

**Escuela Superior Politécnica del Litoral**

**Facultad de Ciencia Naturales y Matemáticas**

Aprovechamiento de lodos provenientes de una planta de tratamiento de agua potable para el desarrollo sostenible de la comuna San Juan

**Proyecto Integrador**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniero Químico**

Presentado por:

Ricardo Andrés Bedoya Matamoros

Jefferson Ronal Zavaleta Sánchez

Guayaquil - Ecuador

Año: 2023

## Dedicatoria

---

El presente proyecto va dedicado a Dios. A mi madre Isela, la cual ha estado a mi lado en cada momento de mi carrera, aconsejándome y escuchándome. A mi padre César, quien me ha apoyado a lo largo de este viaje. A mi gato el cual me ha acompañado siempre que necesitaba desvelarme trabajando. A mi biblioteca de música, la cual me ha ayudado a mantenerme de pie a lo largo de la carrera. De igual forma, le dedico este trabajo a todas las personas que de alguna manera han compartido conmigo a lo largo de este trayecto. Por último, pero no menos importante, le quiero dedicar este trabajo a mí mismo. Nadie ha sufrido tanto por este proyecto como yo, así que dedicarme este logro es importante.

*Ricardo Bedoya*

## Dedicatoria

---

Dedico con todo mi corazón este proyecto a mi familia. A mi madre y a mi padre que siempre estuvieron presentes apoyándome en cada paso de este largo camino. A mis hermanos por su apoyo incondicional. A mi novia y futura esposa Ingry que en cada momento que caía me levantaba y me ayudaba a seguir. A mi hermano de la vida y socio por su apoyo incondicional y por último a mi hija perruna Danna Paula que alegra mi vida.

*Jefferson Zavaleta*

## Agradecimientos

---

Queremos agradecer la realización de este proyecto a los tutores, que con su guía y apoyo hemos sido capaces de completarlo.

Además, queremos agradecer a los analistas del Laboratorio de Geotecnia y Construcción que nos supieron ayudar a realizar los análisis que necesitábamos y a poder completar de manera correcta la metodología de la investigación.

## Declaración Expresa

---

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Ricardo Andrés Bedoya Matamoros y Jefferson Ronal Zavaleta Sánchez damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”



Ricardo Andrés Bedoya  
Matamoros



Jefferson Ronal Zavaleta  
Sánchez

## Evaluadores



---

**Mgtr. Christian Macías**

Tutor de proyecto

---

**PhD. David Matamoros**

Tutor de proyecto

---

**Mgtr. Nadia Flores**

Profesor de Materia

## Resumen

La generación de lodo es un problema que afecta a las empresas dedicadas al tratamiento de agua potable o residual. Dentro de la planta del cliente se generan 5 toneladas diarias de lodo como residuo. Éste busca una forma de aprovechar ese lodo para evitar su disposición a zonas verdes. Para ello se procedió a analizar el proceso de tratamiento del agua potable dentro de la planta para conocer la zona de muestreo y obtener el lodo. La muestra de lodo obtenida fue caracterizada mediante análisis físicos y químicos para encontrar su posible aplicación en agricultura o construcción. Los resultados de la caracterización mostraron como no es posible utilizar el lodo para la agricultura debido a la presencia de aluminio, el cual es tóxico para las plantas. El lodo, al ser de tipo arenoso, fue posible mezclarlo con cemento para la fabricación de bloques. Se midió la resistencia de mezclas de mortero con concentraciones de lodo de 5, 15 y 25%, resultando la mezcla de 5% de lodo como la más resistente. Por lo tanto, se concluye que la aplicación ideal de este lodo es para la fabricación de bloques de cemento, con concentraciones entre 5 y 10%.

**Palabras clave:** Planta de tratamiento de agua potable; lodo; muestra; caracterización; bloques de cemento.

## Abstract

Sludge generation is a problem for waste or drinking water treatment plants. Inside the client's plant around 5 tons per day of sludge are produced as waste. They are trying to find a way to exploit it to avoid discharging it to green areas. For this, a previous analysis of the plant's process was performed to know where to extract the sludge. A sample was obtained and characterized by physical and chemical tests to find an application for it in agriculture or construction. The results from the characterization showed that the sludge cannot be applied in agriculture because of the presence of aluminum, which is toxic for plants. The sludge had a sandy texture, so it was mixed with cement to produce blocks. Resistance of mortar mixtures was measured, where the mixtures had a sludge concentration of 5, 15 and 25%. The 5% mortar block was the one that resisted the most. To conclude, the best application for the sludge is for cement blocks, with a concentration between 5 and 10% of sludge.

**Keywords:** Drinking water treatment plant; sludge; sample; characterization; cement blocks



# Índice general

Resumen .....	vi
Abstract.....	vii
Abreviaturas.....	xi
Simbología.....	xii
Índice de figuras.....	xiii
Índice de tablas.....	xiv
Capítulo 1 .....	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Descripción del problema .....	2
1.3. Justificación del problema .....	3
1.4. Objetivos .....	5
1.4.1. Objetivo general.....	5
1.4.2. Objetivos específicos .....	5
1.5. Marco Teórico.....	5
1.5.1. Tratamiento de agua potable.....	5
1.5.2. Lodos generados de una PTAP .....	6
1.5.3. Características físicas y químicas de los lodos generados.....	6
1.5.4. Tratamiento de lodos generados en PTAP.....	7
1.5.5. Mezcla y Espesamiento .....	7
1.5.6. Deshidratación .....	8

1.5.7. Disposición final .....	9
1.5.8. Aplicaciones de lodos generados en PTAP .....	9
Capítulo 2 .....	10
2.1. Metodología aplicada.....	11
2.2. Lugar de interés.....	11
2.3. Toma y almacenamiento de muestras de lodo .....	13
2.4. Caracterización del lodo .....	15
2.4.1. Análisis químico .....	15
2.4.2. Análisis físico .....	16
2.5. Diseño experimental.....	23
2.5.1. Lodo como aditivo para agricultura.....	23
2.5.2. Lodo para material de construcción.....	23
2.5.3. Análisis de impacto ambiental .....	27
Capítulo 3 .....	29
3.1. Resultados obtenidos de la caracterización.....	30
3.1.1. Análisis químico .....	30
3.1.2. Análisis físico .....	31
3.2. Diseño Experimental.....	36
3.2.1. Análisis del lodo para la agricultura .....	36
3.2.2. Determinación de la resistencia a la compresión de morteros con lodo .....	38
3.2.3. Análisis de Impacto Ambiental .....	44

Capítulo 4 .....	49
4.1. Conclusiones.....	49
4.2. Recomendaciones.....	52
Referencias.....	53

## **Abreviaturas**

ESPOL Escuela Superior Politécnica del Litoral

ASTM American Society for Testing and Materials

NTE Norma Técnica Ecuatoriana

INEN Servicio Ecuatoriano de Normalización

PTAP Planta de Tratamiento de Agua Potable

PTAR Planta de Tratamiento de Agua Residual

FIMCP Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción

FICT Facultad de Ciencias de la Tierra

AASHTO American Association of State Highway and Transportation Officials

## Simbología

mg	Miligramo
kg	Kilogramo
pH	Potencial de Hidrógeno
cm	Centímetro
mV	Milivoltio
Cu	Cobre
Ni	Níquel
C	Carbono
Mn	Manganeso
P	Fósforo

## Índice de figuras

<b>Figura 2.1</b> Metodología aplicada .....	11
<b>Figura 2.2</b> Remoción de partículas sólidas.....	12
<b>Figura 2.3</b> Clarificador .....	13
<b>Figura 2.4</b> Unidad de tratamiento de lodos.....	14
<b>Figura 2.5</b> Depósito de lodos.....	14
<b>Figura 2.6</b> Muestra de lodo húmedo antes del secado .....	17
<b>Figura 2.7</b> Muestra de lodo seca después de dos días.....	18
<b>Figura 2.8</b> Determinación de densidad del lodo.....	19
<b>Figura 2.9</b> Lodo seco triturado.....	20
<b>Figura 2.10</b> Tamizado .....	21
<b>Figura 2.11</b> Muestra pesada y humidificada .....	22
<b>Figura 2.12</b> Determinación de límite líquido .....	22
<b>Figura 2.13</b> Mezcladora.....	25
<b>Figura 2.14</b> Mesa de flujo.....	25
<b>Figura 2.15</b> Moldes para cubos de mortero .....	26
<b>Figura 2.16</b> Máquina de ensayo .....	27
<b>Figura 2.17</b> Simulación hecha en OpenLCA.....	28
<b>Figura 3.1</b> Curva Granulométrica .....	35
<b>Figura 3.2</b> Baño de cal .....	40
<b>Figura 3.3</b> Bloques después de 28 días .....	40
<b>Figura 3.4</b> Diagrama de barras de la máxima compresión de los bloques a los 28 días.....	43
<b>Figura 3.5</b> Model graph de la simulación de OpenLCA.....	45
<b>Figura 3.6</b> Método de cálculo para la simulación.....	46
<b>Figura 3.7</b> Diagrama de barras de las emisiones de la simulación y el caso referenciado.....	47

## Índice de tablas

<b>Tabla 2.1</b> Parámetros para el análisis químico del lodo .....	16
<b>Tabla 2.2</b> Ensayos realizados para el análisis físico del lodo.....	16
<b>Tabla 3.1</b> Características fisicoquímicas del lodo .....	30
<b>Tabla 3.2</b> Macroelementos del lodo .....	30
<b>Tabla 3.3</b> Microelementos del lodo .....	30
<b>Tabla 3.4</b> Metales pesados del lodo .....	31
<b>Tabla 3.5</b> Contenido de humedad del lodo .....	32
<b>Tabla 3.6</b> Peso volumétrico de la muestra de lodo .....	32
<b>Tabla 3.7</b> Tabla Granulométrica .....	33
<b>Tabla 3.8</b> Criterios de calidad del suelo .....	37
<b>Tabla 3.9</b> Composición de las mezclas de mortero.....	38
<b>Tabla 3.10</b> Diámetros determinados en la mesa de flujo para cada mezcla.....	39
<b>Tabla 3.11</b> Resultados de la Resistencia a la Compresión a los 7 días .....	41
<b>Tabla 3.12</b> Resultados de la Resistencia a la Compresión a los 28 días .....	41
<b>Tabla 3.13</b> Promedio de los resultados a los 28 días.....	42

# Capítulo 1



## 1.1. Introducción

El tratamiento de aguas ha sido un proceso que ha permitido la potabilización de ésta para el uso doméstico e industrial. Por lo general, las zonas urbanas y las industrias requieren de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) para suplir la demanda de agua potable que se requiere, utilizando diversas fuentes de agua cruda como aguas residuales municipales o industriales (Riffat, 2010). En contraste, las zonas rurales suelen poseer una planta de tratamiento de agua potable (PTAP) para suplir la demanda de agua potable que requieran las comunas aledañas a la planta, difiriendo las fuentes a comparación de las PTAR, dado que una PTAP requiere una fuente de agua cruda como lo puede ser un canal de riego natural o una represa (Arrieta Lozano, 2019).

Ecuador cuenta con un aproximado de 461 plantas potabilizadoras, las cuales se encuentran divididas de la siguiente manera: el 49.67% se encuentran ubicadas en la región Sierra; el 20.39%, a la región Costa; la región amazónica cuenta con un 29.28% de las plantas; mientras que la región Galápagos apenas cuenta con un 0.69% de la cantidad total de plantas potabilizadoras a nivel nacional (INEC, 2016). Cada planta, sea de agua residual o potable, realiza diversos procedimientos para lograr la remoción de sólidos disueltos, sustancias químicas, patogénicas y tóxicas para proveer agua en las mejores condiciones. Sin embargo, el tratamiento de aguas provoca la generación de lodos como residuos de procedimientos como clarificación, filtración o coagulación/floculación. La composición de los lodos suele variar dependiendo del tipo de tratamiento que se le emplea al agua. Para una PTAP, los lodos suelen poseer materia inorgánica en su composición, así como una baja concentración de nutrientes. Sin embargo, la disposición de lodos a zonas verdes o naturales puede significar una futura contaminación y violación a las leyes de protección ambiental establecidas por el país (Ramirez, 2008).

