depuradoras. *XIII Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos*, pp. 1–12. Badajoz.
- Conesa, J. (2014). *Lodos de depuración: Secado térmico y valorización energética*. Universidad de Alicante. Retrieved from <http://hdl.handle.net/10045/36058>
- De Andrés, J. M. (2010). *Gasificación de lodos de estaciones depuradoras de aguas residuales urbanas (EDAR)*. Universidad Politécnica de Madrid.
- Donado, R. (2013). *Plan de gestión para lodos generados en las PTAR-D de los municipios de Cumaral y San Martín de los Llanos en el departamento del Meta*. Pontificia Universidad Javeriana.
- Egevasa. (2008). Biowin. *Tecnología Del Agua*, (299), 0–1.
- EPMAPS. (2016, June 16). EPMAPS con parámetros de tratamiento de aguas residuales en planta a pequeña escala. *Alcaldía Quito*, p. 1. Quito. Retrieved from [http://prensa.quito.gob.ec/index.php?module=Noticias&func=news_user_view&id=19778&umt=EPMAPS con par%El metros de tratamiento de aguas residuales en planta a peque%Fl a escala](http://prensa.quito.gob.ec/index.php?module=Noticias&func=news_user_view&id=19778&umt=EPMAPS%20con%20par%C3%A1metros%20de%20tratamiento%20de%20aguas%20residuales%20en%20planta%20a%20peque%C3%B1a%20escala)
- García, R. (2001). Combustión y combustibles. *Teoría de La Combustión*, 1, 1–23.
- Granados González, I. (2015). *Generación, caracterización y tratamiento de lodos de EDAR*. Universidad de Córdoba. Retrieved from <http://helvia.uco.es/xmlui/handle/10396/13199>
- Hammeken, A., & Romero, E. (2005). *Análisis y diseño de una planta de tratamiento de agua residual para el municipio de San Andrés Cholula*. Universidad de las Américas Puebla. Retrieved from http://caterina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lic/hammeken_a_am/capitulo8.pdf
- Hierro Guilmain, J. (2003). Los lodos de depuración de aguas residuales urbanas. In *Los residuos urbanos y asimilables* (Consejería, pp. 495–550). Andalucía: Junta de

CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE LODOS DE DEPURACIÓN PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA

Andalucía.

Leppe, A., López, A., & Nelson, P. (2002). *Lodos provenientes de plantas de aguas servidas : potencialidades y restricciones; temores y realidades*. Cancún.

Limón Macías, J. (2013). Los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales, ¿problema o recurso? Guadalajara.

Melgratti, de I. M. R. (2005). Procedimientos analíticos para suelos normales y salinos.

Técnicas usadas en el laboratorio de suelos y agua. *INTA, Estación Experimental Agropecuaria Sáenz Peña*, (Laboratorio de Suelos y Agua), 1–26.

Mendoza, F. J. C., Alberola, M. C., Herrera, L., Gallardo, A., & Bovea, M. D. (2009, Marzo).

Viabilidad de la valorización energética de lodos procedentes de distintos tipos de depuradoras. *Residuos 110*, 32–37.

Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación de España. (1990, Noviembre). Real Decreto

1310/1990: Utilización de los lodos de depuración en el sector agrario. *BOE Núm. 262*, 32339–32340.

Ministerio de Medio Ambiente de España. (2003). Real Decreto 653/2003: Incineración de

residuos. *BOE Núm. 142*, 22966–22980.

Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino de España. (2009). *Caracterización*

de los lodos de depuradoras generados en España. España.

Norma Mexicana. (2013). *Medición de sólidos sedimentables en aguas naturales, residuales y*

residuales tratadas. *NMX-AA-004-SCFI-2013 ANÁLISIS*.

Osorio, P. C., & Peña, D. (2009). Determinación de la relación DQO/DBO5 en aguas

residuales de comunas con población menor a 25.000 habitantes en la VIII región., 1–18.

Peñaherrera Proaño, M. A. (2015). *Estabilización de lodos provenientes de plantas de*

tratamiento de aguas residuales domésticas mediante digestión anaerobia. Universidad de las Américas, Quito.

CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE LODOS DE DEPURACIÓN PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA

Pistonesi, C., Haure, J. L., & D'Elmar, R. (2013). Energía a partir de las aguas residuales.

Editorial de La Universidad Tecnológica Nacional, 1–63.

Pliego Bravo, Y., García, M., Urrea, G., & Vergara, M. (2014). Simulación del proceso termoquímico sugerido para el aprovechamiento de los lodos residuales como fuente de energía alterna. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 13(2), 619–629.

