

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas

Revalorización de lodos provenientes de lagunas de oxidación anaerobias dentro del contexto de una economía circular.

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Químico

Presentado por:

Jennifer Charlotte Pita García

Nicole Ariana Silva Ávila

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2023

DEDICATORIA

En primer lugar, dedico este proyecto a Dios y a la Virgen, quienes me han bendecido y guiado durante mi carrera universitaria.

A mis padres, Juan Carlos Pita y Germania García, quienes son mi pilar fundamental y se han esforzado día a día para brindarme la mejor educación. Espero este logro los llene de orgullo y felicidad porque es por y para ustedes.

A mis hermanos: Johanna, Pedro y Jeannette, quienes son mi ejemplo a seguir. Gracias por sus consejos y enseñanzas.

Finalmente, dedico este proyecto a Mickel, quien me impulsa siempre a cumplir mis sueños, y a mis amigos que me acompañaron en el camino.

Jennifer Charlotte Pita García

DEDICATORIA

Le dedico este proyecto principalmente a mis padres, José Silva y Ángela Ávila, pilares fundamentales en mi vida, quienes siempre me han apoyado e impulsado a ser mejor. Todo lo que he logrado y logre en el futuro es por y para ustedes.

A mis hermanos, Carlos y Fernando, por ser siempre mi ejemplo a seguir y motivación.

A mi Pucca, que me acompañó durante muchos días y noches de estudio, y ahora me acompaña desde el cielo.

Y a mis amigos, por estar siempre conmigo, apoyarme, y escucharme. Gracias por hacer de esta experiencia más grata.

Nicole Ariana Silva Ávila

AGRADECIMIENTOS

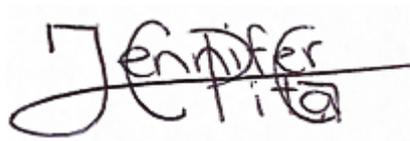
Nuestro más sincero agradecimiento a nuestros tutores, PhD. David Matamoros y MSc. Suanny Mosquera, quienes nos guiaron y aconsejaron durante este proyecto.

Además, agradecemos a la empresa que nos proporcionó las visitas técnicas a la planta para la recolección de muestras de lodo de tratamientos de aguas.

Finalmente, al Centro de Agua y Desarrollo Sustentable, Laboratorio de Geotecnia y Construcción de FICT, Laboratorio de Suelos de FCV y Laboratorio de Evaluación de Materiales de FIMCP. A sus profesores, técnicos y ayudantes quienes contribuyeron en las diferentes pruebas y ensayos realizados en este proyecto.

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Jennifer Charlotte Pita García y Nicole Ariana Silva Ávila 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”

Handwritten signature of Jennifer Pita in black ink, featuring a large, stylized 'J' and 'P'.

Jennifer Pita

Handwritten signature of Nicole Silva in black ink, featuring a large, stylized 'N' and 'S'.

Nicole Silva

EVALUADORES

PhD. Nadia Flores
PROFESOR DE LA MATERIA

PhD. David Matamoros
PROFESOR TUTOR

MSc. Suanny Mosquera
PROFESOR CO-TUTOR

RESUMEN

Durante el proceso de tratamiento y saneamiento del agua, tanto potable como residual, se generan aproximadamente 22400 m³ de lodos como subproducto al mes en la ciudad de Guayaquil. Con el aumento de la densidad poblacional y la demanda del agua, el volumen de este subproducto es cada vez más abundante, ocupando espacios dentro de las instalaciones designadas para su disposición final. A su vez, la incorrecta gestión de estos lodos puede desencadenar problemas en la salud humana, problemas ambientales, entre otros.

La finalidad del presente proyecto es encontrar una alternativa viable para la reinserción de lodos generados en una laguna de oxidación, ubicada en Santa Elena, como un producto con valor agregado. Se evaluó su desempeño como sustituto de abono agrícola a diferentes concentraciones en tres especies: rábanos (*Raphanus sativus*), cilantro (*Coriandrum sativum*) y flores chabelitas (*Catharanthus roseus*). Se tomó en consideración el aspecto de las plantas, cantidad de brotes y altura del tallo para cada una de las plantaciones. En flores chabelitas, la adición del lodo en una mezcla 1:1 lodo/tierra de sembrado favoreció el crecimiento de la planta en un 42%. En el caso de los rábanos, el lodo favoreció el aspecto del tubérculo por su capacidad de retención del agua; sin embargo, se evidenció un menor crecimiento del rábano. Por último, en la plantación de cilantro no se obtuvieron resultados favorables con la adición del lodo, ya que las hojas se marchitaron, y creció un 50% menos que en la plantación usando tierra de sembrado.

Por otro lado, se evaluó también el desempeño del lodo como sustituto de la arena en la elaboración de bloques de arcilla, utilizando concentraciones de 5, 10, 15, 20 y 25% de lodo mezclado con arcilla. Las muestras fueron evaluadas en base a la resistencia a la compresión presentada. Un conjunto de muestras se secó al sol, mientras que el resto se sometieron a altas temperaturas (1000°C). Se evidenció que las muestras sometidas a altas temperaturas presentaron una mayor resistencia a la compresión con un valor máximo de 2.45 MPa a una composición de 10% lodo en peso, mientras que en las muestras secadas al sol la máxima resistencia fue de 0.73 MPa en los bloques con composición de 5% lodo en peso.

Palabras claves: Tratamiento de lodos, laguna de oxidación, economía circular, manufactura de bloques, abono agrícola.

ABSTRACT

During drinking water and wastewater treatment and sanitation, around 22400 m³ of sludge are generated in Guayaquil as a by-product. With an increasing population density and therefore water demand, this by-product occupies a large space within final disposal facilities. Additionally, incorrect management could involve human health and environmental problems, among others.

The purpose of this project is to find a viable alternative for the reinsertion of the sludge generated in an oxidation pond located in Santa Elena as an added-value product. Its performance as a substitute for agricultural fertilizer was evaluated at different concentrations in three different plantations: radishes (*Raphanus sativus*), coriander (*Coriandrum sativum*) and Madagascar periwinkle (*Catharanthus roseus*). The evaluation was based on how the plants looked in comparison to a control sample, the number of sprouts and stem length. In the periwinkle sample the addition of sludge favored the plant growth, and the same number of sprouts were obtained. The addition of sludge favored the radish sample because of its water retention properties. Finally, in coriander there were no favorable results adding sludge to the soil mix, since the plant withered away, and the plant grew 50% less than the one obtained with soil.

On the other hand, the performance as a substitute for sand in the production of clay blocks was also evaluated, using concentrations of 5, 10, 15, 20 and 25% sludge mixed with clay. The samples were evaluated based on the resistance to compression presented. A part of the samples was dried to the sun while the rest were subjected to high temperatures (1000 °C). It was evidenced that the samples subjected to high temperatures presented a greater resistance to compression of 2.45 MPa with a 10% of sludge mixed with clay, while in the sun-dried sample the maximum resistance to compression was 0.73 MPa at a 5% sludge concentration.

Key Words: Sludge treatment, oxidation pond, circular economy, brick manufacturing, agricultural Fertilizer.

ÍNDICE GENERAL

EVALUADORES	6
RESUMEN	I
ABSTRACT	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS	V
SIMBOLOGÍA	VI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VII
ÍNDICE DE TABLAS	IX
CAPÍTULO 1	1
1. Introducción.....	1
1.1 Descripción del problema	2
1.2 Justificación del problema	3
1.3 Objetivos.....	4
Objetivo General	4
Objetivos Específicos	4
1.4 Marco teórico.....	4
1.4.1 Demanda del agua.	4
1.4.2 Tratamiento de lodos de aguas residuales.....	5
1.4.2.1 Espesamiento de lodos	6
1.4.2.2 Digestión de lodos.....	6
1.4.2.3 Deshidratación	7
1.4.2.4 Disposición final	8
1.4.3 Investigación relacionada al tema	9
1.4.4 Reinserción de los lodos como abono agrícola.....	9
CAPÍTULO 2.....	12
2. Metodología	12
2.1 Caracterización de Lodos.....	13
2.2 Caracterización Fisicoquímica.....	14
2.3 Caracterización química	16
2.4 Propiedades físicas	19
CAPÍTULO 3.....	30
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS	30

3.1	Resultados de la caracterización del lodo, tierra de sembrado y arcilla.....	30
3.1.1	Análisis de texturas.	30
3.1.2	Análisis fisicoquímico	31
3.1.3	Estratificación	34
3.1.4	Pruebas físicas	37
3.2	Resultados del diseño de experimentos como abono agrícola	42
3.2.1	Resultados para la plantación de rábanos	42
3.2.2	Resultados para la plantación de flores chabelitas	48
3.2.3	Resultados para la plantación de cilantro.....	51
3.3	Resultados del diseño de experimentos como material de construcción	53
3.4	Análisis económico.....	61
3.4.1	Abono agrícola	61
CAPÍTULO 4		66
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	66
4.1	Conclusiones	66
4.2	Recomendaciones.....	67
BIBLIOGRAFÍA.....		69
APÉNDICES		73

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
PTAR	Planta de Tratamiento de Agua Residual
AASS	Aguas servidas
ST	Sólidos totales
DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno
RAA	Reacción álcali-agregado
EC	Conductividad eléctrica
CICe	Capacidad de intercambio catiónico efectiva
C:N	Relación carbono nitrógeno
Mat. Org.	Materia orgánica
USDA	United States Department of Agriculture
MAGAP	Ministerio de Agricultura y Ganadería
INEN	Instituto Ecuatoriano de Normalización
NTE	Norma Técnica Ecuatoriana
COA	Código Orgánico Ambiental
LP	Límite plástico
LL	Límite líquido
IP	Índice de plasticidad
RAA	Reacción de álcali-agregado

SIMBOLOGÍA

mil	Milésima de pulgada
mg	Miligramo
kg	Kilogramo
UND	Unidades
m ³	Metro cúbico
pH	Potencial de Hidrógeno
m	Metro
C	Carbono
N	Nitrógeno
P	Fósforo
Cu	Cobre
Ni	Níquel
Ca	Calcio
Mg	Magnesio
K	Potasio
Fe	Hierro
B	Boro
Zn	Zinc
Co	Cobalto
Mn	Manganeso
Na	Sodio
Mo	Molibdeno
S	Azufre
Al	Aluminio
Pb	Plomo
Cd	Cadmio
Cr	Cromo
CO ₂	Dióxido de carbono
CH ₄	Metano

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1</i>	<i>Espesador por gravedad</i>	<i>6</i>
<i>Figura 2</i>	<i>Digestor anaerobio por funcionamiento discontinuo</i>	<i>7</i>
<i>Figura 3</i>	<i>Proceso de deshidratación con filtros banda</i>	<i>8</i>
<i>Figura 4</i>	<i>Incinerador de pisos múltiples para reducción térmica de lodos</i>	<i>8</i>
<i>Figura 5</i>	<i>Etapas del desarrollo del proyecto</i>	<i>12</i>
<i>Figura 6</i>	<i>Laguna de oxidación de la PTAR</i>	<i>13</i>
<i>Figura 7</i>	<i>Lecho de secado de lodos de la PTAR</i>	<i>13</i>
<i>Figura 8</i>	<i>Triángulo de texturas del suelo de USDA</i>	<i>15</i>
<i>Figura 9</i>	<i>Segunda muestra del lodo que presenta estratificación</i>	<i>17</i>
<i>Figura 10</i>	<i>Crisoles con muestra sometidos a secado</i>	<i>18</i>
<i>Figura 11</i>	<i>Tamizadora eléctrica para el ensayo de granulometría</i>	<i>20</i>
<i>Figura 12</i>	<i>Estados de consistencia de un suelo de grano fino</i>	<i>21</i>
<i>Figura 13</i>	<i>Tamiz no. 40 utilizado para la determinación de granulometría</i>	<i>21</i>
<i>Figura 14</i>	<i>Cuchara de casagrande usada en el ensayo de límites de Atterberg</i>	<i>22</i>
<i>Figura 15</i>	<i>Diseño experimental para el ensayo de abono agrícola</i>	<i>24</i>
<i>Figura 16</i>	<i>Esquema del diseño de experimento para a) rábanos, b) flores chabelitas y cilantro</i>	<i>24</i>
<i>Figura 17</i>	<i>Esquema del diseño de experimento para material de construcción</i>	<i>25</i>
<i>Figura 18</i>	<i>Equipo utilizado durante el secado e incineración del lodo</i>	<i>26</i>
<i>Figura 19</i>	<i>Representación gráfica del molde para material de construcción</i>	<i>26</i>
<i>Figura 20</i>	<i>Equipo utilizado para las pruebas de resistencia a la compresión</i>	<i>27</i>
<i>Figura 21</i>	<i>Triángulo de texturas del suelo de USDA</i>	<i>30</i>
<i>Figura 22</i>	<i>Diferenciación de capas en la segunda muestra de lodos</i>	<i>34</i>
<i>Figura 23</i>	<i>Curva granulométrica para la muestra de a) arcilla y b) lodo de laguna de oxidación</i>	<i>38</i>
<i>Figura 24</i>	<i>Gráfica de humedad vs número de golpes a partir del ensayo en arcilla</i>	<i>40</i>
<i>Figura 25</i>	<i>Gráfica de humedad vs número de golpes a partir del ensayo en lodo</i>	<i>41</i>
<i>Figura 26</i>	<i>Día 0 de experimentación con flores chabelitas, cilantro y rábanos</i>	<i>42</i>
<i>Figura 27</i>	<i>Día 4 de experimentación de plantación de rábanos durante la germinación de las semillas</i>	<i>43</i>
<i>Figura 28</i>	<i>Gráfico de la altura del tallo respecto al tiempo para la plantación de flores chabelitas con diferentes sustratos</i>	<i>44</i>

<i>Figura 29 Plantaciones de rábanos con a) tierra de sembrado, b) mezcla 1:1 lodo/tierra y c) lodo.</i>	45
<i>Figura 30 Resultados de la experimentación para la plantación de rábanos.</i>	46
<i>Figura 31 Día 0 de la plantación de flores chabelitas.</i>	48
<i>Figura 32 a) Día 4 y b) Día 7 de la experimentación de flores chabelitas.</i>	49
<i>Figura 33 Gráfico de altura del tallo respecto al tiempo para la plantación de flores chabelitas con diferentes sustratos.</i>	49
<i>Figura 34 Resultados de la experimentación para la plantación de flores chabelitas.</i>	50
<i>Figura 35 Comparación de la pigmentación en la plantación de cilantro.</i>	51
<i>Figura 36 Resultados de la experimentación para la plantación de cilantro.</i>	52
<i>Figura 37 Gráfico de altura de la planta respecto al tiempo para la plantación de cilantro con diferentes sustratos.</i>	53
<i>Figura 38 Día 0 de experimentación como material de construcción</i>	53
<i>Figura 39 Proceso de cocción de los bloques a 1000 °C por 1 hora</i>	54
<i>Figura 40 Bloque de 100% lodo luego de ser sometido a 600 °C</i>	55
<i>Figura 41 Cambio de color de los bloques a) antes y b) después de la cocción a 1000 °C.</i>	55
<i>Figura 42 Bloques de arcilla luego de la cocción a altas temperaturas</i>	56
<i>Figura 43 Bloques de arcilla y lodo secados a sol</i>	57
<i>Figura 44 Gráfica Fuerza vs. Desplazamiento para bloques a) cocidos a altas temperaturas y b) secados al sol</i>	57
<i>Figura 45 Valores de compresión máxima para diferentes concentraciones de lodo</i>	60

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1 Relación entre conductividad eléctrica y comportamiento del suelo</i>	<i>16</i>
<i>Tabla 2 Métodos usados en análisis químico</i>	<i>17</i>
<i>Tabla 3 Número de tamices y sus respectivas aberturas.</i>	<i>19</i>
<i>Tabla 4 Resultados del análisis de texturas realizado en un laboratorio privado</i>	<i>30</i>
<i>Tabla 5 Resultados del análisis físicoquímico del lodo y tierra de sembrado.....</i>	<i>31</i>
<i>Tabla 6 Comparación de concentración de metales pesados con la Norma Oficial Mexicana</i>	<i>33</i>
<i>Tabla 7 Resultados de determinación de materia orgánica.....</i>	<i>35</i>
<i>Tabla 8 Valores de promedio y varianza para contenido de materia orgánica en las diferentes capas del lodo</i>	<i>35</i>
<i>Tabla 9 Análisis estadístico del contenido de materia orgánica en las capas del lodo</i>	<i>36</i>
<i>Tabla 10 Peso retenido en cada tamiz para muestra de lodo y arcilla</i>	<i>37</i>
<i>Tabla 11 Resultados del ensayo de límites de Atterberg en arcilla</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 12 Resultados del ensayo de límites de Atterberg en lodo de laguna de oxidación... </i>	<i>41</i>
<i>Tabla 13 Longitudes y diámetros de los rábanos cosechados en diferentes sustratos.....</i>	<i>47</i>
<i>Tabla 14 Valores de máxima compresión de los bloques de lodo y arcilla</i>	<i>59</i>
<i>Tabla 15 Detalle de costos fijos y variables.....</i>	<i>62</i>
<i>Tabla 16 Capital de trabajo para el primer año de producción</i>	<i>62</i>
<i>Tabla 17 Datos de la inversión</i>	<i>63</i>
<i>Tabla 18 Costo total de maquinaria y equipo necesario para elaboración de bloques</i>	<i>63</i>
<i>Tabla 19 Detalle de costos fijos, variables y servicios.....</i>	<i>64</i>
<i>Tabla 20 Capital de trabajo para el primer año de producción</i>	<i>65</i>
<i>Tabla 21 Datos de la inversión</i>	<i>65</i>

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

Durante el proceso de operación en las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) se busca eliminar la mayor cantidad de sólidos presentes. Estos sólidos en el agua se componen en un 60-80% de materia orgánica, dependiendo del afluente, además de contener metales y otras sustancias como consecuencia de los procesos de saneamiento. Parte de los sólidos totales (ST) se quedan suspendidos en el agua, mientras que otra parte, aproximadamente el 4% de la materia orgánica, logra sedimentarse (Clark & Viessman, 1971). Este conjunto de partículas sólidas y demás componentes conforman lo que se conoce como lodos, los cuales son producidos durante las diferentes etapas del proceso.

En Guayaquil se tratan aproximadamente 5.65 millones de m³ de aguas servidas (AASS) al mes (Informe Anual Interagua, 2020), de los cuales se estima que aproximadamente 22400 m³ de lodos son generados y que actualmente tienen como disposición final el relleno sanitario. El espacio disponible en el relleno sanitario es cada vez más escaso por la cantidad producida de desechos municipales. Por otro lado, la disposición en botaderos de zonas rurales es controlada con menor rigurosidad afectando a los recursos naturales, como el suelo, debido a los contaminantes que estos lodos pueden tener por no ser tratados adecuadamente.

En Ecuador se establecen las políticas básicas ambientales en el Código Orgánico Ambiental (COA), el cual es vigente desde el año 2018. El COA regula toda actividad a realizar que pueda tener un impacto sobre el ambiente. Dentro del Título VII Capítulo III se menciona las obligaciones dentro de la gestión integral de los desechos sólidos, así como los lineamientos para el aprovechamiento de los residuos sólidos no peligrosos en la industria. Bajo este marco legal, es de suma importancia buscar métodos de aprovechamiento de estos subproductos. De tal manera, estos desechos pueden ser reinsertados en otros procesos de manufactura según el contexto de economía circular.

1.1 Descripción del problema

Los costos asociados al traslado y disposición final de los lodos provenientes de lagunas de oxidación anaerobias usualmente representan un aporte económico importante en la operación de las PTAR, llegando a representar el 60% de los costos totales de funcionamiento (incluyendo personal, energía, entre otros) (Foladori et. al, 2010). Esto sumado a la alta cantidad de lodos que se producen a diario (aproximadamente 22400 m³ al mes en la ciudad de Guayaquil y zonas aledañas) como subproducto del proceso y su alto contenido de humedad resulta en una masa notable para transportar a los actuales sitios de disposición de residuos sólidos.

Por otro lado, debido a las regulaciones ambientales vigentes en el país respecto a la disposición de los desechos sólidos, estos lodos no pueden ser descartados con facilidad sin ser tratados previamente. Sin embargo, en sitios como los botaderos municipales no existe mayor control o regulación para el tipo de desechos o sus contenidos. A esto se le suma la disponibilidad de espacio dentro de los rellenos sanitarios, que es cada vez más escaso por el gran volumen que representan estos residuos junto a los desechos generados diariamente por los hogares e industrias del país. Como consecuencia, es necesario utilizar extensiones de terrenos más grandes dentro de las ciudades los cuales podrían destinarse a proyectos en beneficio a la sociedad.