Es importante establecer medidas para evitar la disposición de lodos en zonas verdes para así disminuir el impacto ambiental negativo. Actualmente, las plantas de tratamiento de agua residual o potable requieren de un método para tratar el lodo como la reducción de su carga orgánica o aprovecharlo para su uso en algún área específica, como el reemplazo de materia prima para la generación de productos que beneficien a la planta y a los posibles consumidores.

## **1.2. Descripción del problema**

El tratamiento de aguas residuales, tanto domésticas como industriales, y de agua potable, conlleva un proceso de generación de lodos, los cuales nacen de la separación de la materia orgánica del agua. Los lodos pueden ser líquidos, sólidos o una combinación de ambos y presentan materia suspendida. Además, tienen presente un alto contenido de materia activa dependiendo del tipo de agua tratada y los compuestos utilizados para tratarla (Riffat, 2010). Sin embargo, los lodos provenientes del tratamiento de agua potable están compuestos en su mayoría por materia inorgánica como lo son arenas, arcillas y finos. Por otra parte, la carga orgánica es baja comparada con lodos provenientes de tratamiento de aguas residuales (Ramirez, 2008).

La generación de lodos se ha convertido en un problema que afecta no solo al Ecuador, sino también al mundo entero debido a que se generan toneladas de lodo al año. Las plantas de tratamiento deben idear una forma de lidiar con el lodo. Muchas veces la salida fácil es descargarlo a zonas verdes o almacenarlo hasta encontrar una forma de aprovecharlo. Sin embargo, antes de descargar los lodos es necesario analizar su composición química para encontrar si no poseen compuestos peligrosos para el medio ambiente (Palacios, 2021).

Este problema afecta también a las empresas ecuatorianas encargadas del tratamiento de aguas. La empresa en cuestión se encarga del tratamiento de agua para suplir la demanda

doméstica. Actualmente una de esas empresas posee una PTAP ubicada en la comuna San Juan, en la provincia del Guayas , la cual genera lodos producto del tratamiento del agua potable procedente de un canal de riego natural como lo es el Embalse (Interagua, 2019). Actualmente, la empresa no cuenta con un sistema de aprovechamiento del lodo generado, el cual ronda en cantidades de 5 toneladas por día, por lo que se opta por descargarlo al cuerpo de agua más cercano. Esta acción es desarrollada debido a su bajo impacto económico, pero es causante de contaminación.

Por otra parte, desechar el lodo generado puede significar la pérdida de un potencial mercado para la empresa, debido a que existen diversas aplicaciones para el lodo, tales como la construcción, la generación de biomasa o biodiesel (Mancipe Arias & Triviño Restrepo, 2018), o bien como un aditivo o abono que mejore los sembríos agrícolas (Pita & Silva, 2023). Por lo tanto, la empresa se encuentra en la búsqueda de una alternativa que, generando un bajo impacto económico, permita desarrollarlos de manera sostenible y ayude a conectar con la sociedad, mejorando su imagen a nivel local.

### **1.3. Justificación del problema**

La generación de lodos como producto del proceso de tratamiento de aguas causa un problema cuando se desconoce una forma de aprovecharlo. Muchas veces por factores económicos el transporte de lodos hacia diferentes puntos resulta inviable debido a los altos costos. Por lo tanto, la opción más rentable termina siendo el descargo de los lodos hacia las zonas verdes aledañas a la planta, las cuales también involucran a los cuerpos de agua. Sin embargo, el descargo de lodos hacia el agua provoca un impacto ambiental negativo, debido a que estas sustancias poseen una carga orgánica considerable que puede afectar la vida vegetal y animal presentes en el agua. Y para el caso de lodos que presenten alto contenido de

materia inorgánica, es posible la formación de depósitos que ocasionan turbidez en el agua y reducen la actividad fotosintética de las plantas presentes en el agua (Ramírez, 2008).

Es por ello, es preferible idear un plan de tratamiento o aprovechamiento de lodos residuales para evitar tener problemas con respecto al medio ambiente. Además, es necesario contar con una investigación exhaustiva acerca de cómo aprovechar el lodo para aplicarlo en área determinada.

La aplicación de lodos provenientes de una PTAP ayuda en el desarrollo sostenible de las empresas encargadas del tratamiento de aguas, dado a que genera un impacto sobre aspectos ambientales y socioeconómicos. Los lodos pueden ser utilizados en el área de construcción, por lo que se pueden generar mezclas entre el lodo y hormigón, ladrillo o cemento (Torres et al., 2012). Otra aplicación de los lodos es la generación de baldosas, paredes o pilares que puedan apoyar a las personas encargadas de las construcciones reemplazando ciertos materiales para reducir gastos (Rodríguez, 2018).

Por lo tanto, la empresa necesita gestionar una aplicación para el lodo generado. Es necesario reducir las descargas hacia al ambiente, por lo que, si se investiga una solución que ayude a aprovechar el lodo generado, es posible desarrollar un impacto sostenible de la empresa sobre la sociedad. Una pequeña inversión económica es necesaria para poder llevar a cabo la idea, pero dará como consecuencia la formación de una nueva área de desarrollo para la empresa. Además, la solución generaría un impacto social positivo, dado que la empresa estará dedicada a colaborar con la sociedad al involucrarlos como participantes de la posible solución, lo que impulsaría el desarrollo de la comuna. Esta acción generaría un impacto positivo sobre la empresa, lo que mejoraría su imagen en todo el país.

## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1. Objetivo general**

Generar una propuesta para el aprovechamiento del lodo generado en la PTAP mediante la caracterización de muestras para el desarrollo sostenible de la comuna San Juan.

### **1.4.2. Objetivos específicos**

- ✓ Caracterizar la muestra de lodo mediante el análisis físico y químico.
- ✓ Evaluar la aplicación de los lodos mediante el análisis de resultados de la caracterización.
- ✓ Identificar el impacto ambiental que la solución generaría para la evaluación de su posible implementación.

## **1.5. Marco Teórico**

### **1.5.1. Tratamiento de agua potable**

Una PTAP es un sistema utilizado para mejorar las propiedades físicas, químicas y microbiológicas del agua procedente de fuentes que distintas a las utilizadas por una PTAR. El agua cruda es obtenida de fuentes de agua superficial o subterránea. Por lo tanto, las PTAP suelen estar presentes, en el mayor de los casos, en zonas rurales o alejadas de la urbanización. Estas plantas son utilizadas para dotar de agua potable a comunas o comunidades que presenten dificultad para obtener agua de las urbes. Además, también pueden entregar agua potable al sector industrial aledaño para mejorar la producción y ser una ayuda para la sociedad urbana (Arrieta Lozano, 2019).

Las PTAP utilizan procedimientos convencionales para lograr el tratamiento del agua. Entre los procesos que se emplean en una PTAP se encuentran etapas de coagulación,

floculación, sedimentación, filtración, desinfección y ajustes de pH. Al igual que las PTAR, en una PTAP es común encontrar la generación de lodos como residuo de algunos de los procedimientos realizados (Torres Lozada et al., 2023). Sin embargo, debido a las características del agua cruda utilizada para el proceso de tratamiento, los lodos suelen diferir a los generados por una PTAR, tanto en composición como en aplicación.

### **1.5.2. Lodos generados de una PTAP**

Como se explicó previamente, uno de los residuos del proceso de tratamiento de agua potable es el lodo. Los lodos de una PTAP se generan durante la etapa de sedimentación y filtración (Torres Lozada et al., 2022), aunque también es posible encontrar formación de lodos en procesos de membrana y etapas que involucren intercambio iónico. Específicamente, los lodos de una PTAP se forman en el momento de coagulación utilizando sales de aluminio o hierro y ablandamiento del agua por sedimentación. Sin embargo, es común utilizar compuestos poliméricos, ya sean naturales o químicos, como agentes de coagulación para la generación de lodos (Díaz Gómez & Cifuentes Osorio, 2020).

La cantidad de lodo a obtener por parte de los procesos de tratamiento depende, en su mayoría, de la cantidad y composición del agua cruda que se utiliza para el manejo de la planta, del tipo y cantidad de coagulante utilizado y las condiciones que se presentan durante el tratamiento del agua (Díaz Gómez & Cifuentes Osorio, 2020).

### **1.5.3. Características físicas y químicas de los lodos generados**

Principalmente, los lodos que se forman como residuos de un proceso de tratamiento de agua potable son diferentes a los generados por procesos de saneamiento de agua residual. La principal característica es la cantidad de materia orgánica. Los lodos residuales presentan una alta carga orgánica. Sin embargo, los lodos procedentes de una PTAP poseen una baja carga orgánica como consecuente de la poca cantidad de materia orgánica presente en el agua

cruda. Además, suelen presentar, en su mayoría, materia inorgánica como lo son arena, arcillas, finos, etc (Ramirez, 2008).

Por otra parte, los lodos procedentes de PTAP están compuestos, en su mayoría, por óxido o sales de aluminio y hierro, debido al uso de estos agentes durante el proceso de coagulación. Además, la presencia de aluminio se da como consecuencia del uso de compuestos con presencia de este metal para tratar el agua, lo que ocasiona que exista una baja cantidad de materia orgánica en el lodo. Los lodos también están compuestos por una diversa cantidad de óxidos que aparecen como producto de la calidad del agua cruda y los procesos realizados para tratarla. El óxido de sílice,  $\text{SiO}_2$ , forma la mayor parte de la composición química del lodo. Luego se tiene presencia de óxido de aluminio y óxido de hierro por el proceso de coagulación. Por último, también existe la presencia de óxidos de calcio, magnesio, sodio, potasio y fósforo. En menor medida también existe la presencia de metales pesados, la cual depende de la calidad del agua cruda (Diaz Gomez & Cifuentes Osorio, 2020).

#### **1.5.4. Tratamiento de lodos generados en PTAP**

Al igual que los lodos residuales, los lodos que se generan en una PTAP necesitan atravesar un proceso de tratamiento para lograr cumplir objetivos de la planta, ya sea para descargarlos o para aprovecharlos. Este proceso se emplea para reducir el impacto ambiental negativo que se puede generar al momento de descargar estas sustancias hacia zonas verdes o acuáticas.

#### **1.5.5. Mezcla y Espesamiento**

Muchas veces el primer paso para el tratamiento de lodos es espesamiento. Sin embargo, como los lodos de una PTAP se generan en diferentes etapas y cuentan con una composición distinta, es necesario dirigirlos a un tanque de almacenamiento para promover su homogenización y generar un volumen suficiente para manejar el proceso de tratamiento de lodos.

Una vez se tenga un volumen considerable y homogenizado, se procede a realizar la etapa de espesamiento de lodos. Es necesario identificar la cantidad de materia seca que está presente en los lodos, la cual suele variar entre los 3 a 5 g/l. Una vez se identifica la composición de los lodos se procede a realizar el espesamiento empleando decantadores y dos procesos distintos, por gravedad o por flotación. Muchas veces se emplean ambos métodos, comenzando por el espesamiento por gravedad para terminar por el de flotación.

Para el espesamiento por gravedad se utilizan decantadores circulares o rectangulares que permiten el arrastre del lodo para decantar el agua presente en el material. Por otro lado, el espesamiento por flotación se basa en adherir burbujas de aire presurizado al lodo para generar flóculos que se depositan en la superficie, para luego ser retirados por medio de frascetas superficiales (Ramirez, 2008).

#### **1.5.6. Deshidratación**

El proceso de espesamiento se encarga de retirar la mayor parte del agua retenida en los lodos. Sin embargo, al final del proceso todavía existe un porcentaje de agua que necesita ser removido previo a la disposición final. Para ello se emplean métodos de remoción de agua. La evaporación del agua por medio de secado es un método inviable debido al espacio que requiere y a la contaminación que produce. Por lo tanto, se emplean métodos más sofisticados para la separación de las partículas de agua. Entre ellos se encuentra la filtración y la centrifugación. Además, se suelen agregar reactivos como la cal o polielectrolitos para aumentar el rendimiento del procedimiento.