Redacción AINIA. (2012). FACSA y ainia estudian maximizar la obtención de energía a partir de lodos de depuradora. Retrieved April 19, 2017, from <http://www.ainia.es/noticias/facsa-y-ainia-estudian-maximizar-la-obtencion-de-energia-a-partir-de-lodos-de-depuradora/>

Rodríguez, E., Isac, L., Fernández, N., & Salas, M. D. (2004). Beneficios medio ambientales de la depuración de las aguas residuales. Optimización del reciclado. *Ingeniería Municipal*, 17–20.

Secretaria de Ambiente del DMQ. (2016). *Norma técnica de desechos peligrosos y especiales (NT005)*. Quito.

Sixtos, C. (2011). Procedimientos y técnicas para la realización de estudios coproparasitoscópicos. *Virbac Al Día*, 3(24), 12.

Torres, E. (2005). *Reutilización de aguas y lodos residuales*. Universidad Politécnica de Madrid. Retrieved from <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsaar/e/fulltext/gestion/lodos.pdf>

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Cronograma de muestreos realizados.	18
Tabla 3. Resultados de los parámetros fisicoquímicos.	24
Tabla 4. Materia orgánica y nutrientes.....	25
Tabla 5. Parámetros microbiológicos.....	26
Tabla 6. Concentración de metales pesados.....	27
Tabla 7. Parámetros relacionados a la incineración y obtención de energía a partir de los lodos residuales.	28
Tabla 8. Consumo energético en la planta y los costos económicos por hora, día, mes y año.	28
Tabla 9. Cantidad de energía generada kWh/año y posible ahorro económico anual por aprovechamiento de los lodos residuales de la planta piloto.	29
Tabla 10. Comparación de materia orgánica y nutrientes en los lodos residuales vs. fertilizantes comerciales.....	31
Tabla 11. Comparación de metales pesados en los lodos residuales con los límites establecidos en la normativa vigente.	34
Tabla 12. Comparación del poder calorífico inferior de los lodos residuales de la planta piloto vs. el PCI de combustibles fósiles.....	35
Tabla 13. Comparación de la concentración de azufre en los lodos residuales vs. azufre contenido en combustibles de uso común en Latinoamérica ⁷	36

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Esquema de la planta piloto de tratamiento de aguas residuales de la EPMAPS en el simulador <i>BioWin 5.1</i>	22
Gráfico 2. Microorganismos encontrados en los lodos de la planta piloto	32
Gráfico 3. Comparación de valores obtenidos de PCI y PCS vs. valores adecuados para la incineración de lodos residuales	35
Gráfico 4. Comparación del porcentaje de cenizas de los lodos en base seca y en base húmeda.....	37

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo A. Galería fotográfica	51
Foto 1. Serie de reactores aeróbicos y tanques anóxicos en la planta piloto.....	51
Foto 2. Toma de muestras de los lodos residuales.....	51
Foto 3. Almacenamiento de las muestras en botellas de polietileno y coolers para su transporte hasta el laboratorio.	51
Foto 4. Análisis de parámetros in-situ con el equipo multiparamétrico HACH.....	51
Foto 5. Decantación de la muestra en embudos de separación.	51
Foto 6. Secado térmico en planchas del lodo espeso (Lodo 2).....	52
Foto 7. Secado térmico en la estufa del lodo espeso (Lodo 2).....	52
Foto 8. Lodo espeso (Lodo 2).....	52
Foto 9. Lodo seco y molido (Lodo 3).....	52
Foto 10. Digestión de lodos para análisis de Nitrógeno Kjeldahl.....	52
Foto 11. Destilación de lodos.....	52
Foto 12. Preparación del medio Agar Endo BBL.	53
Foto 13. Conteo de placas, 24 horas después de la siembra.....	53
Foto 14. Muestra digerida para análisis de metales y potasio.	53
Foto 15. Análisis de carbono y materia orgánica total.....	53
Anexo B. Glosario	54
Aguas residuales urbanas.....	54
DMQ.....	54
Edafología.....	54
Emisión.....	54
EPMAPS	54
Fuente fija de combustión	54

CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE LODOS DE DEPURACIÓN PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA

Lodos de depuración	55
Metales pesados.....	55
Microorganismos patógenos.....	55
Parámetros agronómicos.....	55
Parámetros fisicoquímicos.....	55
PTAR.....	55
Poder Calorífico	55

ANEXOS

Anexo A. Galería fotográfica

Foto 1. Serie de reactores aeróbicos y tanques anóxicos en la planta piloto.



Foto 2. Toma de muestras de los lodos residuales.



Foto 3. Almacenamiento de las muestras en botellas de polietileno y coolers para su transporte hasta el laboratorio.



Foto 4. Análisis de parámetros in-situ con el equipo multiparamétrico HACH.



Foto 5. Decantación de la muestra en embudos de separación.



CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE LODOS DE DEPURACIÓN PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA

Foto 6. Secado térmico en planchas del lodo espeso (Lodo 2).



Foto 7. Secado térmico en la estufa del lodo espeso (Lodo 2).



Foto 8. Lodo espeso (Lodo 2).



Foto 9. Lodo seco y molido (Lodo 3).



Foto 10. Digestión de lodos para análisis de Nitrógeno Kjeldahl.



Foto 11. Destilación de lodos.



CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE LODOS DE DEPURACIÓN PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA

Foto 12. Preparación del medio Agar Endo BBL.

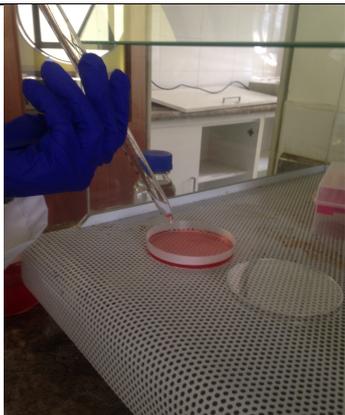


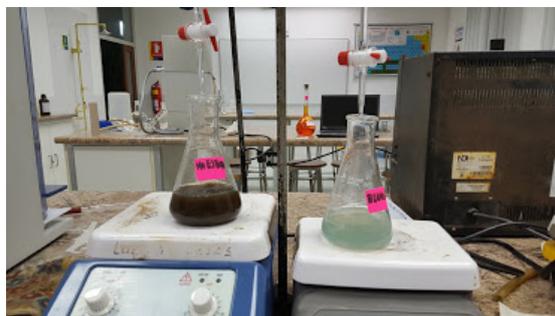
Foto 13. Conteo de placas, 24 horas después de la siembra.



Foto 14. Muestra digerida para análisis de metales y potasio.



Foto 15. Análisis de carbono y materia orgánica total.



Anexo B. Glosario

Aguas residuales urbanas

Agua que no tiene valor inmediato para el fin para el que se utilizó ni para el propósito para el que se produjo debido a su calidad, cantidad o al momento en que se dispone de ella.

DMQ

Distrito Metropolitano de Quito. Se divide en 9 Administraciones Zonales, las cuales contienen a 32 parroquias urbanas y 33 parroquias rurales y suburbanas.

Edafología

Ciencia que estudia la composición y naturaleza, las condiciones que presentan los suelos y la relación que estos mantienen con los seres vivos que viven y se desarrollan sobre ellos.

Emisión

La descarga de sustancias provenientes de actividades humanas en la atmósfera.

EPMAPS

Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento. Es la entidad municipal encargada de la prestación de servicios de agua potable, alcantarillado sanitario y pluvial, a través de todo el ciclo del agua desde la captación en las fuentes, luego al proceso de conducción, potabilización, distribución, recolección de las aguas residuales y la disposición final.

Fuente fija de combustión

Es aquella instalación o conjunto de instalaciones, que tiene como finalidad desarrollar operaciones o procesos industriales, comerciales o de servicios, y que emite o puede emitir contaminantes al aire, debido a proceso de combustión, desde un lugar fijo o inamovible.

CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE LODOS DE DEPURACIÓN PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA

Lodos de depuración

También conocidos como fangos, lodos residuales o lodos de depuradora, son una mezcla de agua y sólidos separados del agua residual, que es generada como resultado de procesos naturales o artificiales dentro de una planta de tratamiento de aguas residuales.

Metales pesados

Son aquellos cuya densidad es por lo menos cinco veces mayor que la del agua. Su concentración en el ambiente puede causar daños en la salud de las personas y animales.

Microorganismos patógenos

Aquellos que son capaces de penetrar y multiplicarse en otros seres vivos, a los que perjudican, originando enfermedades e infecciones.

Parámetros agronómicos

Aquellos asociados a la práctica de la agricultura. Entre ellos se encuentran los nutrientes como el Fósforo, Nitrógeno, Carbono y Potasio.

Parámetros fisicoquímicos

Características físicas y químicas que tiene un compuesto. Entre ellas se encuentra la temperatura, el pH, la conductividad, el oxígeno disuelto, la densidad, humedad, etc.

PTAR

Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, también conocida como Estación Depuradora de Aguas Residuales o EDAR. Es una instalación donde se retiran los contaminantes de las aguas residuales, para hacer de ellas un agua sin riesgos a la salud y/o medio ambiente al disponerla en un cuerpo receptor natural o por su reúso en otras actividades que no sea el consumo humano.

Poder Calorífico

Cantidad de energía por unidad de masa o unidad de volumen de materia que se puede desprender al producirse una combustión. Se expresa en (kJ/kg), (kJ/m³), o (kJ/mol).