Un informe de la Unión Europea (UE, 2002) reveló que los costos asociados a la reinserción de estos lodos mediante su esparcimiento en la tierra, cumpliendo con las normas ambientales, es mucho menor (aprox. 210 euro/ton sólido seco) en comparación a los costos asociados a su disposición en rellenos sanitarios (aprox. 330 euro/ton sólido seco).

Al buscar alternativas para la correcta gestión de este tipo de desechos, se debe tener en consideración la composición del material. Existen regulaciones y normas con las

que se debe cumplir respecto al contenido de metales pesados y otras sustancias perjudiciales a los recursos naturales. Sin embargo, en lugares tales como los botaderos municipales, se dispone de la basura con poco o ningún control, donde los desperdicios quedan completamente descubiertos produciendo olores desagradables.

1.2 Justificación del problema

La disposición de los lodos provenientes de tratamiento de aguas en rellenos sanitarios y botaderos municipales generan un impacto ambiental considerable. Entre estos se puede mencionar contaminación de aguas subterráneas por infiltración de lixiviado en rellenos sanitarios y la contaminación directa del suelo en botaderos municipales. El lixiviado es una mezcla líquida conformada por aguas lluvias que ingresan a las celdas del relleno sanitario y extrae sólidos disueltos o suspendidos presentes en el residuo que filtra. A esto se le suma la emisión de gases producidos por la descomposición de la basura. El principal gas generado por este proceso es el metano, clasificado como un gas de efecto invernadero y es considerado un contaminante de alto riesgo cuando es liberado al ambiente sin ser recuperado y previamente tratado (Köfalusi G. & Aguilar G., 2006).

Dependiendo del proceso de tratamiento y la naturaleza del agua a tratar, los lodos pueden contener metales pesados tales como hierro, aluminio, zinc, entre otros; debido al uso de químicos tales como el cloro y coagulantes (p.ej. sulfato de aluminio). En caso de que estos componentes entren en contacto con suelo agrícola, las cosechas se verán contaminadas, ocasionando menor calidad en los cultivos e ingestión de alimentos con sustancias perjudiciales a la salud (Sharma et Al., 2021). A su vez, el desecho no controlado de estos lodos representa un riesgo biológico debido al posible contenido de patógenos que puedan poseer en su composición.

El tratamiento de los lodos dentro del contexto de una economía circular implica convertir el subproducto considera desecho en un producto deseado, con valor

agregado y que pueda reinsertarse en un proceso de manufactura o producción. Encontrar alternativas viables económica y ambientalmente mejorará la sostenibilidad del proceso industrial de tratamiento de aguas y asegurará que en el futuro aún se cuente con recursos para el desarrollo de la sociedad.

1.3 Objetivos

Objetivo General

Evaluar las propiedades de los lodos provenientes de lagunas de oxidación mediante su caracterización para su reúso dentro del contexto de una economía circular.

Objetivos Específicos

1. Examinar la composición de los lodos provenientes de lagunas de oxidación mediante técnicas de caracterización.
2. Analizar la viabilidad del reúso de material residual de tratamiento de agua como abono agrícola o material de construcción durante la comparación de las alternativas propuestas.
3. Desarrollar un estudio económico inicial para la valorización de los productos evaluados.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Demanda del agua.

La demanda del agua es cada vez más grande dentro de una sociedad en desarrollo. Durante el año 2017 dentro de la provincia del Guayas se trataron 14827.96 L/seg de agua cruda. En el 2019, se evidenció un aumento en el caudal de tratamiento de agua, llegando a tratar aproximadamente 15200 L/seg , es decir un aumento de casi 400 L/seg (Instituto Nacional Ecuatoriano de Censos, 2019).

En Ecuador los procesos para tratamiento de aguas residuales más utilizados son lodos activados, lagunas de oxidación y en los últimos años se ha implementado también la tecnología de humedales artificiales (MetroEcuador, 2018).

1.4.2 Tratamiento de lodos de aguas residuales.

Los lodos son subproductos del tratamiento de aguas residuales y se producen en las etapas de sedimentación primaria y secundaria del proceso. Así mismo, la calidad y cantidad producida depende de las etapas del proceso y de las características del agua afluente.

Los lodos primarios se obtienen de la sedimentación primaria y se componen de aproximadamente la mitad de los sólidos suspendidos que se encuentran presentes en el afluente. Están mayormente compuestos por sólidos volátiles y se puede eliminar el exceso de agua luego del acondicionamiento químico. Es decir, luego del uso de coagulantes y floculantes químicos que permita la decantación de estas partículas. Presentan una coloración gris, con aspecto grasoso y un olor característico (Clark & Viessmann, 1965). Por otro lado, los lodos secundarios son productos de la etapa de clarificación del agua, usualmente en tratamientos biológicos, posterior al tratamiento primario donde se aplican químicos coagulantes y floculantes. Este residuo posee un color café oscuro, así como poca compactibilidad.

Además, como subproducto del tratamiento secundario, se obtienen los lodos activados que se refiere a la masa con alto contenido microbiológico capaz de estabilizar la materia orgánica bajo condiciones anaerobias (Metcalf & Eddy, 2003).

A este conjunto de subproductos se le aplica un tratamiento con el fin de reducir el contenido de agua y asegurar la estabilidad de la materia orgánica. Una de las líneas de proceso más completas consta principalmente de 4 etapas: espesamiento de lodos, digestión de lodos, deshidratación y disposición final. Otras alternativas usadas,

son la disposición directa en lechos de secado sin pre-acondicionamiento o valorización del residuo (He et Al., 2021).

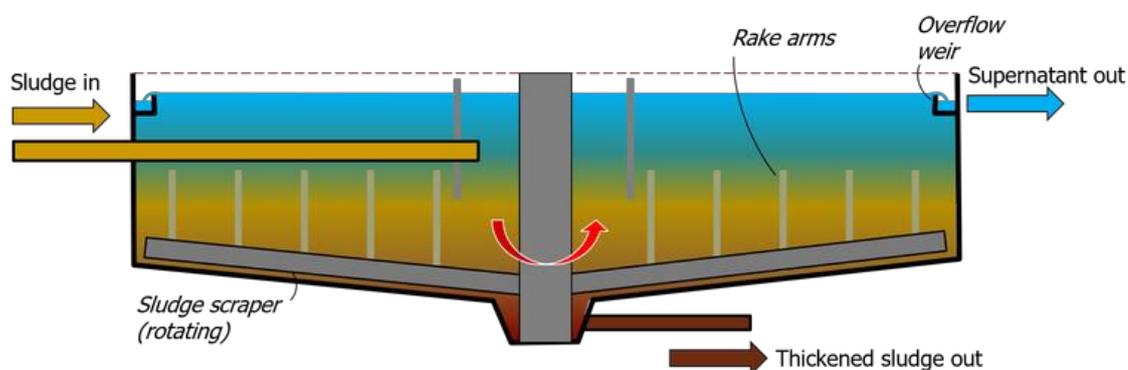
1.4.2.1 *Espesamiento de lodos*

En la primera etapa, se emplea un espesador de gravedad con el fin de reducir el volumen del lodo y lograr un mejor manejo. Durante este proceso, los lodos ingresan por el centro del equipo y los sólidos son decantados al fondo con la ayuda de rasquetas móviles.

Otra alternativa para este proceso es la flotación por aire disuelto el cual facilita el espesamiento del lodo mediante las burbujas de aire inyectadas, lo cual propicia que la masa sólida flote hacia la parte superior del equipo (Patel, 2018).

Figura 1

Espesador por gravedad



Nota: El gráfico representa el funcionamiento de un espesador por gravedad, donde las partículas sólidas que conforman el lodo se sedimentan al fondo del tanque. Recuperado de Sludge treatment – Gravity thickening, Judd Water & Wastewater Consultants, 2018.

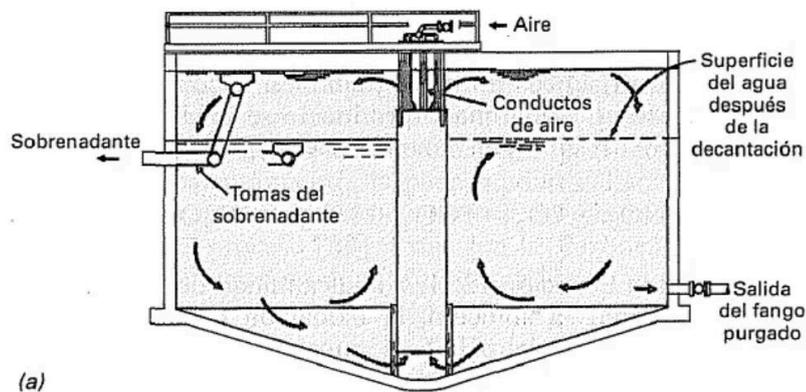
1.4.2.2 *Digestión de lodos*

La digestión de lodos consiste en un proceso biológico en el que los sólidos orgánicos son descompuestos en sustancias estables. Este proceso es realizado para disminuir el volumen total del lodo y eliminar microorganismos patógenos presentes en el subproducto. En primer lugar, el sólido se calienta y se mezcla en un tanque para la

digestión anaerobia por bacterias formadoras de ácidos, donde estas bacterias convierten las moléculas de proteínas y lípidos en moléculas más pequeñas solubles en agua, las cuales posteriormente serán fermentadas en ácidos grasos. Luego, otras bacterias convierten el lodo en CO_2 y CH_4 , donde el metano es recolectado para generación de energía y es reutilizado como alimentación en el tanque de digestión (Patel, 2018).

Figura 2

Digestor anaerobio por funcionamiento discontinuo



Recuperado de: Metcalf & Eddy. (1995). *Ingeniería de Aguas Residuales, Volumen II*, p. 946. McGrawHillEducation

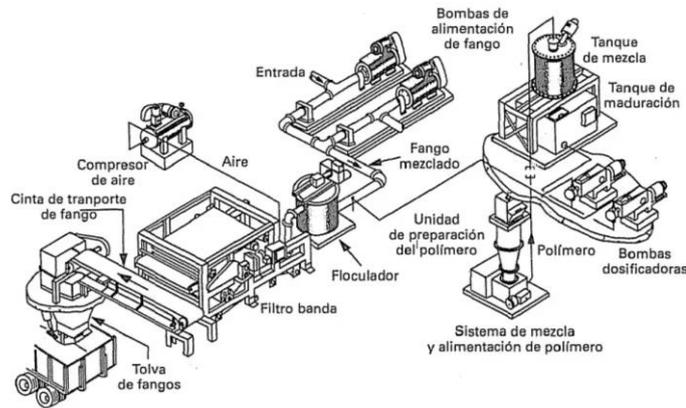
1.4.2.3 Deshidratación

La deshidratación de los lodos es necesaria para remover la mayor cantidad de volumen y peso con el fin de disminuir costos de disposición y transporte. La forma más común para este proceso es el lecho de secado; sin embargo, esta metodología requiere de mucho tiempo para lograr la remoción de agua deseada.

Otras alternativas utilizadas comúnmente son la centrifugación, filtro de vacío de tambor rotatorio y el filtro prensa de banda (Patel, 2018).

Figura 3

Proceso de deshidratación con filtros banda



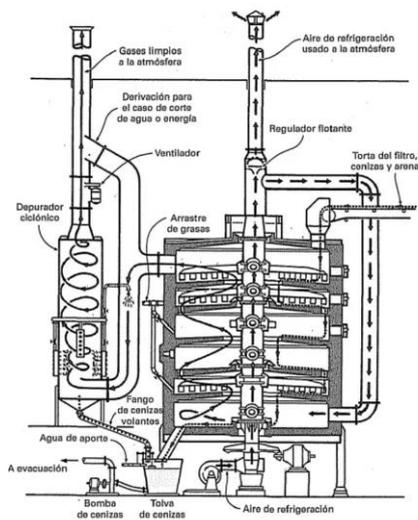
Recuperado de: Metcalf & Eddy. (1995). *Ingeniería de Aguas Residuales, Volumen II*, p. 979. McGrawHillEducation

1.4.2.4 Disposición final

Finalmente, el lodo tratado puede ser descartado en un relleno sanitario o ser utilizado en otros procesos, dependiendo de la caracterización química. En caso de que el lodo posea altos niveles tóxicos, el residuo debe ser incinerado y convertido en cenizas para su disposición final.

Figura 4

Incinerador de pisos múltiples para reducción térmica de lodos



Recuperado de: Metcalf & Eddy. (1995). *Ingeniería de Aguas Residuales, Volumen II*, p. 1003. McGrawHillEducation

1.4.3 Investigación relacionada al tema

El campo de investigación de la gestión de los desechos sólidos es relativamente nuevo y las tecnologías necesarias para llevar a cabo estos proyectos aún está en desarrollo. En la zona de estudio referenciada en este trabajo solo se evidenció el uso de lechos de secado para el tratamiento de estos residuos sólidos generados. Entre las alternativas que se han propuesto e investigado en otros países destacan la recuperación de químicos coagulantes (Keeley, J. et al., 2014), fabricación de ladrillos (Leslaw, S., et.al., 2018), abono agrícola (Iticescu, L.P et al., 2018), absorbente para ciertos contaminantes como CO₂ (Yusuff, S.M et al., 2018), entre otros.

1.4.4 Reinserción de los lodos como abono agrícola

Las características de los lodos varían dependiendo de diversos factores como la fuente de agua de la cual provienen, la estación del año, los químicos utilizados durante el tratamiento y la calidad de este. Generalmente, estos lodos contienen alta concentración de silicio, aluminio y hierro (Nguyen et al., 2002). Estos dos últimos, como producto del uso de coagulantes en base a dichos compuestos. Además, los lodos pueden contener cierta cantidad de arcilla, arena, limo, calcio, rastros de cloro, magnesio, potasio, fósforo y materia orgánica. Los lodos pueden ser reinsertados en otros procesos, según la composición de este, representando buenos resultados.

1.4.4.1 Sustituto de suelo

Para que el lodo pueda ser usado como sustituto de suelo, o compostaje, este debe poseer características comparables al suelo. Un suelo de calidad se define como “la capacidad del suelo para funcionar dentro de los límites del ecosistema y el uso de la tierra, para mantener la actividad biológica, calidad ambiental y promover la salud de los animales y plantas” (Doran & Parkin, 1996). Para que el lodo pueda ser usado debe tener características fisicoquímicas tales como pH entre 5-8, conductividad

eléctrica <4 dS/m, capacidad de retención del agua, aireación, textura y bajo contenido de metales pesados (Dayton & Basta, 2001).

Nutrientes como el nitrógeno y el fósforo contenidos dentro de los lodos puede ser útil como fertilizante. Adicionalmente, sus constituyentes orgánicos benefician al suelo ya que mejoran las condiciones para su uso. Sin embargo, en caso de existir altas concentraciones de metales pesados podría tener un efecto adverso al momento de aplicar los lodos con fin agrícola, contaminando así las cosechas y afectando la salud humana (Sharma, et Al., 2021).

Para la implementación de los lodos dentro de la agricultura puede añadirse el material en forma líquida, o también denominado “*pastel de lodo*” (25% sólidos secos) o como gránulos de lodo (95% sólidos secos). Es recomendable utilizar el lodo húmedo en este tipo de aplicaciones ya que los procesos de secado pueden eliminar nutrientes del lodo (Iticescu et. Al., 2018).

1.4.4.2 Manufactura de bloques

Se ha investigado la posibilidad de adicionar estos lodos dentro del proceso de manufactura de ladrillos, bloques, y material de construcción en general. Ya que la gran parte de los óxidos contenidos dentro de los lodos obtenidos de las PTAR son similares a los de la arcilla (p.ej. SiO_2 , CaO , Al_2O_3), estos pueden ser añadidos al proceso de manufactura de material de construcción. Adicionalmente, el alto contenido de estos óxidos puede ser comparable a materiales con actividad hidráulica latente (materiales con propiedades hidráulicas cuando se activan correctamente), material puzolánico (material que sólo se endurece con el uso de cal) y materiales de relleno como componente cementoso (Dhir et. Al, 2017).

Sin embargo, un alto contenido de materia orgánica no es favorable para las propiedades del material de construcción ya que puede resultar en un material con alta porosidad, disminuyendo la capacidad de carga y estabilidad. Por esta razón es

recomendable incluir un tratamiento térmico para eliminar la mayor cantidad de materia orgánica que pueda estar presente previo a la elaboración de la mezcla para los bloques.

El contenido de hidróxidos alcalinos (p. ej. NaOH) puede influir en la estabilidad del bloque a través de la reacción de álcali-agregado (RAA). La RAA es una reacción lenta que ocurre entre los minerales contenidos en los concretos y los hidróxidos alcalinos que pueden estar contenidos dentro del lodo. Esto compromete la resistencia a compresión del bloque, impidiendo que pueda aguantar altas cargas y resultando en fisuras en la estructura (Cavalcante-da Silva et. Al, 2011).

Se ha evidenciado que, con la adición de lodos, la resistencia de los materiales (p.ej. cemento) disminuye considerablemente en comparación al producto o mezcla original. Por ejemplo, en mezclas con una composición del 5-30%, la resistencia a la compresión disminuyó del 17 a 7 Mpa (Liu et al., 2020). Esto se debe principalmente a la capacidad de absorción del agua que presentan estos lodos. Como suplemento del cemento, se ha encontrado evidencia de que este tipo de agregado deteriora el rendimiento mecánico y durabilidad del concreto (Ahmad et al., 2018).

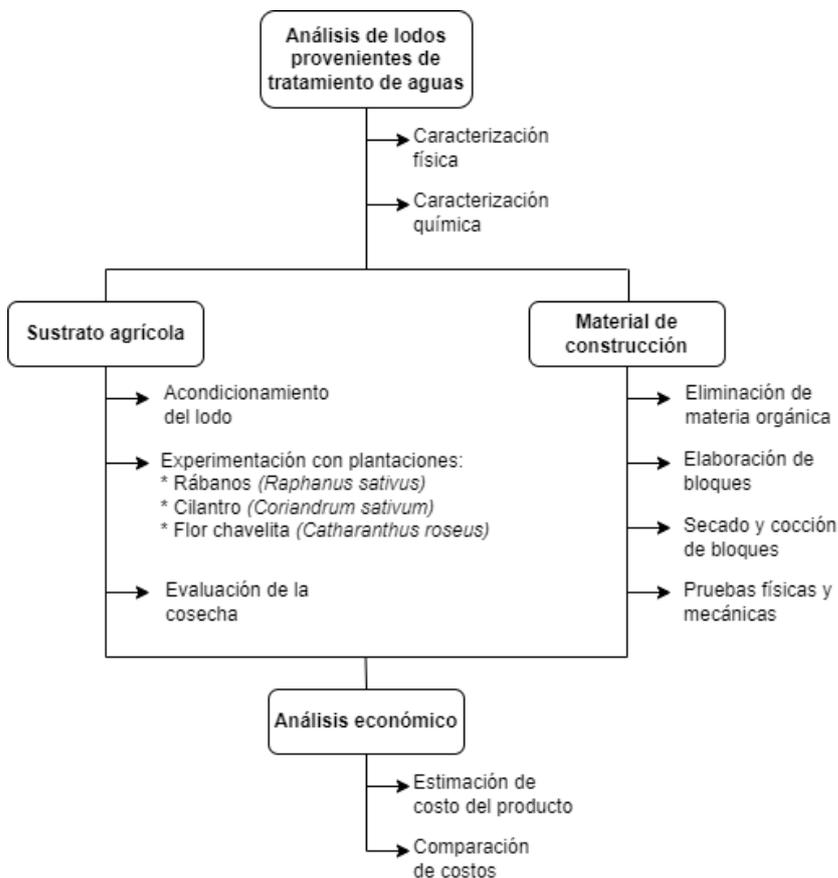
CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

La metodología por seguir en el presente proyecto integrador se muestra a continuación en la Figura 5.

Figura 5

Etapas del desarrollo del proyecto



Se empleó una muestra de lodos provenientes de una planta de tratamiento de aguas residuales ubicada en Punta Carnero, Santa Elena (2°15'51.7"S 80°55'05.9"W). El lodo utilizado en la experimentación fue extraído de lagunas de oxidación mediante un proceso de desazolve en el mes de agosto del 2022, es decir, los residuos acumulados en el fondo de la laguna son separados mediante el uso de maquinaria pesada. Posteriormente, se realizaron análisis con el fin de determinar la composición química del lodo.