El filtrado es realizado utilizando filtros prensa o filtros banda, en donde se usa la presión y los reactivos mencionados para extraer el agua, haciendo pasar al lodo por placas y bandas. Por parte del centrifugado, se utilizan centrífugas industriales formados por un rotor y un tornillo helicoidal. De igual forma, el proceso de centrifugado necesita del uso de los reactivos previamente mencionados para mejorar el rendimiento (Ramirez, 2008).



### **1.5.7. Disposición final**

Una vez el lodo ha atravesado los procesos de espesamiento y deshidratación, es posible descargarlo al ambiente o utilizarlo para actividades que la planta tenga en desarrollo. De igual forma, antes de descargar el lodo hacia el ambiente es necesario consultar la norma ambiental regional para evitar problemas relacionados con la ley de medio ambiente.

### **1.5.8. Aplicaciones de lodos generados en PTAP**

El aprovechamiento de lodos es una actividad que ha nacido como consecuencia de la regulación de las descargas y el deseo del crecimiento sostenible por parte de las empresas encargadas del tratamiento de agua potable. El lodo puede ser utilizado para diversas aplicaciones, las cuales varían de acuerdo con las características fisicoquímicas, biológicas y mecánicas. El lodo puede ser utilizado como un aditivo del suelo para mejorar los cultivos agrícolas (Pita & Silva, 2023). También puede servir para la producción de biodiesel mediante la extracción de lípidos presentes en éste (Mancipe Arias & Triviño Restrepo, 2018). Por otro lado, el área de construcción es una de las que mejor aprovecha el lodo, dado a que se lo puede utilizar para la formación de ladrillos (Torres et al., 2012); producción de adobe (Torres Lozada et al., 2023); o como un sustituto de materias primas utilizadas en el área de construcción (Rodríguez, 2018).

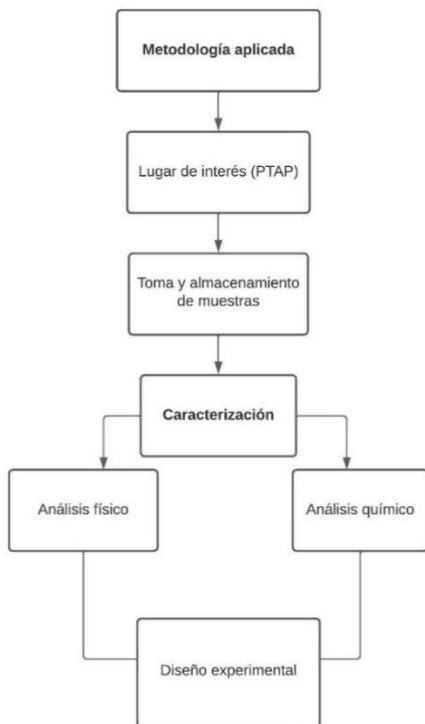
## Capítulo 2

## 2.1. Metodología aplicada

Con la finalidad de encontrar una solución a la problemática identificada en el Capítulo 1 se estableció la metodología del proyecto, la cual consistió en la identificación del área, toma de muestras, caracterización del lodo y diseño experimental. Para resumir la información, se presenta un diagrama en orden jerárquico en la Figura 2.1.

**Figura 2.1**

Metodología aplicada



## 2.2. Lugar de interés

El sitio de donde se obtuvieron las muestras de lodos es la PTAP ubicada en la comuna San Juan (FMV5+QP3, San Juan). Esta planta opera con agua cruda procedente de El Embalse, el cual es un canal de riego natural (Interagua, 2019). El agua cruda es bombeada hacia la planta, en donde se pasa por un tamiz para la remoción de sólidos suspendidos.

## Figura 2.2

### *Remoción de partículas sólidas*



Posteriormente, el agua es tratada con policloruro de aluminio, PAC, el cual es una sustancia utilizada en las plantas potabilizadoras para coagular las partículas coloidales presentes en el agua. Después de agregar el PAC se añade hipoclorito de sodio al 10% para mejorar el proceso de potabilización. Al finalizar esta etapa el agua es dirigida a un sistema de ultrafiltración para mejorar la separación de partículas suspendidas.

Para finalizar el proceso el agua pasa a una clarificadora para ser dividida en tres sectores distintos, en donde se evalúa el impacto de ciertos compuestos para la generación de lodo. Estos sectores son denominados “ácidos” y “básicos”, siendo el “ácido” lodo combinado con ácido muriático; el básico por otra parte, se combina con hidróxido de sodio (soda cáustica). El tercero corresponde a otro proceso, en donde el agua fluye hacia un tornillo sin fin para agregarle un floculante polimérico que logre la separación de la materia orgánica y se genere el lodo. El lodo fluye de manera ascendente por una tubería y luego se deposita en un tanque IBC de 1000 litros que será retirado por la empresa.

## Figura 2.3

### Clarificador



### 2.3. Toma y almacenamiento de muestras de lodo

Actualmente, la empresa cuenta con la limitante de que el equipo que se encarga de la generación del lodo se encuentra averiado. Cuando la operación era regular, la planta podía generar de 5 a 10 toneladas de lodos diarias. El lodo generado iba a parar a un tanque de 1000 litros de capacidad denominado tanque IBC. Los tanques IBC, cuyas siglas en inglés significan “Intermediate Bulk Container”, son contenedores que permiten almacenar líquidos, semisólidos y pastas hasta un volumen de 1000 litros (TRANPAK, 2010). Estos tanques guardaban 1 tonelada de lodo, por lo que se iban reemplazando a medida que rebosaban. La última producción por parte de la planta fue retirada por una empresa externa en convenio con el cliente. Por lo tanto, se tuvo que idear una solución para lograr el muestreo del lodo.

## Figura 2.4

*Unidad de tratamiento de lodos*



## Figura 2.5

*Depósito de lodos*



A pesar de las limitaciones, la empresa logró generar lodo procedente del agua presente en la clarificadora. Este lodo fue depositado en el suelo aledaño para ser muestreado posteriormente. El lodo estuvo ubicado en el suelo por dos días. Es por ello por lo que adquirió partículas sólidas como gravas, ramas y hojas. El lodo no presentaba olor y tenía una textura húmeda y arcillosa.

Por lo tanto, se procedió a realizar el muestreo del lodo. El procedimiento para muestrear el lodo depositado fue realizado a partir de lo que dicta la norma NTE INEN-ISO 5667-13: 2011. Para ello, se utilizaron bolsas herméticas para guardarlo. Se raspó el lodo, el cual estaba pegado en el suelo, con la ayuda de una pala y se lo manipuló con guantes de goma para guardarlo dentro de la bolsa. El lodo fue guardado en bolsas herméticas, las cuales fueron almacenadas en una hielera por protección. (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011).

El almacenamiento del lodo fue realizado en base a la norma NTE INEN-ISO 5667-15:2009, la cual dicta que las muestras de lodo sean almacenadas en temperaturas que rondan los 4 °C. Para mantener estas condiciones, se transportaron las muestras desde San Juan hacia la ESPOL, y fueron posteriormente almacenadas en un equipo de refrigeración ubicado en el Laboratorio de Procesamiento de Aguas y Sedimentos (PAS) (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2014).

## **2.4. Caracterización del lodo**

Otro paso importante para llegar a la parte del diseño experimental es caracterizar el lodo obtenido de la planta, dado a que es necesario clasificarlo de acuerdo con su composición y tipo de partículas. La caracterización del lodo constó de dos etapas: el análisis químico y el análisis físico.

### **2.4.1. Análisis químico**

El análisis químico fue realizado para conocer la composición del lodo y verificar si es apto para diversas aplicaciones. La Tabla 2.1 posee información acerca de los parámetros obtenidos y el método utilizado. El análisis químico fue realizado en colaboración con el Laboratorio de Suelos y Nutrición Vegetal ubicado en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción.

**Tabla 2.1***Parámetros para el análisis químico del lodo*

<b>Parámetro</b>	<b>Método</b>
pH	agua:suelo (5:1)
Conductividad eléctrica	agua:suelo (5:1)
Salinidad	agua:suelo (5:1)
Determinación de macro, microelementos	Muestra pulverizada a 850 µm y leída por Fluorescencia de Rayos X (XRF, ZSpec- EMax)
Determinación de metales pesados	

Los resultados fueron analizados utilizando la información que comparte el Acuerdo N° 28 (MAE, 2015). Se compararon los resultados obtenidos con las especificaciones del Acuerdo, con el fin de determinar si es viable el uso de la muestra de lodo para la agricultura.

#### **2.4.2. Análisis físico**

Se realizó un análisis físico para clasificar al lodo muestreado de acuerdo con el tipo de materia inorgánica que posee (arena, limos, finos). Para ello se realizaron una serie de ensayos descritos en la Tabla 2.2. Estos ensayos fueron realizados en colaboración con el Laboratorio de Geotecnia y Construcción de la Facultad de Ciencias de la Tierra, FICT.

**Tabla 2.2***Ensayos realizados para el análisis físico del lodo*

<b>Ensayo</b>	<b>Método/Norma</b>
Contenido de humedad	ASTM D2216
Densidad	NTE INEN 856



Granulometría	ASTM D – 422
Lavado sobre el tamiz n° 200	ASTM D – 1140
Límites de Atterberg	ASTM D – 4318

#### 2.4.2.1. Secado de la muestra

Para comenzar el procedimiento fue necesario secar las muestras de lodo húmedo. El secado del lodo comenzó colocando la muestra en una bandeja, procurando que ocupe todo el espacio posible. La bandeja fue colocada en una estufa a 60 °C por mínimo dos días para lograr la remoción completa del agua.

#### Figura 2.6

*Muestra de lodo húmedo antes del secado*



Después de los dos días, se retiró la bandeja y se colocó en un mesón hasta que alcanzara la temperatura ambiente. Se pudo notar que se perdió gran cantidad de muestra y que quedaba lodo en estado sólido.

## Figura 2.7

*Muestra de lodo seca después de dos días*



### 2.4.2.2. Contenido de humedad

Además del secado, se extrajo una pequeña muestra del lodo húmedo para determinar el contenido de humedad. En este caso, se colocó esa cantidad en un recipiente aparte con masa conocida. Se pesó el recipiente con la masa húmeda y se anotó la masa. El secado se dio a  $105 \pm 5$  °C por dos días. Esta temperatura está regulada por la norma a la cual se referenció. Después de los dos días se retiró el recipiente del horno y se esperó hasta que esté a temperatura ambiente. Finalmente, se midió la masa del recipiente con la muestra seca y se registró el peso. Para obtener el contenido de humedad se realiza una diferencia de masa y se obtiene el valor en porcentaje (ASTM, 2000).

### 2.4.2.3. Densidad

Para determinar la densidad del lodo se utilizó la muestra húmeda y se realizó el procedimiento descrito en la norma colocada en la Tabla 2. Para ello, se necesitó de un recipiente cilíndrico con volumen conocido. Antes de comenzar con el procedimiento, el cual

consistió en llenar el recipiente con la muestra por completo hasta desbordar, se midió la masa del recipiente vacío y se registró ese valor. Con una placa de vidrio se enrasó y se retiró el exceso. Una vez enrasada se pesó y se anotó la masa del recipiente con muestra. La densidad se obtuvo al restar la masa del recipiente más muestra con la del recipiente vacío y se dividió para el volumen conocido del recipiente, obteniendo el valor en  $\text{g/cm}^3$  (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2006).

### **Figura 2.8**

*Determinación de densidad del lodo*



#### **2.4.2.4. Granulometría**

El lodo seco fue triturado para obtener gravas, arenas y finos. Después del triturado se procedió a realizar el proceso de granulometría, el cual contó con dos etapas: tamizado y lavado sobre el tamiz n° 200.

## Figura 2.9

### *Lodo seco triturado*



El tamizado consistió en pasar la muestra de lodo triturada por una serie de tamices. Los tamices utilizados fueron el n° 4, 10, 20, 40, 100 y 200. Se los colocó en forma de torre siguiendo el orden señalado. La muestra se colocó en el tamiz n°4 y fue llevada a un equipo de agitación. Se agitó por 4 minutos. Después del agitado se retiraron los tamices y se registró la masa retenida en cada uno, junto con el fondo.

Se tabuló la apertura de cada tamiz junto con su masa retenida y se calculó el porcentaje retenido, retenido acumulado y pasante acumulado. Por último, se generó una gráfica denominada curva granulométrica, cuyo eje de las abscisas contenía las aberturas de los tamices en escala logarítmica; mientras que el eje de las ordenadas el porcentaje pasante acumulado en escala aritmética. La curva mostró en que aberturas se retenía la mayor cantidad de muestra y cuanto atravesaba el tamiz n° 200. Esto permitió clasificar el lodo de acuerdo a si es arenoso o fino (Laboratorio de Geotecnia y Construcción, 2020c).

## Figura 2.10

### *Tamizado*



El material que quedó retenido en el tamiz n° 200 y en el fondo fue lavado siguiendo el procedimiento dictado por la norma ASTM D – 1140. Se humedeció el material y se lo colocó en el tamiz n° 200. Luego se lavó el tamiz con material con abundante agua hasta observar que el agua sale limpia por debajo del tamiz. Una vez se lavó toda la muestra se la regresó a un recipiente seco y se secó por 24 horas a una temperatura de  $100 \pm 5$  °C. Se anotó la masa seca después del lavado (Laboratorio de Geotecnia y Construcción, 2020b).

#### **2.4.2.5. Límites de Atterberg**

El ensayo de límites de Atterberg es un procedimiento que permite clasificar el suelo de acuerdo con el tipo de partículas que posee. Se realizó este ensayo en el lodo para obtener un resultado aún más exacto con respecto al tipo de material que posee el lodo. Se siguió el procedimiento dictado por la norma ASTM D – 4318. Se determinaron dos tipos de límites: el límite líquido y plástico. Se comenzó con el triturado de la muestra de lodo seca para luego pasarla por el tamiz n° 40 hasta obtener 100 gramos de muestra pasante.

## Figura 2.11

*Muestra pesada y humidificada*



Para el límite líquido se mojó la muestra hasta lograr que se homogenizara. La muestra húmeda se colocó sobre una copa de Casagrande y se realizó una abertura desde el punto más alto hasta el más bajo de la copa. Se procedió a utilizar el equipo moviendo una palanca la cual genera golpes en la copa. Se golpeó hasta lograr que las dos mitades se unieran. Se anotó el número de golpes.

## Figura 2.12

*Determinación de límite líquido*



Para el límite plástico se tomó una pequeña cantidad de la muestra de lodo humidificada y se redujo su humedad. Después se tomó una pequeña parte de la muestra con humedad reducida para darle una forma elipsoidal. Este poco se colocó sobre una placa de vidrio y se comenzó a dar forma de rodillo hasta alcanzar un diámetro de aproximadamente 3.2 mm.

Después se cortaba en seis partes y se medía el porcentaje de humedad por medio de secado en estufa. (Laboratorio de Geotecnia y Construcción, 2020a).

## **2.5. Diseño experimental**

Realizada la caracterización del lodo y después de haber identificado la composición y el tipo de materia inorgánica que la muestra obtenida poseía se procedió a definir una aplicación para el lodo. Para esta investigación, se analizó el uso potencial del lodo para agricultura y construcción.

### **2.5.1. Lodo como aditivo para agricultura**

Para esta parte se necesitaba que el lodo sirviera como aditivo para diversas plantas y observar su crecimiento comparándolo con un abono regular. Sin embargo, no se realizó este procedimiento debido a la limitante discutida previamente, por lo que no se destinó la muestra de lodo a esta etapa de la investigación. Además, el cliente afirmó que el lodo no era apto para cultivos. Sin embargo, se decidió demostrar por medio del análisis químico si el lodo es apto o no para la agricultura.

### **2.5.2. Lodo para material de construcción**

En base a los resultados obtenidos del análisis físico del lodo se decidió enfocar la solución a la aplicación de lodos en el ámbito de construcciones. En base a la granulometría y a los límites de Atterberg, el lodo fue clasificado como arenoso. Por lo tanto, se decidió evaluar su uso para generar bloques de cemento.

La norma NTE INEN 488 fue consultada para la evaluación del lodo, por lo que se eligió ese procedimiento para determinar la resistencia a la compresión de mezclas de mortero variando su composición con lodo en un 5, 15 y 25%, incluyendo una mezcla sin lodo.

El procedimiento realizado fue una variación al de la norma debido a las limitaciones de muestra y cantidad de moldes disponibles dentro del laboratorio. Se realizó la mezcla del mortero en base a la formación de 3 cubos por cada una de las mezclas propuestas. Asimismo, se eligió el tiempo de ruptura de los cubos a 7 y 28 días debido al poco número de cubos y para observar el comportamiento del lodo junto con el cemento.

Los morteros son un tipo de material de mampostería fabricados únicamente por cemento, arena y agua. El cemento que se utiliza debe ser del tipo hidráulico o Portland. Se utilizó arena que cumpliera con lo establecido por la norma. Los moldes utilizados fueron cúbicos con 50 mm o 2 pulgadas de arista (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2012).

El procedimiento comenzó con la formación del mortero. La mezcla estándar es que por cada parte de cemento se agrega 2.75 de arena y 0.485 de agua. Se agregó en la mezcladora el agua y el cemento. La arena se añadió a medida que se iban mezclando los otros dos materiales.



**Figura 2.13**

*Mezcladora*



Una vez se formó el mortero fue necesario medir el flujo de la mezcla. Para ello se empleó el método establecido en la norma NTE INEN 2502. Se colocó la mezcla sobre la mesa de flujo utilizando el molde de flujo y se procedió a realizar 25 golpes en 15 segundos. Una vez se realizaron los golpes se midió el diámetro del mortero en las cuatro líneas de la mesa de flujo y se calculó el flujo en porcentaje (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2009a).

**Figura 2.14**

*Mesa de flujo*



Después de la determinación del flujo se colocó el mortero sobre los moldes cúbicos. Antes de eso, el molde se cubrió de una capa de aceite para evitar que el mortero se quede pegado. Se agregó el mortero en tres capas distintas y con ayuda de apisonador se dieron 32 golpes para acomodar la mezcla. El cubo estaba listo una vez que se enrase.

### **Figura 2.15**

*Moldes para cubos de mortero*



Después de 24 horas de llenar los moldes, se retiraron los cubos y se colocaron en una piscina de cal para ser curados. La determinación de la resistencia a la compresión se realizó a los 7 y 28 días. Al séptimo día se utilizó un cubo y al vigésimo octavo dos. La resistencia fue medida utilizando el equipo de ensayo dentro del laboratorio, en donde se midió la presión hasta que el bloque se rompiera. (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2009b).

**Figura 2.16**

*Máquina de ensayo*

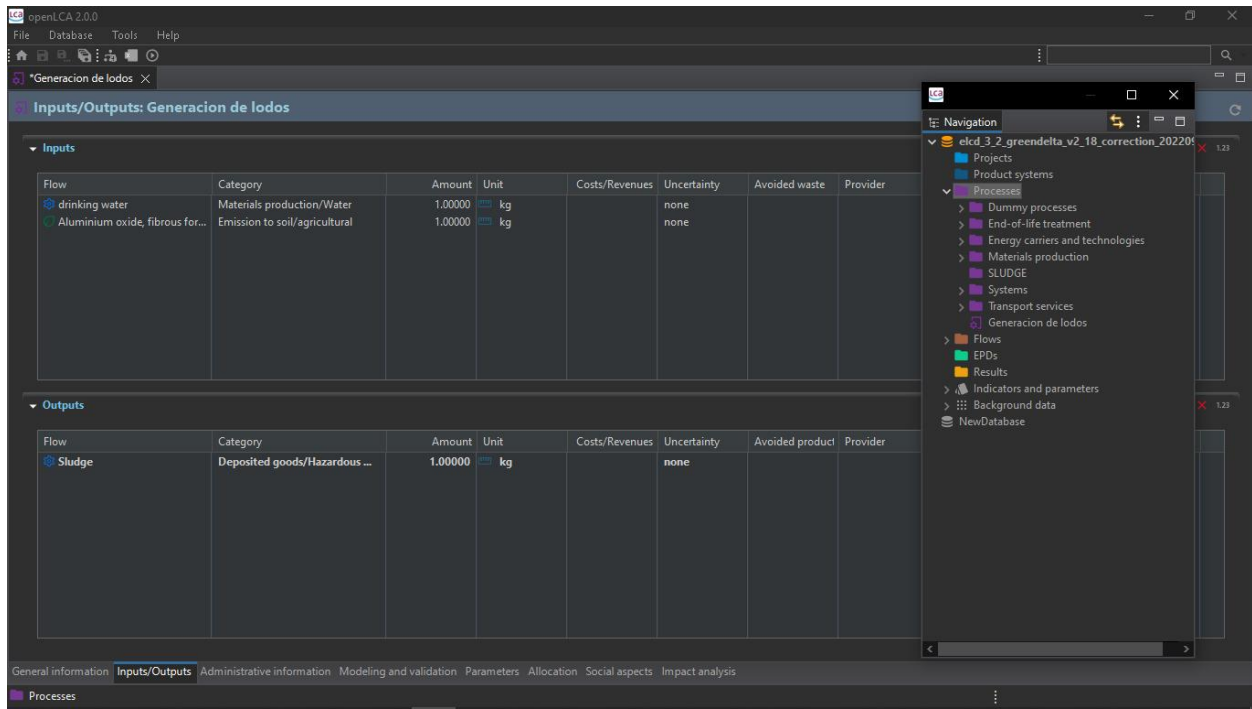


### **2.5.3. Análisis de impacto ambiental**

Luego de que se diseñara la solución para el aprovechamiento del lodo generado en la planta se evaluó el impacto ambiental que se presentaría. Para simular el escenario en donde se genera el lodo se empleó el software de uso libre llamado openLCA. Este software permitió obtener resultados aproximados a base de simulaciones acerca de la huella de carbono que se genera en la planta. Se simuló el proceso de la planta descrito al inicio del capítulo utilizando valores de flujo obtenidos de la bibliografía y de las visitas realizadas. Utilizando los resultados se planteó como impacta la generación de lodos y qué cambios ocurrirán al implementar la solución propuesta. Por otro lado, se evaluó el potencial de la solución en torno a la sostenibilidad, identificando cuanto impacto ambiental se produciría y como se mejoraría la relación entre la empresa y la sociedad.

**Figura 2.17**

*Simulación hecha en OpenLCA*



## Capítulo 3

### 3.1. Resultados obtenidos de la caracterización

#### 3.1.1. Análisis químico

Una vez realizado el análisis químico de la muestra de lodo se obtuvieron los siguientes resultados:

**Tabla 3.1**

*Características fisicoquímicas del lodo*

<b>Nombre</b>	<b>pH</b>	<b>EC</b>	<b>Salinidad</b>
<b>Muestra</b>		<b>mS/cm</b>	<b>psu</b>
Lodo	7.6	1.36	0.69

**Tabla 3.2**

*Macroelementos del lodo*

<b>Nombre</b>	<b>Ca</b>	<b>K</b>	<b>Fe</b>
<b>Muestra</b>	<b>%</b>	<b>%</b>	<b>%</b>
Lodo	3.98	0.57	3.60

**Tabla 3.3**

*Microelementos del lodo*

<b>Nombre</b>	<b>Cu</b>	<b>Mn</b>	<b>Ni</b>	<b>Zn</b>
<b>Muestra</b>	<b>mg/kg</b>	<b>mg/kg</b>	<b>mg/kg</b>	<b>mg/kg</b>
Lodo	90.68	2166.67	67.74	367.44

**Tabla 3.4***Metales pesados del lodo*

<b>Nombre</b>	<b>As</b>	<b>Cd</b>	<b>Pb</b>	<b>Cr</b>
<b>Muestra</b>	<b>mg/kg</b>	<b>mg/kg</b>	<b>mg/kg</b>	<b>mg/kg</b>
Lodo	24.27	0.28	23.93	180.24

La información detallada en las cuatro tablas indica el estado en el que se encontraba la muestra al momento de ser tomada y llevada a análisis. La Tabla 3.1 detalla que la muestra de lodo poseía un pH neutro, siendo de 7.6. A esto se incluye una conductividad de 1.36 mS/cm y salinidad de 0.69 psu. La proporción de macroelementos de la muestra fue baja, estando por debajo del 5%, de acuerdo con la Tabla 3.2. Con respecto a los microelementos y los metales pesados, su composición dentro de la muestra es considerablemente baja, siendo expresada en miligramos por kilogramo (partes por millón, ppm).