Figura 6

Laguna de oxidación de la PTAR



Nota: Planta de tratamientos de aguas residuales en Punta Carnero, Santa Elena (2°15'51.7"S 80°55'05.9"W). Fotografía tomada el 10/11/2022.

2.1 Caracterización de Lodos

Para la caracterización del lodo proveniente de lagunas de oxidación, se utilizó en total 1 kg de muestra aproximadamente para los diferentes ensayos fisicoquímicos. Las propiedades caracterizadas para el lodo fueron: humedad, análisis de texturas, pH, conductividad eléctrica, salinidad, contenido de nitrógeno, fósforo, carbono y materia orgánica. Además, se determinó la concentración de micronutrientes, macronutrientes y metales pesados. Los resultados obtenidos a partir de estos análisis se compararon con la norma presentada por la Cámara de Industrias y Producción (CIP) para suelos utilizados en agricultura.

Figura 7

Lecho de secado de lodos de la PTAR



a)



b)

Nota: Lecho de secado de lodos en Punta Carnero, Santa Elena. Fotografía tomada el a) 10/11/2022 y b) 09/01/2023.

2.2 Caracterización Físicoquímica

Contenido de humedad

Se empleó un horno a una temperatura de 105 °C con el fin de remover el contenido de agua presente en el lodo. Este proceso fue realizado hasta obtener una masa de control constante. Se determinó la masa final del lodo para el cálculo de humedad (H) en base húmeda, en %, a partir de la fórmula:

$$H = \left(\frac{m_1 - m_2}{m_1} \right) * 100\%$$

Donde:

m_1 : Masa del lodo húmedo

m_2 : Masa del lodo seco

Análisis de texturas

El análisis textural fue realizado mediante diferentes tamices para determinar la composición de arena, arcilla y limo presente la muestra.

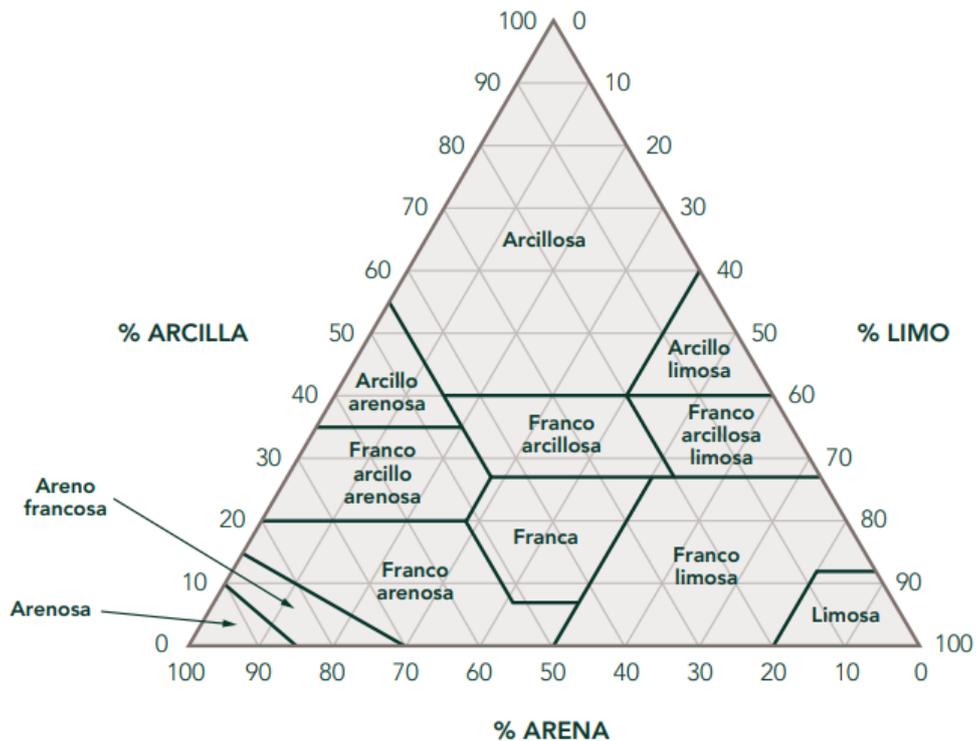
Inicialmente se secó la muestra en un horno a una temperatura de 60 °C, por un período de 3 días. Debido al contenido de material fino presente en la muestra, primero se separó la muestra utilizando el tamiz No. 4, con tamaño de 4.75 μm . Posteriormente, se pasó la muestra a través del tamiz No. 200.

Una vez tamizada, se procedió a lavar la muestra hasta que el agua salga clara, esto con el fin de eliminar todos los finos que estén presentes. Lo que quedó en el tamiz se volvió a secar en el horno a 60 °C.

Posteriormente, el tipo de suelo fue catalogado a partir de los resultados obtenidos en el ensayo utilizando el triángulo textural propuesto por el Departamento de Agricultura (USDA, por sus siglas en inglés: United States Department of Agriculture).

Figura 8

Triángulo de texturas del suelo de USDA



Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica del suelo fue medida utilizando un conductímetro en un extracto acuoso del suelo. Esta propiedad depende de la concentración de solutos iónicos presentes en el agua.

En este caso se utilizó una mezcla de agua-suelo en una proporción 5:1, formando una especie de pasta. Luego, se procedió a dejar la muestra asentarse para permitir que los iones del suelo se disocien en el agua, que actúa como un componente neutro. Finalmente, se utilizó un medidor de conductividad eléctrica para medir la concentración de estos solutos presentes en el agua. A partir de los resultados obtenidos del ensayo, se puede predecir el comportamiento del suelo según los rangos presentados en la tabla 1.

Tabla 1

Relación entre conductividad eléctrica y comportamiento del suelo

Conductividad eléctrica 1:5 (dS/m)	Comportamiento del suelo
0 – 0.12	Escasos nutrientes
0.12 – 0.35	Deseable para plantas sensibles a las sales
0.35 – 0.60	Óptimo para la mayoría de los cultivos
0.60 – 0.85	Reducción del crecimiento
0.85 -1.00	Síntomas de toxicidad
> 1.10	Tóxico para la mayoría de las plantas

Para la aplicación de los lodos provenientes de lagunas de oxidación en suelos como abono agrícola, es necesario que la caracterización cumpla con determinados parámetros de calidad.

2.3 Caracterización química

Potencial de hidrógeno

Para medir el potencial de hidrógeno de la muestra, se utilizó el mismo método que en el caso de la conductividad eléctrica. Se empleó una mezcla de agua-suelo en una proporción 5:1 y posteriormente, se obtuvo el valor de pH del extracto acuoso del suelo utilizando un pHmetro.

Determinación de microelementos, macroelementos y metales pesados

La determinación de parámetros químicos tales como macroelementos, microelementos y metales pesados fueron realizados en un laboratorio privado. Para estos ensayos se utilizaron los siguientes métodos:

Tabla 2

Métodos usados en análisis químico

Parámetro	Método
Nitrógeno total	Analizador Automático C/N
Materia orgánica	Analizador Automático C/N
Determinación de macroelementos (Ca, Mg, K, P)	Agua Regia
Determinación de microelementos (Fe, B, Zn, Co, Ni, Mn, Cu, Na, Mo, S)	Agua Regia
Determinación de metales pesados (Al, Pb, Cd, Cr)	Agua Regia

Respecto a la concentración de metales pesados presentes en el lodo, se comparó los resultados de la caracterización con los valores que determina la Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002 (SEMARNAT, 2002). Esta norma indica valores “buenos” y “excelentes” referentes a contenidos de metales pesados.

Análisis de estratificación

En una segunda visita técnica, luego de 5 meses del desazolve, se observó que el lecho de secado donde se encontraba el lodo tiene diversas capas debido a la estratificación del sólido. Por esta razón, se realizó un análisis de estratificación a las diferentes capas identificadas con el fin de determinar el contenido orgánico e inorgánico presente en cada sección.

Figura 9

Segunda muestra del lodo que presenta estratificación



Nota: La segunda muestra fue tomada 3 meses (9/01/2023) después que la primera muestra. Durante este tiempo el lodo continuó en el lecho de secado.

Se tomaron 3 muestras de 20 – 50 g de las 3 diferentes capas estratificadas y se las secó a 110 °C en un horno por 24 horas, con el fin de obtener la muestra completamente seca. Posteriormente, se pesaron los crisoles y se procedió al proceso de incineración de la muestra en una mufla a 440 °C por un lapso de 8 horas.

Figura 10

Crisoles con muestra sometidos a secado



Nota: Equipo utilizado en el Laboratorio de CADS, Espol. Crisoles a) en el horno para secado y b) en la mufla para incineración

Finalmente, la materia eliminada en la mufla por 440 °C corresponde a la materia orgánica de la muestra; por el contrario, la materia inorgánica es la masa restante en el crisol denominada cenizas.

Posteriormente, se realizó una prueba estadística para verificar que los resultados obtenidos en el ensayo son estadísticamente significantes y la diferencia entre las concentraciones de materia orgánica presentan una diferencia significativa. La prueba estadística se elaboró considerando un intervalo de confianza del 95%, y utilizando los valores promedio de contenido de materia orgánica en cada una de las capas. Se calcularon los límites en cada uno de los casos en base a la ecuación:

$$(\hat{u}_1 - \hat{u}_2) - 2 \sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}} \leq \mu_1 - \mu_2 \leq (\hat{u}_1 - \hat{u}_2) + 2 \sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}$$

Donde \hat{u}_1 y \hat{u}_2 corresponden al promedio de los valores de la muestra 1 y 2 respectivamente, y s_1 y s_2 corresponde a la varianza.

2.4 *Propiedades físicas*

Granulometría

La prueba de granulometría separa el sólido de acuerdo con el tamaño de las partículas que la componen. La muestra fue pasada por una serie de tamices con aberturas cada vez menores.

El análisis granulométrico de áridos finos y gruesos es regulado en el Ecuador por el Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN) en la Norma Técnica Ecuatoriana (NTE) 696, esto es NTE INEN 696. Esta norma establece que, para áridos finos, se debe utilizar los tamices 4, 8, 16, 30, 50, 100, 200. Por otro lado, el procedimiento se rige por la norma NTE INEN 697 “Determinación del material más fino que pasa el tamiz con aberturas de 75 μm (No. 200), mediante lavado”.

Para este ensayo, se secó el sólido a 110 °C por 16 horas para remover la humedad del sólido. Posteriormente, se realizó el lavado de la muestra con abundante agua con el fin de determinar la cantidad de finos presentes. Se secó la muestra nuevamente para obtener el sólido seco.

Una vez seco el sólido, se procedió a realizar el tamizado utilizando una tamizadora eléctrica. En esta experimentación se emplearon los tamices detallados en la Tabla 3.

Tabla 3

Número de tamices y sus respectivas aberturas.

Número de tamiz	Abertura (mm)
4	4.75
8	2.36
16	1.18
30	0.60
50	0.30
100	0.15
200	0.075

Por último, se pesó el sólido retenido en cada tamiz y se determinó el porcentaje de error del ensayo para determinar si es necesario la repetición del procedimiento.

Figura 11

Tamizadora eléctrica para el ensayo de granulometría



Nota: Equipo utilizado en el Laboratorio de Geotecnia y Construcción, ESPOL

Límites de Atterberg

Los límites de Atterberg permiten determinar los límites de plasticidad de la muestra con el fin de caracterizar el comportamiento de un suelo de grano fino. Los suelos con alta composición de material fino presentan propiedades de expansión y compresión que influyen en los materiales de construcción. Esta propiedad define los límites de los contenidos de humedad en el que se produce el cambio de estado de la consistencia de un suelo fino: estado sólido, estado semisólido, estado plástico y estado líquido. En medio de cada uno de estos estados, están los diferentes límites de consistencia: límite líquido, límite plástico, límite de contracción.

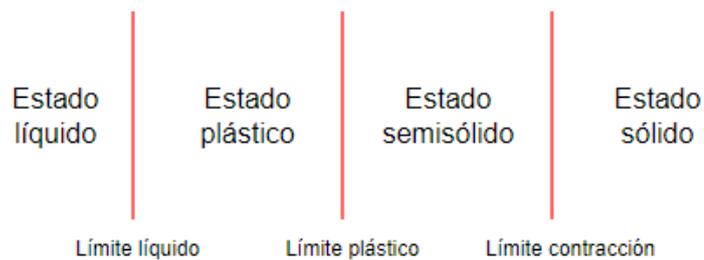
Límite líquido: Es la mínima cantidad de agua que puede presentar un suelo para mantener su plasticidad. Un suelo está en estado plástico cuando se encuentra por encima del límite líquido.

Límite plástico: Es la mínima cantidad de agua que puede soportar un suelo por debajo del cual el suelo pierde su plasticidad, empieza a tornarse duro y entra en estado semisólido.

Límite de contracción: Es la mínima cantidad de agua que presenta un suelo para mantener su estado semisólido. Debajo del límite de contracción, el suelo es completamente sólido y pierde sus propiedades plásticas (Rodríguez W., 2019).

Figura 12

Estados de consistencia de un suelo de grano fino



Para determinar los límites de Atterberg, se secó la muestra de lodo en un horno a 110 °C por 16 horas para remover la humedad del sólido. Luego, se tamizó el lodo seco con un tamiz No. 40 hasta obtener aproximadamente 100 g de sólido fino.

Figura 13

Tamiz no. 40 utilizado para la determinación de granulometría



Nota: Equipo utilizado en el Laboratorio de Geotecnia y Construcción, ESPOL

Posteriormente, se agregó agua al sólido fino gradualmente hasta obtener una masa homogeneizada de consistencia plástica y, con la ayuda de una espátula, se colocó el material sobre la cuchara de casagrande. Usando el ranurador, se trazó un canal desde la parte superior hasta la inferior de la cuchara.

Figura 14

Cuchara de casagrande usada en el ensayo de límites de Atterberg.



Nota: Equipo utilizado en el Laboratorio de Geotecnia y Construcción, ESPOL

Utilizando la manivela, se levantó y dejó caer la cuchara a razón de 2 caídas por segundo hasta que las mitades entraron en contacto. Esto se realiza con la finalidad de que el número de golpes necesarios para que las mitades entren en contacto se encuentre en un rango de 25-35 golpes.

Se agregó aproximadamente 1 mL de agua con una probeta y se repitió el procedimiento, con la diferencia de que el número de golpes debió encontrarse entre 20-30 golpes.

Por último, se agregó 1 mL de agua a la muestra, se colocó la muestra homogeneizada en la cuchara casagrande y se movió la manivela hasta lograr que las mitades entren en contacto con un número de golpes dentro de un rango de 15-25 golpes.

Se tomaron muestras de cada intento y se pesaron los recipientes con el sólido. Posteriormente, se procedió al secado de las muestras dentro del horno durante 24 horas. Luego, se pesó nuevamente el recipiente con la muestra.

Con los datos obtenidos de número de golpes y contenido de humedad, se graficó una curva para determinar el límite líquido (LL), que corresponde al contenido de humedad requerido para alcanzar 25 golpes.

Para el caso del límite plástico (LP), se formaron tubos con el material húmedo (tanto arcilla como lodos) y se tomaron mediciones de peso de tubos formados con cada uno de los materiales. Luego, los recipientes que contienen los tubos formados se sometieron a secado durante un día y se volvió a pesar el recipiente con la muestra.

Con estos datos medidos se calculó el porcentaje de humedad de las muestras y se sacó un promedio entre dichos valores de humedad para arcilla y para lodo. Este promedio entre los valores de humedad corresponde al valor del LP.

Por último, se determinó el índice de plasticidad (IP), que corresponde a la diferencia entre el LL y el LP. Con este valor se clasificó el suelo como suelo plástico o no plástico (NP).

$$IP = LL - LP$$

2.5 Diseño experimental

2.5.1 Abono agrícola

Para evaluar la capacidad del lodo como abono agrícola, se utilizaron tres diferentes plantas: rábanos (*Raphanus sativus*), flores chabelitas (*Catharanthus roseus*) y cilantro (*Coriandrum sativum*). Además, se utilizó una muestra de control para el experimento utilizando tierra de sembrado común; por tanto, el desempeño de las demás plantaciones fue comparado con la muestra de control.

Para cada una de las plantaciones, se tuvieron cuatro diferentes experimentos:

- a) Plantación usando 100% tierra de sembrado (muestra de control).
- b) Plantación utilizando 50% lodo y 50% tierra de sembrado.
- c) Plantación usando 100% lodo de tratamiento de aguas.
- d) Plantación usando 100% tierra de sembrado, en la que se añadió lodo periódicamente para simular la forma tradicional de abonar las plantas.

Figura 15

Diseño experimental para el ensayo de abono agrícola



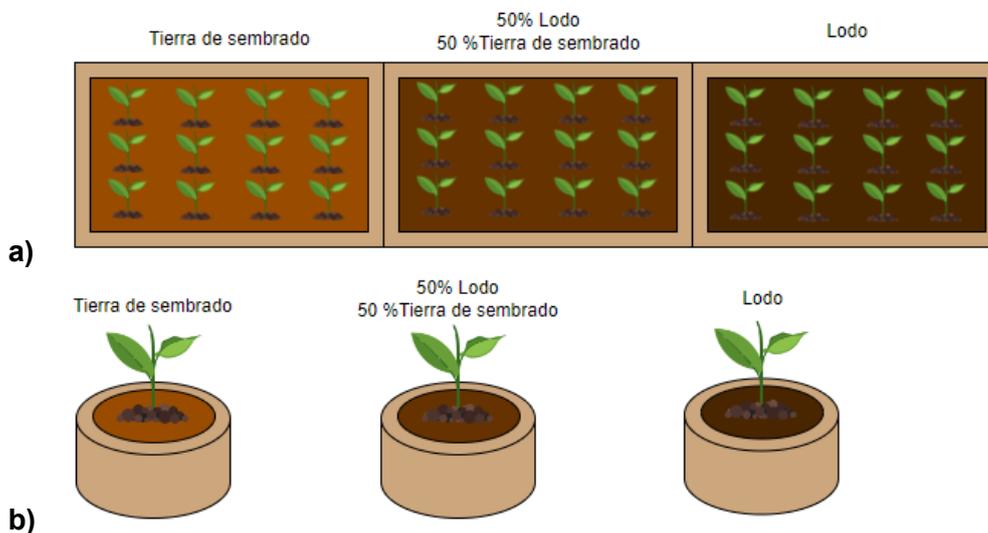
Nota: Plantación de flores chabelitas (izquierda), cilantro (central) y rábanos (derecha).

Las plantaciones fueron medidas en tamaño periódicamente con el fin de construir una gráfica Altura del tallo vs. Tiempo para cada experimento. Esta información permitió evaluar la viabilidad del uso de lodo de tratamiento de aguas en cada planta. En el caso de los rábanos, se plantaron 12 semillas en cada ensayo para obtener suficiente información estadística. Las semillas germinadas fueron trasplantadas en un huerto más grande con el fin de tener la distancia necesaria entre sí y, así, propiciar el correcto crecimiento de los rábanos. Generalmente, las semillas se plantan con una distancia de 3 centímetros ya que no se cosechan tubérculos muy grandes en esta especie de rábanos.

A continuación, se muestra el esquema de los ensayos realizados:

Figura 16

Esquema del diseño de experimento para a) rábanos, b) flores chabelitas y cilantro



2.5.2 Material de construcción

Para evaluar el desempeño del lodo como parte de los componentes de los materiales de construcción, se lo utilizó como agregado en ladrillos de arcilla. Generalmente, para la elaboración de bloques se utiliza arena y arcilla como principales componentes. En este caso, el lodo se usó como un sustituto de la arena.

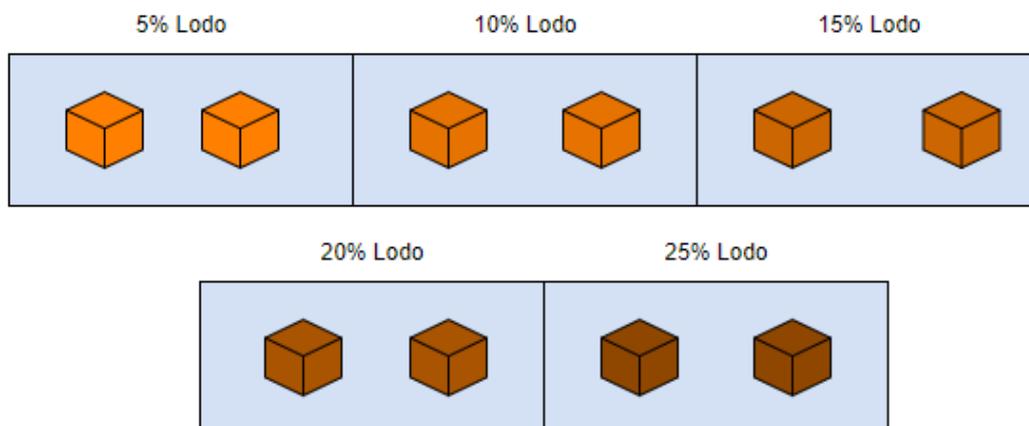
Se utilizó una muestra de control elaborada únicamente de arcilla, y se evaluó su resistencia a la compresión para determinar la presión máxima que es capaz de soportar este material. Se varió la composición del lodo dentro de la mezcla.