### **3.1.2. Análisis físico**

#### **3.1.2.1. Contenido de humedad**

El procedimiento para obtener el contenido de humedad de la muestra de lodo produjo dos tipos de resultados: uno cualitativo y otro cuantitativo. El resultado cualitativo fue como el lodo se veía al momento de eliminar todo rastro de agua. Por la parte del resultado cuantitativo, la Tabla 3.5 presenta el porcentaje de humedad de la muestra de lodo seca, obteniendo un resultado de 82.35%. Se puede entender que, por cada 100 g de muestra, 82.35 g corresponden a agua, mientras el resto es lodo. Es por ello por lo que la cantidad de muestra se reducía drásticamente al final del secado.

**Tabla 3.5***Contenido de humedad del lodo*

<b>Contenido de Humedad</b>	
<b>Masa Recipiente (g)</b>	100.7
<b>Masa Recipiente + Muestra Húmeda (g)</b>	207.8
<b>Masa Recipiente + Muestra Seca (g)</b>	119.6
<b>Masa de Agua (g)</b>	88.2
<b>Masa de Muestra Seca (g)</b>	18.9
<b>Contenido de Humedad (%)</b>	82.35%

**3.1.2.2. Densidad**

La Tabla 3.6 presenta los resultados en torno a la determinación de la densidad (o peso volumétrico) de la muestra de lodo húmeda. Se utilizó el lodo húmedo por motivo de la cantidad de muestra y porque el lodo suele producirse en este estado en la PTAP. Se obtuvo un valor de  $1.09 \text{ g/cm}^3$ , lo que indica que la muestra de lodo obtenida era más densa que el agua. Este hecho se vio ejemplificado al observar lodo proveniente de la planta ubicados en baldes de agua, en donde se notó que el lodo siempre se encontraba depositado en el fondo del balde.

**Tabla 3.6***Peso volumétrico de la muestra de lodo*

<b>Peso Volumétrico</b>	
<b>Masa del Recipiente (g)</b>	379.6
<b>Volumen del Recipiente (cm<sup>3</sup>)</b>	951
<b>Masa del Recipiente + Muestra (g)</b>	1419.27



### 3.1.2.3. Granulometría

La granulometría fue aplicada con el fin de clasificar a la muestra de lodo seca de acuerdo con sus partículas. El capítulo 2 se encargó de describir a detalle el procedimiento para lograr la granulometría. Se comenzó con el tamizado, en donde se recogió y se midió la masa retenida en cada tamiz utilizado. A su vez, se reportó la abertura de cada tamiz para luego generar una tabla y una gráfica.

En primera instancia, se generó una tabla con las masas retenidas y las aberturas de los tamices, incluyendo la masa total, la cual es la suma de cada una de las masas retenidas. A continuación, se amplió la tabla con valores de % retenido, % retenido acumulado y % pasante acumulado, con el fin de evaluar en que tamices se retuvo la mayor cantidad de muestra y como fue la tendencia al pasar cada tamiz.

**Tabla 3.7**

*Tabla Granulométrica*

<b>Tamiz</b>	<b>Abertura (mm)</b>	<b>Masa retenida (g)</b>	<b>%Retenido</b>	<b>%Retenido acumulado</b>	<b>%Pasante acumulado</b>
4	4.75	3.6	1.97%	1.97%	98.03%
10	2	34.4	18.85%	20.82%	79.18%
20	0.85	66.3	36.33%	57.15%	42.85%
40	0.425	39.9	21.86%	79.01%	20.99%
100	0.15	21.1	11.56%	90.58%	9.42%
200	0.075	7.5	4.11%	94.68%	5.32%

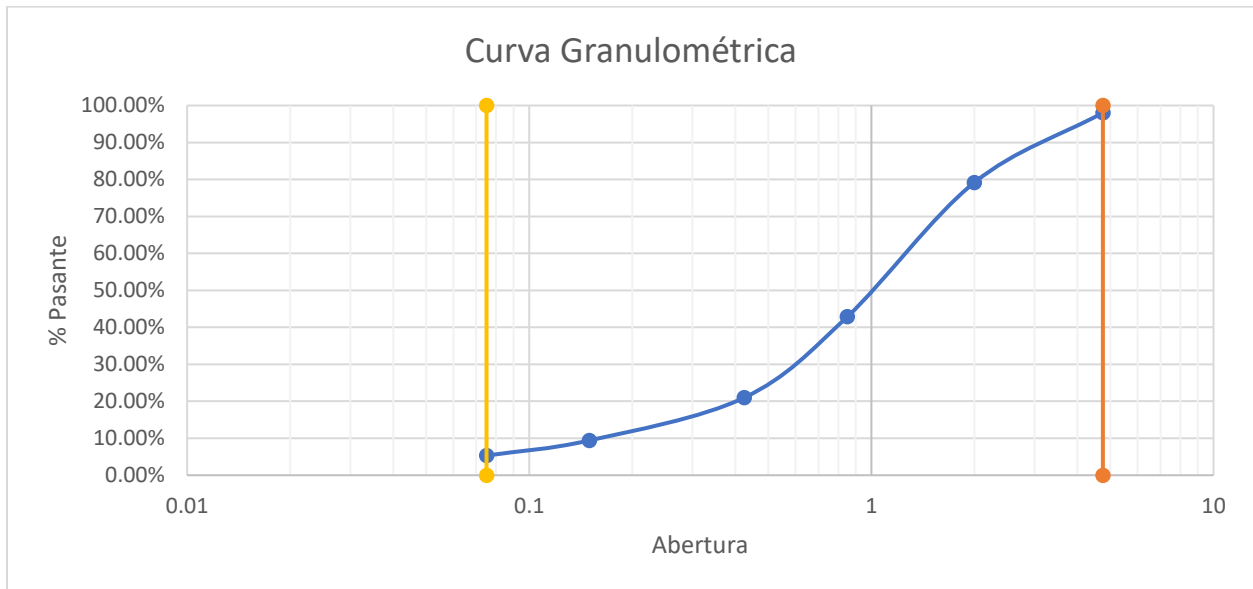
<b>Fondo</b>	-	9.7	5.32%	100.00%	-
<b>TOTAL</b>	-	182.5	100.00%	-	-

La Tabla 3.7 muestra los resultados de lo descrito previamente. Se observó que la mayor cantidad de muestra retenida se encontraba en los tamices 20 y 40, de acuerdo con lo reportado en la masa y el porcentaje retenidos. A su vez, siguiendo con el porcentaje retenido acumulado, hasta el tamiz 100 se retuvo el 90.58% de la cantidad total utilizada para realizar la granulometría. Esto indica que muy poco contenido logro retenerse en el tamiz 200 y el fondo. Por otra parte, el porcentaje pasante acumulado muestra como hasta el tamiz 40 logró más del 10% de la muestra. Sin embargo, al llegar a los tamices 100 y 200 pasaba cada vez menos muestra.

Por último, se generó una gráfica granulométrica con los datos de abertura de los tamices y el porcentaje de pasante acumulado. La Figura 3.1 muestra la curva granulométrica, elaborada en un gráfico semi-log. Esta curva muestra como es la tendencia de la muestra a medida que va pasando los tamices, y como la mayoría de la muestra se encuentra entre el sistema de tamices utilizados, pues muy poca cantidad se encuentra fuera del rango, lo que indica que muy poca cantidad llegó hasta el fondo. Con estos resultados se infirió el tipo de partículas presentes en la muestra de lodo.

**Figura 3.1**

*Curva Granulométrica*



#### **3.1.2.4. Límites de Atterberg**

Los límites de Atterberg fue el último procedimiento realizado por parte del análisis físico y permitió clasificar al lodo según su tipo de partículas. Como se explicó en el Capítulo 2, este procedimiento presentó modificaciones a comparación de lo dictado por la norma. El primer límite fue el líquido, en donde se colocó la muestra húmeda en la cuchara de Casagrande y se procedió a golpear. Sin embargo, los golpes resultantes hasta que la muestra quede junta fueron menores a 15. Esto significó que no se pudo obtener un valor para este límite.

El límite plástico también presentó resultados diferentes a los que se esperaba, según la norma. Al intentar formar los rodillos se rompieron en un diámetro menor al normalizado. Por lo tanto, tampoco se pudo obtener un valor para este límite. Al no obtener un valor para los límites, el lodo solo pudo ser clasificado de una forma.

### **3.1.2.5. Clasificación del lodo**

Para clasificar el lodo se necesitó evaluarlo como una muestra de suelo, siguiendo las especificaciones que se tiene para analizar y clasificar el suelo dependiendo del tipo de partículas. Se comenzó identificando los resultados de la granulometría, siguiendo el sistema de clasificación AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials). Este sistema indica que tipo de partículas presenta una muestra de suelo de acuerdo con ciertos criterios. El criterio que está ligado a la muestra de lodo analizada es el que explica sobre el tamaño del grano y la plasticidad.

La muestra de lodo analizada cumple con el criterio arena, el cual indica que la muestra pasa el tamiz 10 y se retiene en el 200. Además, en la granulometría solo un 5% de la muestra logró pasar el tamiz 200, indicando que la muestra poseía muy poco material fino. Por lo tanto, con la granulometría se demostró que el lodo muestreado es de tipo arenoso.

Los límites de Atterberg también influyeron en la decisión previa. Como no se obtuvieron valores para el límite líquido y plástico se determinó que la muestra de lodo es no plástica. El sistema de clasificación AASHTO también explica el caso que se tenga una muestra de suelo no plástica. La única especificación con la que cumple la muestra no plástica es la de suelo arenoso. Por lo tanto, los límites de Atterberg determinaron que el lodo muestreado corresponde a un suelo arenoso (Pineda, 2008).

## **3.2. Diseño Experimental**

### **3.2.1. Análisis del lodo para la agricultura**

Con los resultados obtenidos por parte del análisis químico de la muestra del lodo se puede confirmar o descartar su posible uso para la agricultura. En la investigación previa se determinó que el lodo proveniente del lugar de interés posee una baja carga de nutrientes, por lo que su aplicación como aditivo de suelos es inviable.

Otro aspecto que influye en la decisión es el tipo de lodo proveniente de la PTAP. Por lo general, este lodo es considerado como lodo aluminoso, debido a que se utiliza óxidos de aluminio para tratar el agua. El aluminio es un agente tóxico para las plantas. En concentraciones mayores a 5 ppm puede interferir en el crecimiento de las raíces, además de inhibir el proceso enzimático encargado de la reducción de azúcares en la pared celular (Sela, 2022).

Por parte de los resultados del análisis químico, nuevamente se trató al lodo como una muestra de suelo para fines comparativos. Se compararon los resultados obtenidos con los criterios de calidad del suelo definidos en el Anexo 2 del Acuerdo Ministerial N° 28 del Ministerio de Ambiente del Ecuador. La Tabla 3.8 muestra los valores establecidos por la norma sobre los parámetros determinados a la muestra de lodo (MAE, 2015).

**Tabla 3.8**

*Criterios de calidad del suelo*

<b>Criterios de Calidad del Suelo</b>				
<b>Parámetro</b>	<b>Unidades</b>	<b>Especificación</b>	<b>Valor</b>	<b>Estado</b>
Conductividad	uS/cm	200	1360	No cumple
pH	-	6 – 8	7.6	Cumple
Cobre	mg/kg	25	90.68	No cumple
Níquel	mg/kg	19	67.74	No cumple
Zinc	mg/kg	60	367.44	No cumple
Arsénico	mg/kg	12	24.27	No cumple
Cadmio	mg/kg	0.5	0.28	Cumple
Plomo	mg/kg	19	23.93	No cumple
Cromo	mg/kg	54	180.24	No cumple

Si se comparan los resultados obtenidos tabulados al principio del capítulo se podrá observar que los valores obtenidos superan a los de la Tabla 3.8, en especial con la concentración de los micronutrientes y metales pesados. Con esta comparación se puede determinar que la muestra de lodo no es apta para la agricultura, debido a que no cumple con las especificaciones impuestas por la norma ecuatoriana.

### 3.2.2. Determinación de la resistencia a la compresión de morteros con lodo

Habiendo confirmado que la muestra de lodo es arenosa, se realizó el procedimiento descrito en el Capítulo 2. Primero se comenzó con la formación de la mezcla de mortero. Lo que se pudo observar es que, a medida que se aumentaba la concentración de lodo en la mezcla, se demandaba más cantidad de agua para obtener una mezcla consistente, por lo que se tuvo que variar la cantidad de agua. La Tabla 3.9 muestra la cantidad de cemento, arena, agua y lodo utilizado para cada muestra, incluyendo el blanco.

**Tabla 3.9**

*Composición de las mezclas de mortero*

<b>Dosificación</b>	<b>Agua</b>	<b>Cemento</b>	<b>Arena</b>	<b>Lodo</b>	<b># Cubos</b>
5%	161.7 g	250 g	653.12 g	34.38 g	3
15%	171.3 g	250 g	584.4 g	103.1 g	3
25 %	201.3 g	250 g	515.6 g	171.9 g	3
Blanco	141.3 g	250 g	687.5 g	-	3

El procedimiento también indica que se debe determinar la fluidez de mezclas realizadas. Por lo tanto, se realizó el procedimiento descrito en el Capítulo 2 para determinar la fluidez de cada una de las mezclas, obteniendo los resultados detallados en la Tabla 3.10. Entre estos resultados, se notó como la composición de 15% de lodo poseía el menor diámetro

promedio a comparación de las otras mezclas, indicando que la fluidez es la menor de las cuatro mezclas.

**Tabla 3.10**

*Diámetros determinados en la mesa de flujo para cada mezcla*

<b>Dosificación</b>	<b>5%</b>	<b>15%</b>	<b>25%</b>	<b>Blanco</b>
<b>Diámetro</b>				
<b>Diámetro 1 (cm)</b>	16	11	14	17
<b>Diámetro 2 (cm)</b>	15	10	13	15
<b>Diámetro 3 (cm)</b>	16	11	12	18
<b>Diámetro 4 (cm)</b>	14	11	12	18
<b>PROMEDIO (cm)</b>	15.25	10.75	12.75	17

Una vez formados los tres cubos para cada mezcla de mortero se los dejó en un baño de cal para que sean curados. El proceso de curación se realizó para lograr que los bloques adquieran la resistencia deseada antes de comenzar con el proceso de medición de resistencia a la compresión. La resistencia de los bloques fue medida a los 7 y 28 días contados desde su formación, por lo que todo ese tiempo los bloques se encontraban curándose en un baño de cal ubicado en el laboratorio.

### Figura 3.2

#### *Baño de cal*



Los bloques de mortero cambiaron a medida que pasaba el tiempo, dado que el cemento comenzaba a reaccionar con los compuestos presentes en el lodo, en especial con el aluminio. Al formarse, los bloques adquirirían un color más negro a medida que se aumentaba la concentración de lodo en la mezcla. Pasado los 7 días, la apariencia de los bloques se mantenía, con pequeñas diferencias a comparación con el momento antes del curado. Sin embargo, a los 28 días la apariencia de los bloques cambió, en especial con los bloques de mezcla de 25% de lodo, dado a que perdieron un poco el tono negro y adquirieron un color blanco. La Figura 3.3 muestra a los cubos de 5, 15 y 25% lodo, y el blanco después de los 28 días, respectivamente. Se notó que los que tenían mayor concentración de lodo adquirirían una tonalidad blanca que rodeaba varias caras de los cubos.

### Figura 3.3

#### *Bloques después de 28 días*





El período de 28 días permitió que se analice como afecta el lodo al cemento. Como se describió previamente, el lodo posee un contenido de aluminio considerable, por lo que ese aluminio reacción con el cemento. El producto de la reacción ocasiona la formación de grietas y rupturas en el bloque de mortero. Se reportó que los cubos poseían pequeñas grietas al ser retirados de la cámara de curado. Sin embargo, esta característica también se reportaba en los bloques denominados como blanco. Por lo tanto, el aluminio no afectó a los cubos de mortero de manera significativa, solo generó pequeños orificios que no interfirieron en la determinación de la resistencia a la compresión (Barberi et al., 2015).

Los cubos fueron rotos en la máquina de ensayo a los 7 y 28 días contados desde su formación. Antes de comenzar con el ensayo se midieron las aristas de los cubos para encontrar el área transversal real, debido a que, durante el proceso de elaboración y retiro de los moldes, se presentaron errores provocados por la compactación.

**Tabla 3.11**

*Resultados de la Resistencia a la Compresión a los 7 días*

<b>Resultados Resistencia a la Compresión a los 7 días</b>					
<b>Nombre</b>	<b>Max Fuerza (N)</b>	<b>Max Deformación (%)</b>	<b>Compresión (MPa)</b>	<b>Max Compresión (MPa)</b>	<b>Max Desplazamiento (mm)</b>
5%	5978.03	5.93325	2.56843	2.56843	2.96663
15%	3937.72	4.4495	1.65799	1.65799	2.22475
25%	1841.55	3.933	0.76699	0.76699	1.9665
BLANCO	13759.6	3.39075	5.6764	5.67641	1.69538

**Tabla 3.12**

*Resultados de la Resistencia a la Compresión a los 28 días*

<b>Resultados Resistencia a la Compresión a los 28 días</b>					
---	--	--	--	--	--

Nombre	Max Fuerza (N)	Max Deformación (%)	Compresión (MPa)	Max Compresión (MPa)	Max Desplazamiento (mm)
5%	15245.8	3.807	5.74879	5.74879	1.9035
5%	15802.5	4.43425	6.07555	6.07555	2.21713
15%	4693.51	3.471	1.8045	1.8045	1.7355
15%	5004.72	4.197	1.85086	1.85086	2.0985
25%	1883.9	4.4315	0.7243	0.7243	2.21575
25%	1589.3	4.46125	0.59928	0.59928	2.23063
BLANCO	24373.6	4.4475	9.19065	9.19065	2.22375
BLANCO	19992.8	4.1035	7.84031	7.84031	2.05175

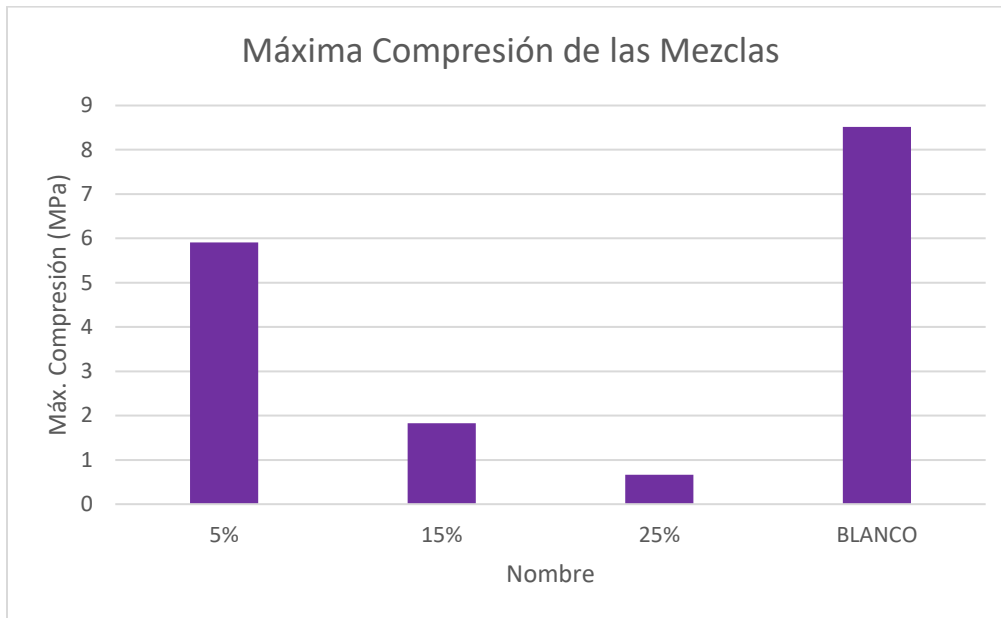
**Tabla 3.13**

*Promedio de los resultados a los 28 días*

<b>Resultados Resistencia a la Compresión a los 28 días (Promedio)</b>					
Nombre	Max Fuerza (N)	Max Deformación (%)	Compresión (MPa)	Max Compresión (MPa)	Max Desplazamiento (mm)
5%	15524.15	4.120625	5.91217	5.91217	2.060315
15%	4849.115	3.834	1.82768	1.82768	1.917
25%	1736.6	4.446375	0.66179	0.66179	2.22319
BLANCO	22183.2	4.2755	8.51548	8.51548	2.13775

**Figura 3.4**

*Diagrama de barras de la máxima compresión de los bloques a los 28 días*



Las Tablas 3.11, 3.12 y 3.13 muestran los resultados obtenidos de la medición de la resistencia a la compresión de los bloques a los 7 y 28 días desde su formación. Estas tablas cuentan con la máxima fuerza a la que fueron sometidos los bloques. Además, se cuenta con los resultados de la máxima compresión permitida por los bloques de cada mezcla.

Primeramente, se evidenció la misma tendencia para los bloques ensayados a los 7 y a los 28 días. Los bloques que sirvieron como “BLANCOS” fueron a los que más fuerza se les aplicó hasta alcanzar el fraccionamiento. Por lo tanto, se compararon los resultados obtenidos de las otras mezclas para establecer la ideal.

A los 7 días, la mezcla que mayor compresión máxima presentó fue la de 5% de lodo, llegando a un valor de 2.57 MPa, aproximadamente. Le sigue la mezcla de 15% y, por último, la mezcla de 25%. Esta tendencia se repitió en la prueba a los 28 días. Para esta prueba se utilizaron dos bloques de cada mezcla para el ensayo, por lo que se obtuvo un promedio, tal como lo especifica la Tabla 3.13. En este caso, nuevamente la mezcla de 5% resultó la de

mayor compresión máxima. El valor de la compresión máxima aumentó a comparación con el ensayo a los 7 días, inclusive.

La Figura 3.4 resume de manera gráfica los resultados promedio de la compresión de las mezclas a los 28 días. En este diagrama se puede evidenciar que la mezcla de 5% lodo resistió mucho más que las otras dos mezclas, pero no logró llegar al nivel de compresión de la mezcla sin lodo. Siguiendo lo establecido por la norma NTE INEN 3066 se tiene la clasificación de tres tipos de bloques de hormigón en base a la resistencia a la compresión. La mezcla de 5% lodo contiene el valor apto de bloques de clase B, por lo que el valor de resistencia obtenido se rigió a un valor normalizado, debido a que el promedio de resistencia de esta clase de bloques de hormigón es de 3.5 MPa (NTE INEN, 2016).