Para el estudio se formaron ladrillos con una composición del: 0%, 5%, 10%, 15%, 20% y 25% de lodo, respectivamente, para cada uno de los casos. Además, se realizaron 2 muestras por cada composición con el objetivo de evaluar dos métodos de secado: cocción a altas temperaturas y secado al sol. Adicionalmente, se realizaron 2 bloques de 100% lodo para evaluar su resistencia a la compresión.

Se evaluó su resistencia a la compresión y se comparó cada una de las variaciones con la muestra de control. A partir de estos datos, se generó una gráfica Fuerza aplicada vs Desplazamiento y Resistencia vs Composición por cada ensayo, para así determinar la composición óptima para la fabricación de ladrillos.

Figura 17

Esquema del diseño de experimento para material de construcción.



Como parte de la metodología para la elaboración de los ladrillos, se inició secando 2 kg de lodo y arcilla respectivamente a 105 °C durante 24 horas, para eliminar la humedad en exceso de ambos materiales.

Figura 18

Equipo utilizado durante el secado e incineración del lodo

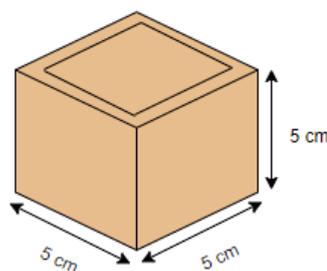


Posteriormente, se colocó la muestra de lodo en una mufla a 350 °C durante 2 horas, para eliminar la materia orgánica presente ya que esta puede influir negativamente en el desempeño del lodo en el ladrillo.

Las mezclas se formaron con las composiciones previamente mencionadas utilizando agua y se colocó la mezcla en moldes de madera con un tamaño de 5 x 5 x 5 cm³. Los moldes se dejaron secar al aire libre en condiciones normales de viento y temperatura durante 1 semana. Un set de los bloques se dejó secar al sol, otro set igual de bloques fue sometido a un proceso de cocción durante 1 hora a 1000 °C con la finalidad de determinar si los bloques de arcilla adquieren mayor resistencia a la compresión al someterse a altas temperaturas.

Figura 19

Representación gráfica del molde para material de construcción



Una vez obtenido los bloques mediante las dos metodologías: cocción a altas temperaturas y secado al sol, se procedió a realizar las pruebas de compresión en los bloques utilizando una prensa hidráulica. Esta prueba se realizó para determinar la máxima fuerza que soportan los bloques antes de romperse. El equipo utilizado presenta valores instantáneos de fuerza aplicada y esfuerzo de compresión los cuales se registran digitalmente en un documento Excel. A partir de estos valores proporcionaron se graficaron las curvas de Fuerza aplicada vs. Desplazamiento y Esfuerzo máximo vs. Composición de lodo. Finalmente, se determinó la composición óptima de lodo para obtener una mayor resistencia de compresión en los bloques.

Figura 20

Equipo utilizado para las pruebas de resistencia a la compresión



Nota: Equipo utilizado del Laboratorio de Geotecnia y Construcción de FICT, ESPOL.

2.6 Análisis económico

Para el análisis económico realizado en el caso de ambas alternativas se utilizó la herramienta Microsoft Excel, considerando diferentes factores.

2.6.1 Abono agrícola

Al evaluar la factibilidad de reinsertar los lodos productos del tratamiento de agua en el campo agrícola, se consideraron diversos factores. Se va a asumir que únicamente el 70% de los lodos producidos serán reutilizados.

Se requerirán dos personas para llevar a cabo el proyecto con un sueldo básico. No se requiere el uso de maquinaria pesada extra ni equipos, tampoco se consideró la compra de terrenos adicionales. Todas las actividades se pueden realizar dentro de las instalaciones actuales de la PTAR.

Para los costos variables se consideraron materiales como las bolsas de propileno en las que se transportará el producto e insumos para el personal como guantes, overoles, entre otros.

Respecto a las ventas, se tendrá un volumen de venta para el primer año de producción, y este volumen irá aumentando en un 5% a medida que pasan los años hasta el año 10. El precio de venta sugerido se calculó a partir del volumen de producción y el costo de producción. Estos costos de producción incluyen los insumos, el personal, y los servicios básicos.

Este precio unitario de venta obtenido se comparó con precios actuales de venta de fertilizantes a base de urea en el mercado ecuatoriano, según fuentes oficiales de noticias (El Comercio). Finalmente, se calculó el valor actual neto (VAN), la tasa interna de retorno (TIR) y el *payback* o tiempo en el que se recuperará la inversión.

2.6.2 Material de construcción

Para el material de construcción se consideró el costo de la materia prima necesaria para la producción, en este caso la arcilla ya que el lodo no tiene un costo. De igual manera se consideraron los costos de operación tales como el personal requerido, uso del agua, energía usada durante los procesos de secado e incineración, entre otros. A diferencia del abono agrícola, se consideró el costo para la adquisición de equipos como trituradora y hornos para llevar a cabo la producción.

En este caso únicamente el 10% de los bloques correspondió a la arcilla. Al igual que en el caso anterior se obtuvieron valores para precio unitario sugerido en base a un volumen calculado para poder tener una producción económicamente viable. Este

precio unitario se comparó con precios ofertados en diversos comercios y ladrilleros ecuatorianos. Para este caso, se consideraron también aspectos tales como el tamaño del bloque elaborado versus los ofertados en el mercado.

Al igual que en el caso anterior, se calculó el valor del VAN, TIR y el tiempo que tomará recuperar la inversión inicial.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Resultados de la caracterización del lodo, tierra de sembrado y arcilla

3.1.1 Análisis de texturas.

El análisis de texturas permite conocer el tipo y la textura del suelo con el que se está trabajando. En función a esto, se puede determinar la capacidad de retención de agua. Estos resultados fueron obtenidos mediante un análisis realizado por un laboratorio privado, el cual se encuentra en el Anexo II del Apéndice A.

Tabla 4

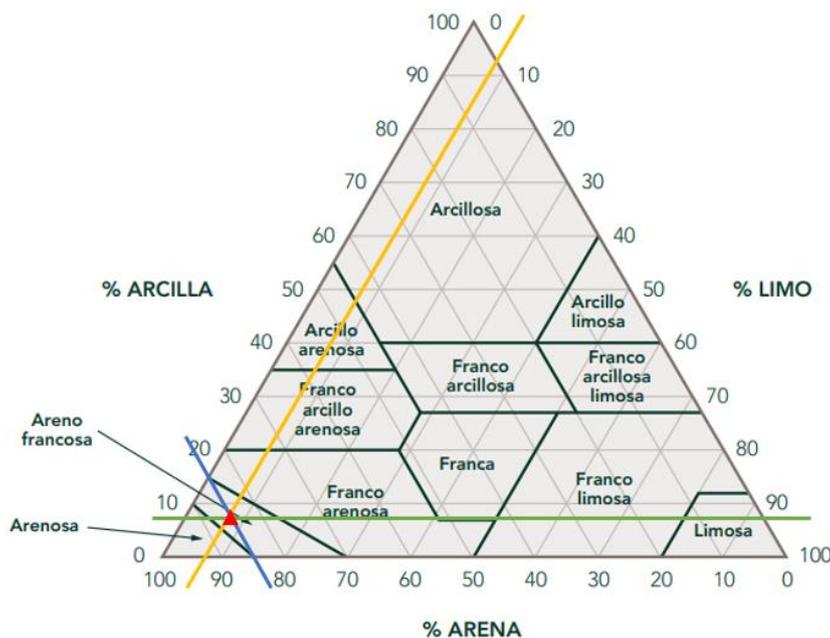
Resultados del análisis de texturas realizado en un laboratorio privado

Nombre muestra	Arena %	Arcilla %	Limo %	Clase textural
Lodos provenientes de laguna de oxidación	84.79	9.22	5.99	Arenoso franco

De acuerdo con los porcentajes de arena, arcilla y limo que contiene la muestra, es posible determinar el tipo de suelo a partir del triángulo textural de la USDA.

Figura 21

Triángulo de texturas del suelo de USDA



Se evidencia que los lodos corresponden a un suelo arenoso franco. El contenido de arena del 84.79% presente en la muestra se debe principalmente al tipo de tratamiento que se tiene en la planta de tratamiento de aguas residuales. En este proceso específico, no se cuenta con un desarenador, por lo que todas las partículas arenosas sedimentan y forman parte del lodo acumulado en la laguna de oxidación.

3.1.2 Análisis fisicoquímico

Se realizó el análisis fisicoquímico a la muestra de lodo proveniente de lagunas de oxidación y a la muestra de tierra de sembrado, los cuales se compararon con la norma presentada por la CIP. Los parámetros fisicoquímicos analizados son presentados en la tabla a continuación

Tabla 5

Resultados del análisis fisicoquímico del lodo y tierra de sembrado

Parámetro	Resultado Lodo de laguna de oxidación	Resultado Tierra de sembrado	NORMA CIP
pH	7.5	7.5	6-8
EC (mS/cm)	3.3	0.382	2
Salinidad (psu)	1.65	0.19	--
Capacidad de intercambio catiónico efectiva (cmol/kg)	42.9	37.2	--
N%	0.87	0.35	--
C%	10.22	5.17	--
C:N	11.79	14.58	--
% Materia orgánica	17.58	8.90	--
Ca%	5.71	0.91	--
Mg%	0.57	0.88	--
K%	0.23	0.30	--
P%	0.45	0.04	--
Fe (mg/kg)	7718.6	13460.1	--
B (mg/kg)	90.3	114.4	1*
Zn (mg/kg)	414.9	49.1	60

Co (mg/kg)	3.5	11.8	10
Ni (mg/kg)	10.2	31.5	--
Mn (mg/kg)	184.5	438.1	--
Cu (mg/kg)	170.1	48.7	30
Na (mg/kg)	3041.4	892.0	--
Mo (mg/kg)	BLD	BLD	2
S (mg/kg)	5156.8	392.1	250
Al%	1.47	2.27	--
Pb (mg/kg)	BLD	BLD	25
Cd (mg/kg)	2.2	BLD	0.5
Cr (mg/kg)	21.8	35	20

Nota: Ciertos valores de parámetros no constan en la norma para regular la calidad del suelo

** = Boro soluble en agua*

BLD = Bajo límite de detección

En general, se identificó que ciertos parámetros tales como la salinidad y conductividad eléctrica, presentan un alto valor en comparación con la muestra de tierra de sembrado. Este alto contenido de sales puede ser resultado de diversos factores, entre ellos la localización de la PTAR (lagunas de oxidación).

La planta de tratamiento de aguas se encuentra ubicada en la provincia de Santa Elena, donde el lodo es susceptible a cambios en su salinidad por el aire y por el posible contacto con agua de mar. Adicionalmente, puede existir un alto contenido de sales en el agua tratada por temas de tuberías e incluso el mismo efluente, lo que ocasiona su acumulación en los lodos producto del tratamiento. En consecuencia, la conductividad eléctrica también presenta una alta salinidad en la muestra de lodo.

Respecto a la determinación de macronutrientes, se puede identificar que el lodo contiene un 0.87% de nitrógeno, el cual está muy por debajo del rango promedio de nitrógeno en muestras de lodo residual, entre 3.4 – 4% (Rorat et.al, 2019). Esto puede estar relacionado al tipo de suelo y su contenido de arena del 84.79%, ya que en suelos arenosos es más común experimentar un déficit de nitrógeno. Lo mismo

sucede en suelos donde la salinidad es muy alta, debido a la poca retención de nutrientes (Cherlynka V., 2022).

Al comparar estos valores obtenidos para los lodos con la norma propuesta por la CIP, se notó que los parámetros tales como el pH, contenido de zinc, molibdeno, plomo y cadmio el lodo cumple con lo determinado por la norma.

En comparación a la tierra de sembrado, ambos suelos tienen propiedades similares en su mayoría. La muestra de lodos presenta un mayor contenido de metales que la tierra de sembrado (p. ej. cobre, zinc, cadmio), al igual que mayor contenido de sales. Por otro lado, las muestras de lodos presentan un olor característico similar al olor de combustibles fósiles. Esta situación no es común y podría ser consecuencia a la presencia de hidrocarburos dentro de la muestra. En el sitio existen tuberías de transporte de combustibles fósiles, lo cual podría ocasionar una contaminación no intencional. Sin embargo, el análisis del contenido de hidrocarburos está fuera del alcance de este estudio.

Finalmente, se presenta el análisis de metales pesados en comparación a la Norma Oficial Mexicana. Se muestran los resultados y los valores de la norma en la tabla 5.

Tabla 6

Comparación de concentración de metales pesados con la Norma Oficial Mexicana

Parámetro	Resultados de lodo laguna de oxidación en base seca	Límites excelentes en base seca	Límites buenos en base seca
Cadmio (mg/kg)	2.2	39	75
Cromo (mg/kg)	21.8	1200	85
Cobre (mg/kg)	170.1	1500	3000
Plomo (mg/kg)	BLD	300	840
Níquel (mg/kg)	10.2	420	420
Zinc (mg/kg)	414.9	2800	7500

Nota: Los límites mostrados corresponden a los límites máximos permisibles según la Norma Oficial Mexicana

3.1.3 Estratificación

A partir del ensayo de estratificación, se determinó el contenido de materia orgánica y humedad en cada una de las capas. La primera capa corresponde a la capa superficial, se diferencia por tener una coloración blanca y textura rígida. La segunda capa presenta una coloración un poco más oscura que la primera capa, y al momento de triturar se puede ver el contenido de humedad por dentro. Y la tercera capa presenta una coloración mucho más oscura por la retención de agua. En la figura 22 se puede diferenciar las diferentes capas.

Durante el estudio, se homogenizaron estas tres capas para realizar los diferentes análisis y obtener valores promedio. Sin embargo, se realizó la determinación de contenido de materia orgánica para cada caso, para determinar si esta estratificación se debe a la humedad o si existe una diferencia en contenido orgánico.

Figura 22

Diferenciación de capas en la segunda muestra de lodos



Nota: Fotografía de la muestra tomada el 9/01/2023.

A continuación, se presentan los siguientes resultados del análisis de estratificación de las diferentes etapas.

Tabla 7

Resultados de determinación de materia orgánica

Muestra	Masa húmeda [g]	Masa seca [g]	Cenizas [g]	% Humedad*	% Cenizas**	% Mat. Org.**
Primera capa	30,68	28,05	20,31	8,57%	72,41%	27,60%
	35,53	32,57	24,39	8,33%	74,88%	25,12%
	32,28	29,61	18,27	8,27%	61,70%	38,29%
Promedio	32,83	30,08	20,99	8,39%	69,66%	30,34%
Segunda capa	39,95	28,26	20,97	29,26%	74,20%	25,80%
	42,59	30,24	22,51	29,00%	74,44%	25,57%
	46,07	32,15	22,39	30,21%	69,64%	30,35%
Promedio	42,87	30,22	21,96	29,49%	72,76%	27,24%
Tercera capa	37,04	21,61	15,86	41,66%	73,39%	26,59%
	35,68	20,02	15,03	43,89%	75,07%	24,92%
	35,11	23,73	15,85	32,41%	66,79%	33,20%
Promedio	35,94	21,79	15,58	39,32%	71,75%	28,24%
Muestra homogenizada	69,92	32,67	26,71	53,28%	81,76%	18,23%
	21,79	10,28	8,32	52,82%	80,93%	19,00%
	37,18	18,73	15,65	49,62%	83,56%	16,48%
Promedio	42,96	20,56	16,89	51,91%	82,08%	17,90%

* = Cálculo realizado en base húmeda

** = Cálculo realizado en base seca

Se puede notar a partir de la tabla mostrada que no existe una diferenciación en el contenido de materia orgánica en cada una de las capas. Sin embargo, estadísticamente estas diferencias sí son significativas. Se calculó el promedio y varianza de la materia orgánica contenida en las muestras de cada una de las capas.

Tabla 8

Valores de promedio y varianza para contenido de materia orgánica en las diferentes capas del lodo

Muestra	Promedio materia orgánica	Varianza materia orgánica
Primera capa (μ_1)	30.34%	2.4×10^{-5}
Segunda capa (μ_2)	27.24%	5.3×10^{-7}
Tercera capa (μ_3)	28.24%	3.7×10^{-6}

Con los valores obtenidos y considerando un intervalo de confianza del 95% se obtuvieron las siguientes diferencias entre cada una de las capas.

Tabla 9

Análisis estadístico del contenido de materia orgánica en las capas del lodo

Muestra	Límite inferior	Límite superior	Significancia
Primera capa – Segunda capa	2.52%	3.67%	Estadísticamente significativa
Tercera capa – Segunda capa	0.76%	1.23%	Estadísticamente significativa
Primera capa – Tercera capa	1.49%	2.71%	Estadísticamente significativa

A partir de la comparación del contenido de materia orgánica entre las capas se evidencia que no se incluye el cero en el intervalo de confianza para sus diferencias. A partir de esto se consideró que las concentraciones de materia orgánica observadas en las tres diferentes capas a pesar de presentar valores cercanos entre sí son estadísticamente significantes. Es decir, los datos obtenidos a partir del análisis tienen un fundamento estadístico y sí presentan diferencias en el contenido de materia orgánica.

La muestra homogenizada presenta menor cantidad de materia orgánica en comparación a la segunda muestra tomada. Ambas muestras fueron tomadas en épocas diferentes, con una diferencia de aproximadamente 3 meses, lo que pudo ocasionar esta pérdida de materia orgánica. Se puede notar también la capacidad de retención de agua del material. A pesar de que la muestra homogenizada ha sido almacenada durante 3 meses, presenta un mayor contenido de humedad que la segunda muestra ya que fue almacenada herméticamente desde su recolección.

Así mismo, se puede evidenciar que la estratificación se debe al contenido de agua del material. A medida que el lodo se encuentra más cercano a la superficie, el contenido de humedad disminuye, ocasionando el cambio de color evidenciado. Esto se debe a las condiciones a la cual se encuentra expuesto en la superficie.

3.1.4 Pruebas físicas

3.1.4.1 Granulometría

La granulometría en la producción de materiales de construcción es un factor importante dentro de la evaluación de los agregados a la mezcla. Se busca tener continuidad en la curva granulométrica para que la mezcla tenga un buen desempeño. En el ensayo de granulometría, se determinó la cantidad de sólido retenido en cada tamiz con el fin de conocer la composición de sólidos finos y gruesos que contiene la muestra. En la tabla 8 se presenta la cantidad en peso retenida en los respectivos tamices utilizados en la experimentación.