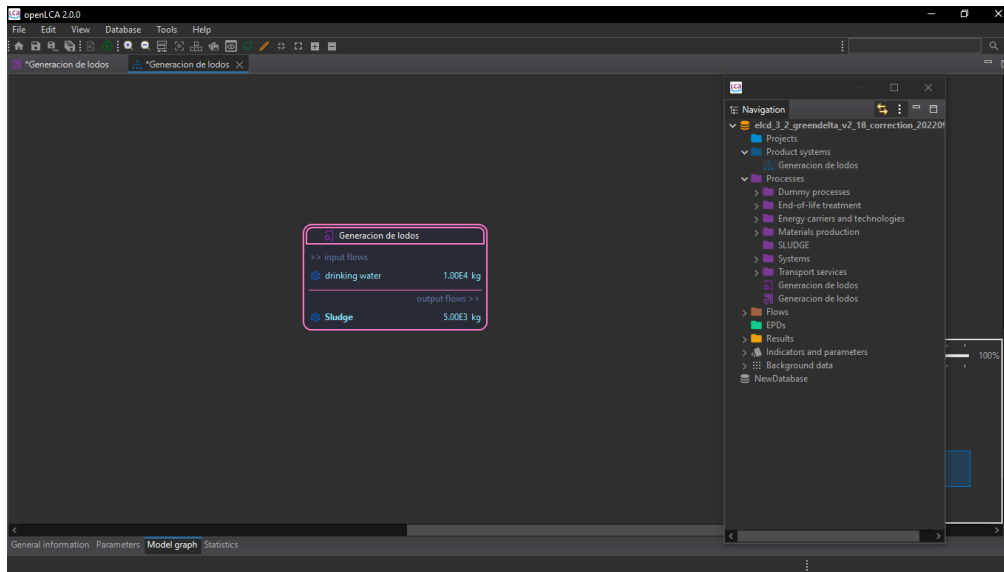
Siguiendo lo referenciado previamente, que un bloque de hormigón sea denominado de Tipo B significa que su uso está relacionado a la mampostería no estructural. Este término significa que los bloques pueden ser fabricados para funcionar como estructuras divisorias para las casas. Es por ello por lo que se propone el uso del lodo de la planta para la fabricación de bloques de cemento, siempre y cuando se utilice al lodo en concentraciones entre los 5 y 10%. Esto como medida para mantener la resistencia a lo largo del tiempo

### **3.2.3. Análisis de Impacto Ambiental**

En esta etapa se realizó una simulación en el software OpenLCA, en donde se evaluó el impacto ambiental que ocasiona la generación de lodo en la planta y sus alrededores. La simulación fue elaborada en base a una cantidad de lodo preliminar que se podría generar en una operación anual de la PTAP, siendo un aproximado de 5000 kg por cada 10000 kg de agua. La Figura 3.5 muestra el “model graph” utilizado para realizar la simulación del proceso. En este, se estimó la cantidad de agua potable que demandaría el proceso para generar la cantidad establecida de lodo.

**Figura 3.5**

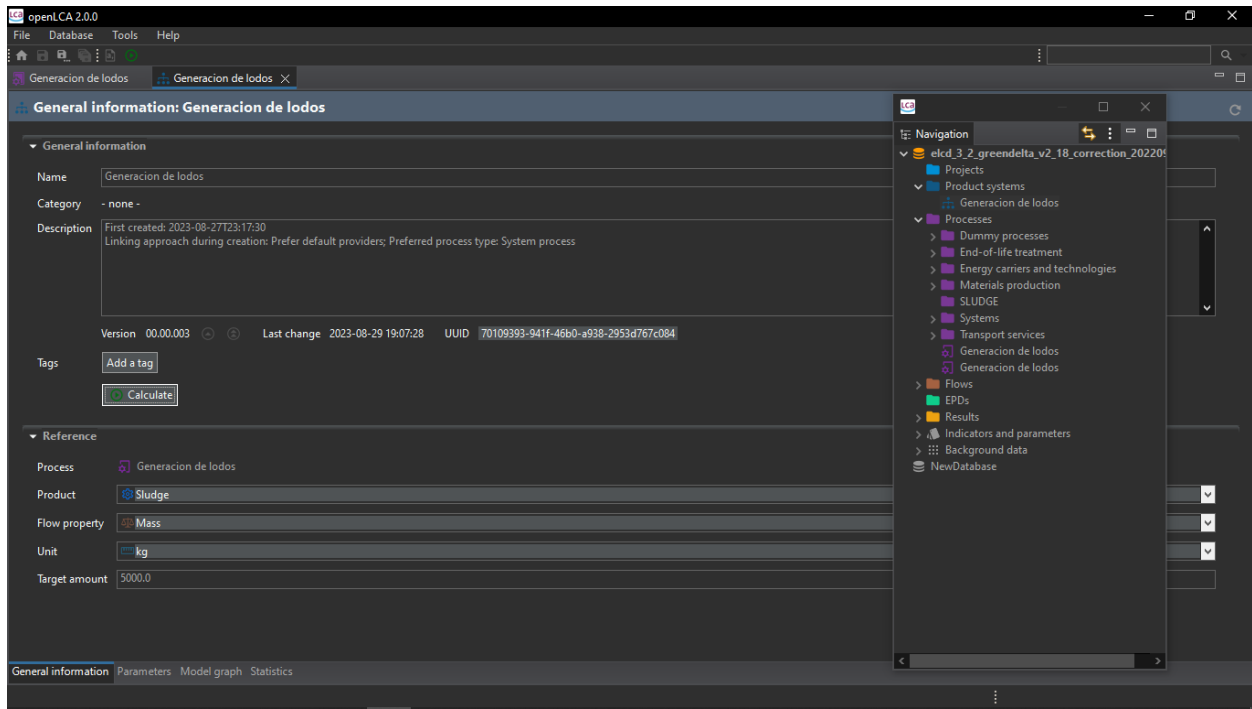
*Model graph de la simulación de OpenLCA*



La Figura 3.6 muestra el método de cálculo que se empleó para obtener los valores de impacto ambiental que determina la simulación. Se siguió como referencia un proyecto de investigación que tenía como objetivo enseñar como realizar simulaciones en OpenLCA, aunque el ejemplo que se montó dentro de la referencia consultada era acerca de bolsas de plástico. Sin embargo, solo se consultaron los parámetros necesarios para lograr una simulación dentro del software utilizado (Gómez Pinzón et al., 2018).

**Figura 3.6**

*Método de cálculo para la simulación*



Como resultado, se entenderá como impacto ambiental al total de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) obtenidas en la simulación. Este valor se encuentra en la parte de “Climate Change” en los resultados del impacto ambiental de la simulación de OpenLCA. Por motivos de errores dentro de la simulación, o de desconocer de manera exacta el proceso de la planta se decidió comparar el valor estimado con un valor de emisiones de GEI obtenido de dos referencias bibliográficas.

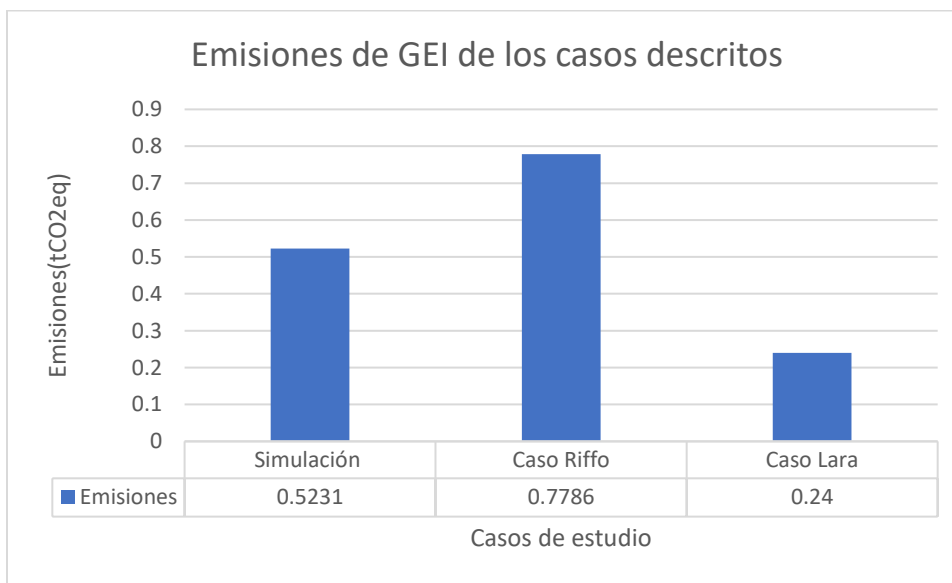
El análisis de impacto ambiental realizado por Riffo fue hecho a toda una PTAR. De igual forma, la investigación de los autores hace hincapié en las emisiones de GEI de tres escenarios distintos, separando en un diagrama de pie los distintos sectores. Se eligió a las emisiones por parte de la etapa de tratamiento de lodos para realizar la comparativa más apegada al enfoque del proyecto. Se obtuvo un promedio de las emisiones de los tres

escenarios y se calculó el respectivo valor con el promedio de los porcentajes correspondientes a las emisiones de los lodos de cada uno de los diagramas (Riffo Rivas, 2017).

Por otra parte, se consultó al análisis efectuado por Lara, en donde se evalúa las emisiones de GEI de otra PTAR, haciendo énfasis en la producción de lodo. Este valor, obtenido del análisis de las emisiones de CO<sub>2</sub> en la parte de tratamiento de lodos, fue igualmente comparado con el obtenido de la simulación y con el discutido previamente (Lara, 2003).

### Figura 3.7

Diagrama de barras de las emisiones de la simulación y el caso referenciado



La Figura 3.7 esquematiza en un diagrama de barras los valores obtenidos de emisiones de GEI de cada caso de estudio, medido en tCO<sub>2</sub>eq, la cual es la medida para referirse a las emisiones de GEI. El gráfico indica que el caso que mayor valor de emisión otorga es el de Riffo, con 0.7786 tCO<sub>2</sub>eq; mientras que el menor es el de Lara con 0.24 tCO<sub>2</sub>eq. El valor de emisiones por parte de la simulación se encuentra entre los valores descritos

previamente. Esto significa que las emisiones de GEI de parte de los lodos generados en este tipo de plantas rondan entre los 0.20 y 0.80 tCO<sub>2</sub>eq anuales.

Si bien el dióxido de carbono de los lodos del lugar de interés no es el principal problema dentro de las emisiones, otros compuestos como el metano afectarían al medio ambiente al tener una presencia importante dentro de los residuos de la planta. Es por ello por lo que se propuso la solución para intentar reducir las emisiones generadas mediante el aprovechamiento del lodo, lo que generaría un impacto positivo en el medio ambiente.



## **Capítulo 4**

### **4.1. Conclusiones**

En el presente proyecto se analizó una muestra de lodo generado por una PTAP ubicada en la comuna San Juan. La investigación fue realizada con el objetivo de encontrar una solución a la problemática acerca de como aprovechar el lodo que se genera. Para ello se

realizó una caracterización a la muestra recogida para identificar en que áreas se puede utilizar el lodo.

Como conclusión fue posible el diseño de un plan para aprovechar el lodo generado enfocado en el desarrollo sostenible de la comuna, debido a que se planteó una posible solución que ayudará a la empresa a mitigar la problemática. Para identificar una aplicación del lodo se realizó una caracterización, en donde se efectuaron análisis químicos y físicos para clasificar al lodo. Una vez se caracterizó se evaluó su uso para la agricultura y la construcción, debido a que son dos campos importantes en la gestión de una comuna. Por último, se evaluó el impacto ambiental que se genera y si la solución fuera capaz de mitigarlo.

Por parte de la caracterización, el análisis químico permitió encontrar parámetros fisicoquímicos y la composición de macro y micronutrientes, así como los metales pesados presentes en la muestra de lodo. Estos resultados fueron comparados con los criterios de calidad del Anexo 2 del Acuerdo n° 28, dando una respuesta negativa debido a que los valores obtenidos se encontraban por encima del valor permitido por el acuerdo, por lo tanto, se concluyó que el lodo no es apto para la agricultura. Además de que la presencia de aluminio en el lodo impediría el crecimiento de cultivos tradicionales.

Para el análisis físico se clasificó el lodo de acuerdo con el tipo de partículas presentes. Primero se determinó el contenido de humedad, obteniendo un valor cercano al 85%, confirmando que la muestra de lodo obtenida era en su mayoría agua, por lo que, al secarse, se perdía una cantidad considerable de mezcla. Para clasificar al lodo se realizó una granulometría y se hallaron los límites de Atterberg.

Por parte de la granulometría, la muestra se retuvo en su mayoría entre los tamices 10 y 100. Muy poca muestra se retuvo en el tamiz 200 y en el fondo, lo que significó que el lodo poseía muy poca cantidad de finos, teniendo en su mayoría presencia de arena. Para los

límites de Atterberg, el límite líquido no pudo ser determinado debido a que la cantidad de golpes fue menor a 15, por lo que no se pudo obtener un valor numérico. Con el límite plástico ocurrió lo mismo; los rodillos se rompieron antes de alcanzar el diámetro normalizado, por lo que tampoco existió un valor para este límite. Por lo tanto, se concluyó que el lodo obtenido corresponde a un suelo de tipo arenoso.