Tabla 10

Peso retenido en cada tamiz para muestra de lodo y arcilla

No. Tamiz	Laguna de oxidación		Arcilla	
	Masa retenida (g)	% Retenido	Masa retenida (g)	% Retenido
4	16.16	49.60%	0	0.00%
8	6.72	20.63%	0.96	0.64%
16	3.60	11.05%	9.58	6.39%
30	1.85	5.68%	23.97	15.98%
50	1.22	3.74%	25.07	16.72%
100	1.19	3.65%	25.93	17.29%
200	0.68	2.09%	21.55	14.37%
Fondo	0.26	0.80%	8.96	5.97%
Lavado	0.9	2.76%	33.96	22.64%

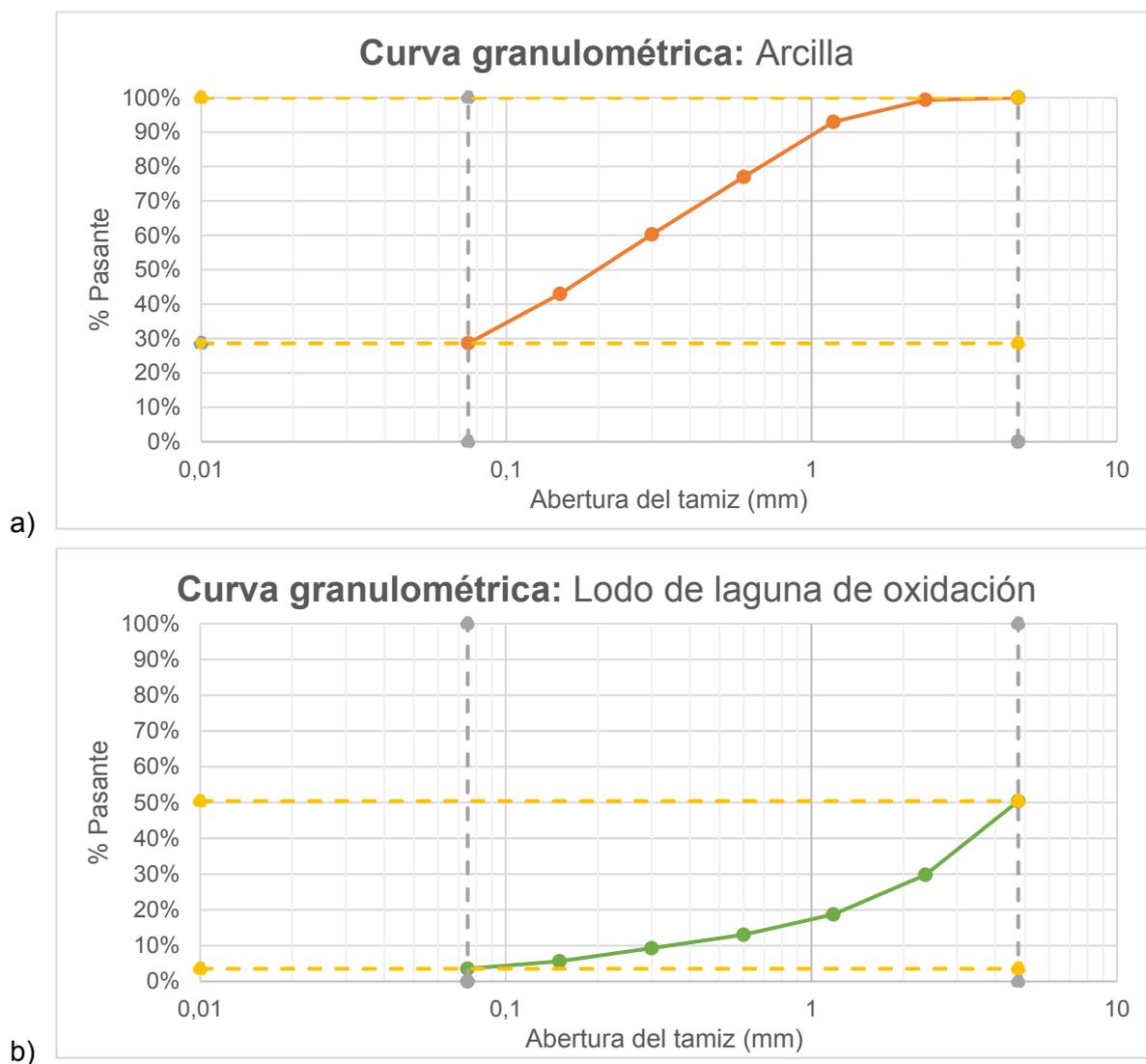
A partir de la información presentada, se realiza una curva granulométrica para cada muestra con el fin de analizar la estructura del suelo; de esta manera es posible determinar la composición de grava, arena y sólidos finos que contiene la muestra.

En la figura 23 se presenta la curva granulométrica obtenida a partir de los resultados del ensayo para la muestra de arcilla, material que será utilizado para la elaboración de materiales de construcción, y la muestra de lodo provenientes de lagunas de

oxidación. Se determinó que la muestra de arcilla contiene un 0% de grava, 71.38% de arena y 28.62% de sólidos finos. Además, por la tendencia de la curva se puede deducir que la muestra se compone principalmente de sólidos agregados finos. Por otro lado, respecto a la muestra de lodo proveniente de lagunas de oxidación se obtuvo que el 50.40% corresponde a grava, el 46.04% a arenas y el 3.56% restante corresponde a los sólidos finos presentes en el suelo. La gráfica 23 b presenta una tendencia exponencial creciente lo cual indica que la muestra se compone principalmente de sólidos agregados gruesos.

Figura 23

Curva granulométrica para la muestra de a) arcilla y b) lodo de laguna de oxidación.



3.1.4.2 Límites de Atterberg

Se realizó el ensayo de límites de Atterberg para la muestra de arcilla, la cual será usada en la elaboración de los bloques al igual que para la muestra de lodo proveniente de lagunas de oxidación. La arcilla se incorporará como material aglutinante.

Como se mencionó en el capítulo 2, durante la prueba de límites de Atterberg se contabilizan los números de golpes necesarios para que las mitades generadas en la cuchara casagrande se junten. En base a este número de golpes, se generó una gráfica versus el porcentaje de humedad de cada una de las muestras, la cual se aproxima a una gráfica lineal.

Tabla 11

Resultados del ensayo de límites de Atterberg en arcilla

No. Golpes	Wh+R	R	Ws+R	Ww	Ws	%W
32	19,09	6,34	16,1	2,99	9,76	30,64%
22	19,64	6,34	16,4	3,24	10,06	32,21%
16	16,5	6,1	13,9	2,6	7,8	33,33%

Nota: Wh+R = masa de muestra húmeda más recipiente (g)

R= masa del recipiente (g)

Ws+R= masa de la muestra seca más recipiente (g)

Ww= masa de agua removida (g)

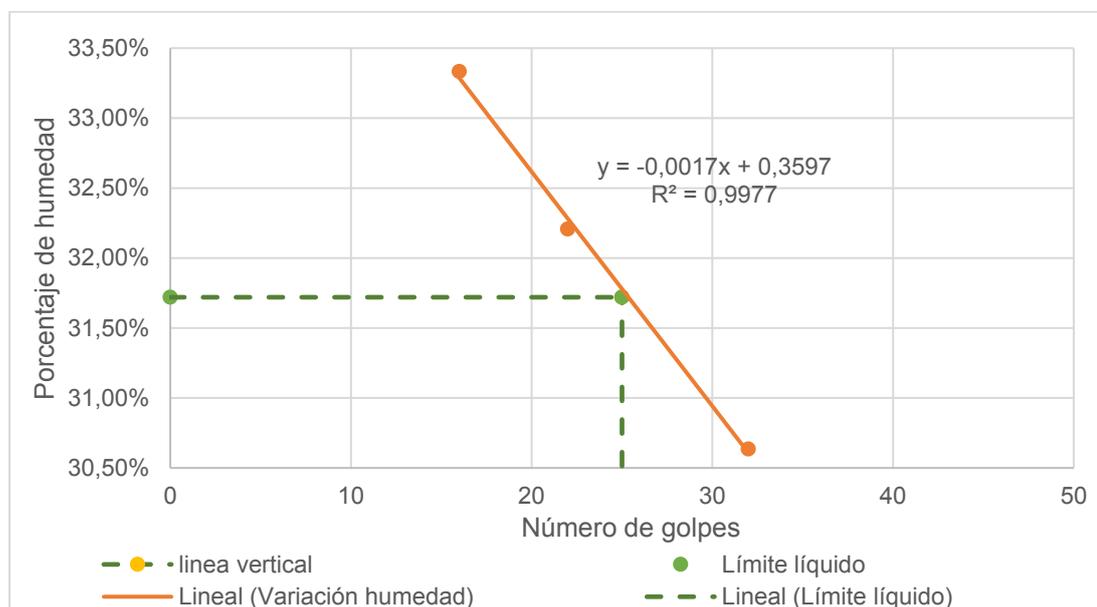
Ws= peso seco de la muestra (g)

%W= contenido de humedad

En el ensayo con arcilla se evidenció que, a menor número de golpes, se tenía un mayor contenido de humedad. Este es un comportamiento normal en suelos de tipo arcillosos. Con los resultados de porcentaje de humedad se realizó la gráfica correspondiente al contenido de humedad en escala aritmética versus número de golpes en escala aritmética.

Figura 24

Gráfica de humedad vs número de golpes a partir del ensayo en arcilla.



Una vez obtenida la gráfica, a partir de la ecuación de la recta se calculó el valor de límite líquido correspondiente al porcentaje de humedad a los 25 golpes, con un valor de 0.317. Así mismo, se llevó a cabo el ensayo de determinación del límite plástico en arcilla, a partir del cual se determinó que el valor del límite plástico es de 0.19. Con ambos valores se obtuvo el índice de plasticidad de la arcilla a partir de la resta del límite plástico (LP) del límite líquido (LL), con un valor de 0.13.

Mediante la figura 20, utilizando valores de 13% y 31.7% para el IP (índice de plasticidad) y el LL respectivamente, se puede notar que el tipo de arcilla utilizada corresponde a una arcilla inorgánica de baja plasticidad.

Por otro lado, para el ensayo de límites de Atterberg utilizando el lodo de las lagunas de oxidación, se siguió el mismo procedimiento previamente mencionado para la arcilla. A continuación, se muestran los datos de humedad y números de golpes obtenidos del ensayo.

Tabla 12

Resultados del ensayo de límites de Atterberg en lodo de laguna de oxidación

No. Golpes	Wh+R	R	Ws+R	Ww	Ws	%W
32	16,43	6,05	12,4	4,03	6,35	63,46%
27	14,7	6,09	11,3	3,4	5,21	65,26%
21	17,45	6,02	12,9	4,55	6,88	66,13%

Nota: Wh+R = masa de muestra húmeda más recipiente (g)

R= masa del recipiente (g)

Ws+R= masa de la muestra seca más recipiente (g)

Ww= masa de agua removida (g)

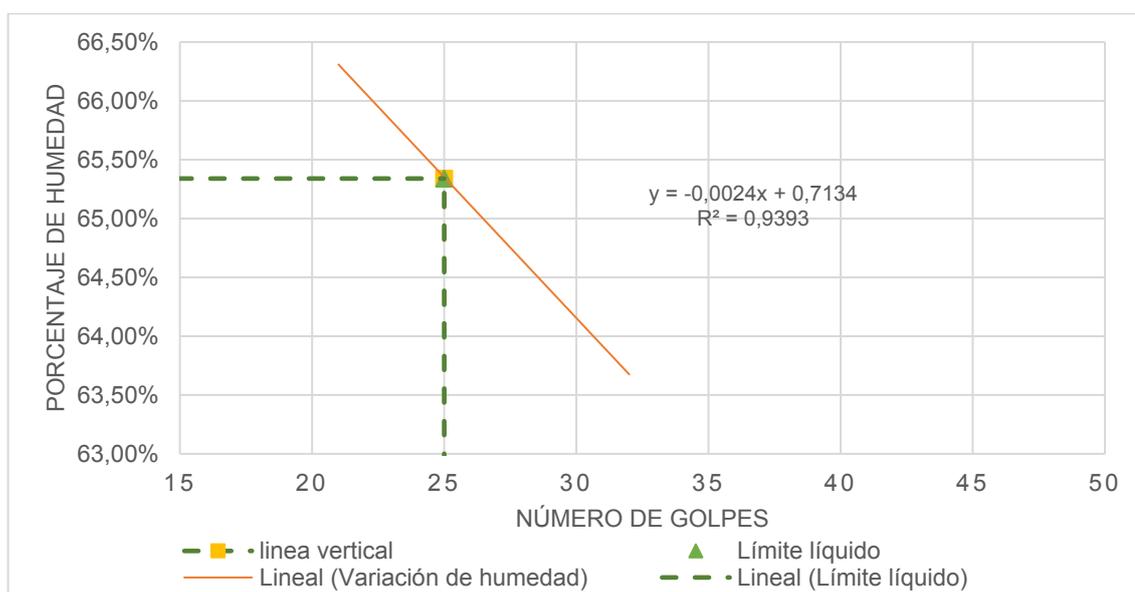
Ws= peso seco de la muestra (g)

%W= contenido de humedad

En este ensayo se evidencia que, al igual que en el caso anterior, a mayor número de golpes la humedad de la muestra era mayor. Sin embargo, en el caso del lodo la cantidad de golpes no tuvo gran variación a diferencia de la arcilla y, así mismo, la cantidad de humedad se mantuvo muy cercana entre sí. Durante este ensayo se determinó que el lodo es muy susceptible a los cambios de humedad, lo cual afectó a los datos recopilados.

Figura 25

Gráfica de humedad vs número de golpes a partir del ensayo en lodo



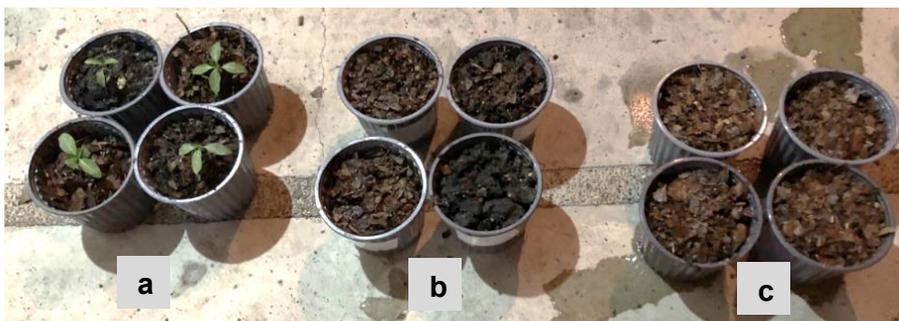
Al obtener la gráfica, se aproximaron los puntos a una línea recta obteniendo su respectiva ecuación lineal. Se reemplazó el número de golpes en la ecuación de la recta correspondiente a 25, el cual indica el límite líquido, obteniéndose un valor de 0.653. Respecto al ensayo del límite plástico, debido a que el lodo presentó alta susceptibilidad a cambios de humedad, los tubos con este material se rompían con facilidad. Este tipo de comportamiento es típico en suelos arenoso franco, lo que dificulta moldear el material y formar los tubos (Ciancaglini, N.D.). Al no poder completar el ensayo del límite plástico debido a las razones previamente mencionadas, se determinó que el material corresponde a un material no plástico.

3.2 Resultados del diseño de experimentos como abono agrícola

Se logró realizar la experimentación del uso de lodos provenientes de tratamiento de aguas residuales como abono agrícola utilizando 3 diferentes especies vegetales: rábanos, flores chabelitas y cilantro.

Figura 26

Día 0 de experimentación con flores chabelitas, cilantro y rábanos.



Nota: Plantación de a) flores chabelitas, b) cilantro y b) rábanos. Fotografía tomada el 21/11/2022.

3.2.1 Resultados para la plantación de rábanos

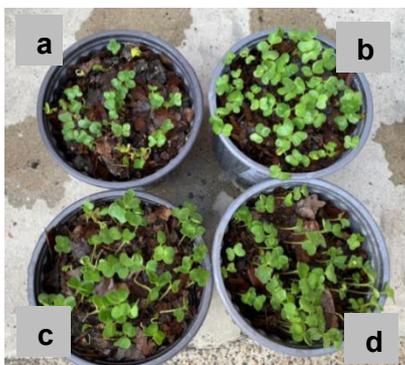
La especie de rábanos plantados en esta experimentación es *Raphanus sativus*, también conocido como rábanos rojos o rabanitos. Esta especie presenta una coloración roja, morada, blanca o rosácea en la piel del tubérculo. La cosecha de los

rábanos posee un ciclo relativamente corto, es decir, la cosecha se realiza 3 o 4 semanas después de haber plantado las semillas.

En esta experimentación, se sembraron semillas en cada ensayo con diferentes suelos: tierra de sembrado, mezcla 50% lodo/50% tierra de sembrado y lodo. Esto con el objetivo de posteriormente trasplantar las semillas germinadas en un huerto con mayor espacio. Se observó que, en la plantación con lodo como sustituto de suelo, germinó menor cantidad de semillas de rábanos, como se observa en la figura 27, lo que podría ser consecuencia de la textura compacta que presenta el lodo húmedo. Esta textura no permite que las raíces de las plantas se arraiguen en el suelo, por lo que se evidencia una disminución de cantidad de semillas germinadas. Por el contrario, en las plantaciones con tierra de sembrado y mezcla 50% lodo/50% tierra las semillas crecieron con normalidad.

Figura 27

Día 4 de experimentación de plantación de rábanos durante la germinación de las semillas.



Nota: Plantación con lodo (a), plantación con mezcla 50% lodo/50% tierra (b) y plantación con tierra de sembrado (c-d). Fotografía tomada el 25/11/2022.

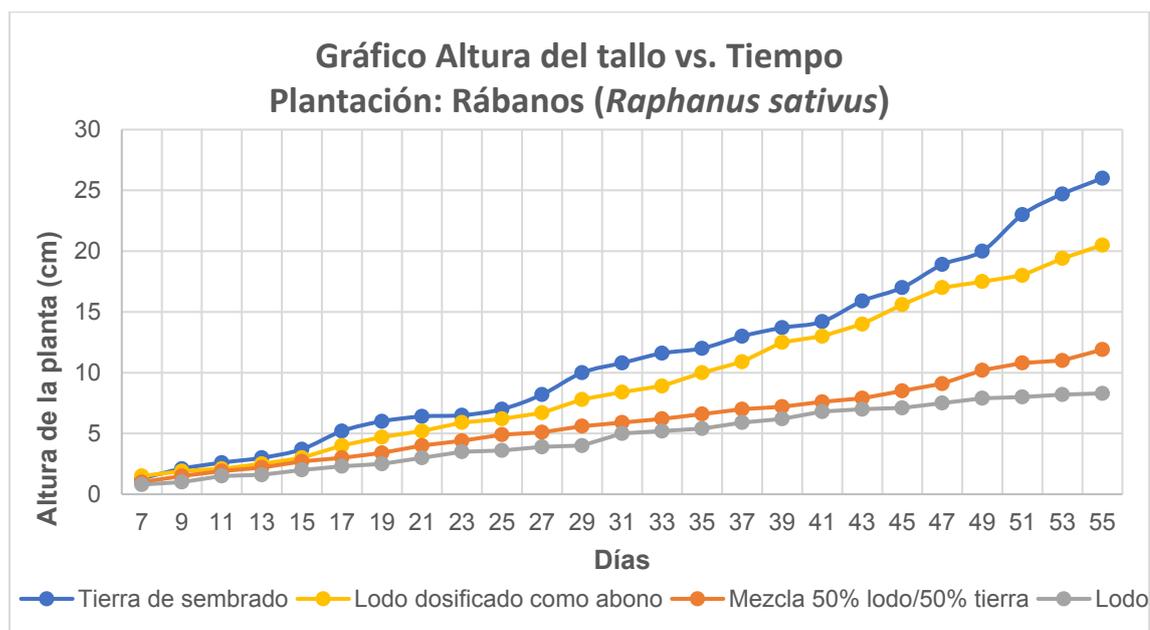
Al pasar los días, después del trasplante en el huerto, se observó que 4 de las 12 semillas trasplantadas se marchitaron en la plantación con lodo debido a la textura de este suelo, como se mencionó anteriormente. Además, se observó que las hojas de los rábanos en la plantación con lodo presentaron una coloración amarillenta con el pasar de los días, lo cual puede ser resultado de la alta conductividad eléctrica que se

obtuvo como resultado de la caracterización química de este sustrato. La conductividad eléctrica representa la cantidad de sales disueltas en el suelo, este parámetro puede ser un indicativo de la toxicidad del suelo para ciertas plantas. Esta información se encuentra respaldada en la tabla 1 de la sección 2.

A continuación, se presenta la gráfica Altura del tallo vs. Tiempo (en días) de la plantación de rábanos con diferentes sustratos. La medición del tallo se realizó según el Anexo I del Apéndice A. Cabe indicar que el gráfico empieza en el día 7 ya que en este día las semillas germinadas fueron trasplantadas en el huerto.

Figura 28

Gráfico de la altura del tallo respecto al tiempo para la plantación de flores chabelitas con diferentes sustratos.



Nota: La medición se realizó desde el nivel del suelo a la terminación del tallo.

Como se puede observar en la figura 29, la plantación con tierra de sembrado presenta un incremento notable en el crecimiento de la plantación de los rábanos, en comparación con las plantas que crecieron en la mezcla 50% lodo/50% tierra y sólo en lodo de lagunas de oxidación. Además, se evidencia que en la plantación con tierra de sembrado las hojas son más frondosas, al contrario de las otras dos plantaciones.

Es necesario indicar que la altura y frondosidad de la planta no necesariamente es un indicativo para conocer si el sustrato es el adecuado para el crecimiento del tubérculo. Para esta especie, se debe considerar que, si el sustrato utilizado posee un alto contenido de nutrientes, la planta priorizará crecer el tallo y no la raíz provocando que el tubérculo no crezca. En plantaciones de rábanos es importante tener un sustrato con los niveles adecuado de micronutrientes y macronutrientes para propiciar el crecimiento de los tubérculos.