Como el lodo no era apto para la agricultura, se eligió al área de construcción como referente para la aplicación. Al clasificar al lodo como arenoso se eligió aplicarlo en mezclas con cemento, debido a que se puede reemplazar la arena por cierta cantidad de lodo. Para ello se llevó a cabo el método establecido por la NTE INEN 488, utilizando mezclas de 5, 15 y 25% de lodo. Se dejó curar a los cubos por 7 y 28 días. Los cubos a 28 días fueron inspeccionados para verificar que no existan grietas o rupturas debido a la reacción entre el aluminio presente en el lodo y el cemento. Se confirmó que los cubos no perdieron su textura ni presentaron fallas.

Por parte de la determinación de la resistencia a la compresión de los cubos, se rompió solo uno a los 7 días y dos a los 28, con el fin de evaluar el comportamiento de la mezcla a mayor tiempo. Los bloques "BLANCOS" mostraron una compresión mucho mayor que las otras mezclas. Sin embargo, la mezcla de 5% mantuvo una compresión considerable. Esta tendencia se repitió a los 28 días, mostrando que la mezcla de 5% es aún más resistente a comparación con el cubo ensayado a los 7 días. Este comportamiento demuestra que una dosificación no tan alta de lodo en una mezcla de concreto sigue siendo resistente. Es por ello por lo que se propone generar mezclas de concreto con una concentración de lodo de entre 5 y 10% para aprovechar el material obtenido de la PTAP y mantener una resistencia considerable en bloques que sirvan para la sociedad.

Por último, se evaluó el impacto ambiental del lodo generado mediante la simulación de un ciclo de vida utilizando OpenLCA, así como una comparación con dos casos de estudio. Se

definió al impacto ambiental como las emisiones de GEI generadas por los lodos de la PTAP, con el fin de indagar si la solución es capaz de reducir las emisiones. Siguiendo con la información graficada en la Figura 3.6, las emisiones de GEI por parte de los lodos generados por plantas de tratamiento ronda en valores entre 0.20 y 0.80 tCO<sub>2</sub>eq. Por parte del lugar de interés, el lodo genera un impacto significativo al ambiente, en términos de las emisiones de GEI, los cuales no solo incluyen al CO<sub>2</sub>, sino también al gas metano y otros compuestos más. Es por ello por lo que se propone un plan para aprovechar el lodo y evitar que se mantenga depositado sin ser utilizado hasta que la planta decida que hacer con él. El aprovechar el lodo para la fabricación de bloques de cemento u hormigón genera una reducción en las emisiones de GEI, y corresponde a una mejora al impacto ambiental que genera el lugar de interés en la zona aledaña.

A su vez, se propone una solución que mejore la relación entre la empresa y la sociedad aledaña, por lo que se puede generar un impacto social positiva al incluir a la comunidad como parte de la solución presentada. De la misma forma se plantea que la solución puede ayudar a generar un impacto económico positivo a la empresa, debido a que se evitará regalar o desechar el lodo y se podrá aprovechar para brindar servicios que representen ingresos de manera activa o pasiva.

## **4.2. Recomendaciones**

- Es recomendable mencionar los problemas que la zona de interés atraviesa antes de comenzar el proyecto de investigación, con el fin de evitar inconvenientes al momento de muestrear, dado a que se puede retrasar la investigación.
- Se recomienda muestrear el lodo con cuidado y detenimiento, debido a que se pueden incorporar partículas sólidas no deseadas como gravas, o se puede aumentar la concentración de microelementos que alteren la composición del lodo.

- Se recomienda la correcta manipulación de las muestras de lodo, en especial al momento de almacenarlas, con el fin de evitar cualquier tipo de daño a la muestra o perder material.
- Es recomendable contar con el apoyo de otro laboratorio para ampliar los parámetros medidos en el análisis químico, con la finalidad de ampliar los resultados y establecer una conclusión basada en una comparación más amplia.
- Se recomienda regular la cantidad de agua a utilizar en la mezcla de mortero, con el fin de que la mezcla no adquiera una consistencia líquida que impida la formación de los cubos.
- Se recomienda formar mezclas de mortero variando la concentración de lodo desde 5% hasta 10%, variando en 1%, con el fin de evaluar hasta que composición se tiene un valor de compresión máxima aceptable, a comparación de un blanco.
- Se recomienda formar bloques de concreto con la composición de lodo sugerida para evaluar resistencia y comportamiento a medida que pasa el tiempo, analizando cualitativamente cada aspecto de estos.
- Se recomienda elaborar de manera más precisa la simulación en el software OpenLCA para conocer a más detalle como es realmente el impacto ambiental que produce la generación de lodos en la planta.

## Referencias

- Arrieta Lozano, J. J. (2019). Recomendaciones Para Diseño Y Optimización De Plantas De Tratamiento De Agua Potable, Considerando Aspectos De Funcionalidad Y Durabilidad. *Prospectiva*, 17(2), 47–52. <https://doi.org/10.15665/rp.v17i2.1732>
- ASTM. (2000). Determinación del contenido de humedad de los suelos y rocas en el

laboratorio. *Geotecnia*, 2216.

Barberi, D., Bertero, R., Fornasier, G., López, R., Milanesi, C., & Torrent, R. (2015). *¿Por qué el aluminio y el hormigón no se llevan bien?* Asociación Argentina de Tecnología Del Hormigón. <https://www.aath.org.ar/?p=1292>

Diaz Gomez, J., & Cifuentes Osorio, G. R. (2020). *De la Generación al Aprovechamiento Sostenible de Lodos y Biosólidos de Tratamiento de Aguas y Aguas Residuales* (1st ed.). Universidad de Boyacá.

Gómez Pinzón, O., Torres Muñoz, B., Rincón Saavedra, L., & Rodríguez Peña, L. (2018). *Instructivo Programa Opencla. 1*, 1–476.

INEC. (2016). Estadística de información ambiental económica en Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales 2015 (Agua y Alcantarillado). *Instituto Nacional de Estadística y Censos INEC, 2015*, 30.  
[http://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Encuestas\\_Ambientales/Municipios\\_2015/Documento\\_Tecnico-Gestion\\_de\\_Agua\\_y\\_Alcantarillado\\_2015.pdf](http://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Encuestas_Ambientales/Municipios_2015/Documento_Tecnico-Gestion_de_Agua_y_Alcantarillado_2015.pdf)

Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2006). Áridos. Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido fino. *Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2009*, 21.

Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2009a). Cemento hidráulico. Determinación de flujo en morteros. *Norma Técnica Ecuatoriana*.  
<https://archive.org/details/ec.nte.2502.2009/page/n3/mode/2up?view=theater>

Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2009b). Cemento Hidráulico. Determinación de la Resistencia a la Compresión de 50 mm de Arista. *Instituto Ecuatoriano de Normalización*,

19.

Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2011). Calidad del Agua. Muestreo. Parte 13: Guía para el Muestreo de Lodos (ISO 5667-13:2011, IDT). *Norma Técnica Ecuatoriana*.

Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2012). Cemento Hidráulico. Definición de Términos. *Norma Técnica Ecuatoriana*., 1–6.

Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2014). Norma Técnica Ecuatoriana- Calidad Del Agua Muestreo.Parte15: Guía Para La Conservación Y Manipulación De Muestras De Lodo Y Sedimentos (ISO 5667-15:2009, IDT). *Norma Técnica Ecuatoriana*.

Interagua. (2019). *Estación de Bombeo en Mi Lote 2B Planta de Tratamiento de Agua Potable en San Juan Inauguramos Planta Desalinizadora de Agua en Puná Inversión :*

Laboratorio de Geotecnia y Construcción. (2020a). *Guía para el ensayo de: Límite líquido y límite plástico de suelos*.

Laboratorio de Geotecnia y Construcción. (2020b). *Norma de referencia : ASTM D – 1140. 10(200), 0–1*.

Laboratorio de Geotecnia y Construcción. (2020c). *Norma de referencia : ASTM D – 422. 10(200)*.

Lara, S. (2003). *Estimacion De Emisiones De Gases Con Efecto Invernadero, Provenientes Del Tratamiento De Aguas Servidas En La Región Metropolitana*. 1–136.  
<http://mgpa.forestaluchile.cl/Tesis/Lara,Scarlett.pdf>

MAE. (2015). *Reforma del Libro IX del Texto Unificado de legislación Secundaria. Anexo 2: Norma de calidad ambiental del recurso suelo y criterios de remediación para suelos contaminados. Año III, N°387. Ministerio del Ambiente, Ecuador. 028, 220*.

- Mancipe Arias, L. M., & Triviño Restrepo, M. del P. (2018). Valoración de lodos de planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) como materia prima para la extracción de lípidos en la obtención de biodiesel. *Revista ION*, 31(1), 71–79.  
<https://doi.org/10.18273/revion.v31n1-2018012>
- NTE INEN. (2016). Bloques de Hormigón. Requisitos y Métodos de Ensayo. *Instituto Ecuatoriano de Normalización*, 45. file:///C:/Users/Alba/Downloads/nte\_inen\_3066.pdf
- Palacios, A. (2021). *Estabilización y manejo de lodos residuales en la Planta Municipal. Portoviejo*. Universidad de las Fuerzas Armadas.
- Pineda, J. (2008). *Clasificación Del Suelo*.  
<https://www2.ulpgc.es/hege/almacen/download/31/31448/suelos.pdf>
- Pita, J., & Silva, N. (2023). *Revalorización de lodos provenientes de lagunas de oxidación anaerobias dentro del contexto de una economía circular*. Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Ramirez, F. (2008). Lodos Producidos En El Tratamiento Del Agua Potable. *Técnica Industrial*, 46–52. <https://www.tecnicaindustrial.es/wp-content/uploads/Numeros/35/43/a43.pdf>
- Riffat, R. (2010). Fundamentals of Wastewater Treatment and Engineering. In *Applied Cognitive and Behavioural Approaches to the Treatment of Addiction* (First). Taylor & Francis.  
<https://doi.org/10.1002/9780470661420.ch3>
- Riffo Rivas, J. P. (2017). *Análisis de ciclo de vida para una planta de tratamiento de aguas residuales: Potencial de calentamiento global generado por PTAR Talagante*.  
<https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/148239#.ZEiaZ-Rcx2s.mendeley>
- Rodríguez, Y. M. (2018). *Caracterización de lodos residuales en la cantera La Inagua de la provincia de Guantánamo*. Instituto Superior Minero Metalúrgico de MOA Dr. Antonio



Núñez Jiménez.

Sela, G. (2022). *Aluminum Toxicity in Plants*. Agriculture, Plant Nutrition, Soil.

<https://cropaia.com/blog/aluminum-toxicity-in-plants/#:~:text=An aluminum concentration of 2-5 ppm is considered,root cell division and%2C therefore%2C inhibits root elongation>

Torres Lozada, P., Arango Vallejo, L. A., & Torres López, W. A. (2022). Estimación de la producción de lodos en plantas convencionales de tratamiento de agua potable mediante modelos de predicción. *Revista UIS Ingenierías*, 21(4), 87–96.

<https://doi.org/10.18273/revuin.v21n4-2022008>

Torres Lozada, P., Arango Vallejo, L. A., & Torres López, W. A. (2023). Evaluación del aprovechamiento de lodos de plantas de tratamiento de agua potable en la preparación de adobe como material de construcción sostenible. *Revista EIA*, 20(39), 1–18.

<https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=a9h&AN=161682073&lang=es&site=ehost-live%0A10.24050/reia.v20i39.1595>

Torres, P., Hernández, D., & Paredes, D. (2012). Productive use of sludge from a drinking water treatment plant for manufacturing ceramic bricks. *Revista Ingenieria de Construccion*, 27(3), 145–154. <https://doi.org/10.4067/s0718-50732012000300003>

TRANPAK. (2010). *WHAT IS AN INTERMEDIATE BULK CONTAINER?*

<https://www.tranpak.com/faq/what-is-an-intermediate-bulk-container/>