Figura 29

Plantaciones de rábanos con a) tierra de sembrado, b) mezcla 1:1 lodo/tierra y c) lodo.



Nota: Fotografías tomadas el 01/12/2022 (izquierda) y 06/01/2023 (derecha).

Finalmente, se realizó la cosecha de los rábanos en las plantaciones antes mencionadas para evaluar el funcionamiento de los sustratos en esta especie. Se obtuvo una cosecha de 5 rábanos en la plantación con tierra de sembrado, 2 rábanos en la tierra de sembrado utilizando lodo como abono, 2 rábanos en la mezcla 50% lodo/50% tierra y 3 rábanos en la plantación con lodo. Los frutos obtenidos se pueden observar en la figura 25 con su respectiva medida.

Cabe resaltar que no todas las semillas plantadas dieron rábanos como fruto, lo cual no se debe necesariamente al sustrato utilizado. Existen diversos factores que influyen en el crecimiento del tubérculo, por ejemplo, la fertilidad de la semilla, las condiciones climáticas, la periodicidad del riego, la humedad del sustrato, entre otras.

Figura 30

Resultados de la experimentación para la plantación de rábanos.



Nota: Rábanos cosechados de la plantación de a) tierra de sembrado, b) tierra de sembrado con lodo como abono, c) mezcla 50% lodo/50% tierra y d) lodo de laguna de oxidación. Fotografías tomadas el 17/01/2023.

Como se puede en las fotografías antes adjuntas, existen ciertas grietas y particiones en algunos rábanos. Esto se debe a que, en caso de tener un riego inadecuado o desigual durante el crecimiento del tubérculo debajo tierra, el rábano intenta compensar esta sequía absorbiendo gran cantidad de agua, lo cual produce que crezca demasiado el tubérculo y se genere grietas.

Se puede evidenciar que los rábanos cosechados en la plantación con los lodos provenientes de tratamiento de aguas no presentan agrietamiento. Esto es consecuencia de la gran capacidad de retención de agua que presenta este material como sustrato, por esta razón, la plantación se mantenía siempre con el contenido de humedad adecuado para evitar el agrietamiento en el tubérculo.

A continuación, se muestra los resultados obtenidos de la medición de los rábanos cosechados, tanto en longitud como en diámetro:

Tabla 13

Longitudes y diámetros de los rábanos cosechados en diferentes sustratos.

Sustrato utilizado	Longitud del rábano (cm)	Diámetro del rábano (cm)
Tierra de sembrado	5.1	9.7
	5.1	7.4
	4.4	6.2
	3.2	5.1
	3.0	6.3
Tierra de sembrado con lodo como abono	5.5	6.3
	3.4	6
Mezcla 1:1 lodo/tierra	3.8	7.5
	2.6	5.3
Lodo de lagunas de oxidación	3.7	8.4
	2.1	7
	2.5	6.6

En resumen, se evidencia en la tabla 13 que en la tierra de sembrado se obtuvieron tubérculos de mayor tamaño y diámetro, en comparación a las otras plantaciones. De lo contrario, los rábanos con menor tamaño se cosecharon en la plantación con 100% lodo como sustrato.

3.2.2 Resultados para la plantación de flores chabelitas

En esta experimentación se plantó la especie *Catharanthus roseus*, conocida como flores chabelitas. Esta especie se cultiva como planta ornamental y es conocida por su resistencia a condiciones secas y deficiencia de nutrientes. Por esta razón, se decidió emplear esta planta para evaluar el crecimiento de la planta con diferentes sustratos. A diferencia de la experimentación de rábanos y cilantro, en este caso las plantaciones empezaron con plántulas provenientes de una planta “madre”.

A partir del diseño experimental mostrado previamente, se plantó una semilla germinada para cada sustrato: tierra de sembrado, mezcla 50% lodo/50% tierra y lodo de lagunas de oxidación. Adicionalmente, se plantó una semilla germinada en tierra de sembrado y se agregó periódicamente lodo al sustrato con el fin de replicar la forma típica de abonar.

Figura 31

Día 0 de la plantación de flores chabelitas.



Nota: Chabelitas en 100% lodo (a), chabelitas en mezcla 50%lodo/50% tierra de sembrado (b) y chabelitas en tierra de sembrado (c-d). Fotografía tomada el 21/11/2023.

Se observó que, con el paso de los días, la plantación con 100% lodo como sustrato se marchitaba paulatinamente. Como se evidencia en la figura 32 a, la planta perdió 2 hojas después de 4 días y, finalmente, se marchitó por completo al día 7. Se infiere que al sustituir el sustrato con un 100% de lodo, la planta se marchitó debido al alto contenido de sales disueltas; este factor puede influir en la toxicidad del suelo para la planta. Además, la textura del lodo puede desfavorecer el crecimiento de la raíz.

Figura 32

a) Día 4 y b) Día 7 de la experimentación de flores chabelitas.

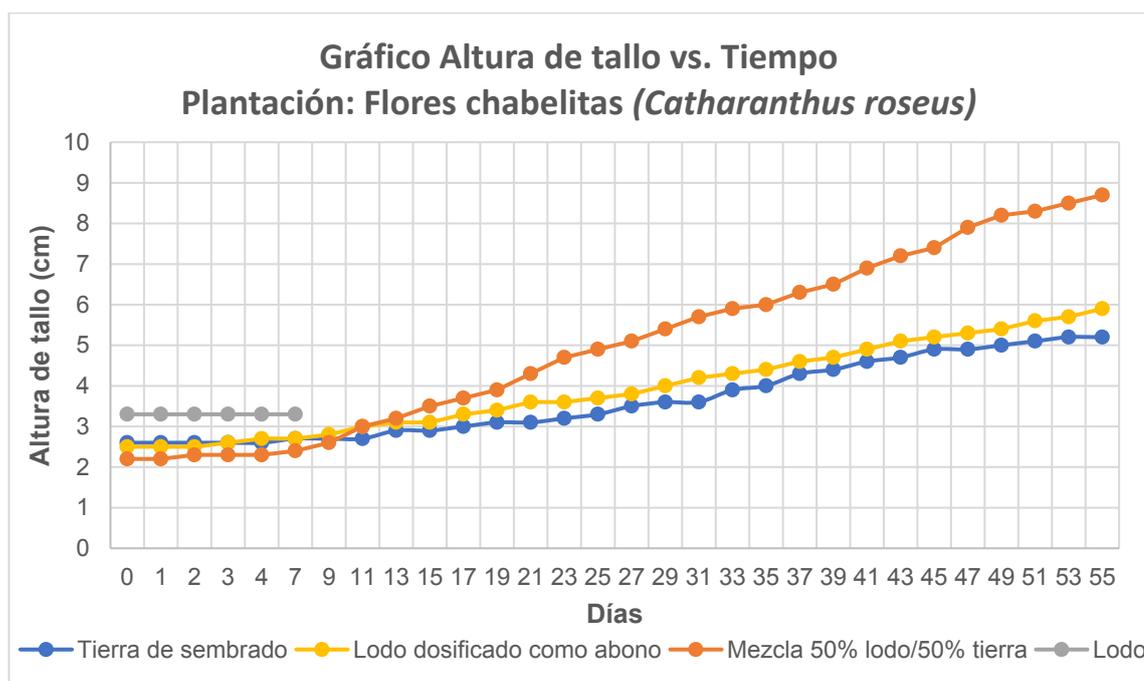


Nota: Maceta con lodo de lagunas de oxidación se encuentra en la parte inferior derecha de cada fotografía. Fotografía tomada el a) 25/11/2022 y b) 28/12/2022.

Además, se tomó datos de la altura de las plantas a diferentes días para evidenciar el crecimiento en cada experimento, según se observa en el Anexo I del Apéndice A. Se presenta el crecimiento de las flores respecto al tiempo a continuación:

Figura 33

Gráfico de altura del tallo respecto al tiempo para la plantación de flores chabelitas con diferentes sustratos.



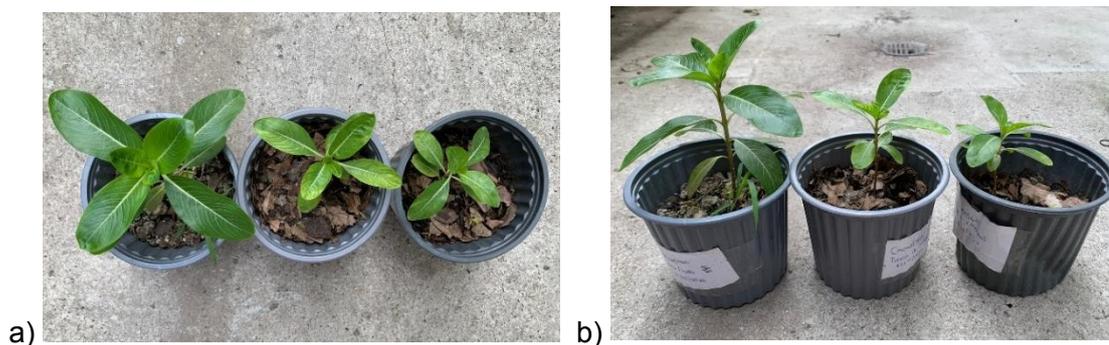
Nota: La medición se realizó desde el nivel del suelo a la terminación del tallo.

En base a esta experimentación, se observó que, al finalizar el período de evaluación de la planta, la maceta con mezcla 50% lodo/50% tierra obtuvo un mayor crecimiento del tallo que las experimentaciones de tierra de sembrado. Por otro lado, la maceta en la que se añadió lodo periódicamente como abono agrícola tuvo un crecimiento mayor que la maceta con tierra de sembrado, la cual es considerada muestra de control.

Además, como se puede observar en la figura 34, la planta con mayor crecimiento en tallo también presenta hojas más grandes que el resto de las plantaciones. Esto es resultado del crecimiento intercalar por aumento del tamaño celular de las plantas, debido a que el lodo contiene una alta carga orgánica y altos niveles de los diferentes micronutrientes y macronutrientes caracterizados en el presente proyecto.

Figura 34

Resultados de la experimentación para la plantación de flores chabelitas.



Nota: Plantación con mezcla lodo/tierra (maceta izquierda), plantación con tierra de sembrado con lodo como abono (maceta central) y plantación con tierra de sembrado (maceta derecha). Fotografía tomada el 06/11/2022.

De estos hallazgos, se puede concluir que, para esta especie, el lodo de lagunas de oxidación es beneficioso para el crecimiento de las plantas ya sea como sustrato mezclándolo con lodo o incluyéndolo en la plantación a modo de abono. Sin embargo, no es posible reemplazar por completo el sustrato ya que puede ser contraproducente para el crecimiento y fortalecimiento de la raíz.

3.2.3 Resultados para la plantación de cilantro

Por último, en esta experimentación se plantaron semillas de la especie *Coriandrum sativum*, comúnmente conocido como cilantro, la cual es una hierba utilizada en diferentes platos gastronómicos. Adicionalmente, el cilantro es utilizado como hierba aromática por sus propiedades antiinflamatorias, antisépticas y su alto contenido de vitamina C y K.

En base al diseño experimental descrito en la sección 2, se replicó el proceso de las otras especies para evaluar la viabilidad del lodo como reemplazo del sustrato con lodo de lagunas de oxidación. Se observó que, en la plantación con lodo de tratamiento de aguas, germinó menor cantidad de semillas de cilantro en comparación a las muestras con los otros sustratos.

Además, como se evidencia en la figura 35, la plantación con lodo como sustrato posee un tono verde más oscuro en comparación a las otras macetas. Esto se debe al elevado contenido de nitrógeno que contiene el lodo de tratamiento de aguas en comparación a lo observado en tierra de sembrado, lo cual propicia la formación de aminoácidos en las plantas. Por ende, la planta produce más clorofila, químico que les proporciona la coloración verde a las plantas.

Figura 35

Comparación de la pigmentación en la plantación de cilantro.



Nota: Plantación con lodo (maceta izquierda) y con tierra de sembrado (maceta derecha).

Fotografía tomada el 30/11/2022.

Sin embargo, posteriormente la plantación de lodo se fue marchitando paulatinamente por las razones explicadas en las secciones 3.2.1 y 3.2.2. Por esta razón, al final de la experimentación se observa que las plantas a la cual se le añadió lodo como sustrato presentaban hojas amarillas y marchitas.

Figura 36

Resultados de la experimentación para la plantación de cilantro.



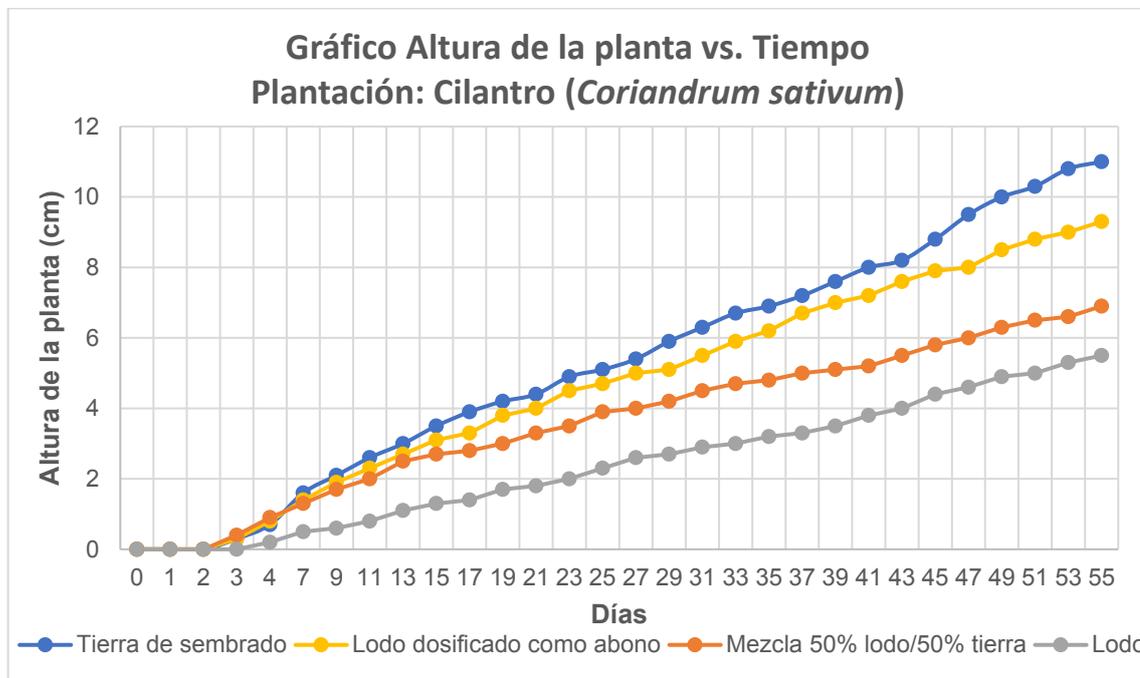
Nota: Plantación con lodo (superior izquierda), mezcla lodo/tierra (superior derecha), tierra de sembrado con lodo como abono (inferior izquierda) y tierra de sembrado (inferior derecha). Fotografía tomada el 06/11/2022.

Respecto al crecimiento de las muestras al pasar los días, se evidencia en la gráfica 37, que la plantación con mayor crecimiento fue la de tierra de sembrado. De lo contrario, la que posee menor altura es la plantación con lodo proveniente de lagunas de oxidación ya que esta planta se fue marchitando paulatinamente.

En esta experimentación, se llega a la conclusión que la adición de lodo en el sustrato de la planta no beneficia al crecimiento y fortalecimiento de ésta. Esto puede ser resultado al contenido de sales disueltas y a la dura textura que posee el lodo, como se explicó anteriormente. Además, se puede inferir una sobredosis de nitrógeno en la planta que puede ser perjudicial para el desarrollo de la especie.

Figura 37

Gráfico de altura de la planta respecto al tiempo para la plantación de cilantro con diferentes sustratos



Nota: La medición de altura se realizó desde el nivel del suelo a la terminación del tallo según el Anexo I del Apéndice A.

3.3 Resultados del diseño de experimentos como material de construcción

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la aplicación de lodo proveniente de lagunas de oxidación como sustituto de arena en material de construcción.

Figura 38

Día 0 de experimentación como material de construcción



Nota: Concentración de lodo en los bloques de izquierda a derecha: 0, 5, 10, 15, 20, 25, 100%

En primer lugar, respecto al método de cocción a altas temperaturas, se evidenciaron diversos cambios físicos en los bloques durante el proceso. La producción de bloques se divide en cinco etapas: secado, deshidratación, oxidación, vitrificación y reducción. Cada una de estas etapas ocurren dentro de un rango de temperaturas.

La etapa más importante es la vitrificación. La arcilla se vitrifica a medida que se aumenta la temperatura y ocurre dentro de un rango de 870 a 1315 °C, permitiéndole volverse más dura. Esto es importante ya que permitirá que los bloques adquieran una mayor resistencia a la compresión y, así, poder soportar mayores cargas.

Figura 39

Proceso de cocción de los bloques a 1000 °C por 1 hora



Como se indicó en el diseño experimental de bloques de construcción, se ingresó un bloque de cada composición dentro de la mufla. Cabe mencionar que se retiró el molde de madera para evitar incendios dentro del equipo, lo cual provocó que algunos bloques se resquebrajen durante el proceso de desmolde.

Durante el proceso de cocción a altas temperaturas, se percibió un olor a quemado a los 600 °C por lo que se procedió a revisar el equipo y se percató que el bloque de 100% lodo se estaba quemando, como se observa en la figura 40. Por esta razón, fue sacado de inmediato del equipo y se continuó con el procedimiento con los bloques restantes. Al momento de retirar este bloque de la mufla, se deshizo por completo; es decir, no resistió la cocción a alta temperatura.

Figura 40

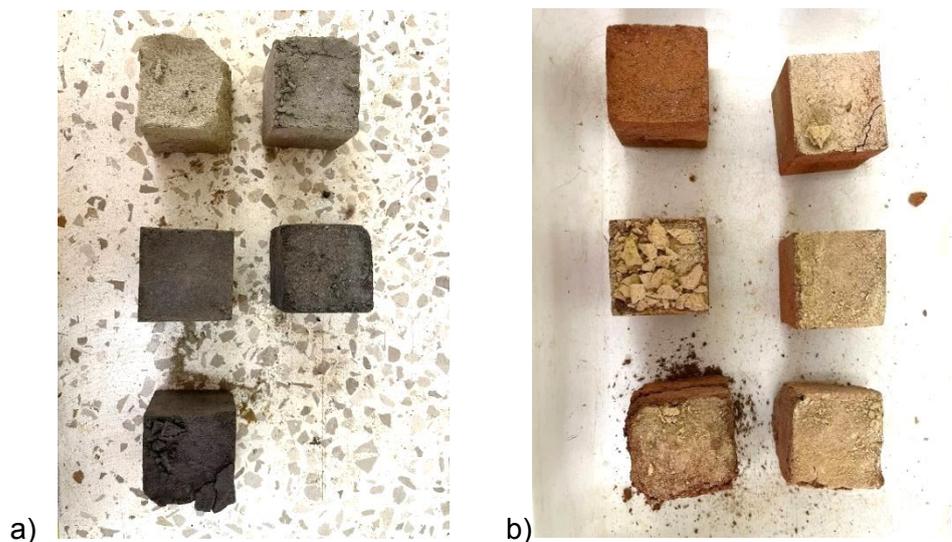
Bloque de 100% lodo luego de ser sometido a 600 °C



Luego del tiempo establecido dentro de la mufla, los bloques fueron retirados y se observó un cambio de color de los cubos de gris oscuro a color ladrillo, como se observa en la figura 41. Este cambio de color se debe a la exposición de la arcilla a altas temperaturas. El cambio de coloración en arcillas se da por óxidos que normalmente se encuentran en las arcillas. Esta reacción de oxidación ocurre a temperaturas entre 350 y 650 °C. La principal razón del cambio a coloración roja es la oxidación del hierro en óxido ferroso.

Figura 41

Cambio de color de los bloques a) antes y b) después de la cocción a 1000 °C



Nota: Composición en peso de lodo del 0% (superior izquierda), 5% (superior derecha), 10% (central izquierda), 15% (central derecha), 20% (inferior izquierda) y 25% (inferior derecha).

Se observa en la figura 41 a) la ausencia del bloque con composición de 25% lodo y 85% arcilla, esto se debe a que el mismo se quebró durante el proceso de desmolde por su consistencia frágil. Por esta razón, no fue posible la evaluación de este bloque en pruebas de resistencia a la compresión.

Durante la inspección de los bloques posterior al proceso de cocción, se evidenció que algunos de los cubos sometidos a cocción a altas temperaturas presentaron grietas en la superficie. Los bloques con composición de 0% y 5% lodo no presentaron grietas. Se observó que los bloques con 10 y 15% lodo tenían pocas grietas pequeñas, de lo contrario, los bloques con 20% y 25% estaban resquebrajados y frágiles al tacto. Esto se puede evidenciar en la figura 41.

Figura 42

Bloques de arcilla luego de la cocción a altas temperaturas



Nota: Los bloques más cercanos a la cámara poseen mayor composición de lodo.

Respecto al método de secado al sol, los bloques fueron sometidos a condiciones normales de aire y temperatura por un período de 7 días. Cabe mencionar que, comúnmente, los bloques son secados al sol por 28 días; sin embargo, en nuestra experimentación no fue posible por la limitación de tiempo. Posteriormente, los bloques fueron desmoldados para someter los mismos a pruebas de compresión.

Figura 43

Bloques de arcilla y lodo secados a sol



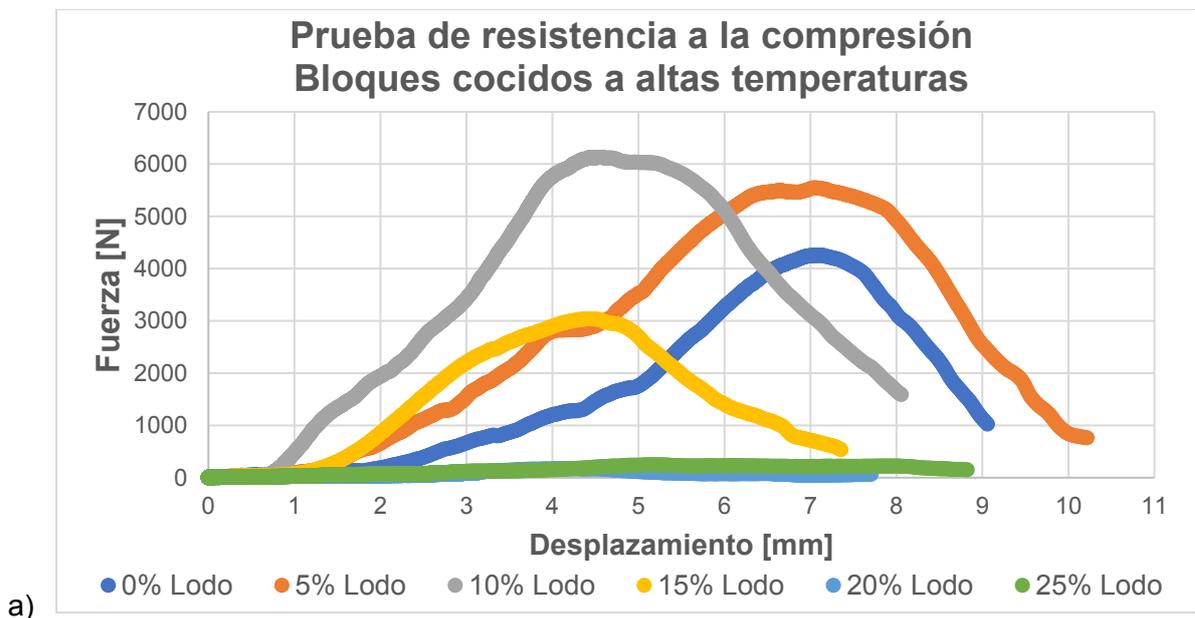
Nota: Aumento de composición de lodo de izquierda a derecha: 0, 5, 10, 15, 20, 25, 100%

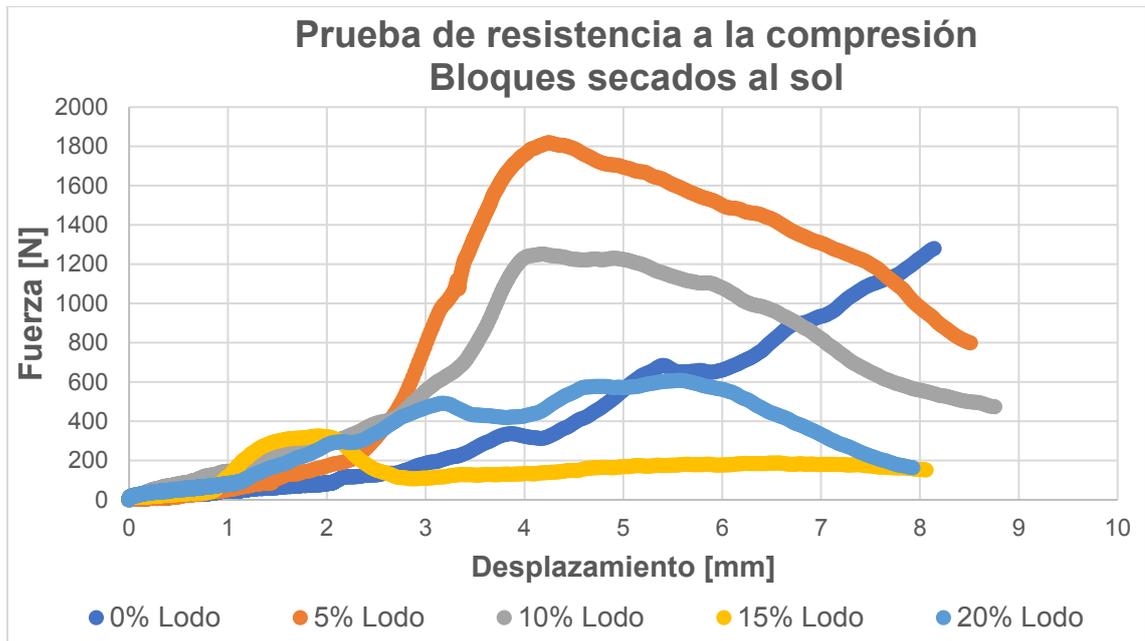
Durante esta experimentación, los moldes donde se encontraba la mezcla de arcilla/lodo no fueron engrasados previamente. Por esta razón, al momento de desmoldar los bloques, algunos de estos se pegaron en los laterales provocando el resquebrajamiento de ciertos cubos. A pesar de esto, se sometieron todos los bloques a las pruebas de compresión utilizando la prensa hidráulica.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la fuerza ejercida en el bloque respecto al desplazamiento de los bloques cocidos a altas temperaturas y secados al sol, con sus diferentes composiciones, respectivamente. El punto máximo de las curvas corresponde a la compresión máxima que es capaz de soportar el material.

Figura 44

Gráfica Fuerza vs. Desplazamiento para bloques a) cocidos a altas temperaturas y b) secados al sol





b)

Se evidencia en la figura 44 a) que el cubo al cual se le aplicó mayor fuerza para la compresión es aquel que contiene 10% lodo y 90% arcilla. Además, el bloque con 5% lodo también presenta un aumento de la resistencia a la compresión en comparación a la muestra de control, bloque de 0% lodo. Cabe resaltar que no se logró realizar las pruebas de compresión a la muestra de 100% lodo ya que se incineró durante el proceso de cocción.

Por otro lado, los bloques de 20% y 25% lodo se resquebrajaron fácilmente al aplicarle una fuerza mucho menor a los otros bloques, lo cual se evidencia en la gráfica como una curva casi recta. Esto se debe a que, como se presentó en la caracterización fisicoquímica, la clase textural del lodo es arenoso franco con un 84.79% de arena en su composición. En la elaboración de materiales de construcción, la adición de arenas en gran proporción disminuye la resistencia a la compresión en bloques de arcilla y aumenta el agrietamiento en la superficie durante el proceso de cocción, tal como se evidencia en la figura 42.

Respecto a la figura 44 b), el bloque secado al sol que contiene 5% lodo y 95% arcilla fue al que se le aplicó mayor fuerza para su compresión. Se observa que la curva azul, la cual representa la muestra de control, presenta una tendencia ascendente porque no se logró obtener el valor máximo de fuerza para la compresión. Esto se debe a que el bloque no presentaba un área uniforme en la parte superior del cubo ya que se resquebrajó durante el proceso de desmolde. Por esta razón, los sensores de la prensa hidráulica detuvieron el procedimiento sin lograr determinar el valor máximo.

Además, se observa que el aumento de arenas en la composición del bloque disminuye la resistencia a la compresión en el material, como fue explicado anteriormente. Sin embargo, el bloque que contiene 15% lodo presentó una menor resistencia a la compresión que el bloque con 20% lodo. Esto fue producto a que el primero no se compactó correctamente en el molde durante el proceso de elaboración, por tanto, no presentaba un volumen uniforme.

A continuación, se presenta un resumen de los valores máximos de compresión en los diferentes bloques:

Tabla 14

Valores de máxima compresión de los bloques de lodo y arcilla

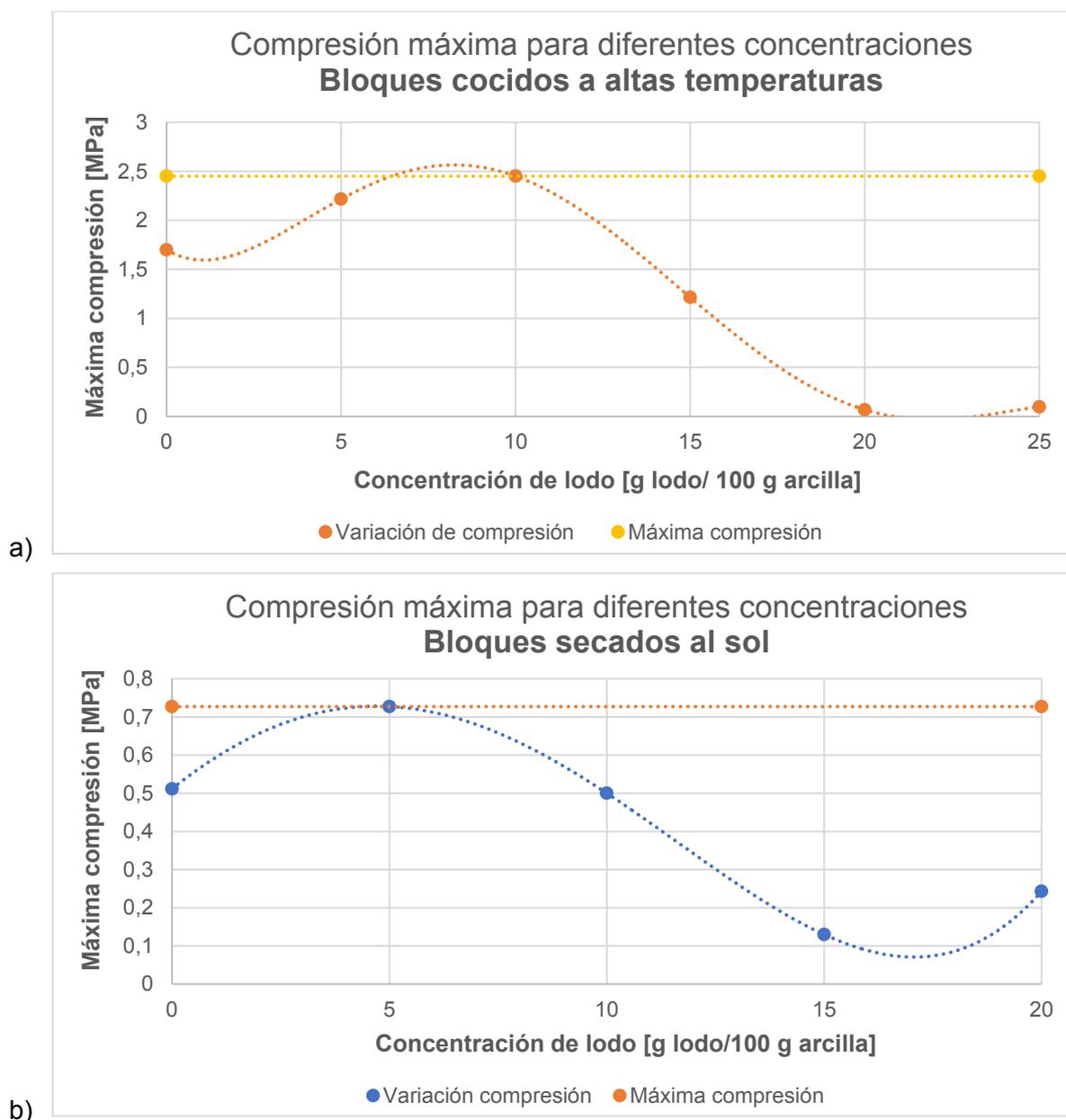
	Bloques cocidos a 1000 °C	Bloques secados al sol
Composición	Compresión máxima (MPa)	Compresión máxima (MPa)
0% lodo	1.70031	0.51155
5% lodo	2.21691	0.72721
10% lodo	2.45066	0.50017
15% lodo	1.21473	0.12967
20% lodo	0.06806	0.24303
25% lodo	0.09750	-

Se evidencia que los bloques cocidos a altas temperaturas aumentan la resistencia a la compresión en comparación a los bloques secados al sol, a excepción del bloque con 20% lodo. Se evidenció que, a mayor concentración de lodos, el bloque se volvía

frágil durante la cocción a altas temperaturas. Adicionalmente, no se tiene datos del bloque de 25% secado al sol ya que el mismo se deshizo al momento de sacarlo del molde. A su vez, durante la prueba de compresión, se percató que los bloques secados al sol aún se encontraban húmedos en el interior. Por lo tanto, este es otro factor que influye en la disminución de la resistencia a la compresión.

Figura 45

Valores de compresión máxima para diferentes concentraciones de lodo



Finalmente, en las figuras 45 a) y b) se muestra la variación de la compresión máxima de los bloques según la composición de lodo en los dos métodos evaluados, respectivamente. De esta manera, se determina que los bloques de arcilla cocidos a altas temperaturas representan una mejor opción que los secados al sol en términos de compresión máxima.

Sin embargo, cabe indicar que los valores de compresión máxima determinados en los bloques no son los indicados para utilizar el material de lodo/arcilla con fines estructurales, más bien puede ser utilizado en piezas ornamentales como jarrones, maceteros, entre otros.

3.4 Análisis económico

3.4.1 Abono agrícola

Se tomó en consideración aspectos tales como la mano de obra necesaria, los insumos, tasas de interés, materia prima, entre otros. Se considera la presencia de dos operarios, encargados de colocar el lodo en sacos una vez lleguen al lecho de secado. El salario para los colaboradores se asume el salario básico actual en Ecuador (\$450.00). Así mismo, la única materia prima necesaria es el lodo, por lo que no se necesitará presupuesto para adquirirla ya que es un subproducto.

Se consideran como costos de operación variables el consumo de agua al igual que insumos tales como mascarillas, guantes, overoles y botas. Con estas consideraciones, un capital de trabajo durante el año 1 de \$12,587.60 será necesario. Los costos de producción detallados para cada año hasta el año 10 se explican detalladamente en el anexo I del apéndice B.

Tabla 15*Detalle de costos fijos y variables*

Tipo	Material	Cantidad	Unidad	Costo unitario	Total anual
Costos fijos	Bolsa propileno 25 kg	2800	fundas/año	\$ 0.13	\$ 364.00
	Análisis químico	8	análisis/año	\$ 45.00	\$ 360.00
	Lodo	84000	kg/año	\$ 0.00	\$ 0.00
	Salario	2	\$/año	\$ 450.00	\$ 10,800.00
Costos variables	Pala	3	pala/año	\$ 14.00	\$ 42.00
	Overol	3	UND/año	\$ 30.00	\$ 90.00
	Mascarillas industriales	5	UND/año	\$ 60.00	\$ 300.00
	Botas industriales	3	UND	\$ 70.00	\$ 210.00
	Guantes	8	PAR	\$ 5.00	\$ 40.00

Tabla 16*Capital de trabajo para el primer año de producción*

Capital de Trabajo [Año 1]	
Descripción	Total
Material directo	\$ 11,524.00
Costos indirectos	\$ 640.00
Administrativos	\$ -
Servicios	\$ 381.60
Capital Anual	\$ 12,587.60

Asumiendo que sólo el 70% del material recogido de las lagunas es aprovechable como abono en agricultura, se estima tener una producción de aproximadamente 1000 fundas de 25 kg al año. Se estima también que las ventas incrementarán en un 5% anualmente, favoreciendo el negocio. El precio recomendado para producción se calculó en base a los costos de producción y las unidades de venta establecidas con anterioridad, obteniendo así un precio recomendado de \$4.77 para una funda de 25 kg de lodos. En el mercado ecuatoriano, un quintal de abono a base de urea ha llegado

a costar \$55 en enero del 2022 (Orozco, 2022). Con la aplicación de los lodos como sustituto o complemento de la aplicación de este tipo de fertilizantes, los agricultores podrían ahorrar aproximadamente \$9.00 por cada 25 kg comprado.

Sin embargo, \$4.77 es el precio recomendado para un saco de 25 kg (0.19 \$/kg) como se mencionó previamente. Se estima aumentar el precio a 0.2 \$/kg. Con la inflación creciente a lo largo de los años, este precio de venta podría incrementarse a 0.3 \$/kg.

Tabla 17

Datos de la inversión

Inversión	\$12,587.60
VAN	\$45.963,88
TIR	26%
Payback [años]	0,00

Con estos costos y ventas estimados, se puede obtener un payback en años de 0. Esto debido a que a inversión necesaria es mínima en comparación a las posibles ganancias que se pueden obtener de esta alternativa

3.4.2 Material de construcción

Para el análisis económico del material de construcción, se estimaron los costos de los equipos necesarios para la elaboración y cocción del material. Los costos y especificaciones de cantidad para cada uno de los equipos se detallan en la tabla 18.

Tabla 18

Costo total de maquinaria y equipo necesario para elaboración de bloques

Maquinaria y Equipo			
Descripción	Cantidad	Costo Unitario	Total
<i>Trituradora</i>	1	9000	\$ 9.000,00
<i>Tamiz</i>	1	3500	\$ 3.500,00
<i>Cortadora</i>	1	1000	\$ 1.000,00
<i>Horno</i>	2	5000	\$ 10.000,00
TOTAL			\$ 23.500,00

A partir de las pruebas de compresión, se determinó que la concentración que más favorece a este tipo de material propuesto es la de 10% lodo, 90% arcilla. Para esto, se consideraron bloques para la venta con dimensiones de aproximadamente 5cm x 2.5cm x 12cm. Se estima que se obtendrá una producción mensual de aproximadamente 150 mil bloques, para lo cual se debe considerar el costo del combustible para el funcionamiento del horno, arcilla, entre otros insumos detallados en la tabla 19.

Tabla 19

Detalle de costos fijos, variables y servicios

Tipo	Material	Cantidad	Unidad	Costo unitario	Total mensual
Costos fijos	Masa GLP	1100	kg	\$ 0.95	\$ 1,045.00
	Masa arcilla	27000	kg	\$ 2.00	\$ 54,000.00
	Lodo	3000	kg	\$ 0.00	\$ 0.00
	Sueldos	2	\$/mes	\$ 450.00	\$ 900,00.00
Costos variables	Overol	2	UND	\$ 30.00	\$ 60.00
	Mascarillas industriales	2	UND	\$ 60.00	\$ 120.00
	Botas industriales	2	UND	\$ 70.00	\$ 140.00
	Guantes	4	PAR	\$ 5.00	\$ 20.00
Servicios básicos	Agua	300	m ³	\$ 1.06	\$ 318.00
	Luz	15000	kWh	\$ 0.09	\$ 1,350.00

Considerando los gastos previamente mencionados, para llevar a cabo la idea de implementación se necesitará un capital de trabajo de aproximadamente \$691,696.00 para el primer año, esto dando como resultado una producción de 1.75M de bloques durante ese período. Al igual que en el caso anterior, se estima que la producción aumentará en un 5% anualmente.

Tabla 20*Capital de trabajo para el primer año de producción*

Capital de Trabajo [Año 1]	
Descripción	Total
Material directo	\$ 671,340.00
Costos indirectos	\$ 340.00
Administrativos	\$ ---
Servicios	\$ 20,016.00
Capital Anual	\$ 691,696.00

El precio recomendado de venta para poder recuperar la inversión es de \$0.39. Para objeto de este análisis, el precio unitario seleccionado será de \$0.4. En el mercado, los bloques de arcilla de dimensiones 10x20x40 cm tienen un precio unitario de \$0.32, por lo que la competencia de venta será compleja. Adicionalmente, considerando la inflación el precio de venta podría aumentar hasta \$0.62 por unidad.

Analizando la inversión, se obtuvieron los siguientes datos

Tabla 21*Datos de la inversión*

Inversión	\$ 691,696.00
VAN	\$ 7'106,420.65
TIR	108%
Payback [años]	0,63

A partir del estudio, se obtuvo como resultado que se puede tener un payback o recuperar la inversión en 0.63 años. Sin embargo, la producción tendría que ser excesiva, y los costos muy altos considerando el tamaño del producto. Además, el producto se promocionaría como un bloque para uso ornamental debido a su relativamente baja resistencia a la compresión, por lo que su limitado uso representa una desventaja al momento de insertarlo en el mercado.

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

En el presente proyecto se logró analizar la aplicación de los lodos provenientes de lagunas de oxidación en diferentes procesos, como abono agrícola y material de construcción.

Se examinó la composición de los lodos de tratamiento de aguas a partir de técnicas de caracterización donde se determinó que poseen un contenido de materia orgánica del 18% y altos niveles de micronutrientes y macronutrientes. Se determinó una alta salinidad y conductividad eléctrica de 3.3 mS/cm, afectando la aplicación como abono agrícola. Además, se determinó un contenido de calcio de 5.71% en los lodos lo cual influye en la elaboración de bloques de construcción.

Respecto a la aplicación como abono agrícola, se concluye que la reinserción de los lodos al 100% como sustrato de las plantas no es una opción viable para las especies evaluadas. La composición óptima en plantas ornamentales, como flores chabelitas, es de 50% lodo y 50% tierra de sembrado. En especies como rábanos y cilantro, se determinó que el lodo puede ser dosificado como abono periódicamente dentro de la plantación.

Por otro lado, se determinó que es posible la utilización de lodos provenientes de lagunas de oxidación para la elaboración de bloques de arcilla. La composición óptima en los bloques es de 10% lodo y 90% arcilla mediante el método de cocción a altas temperaturas. De esta forma, se incrementó la resistencia a la compresión en un 144% en comparación con la muestra de control.

Finalmente, se realizó un estudio económico donde se determinó que, entre ambas opciones, el abono agrícola presenta una mejor viabilidad económica. Debido a que

requiere de menos materiales, conllevando una menor inversión y costos de producción. A su vez, puede posicionarse en el mercado de la agricultura y competir con los precios existentes de fertilizantes a base de urea.

Por otro lado, respecto al material de construcción, se tomó como base la forma tradicional para elaborar bloques, la cual requiere de personas y tiempo. Debido al alto costo que esto conlleva, para temas de este estudio la alternativa no es viable. Con la instalación de nuevas tecnologías para la elaboración de bloques, la eficiencia en la producción podría incrementar generando mayores ganancias.

4.2 Recomendaciones

- Es recomendable realizar análisis microbiológico al lodo de lagunas de oxidación con el fin de conocer posibles patógenos presentes y, así, evaluar la posibilidad de utilizar este lodo en plantaciones comestibles.
- Al momento de plantar las especies en la experimentación de 100% lodo, no se debe compactar el suelo alrededor de la planta para evitar que se marchite por no tener suficiente espacio para echar raíces.
- En la plantación de rábanos, es recomendable implementar un sistema de riego por goteo para mantener el suelo húmedo y evitar grietas en el tubérculo.
- Es recomendable propiciar condiciones adecuadas de humedad y exposición al sol a las plantas para el crecimiento de las especies.
- Respecto al diseño experimental de material de construcción, se recomienda compactar bien los bloques para evitar agrietamiento en la superficie durante el proceso de secado al sol.
- Es recomendable esperar un período de enfriamiento después de la cocción de los bloques con el fin de evitar que los mismos se rompan luego de ser sometidos a altas temperaturas.

- Se recomienda engrasar los moldes antes de agregar la mezcla de lodo/arcilla para realizar el material de construcción, con el fin de evitar resquebrajamiento en los bloques al momento de desmoldar.
- Se recomienda utilizar un utensilio adecuado para compactar la mezcla de lodo/arcilla dentro de los bloques con el fin de obtener un volumen uniforme en el cubo.
- Es recomendable esperar el período de 28 días para el proceso de secado al sol de los bloques de lodo/arcilla con el fin de asegurarse que la mezcla esté completamente seca.
- Se recomienda someter los bloques de arcilla y lodo a pruebas de sumersión en agua por un período de 7 días para determinar la permeabilidad de los cubos dependiendo de la composición.
- Se recomienda utilizar los lodos de tratamientos de aguas como material de construcción utilizando otros aglutinantes para la producción de cemento u hormigón y evaluar su desempeño como agregado.

BIBLIOGRAFÍA

- Ahmad, T., Ahmad, K. & Alam, M. (2018). *Investigating calcined filter backwash solids as supplementary cementitious material for recycling in construction practices*. *Construction and Building Materials*, 175, 664-671. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.227>
- Basta, N. T. & Dayton, E. A. (2001, enero). *Characterization of Drinking Water Treatment Residuals for Use as a Soil Substitute*. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/11790194_Characterization_of_Drinking_Water_Treatment_Residuals_for_Use_as_a_Soil_Substitute
- Bowles E, Joseph. *Manual de Laboratorio de Suelos e Ingeniería Civil*. México, Editorial Mc Graw-hill ,1985
- Calvacante-da Silva, C.F., Barreto-Monteiro, E.C., Duarte-Gusmao, A. (2011). *Análisis de métodos de prevención de la reacción de álcali-agregado: análisis petrográfico y método acelerado para barras de mortero*.
- Cámara de Industrial y Producción (CIP). (Sin fecha). *Norma de Calidad Ambiental del Recurso Suelo y Criterios de Remediación para Suelos Contaminados*. Recuperado de: <https://www.cip.org.ec/attachments/article/450/ANEXO%20%20SUELO.pdf>
- Ciancaglini, N. Not dated. *Guía para determinación de textura de suelos por método organoléptico*. Estación Experimental Agropecuaria San Juan. Recuperado de: [http://www.prosap.gov.ar/Docs/INSTRUCTIVO%20\(R-001\)-%20Gu%C3%ADa%20para%20la%20determinaci%C3%B3n%20de%20textura%20de%20suelos%20por%20m%C3%A9todo%20organol%C3%A9ptico.pdf](http://www.prosap.gov.ar/Docs/INSTRUCTIVO%20(R-001)-%20Gu%C3%ADa%20para%20la%20determinaci%C3%B3n%20de%20textura%20de%20suelos%20por%20m%C3%A9todo%20organol%C3%A9ptico.pdf)
- Cherlynka, Vasil. (2022). *Deficiencia de Nitrógeno en las plantas: Cómo Repararlo*. EOS Data Analytics. Recuperado de: <https://eos.com/es/blog/deficiencia-de-nitrogeno-en-las-plantas/#:~:text=La%20falta%20de%20nitr%C3%B3geno%20est%C3%A1,debido%20al%20exceso%20de%20agua>.

- Clark, John W., Viessman, Warren. & Hammer, Mark J. (1971). *Water supply and pollution control*.
- Dhir, R.K., Ghataora, G.S., Lynn, C.J. (2017). *Sewage sludge ash characteristics. Sustainable Construction Materials*. Woodhead Publishing, pp. 111-158
- Doran, J.W., and Parkin, T.B. (1996). *Quantitative Indicators of Soil Quality: A Minimum Data Set*. In *Methods for Assessing Soil Quality*. Soil Sci. Soc. Am. J. Spec. Publ. 49, J.W. Doran and A.J. Jones (Eds.), Soil Sci. Soc. Am., Madison, Wis.
- European Commission. (2002). *Disposal and Recycling Routes for Sewage Sludge part 4 – Economic Report*. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg. ISBN 92-894-1801-X. Recuperado de: https://ec.europa.eu/environment/archives/waste/sludge/pdf/sludge_disposal4.pdf
- Foladori, P., Andreottola, G. & Ziglio, G. (2010). *Sludge Reduction Technologies in Wastewater Treatment Plants*. IWA Publishing Ltd, London, UK. ISBN13: 9781843392781.
- He, J., Chen, Z., Dougherty, M., Hu, S., & Zuo, X. (2021). *Explore the sludge stabilization process in sludge drying bed by modeling study from mesocosm experiments*. *Environmental Research*, 195, 110837. doi:10.1016/j.envres.2021.110837
- Hussein K.A., Hassan A.F., E.S. Abdel-Hady. (2010). *Study of sewage sludge use in agriculture and its effect on plant and soil*. *Agriculture and biology journal of North America*. doi:10.5251/abjna.2010.1.5.1044.1049
- Iticescu, L.P., Georgescu, G.M., et. Al. (2018). *The characteristics of sewage sludge used on agricultural lands*. AIP Conference Hearings; <https://doi.org/10.1063/1.5060680>
- Keeley, J., Jarvis, P., Judd, S. (2014). *Coagulant Recovery from Water Treatment Residuals: A Review of Applicable Technologies*. Taylor & Francis Online. <https://doi.org/10.1080/10643389.2013.829766>
- Köfalusi, G., Aguilar, G. (2006). *Los productos y los impactos de la descomposición de residuos sólidos urbanos en los sitios de disposición*

- final*. Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental. Gaceta Ecológica 79, pp 39-51
- Leslaw, S., Bartłomiej, M., Piotr, K. (2018). *The potential of raw sewage sludge in construction industry – A review*. Journal of Cleaner Production. Pp. 342 – 356.
- Liu, Y., Zhuge, Y., Chow, C. W. K., Keegan, A., Li, D., Pham, P. N., Huang, J. & Siddique, R. (2020, 19 marzo). *Properties and microstructure of concrete blocks incorporating drinking water treatment sludge exposed to early-age carbonation curing*. ScienceDirect. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620313044>
- Metcalf & Eddy Inc., Tchobanoglous, G., Burton, F. L., Tsuchihashi, R., & Stensel, H. D. (2003). *Wastewater engineering: Treatment and resource recovery* (5th ed.). McGraw-Hill Professional
- Metcalf & Eddy. (1995). *Ingeniería de Aguas Residuales* (3era edición), Volumen II. McGraw-Hill Education.
- Nguyen, M. D., Thomas, M., Surapaneni, A., Moon, E. M. & Milne, N. A. (2022). *Beneficial reuse of water treatment sludge in the context of circular economy*. Environmental Technology & Innovation, 28, 102651. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102651>
- Patel, J. (2018). *4-Step Wastewater Sludge Treatment Process*. Water Online. <https://www.wateronline.com/doc/step-wastewater-sludge-treatment-process-0001>
- Rodríguez, W. (2019). *Fundamentos de Ingeniería Geotecnia: Suelos y Cimentaciones*. Pp 26 – 36. Recuperado de: https://www.academia.edu/38931233/INGENIER%C3%8DA_GEOT%C3%89CNICA_2019_Suelos_y_Cimentaciones_LIBRO
- Sharma, L., Sarangthem, I., et. Al. (2021). *Sewage Sludge and Its Health Risk Assessment: Opportunities and Challenges*. ResearchGate. DOI: [10.1007/978-3-030-85226-9_10](https://doi.org/10.1007/978-3-030-85226-9_10)
- SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2002. *Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT que establece la protección*

- ambiental, lodos y biosólidos, especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento.* México, D. F.
- Sonune, A. & Ghate, R. (2004). *Developments in wastewater treatment methods.* *Desalination*, 167, 55-63. <https://doi.org/10.1016/3.desal.2004.06.113>
- Topare, N., Attar, S. & Manfe, M. (2011). *Sewage/Wastewater treatment technologies: A review.* *Scientific Reviews & Chemical Communications*, 1, 18-24.
- Yusuff, S.M., Khim, O.L., Yunus, W., Fitrianto, A., Ahmad, M., et. al. (2018). *Carbon dioxide sorption isotherm and kinetics by alum sludge.* *Materials Today: Proceedings*. Volume 5, Issue 10, Part 2. Pages 21948-21955. ISSN 2214-7853. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.07.055>.

APÉNDICES

APÉNDICE A

Anexo I. Ejemplificación de medida para las plantaciones de rábanos, flores chabelitas y cilantro.



Nota: La medición se realizó desde el nivel del suelo a la terminación del tallo. Fotografía tomada el 29/01/2023.

Anexo II. Análisis de muestras de suelo

Reporte Técnico No 172-LABSYNV-2022

ANÁLISIS DE 2 MUESTRAS DE SUELO

Elaborado por:

Laboratorio de Suelos y Nutrición Vegetal

Dr. Eduardo Chávez Navarrete

Dra. Martha Hidalgo L.

Ing. Elías García

Ing. Valeria Moreira

Diciembre, 2022



REPORTE DE RESULTADOS DE ANÁLISIS TÉCNICO

CLIENTE:	JENNIFER PITA
DIRECCIÓN CLIENTE:	
SOLICITADO POR:	Jennifer Pita
TIPO DE MUESTRA:	Suelo
ANÁLISIS SOLICITADO:	Completo
NÚMERO DE MUESTRAS:	2
IDENTIFICACIÓN DE MUESTRAS:	Suelo
# ORDEN DE TRABAJO	LSYNV-186-2022
FECHA DE ANÁLISIS:	1-Diciembre-2022

PARÁMETRO	MÉTODO
pH	agua:suelo (5:1)
CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA	agua:suelo (5:1)
NITRÓGENO TOTAL Y MATERIA ORGÁNICA	Analizador Automático C/N
DETERMINACIÓN DE MACRO, MICROELEMENTOS Y METALES PESADOS MEDIANTE ICP-OES	Agua Regia

Nota: Los resultados corresponden únicamente a las muestras analizadas por el laboratorio.

1) Textura

NOMBRE MUESTRA	Arena %	Arcilla %	Limo %	Clase Textural
Laguna de Oxidación	84,79	9,22	5,99	Arenoso Franco

2) Características Físico Química:

Nombre Muestra	pH	EC mS/cm	Salinidad psu	CICe (cmol/kg)
Laguna de Oxidación	7,5	3,3	1,65	42,9
Tierra de sembrado	7,5	382,0*	0,190	37,2

EC= Conductividad Eléctrica
CICe= Capacidad de Intercambio Catiónico efectiva
* = uS/cm



Nombre Muestra	N %	C %	C:N	Mat. Org. %
Laguna de Oxidación	0,87	10,22	11,79	17,58
Tierra de sembrado	0,35	5,17	14,58	8,90

N= Nitrógeno; C= Carbón; C: N= Relación carbón nitrógeno; Mat. Org.= Materia Orgánica

3) Macro elementos

Nombre Muestra	Ca %	Mg %	K %	P %
Laguna de Oxidación	5,71	0,57	0,23	0,45
Tierra de sembrado	0,91	0,88	0,30	0,04

Macroelementos:
Ca = Calcio, Mg= Magnesio,
K= Potasio, P = Fósforo
BLD= Bajo límite de detección

4) Micro elementos

Nombre Muestra	Fe mg kg ⁻¹	B mg kg ⁻¹	Zn mg kg ⁻¹	Co mg kg ⁻¹	Ni mg kg ⁻¹
Laguna de Oxidación	7718,6	90,3	414,9	3,5	10,2
Tierra de sembrado	13460,1	114,4	49,1	11,8	31,5

Nombre Muestra	Mn mg kg ⁻¹	Cu mg kg ⁻¹	Na mg kg ⁻¹	Mo mg kg ⁻¹	S mg kg ⁻¹
Laguna de Oxidación	184,5	170,1	3041,4	BLD	5156,8
Tierra de sembrado	438,1	48,7	892,0	BLD	392,1

Microelementos:
B= Boro; Fe= Hierro; Zn = Zinc; Co= Cobalto
Mn = Manganeso, Cu= Cobre; Ni= Niquel; Na= Sodio
Mo= Molibdeno; S= Azufre
mg Kg⁻¹ = miligramo/Kilogramo
BLD= Bajo límite de detección

5) Metales Pesados

Nombre Muestra	Al %	Pb mg kg ⁻¹	Cd mg kg ⁻¹	Cr mg kg ⁻¹
Laguna de Oxidación	1,47	BLD	2,2	21,8
Tierra de sembrado	2,27	BLD	BLD	35,0

Metales Pesados:
Al= Aluminio; Pb= Plomo,
Cd = Cadmio; Cr = Cromo;
mg Kg⁻¹ = miligramo/Kilogramo
BLD= Bajo límite de detección



FIRMA DE APROBACIÓN



Dr. Eduardo Chávez Navarrete

Jefe de Laboratorio de Suelos y Nutrición Vegetal

Preguntas, comentarios o sugerencias contactarse con: Dra. Martha Hidalgo
Laboratorio de Suelos – ESPOL, Km 30.5 Vía Perimetral - Campus Gustavo Galindo, Facultad de Ciencias de la Vida
(FCV) Edificio 12 K (Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción, atrás del edificio STEM)
Correos electrónicos jhsuelos@espol.edu.ec; mahidal@espol.edu.ec; Página Web: www.espol.edu.ec



APÉNDICE B

Anexo I. Flujo de caja para el abono agrícola

Descripción	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
Ingresos											
Ventas proyectadas		\$13.200,00	\$14.277,12	\$15.419,29	\$16.629,99	\$17.912,87	\$19.271,78	\$20.710,74	\$22.233,98	\$23.845,95	\$25.551,29
Total de ingresos		\$13.200,00	\$14.277,12	\$15.419,29	\$16.629,99	\$17.912,87	\$19.271,78	\$20.710,74	\$22.233,98	\$23.845,95	\$25.551,29
Egresos operacionales											
Gastos de operación		\$12.587,60	\$12.587,60	\$12.587,60	\$12.587,60	\$12.587,60	\$12.587,60	\$12.587,60	\$12.587,60	\$12.587,60	\$12.587,60
Total egresos operacionales		\$12.587,60									
Gastos no operacionales											
Imprevistos		\$300,00	\$300,00	\$300,00	\$300,00	\$300,00	\$300,00	\$300,00	\$300,00	\$300,00	\$300,00
Total egresos no operacionales		\$300,00									
Total egresos		\$12.887,60									
Beneficio neto	\$12.587,60	\$312,40	\$1.389,52	\$2.531,69	\$3.742,39	\$5.025,27	\$6.384,18	\$7.823,14	\$9.346,38	\$10.958,35	\$12.663,69

Anexo II. Flujo de caja para el material de construcción

Descripción	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
Ingresos											
Ventas proyectadas		\$703.968,00	\$776.124,72	\$855.677,50	\$943.384,45	\$1.040.081,35	\$1.146.689,69	\$1.264.225,39	\$1.393.808,49	\$1.536.673,86	\$1.694.182,93
Total de ingresos		\$703.968,00	\$776.124,72	\$855.677,50	\$943.384,45	\$1.040.081,35	\$1.146.689,69	\$1.264.225,39	\$1.393.808,49	\$1.536.673,86	\$1.694.182,93
Egresos operacionales											
Gastos de operación		\$2.350,00	\$1.327,00	\$1.327,00	\$1.327,00	\$1.327,00	\$1.327,00	\$1.327,00	\$1.327,00	\$1.327,00	\$1.327,00
Total egresos operacionales		\$2.350,00	\$1.327,00	\$1.327,00	\$1.327,00	\$1.327,00	\$1.327,00	\$1.327,00	\$1.327,00	\$1.327,00	\$1.327,00
Gastos no operacionales											
Imprevistos		\$300,00	\$300,00	\$300,00	\$300,00	\$300,00	\$300,00	\$300,00	\$300,00	\$300,00	\$300,00
Total egresos no operacionales		\$300,00	\$300,00	\$300,00	\$300,00	\$300,00	\$300,00	\$300,00	\$300,00	\$300,00	\$300,00
Total egresos		\$2.650,00	\$1.627,00	\$1.627,00	\$1.627,00	\$1.627,00	\$1.627,00	\$1.627,00	\$1.627,00	\$1.627,00	\$1.627,00
Beneficio neto		\$701.318,00	\$774.497,72	\$854.050,50	\$941.757,45	\$1.038.454,35	\$1.145.062,69	\$1.262.598,39	\$1.392.181,49	\$1.535.046,86	\$1.692.555,93
Inversión inicial	\$715.196,00										
Depreciación		\$2.350,00	\$1.327,00	\$1.327,00	\$1.327,00	\$1.327,00	\$1.327,00	\$1.327,00	\$1.327,00	\$1.327,00	\$1.327,00
Flujo de caja	\$-715.196,00	\$703.668,00	\$775.824,72	\$855.377,50	\$943.084,45	\$1.039.781,35	\$1.146.389,69	\$1.263.925,39	\$1.393.508,49	\$1.536.373,86	\$1.693.882,93