

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas

Reutilización de lodos de una planta de tratamiento de agua potable

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Químico

Presentado por:

Arias Plaza Nataly Susana

Torres Vera Jennifer Samantha

Guayaquil - Ecuador

Año: 2023

Dedicatoria

El presente proyecto se lo dedico a Dios por brindarme la fuerza necesaria en los momentos difíciles. A mi madre que desde el cielo guio mi camino y me cuidó para culminar mi carrera con éxito.

A mis hermanas Adriana y Karen por brindarme su apoyo incondicional y ser mi mayor inspiración para continuar con mis estudios. A mi querida mami ata por tenerme siempre en sus oraciones. A mis tíos por brindarme su apoyo incondicional en esta gran ciudad.

Finalmente, para toda mi familia que creyó en mí.

Arias Plaza Nataly Susana

Dedicatoria

El presente proyecto lo dedico a mis padres, Silvania Hernández y Carlos Torres, quienes con su amor y paciencia me ayudaron a seguir adelante, siempre apoyándome en mis estudios, y preocupándose por mi bienestar.

A mis hermanos Carlos, Paula, y a mi prima Zully por darme momentos de alegría.

A mi pareja JuanDa por brindarme su apoyo incondicional en todo momento, y motivándome a seguir.

Torres Vera Jennifer Samantha

Agradecimientos

Nuestro más sincero agradecimiento a Dios, amigos, y a nuestros tutores PhD. David Matamoros y MSc. Suanny Mosquera que nos guiaron durante todo el proyecto.

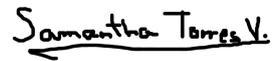
También queremos agradecer al laboratorio de suelos FCV y al laboratorio de Geotecnia y Construcción de FICT, y principalmente al técnico docente Arián Briones que nos brindó su apoyo.

Declaración Expresa

"Los derechos de titularidad y explotación, me(nos) corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; (nombre de los participantes) y doy(damos) mi(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"



Nataly Susana Arias Plaza



Jennifer Samantha Torres Vera

Evaluadores

MSc. Nadia Flores

Profesor de Materia

PhD. David Matamoros

Tutor de proyecto

Resumen

Actualmente la reutilización de lodos de las plantas de tratamiento de agua potable (PTAP) no han sido interés de análisis porque se ha considerado con bajo impacto ambiental por su naturaleza inorgánica. Sin embargo, los lodos de esta naturaleza son vertidos principalmente en vertederos de cielo abierto o ríos, siempre y cuando estos cumplan con la normativa de desecho. Además, el deshacerse de estos para las PTAP implica costos extras asociados al traslado y disposición final.

Mediante este proyecto se buscó alternativas de reutilización del lodo de una PTAP, iniciando con caracterización física y química del lodo, para el planteamiento de las propuestas de re inserción de los lodos. Por un lado, se analizó el uso del lodo como abono agrícola mediante la plantación de especies ornamentales (girasol y zinnia) y alimenticias (lechuga y girasol) en 40%, 50% y 60% de lodo y una muestra control de 100% tierra de sembrar. Se observó que el lodo retrasa el crecimiento de la planta por baja carga orgánica y elevados índices de conductividad y salinidad.

Con respecto a la otra propuesta se utilizó el lodo como materia prima en la elaboración de bloques de arcilla en 5%, 10%, 25%, 50% y 100% concentración, además se realizó la muestra control de 100% arcilla, la efectividad del prototipo se evaluó en las pruebas de resistencia a la compresión, donde se evidenció que todas las muestras se encuentran en un rango de reutilización según la normativa INEN 297. Pero se escoge como prototipo óptimo para reutilización la muestra de 50% lodo, porque se considera un mayor uso de lodo como materia prima además de menores costos de producción.

Palabras claves: Tratamiento de lodos, abono agrícola, bloques, recuperación de recursos.

Abstract

Currently, the reuse of sludge from drinking water treatment plants (DWTP) has not been analyzed because it has been considered to have a low environmental impact due to its inorganic nature. This is not entirely true; sludge of this nature is mainly dumped in open air landfills or rivers if they comply with disposal regulations. In addition, the disposal of sludge for WWTPs implies extra costs associated with transportation and final disposal.

This project sought alternatives for the reuse of sludge from a WWTP, starting with physical and chemical characterization of the sludge, to propose alternatives for reinsertion of the sludge. On the one hand, the use of sludge as agricultural fertilizer was analyzed by planting ornamental species (sunflower and zinnia) and food species (lettuce and sunflower) in 40%, 50% and 60% of sludge and a control sample of 100% topsoil. It was observed that sludge retards plant growth due to low organic load and high conductivity and salinity indices.

With respect to the other proposal, sludge was used as raw material in the production of clay blocks in 5%, 10%, 25%, 50% and 100% concentration, in addition to the control sample of 100% clay, the effectiveness of the prototype was evaluated in the compressive strength tests, where it was shown that all samples are in a range of reuse according to INEN 297. But the sample of 50% sludge was chosen as the optimal prototype for reuse, because it is considered a greater use of sludge as raw material in addition to lower production costs.

Key words: Sludge treatment, agricultural fertilizer, construction blocks, resource recovery.

ÍNDICE

Resumen	I
Abstract	II
Abreviaturas	V
Simbología.....	VI
Capítulo 1	1
1. Introducción.....	2
1.1 Descripción del problema.....	3
1.2 Justificación del problema	4
1.3 Objetivos	4
1.3.1 Objetivo general.....	4
1.3.2 Objetivos específicos.....	4
1.4 Marco Teórico.....	5
1.4.1 Plantas de Tratamiento de Agua Potable.....	5
1.4.2 Lodos de una PTAP.....	7
1.4.3 Disposición final de lodos de una PTAP	8
1.4.4 Actuales tratamientos para el lodo de un PTAP	8
1.4.4.1 Lodo como insumo para abono agrícola.	9
1.4.4.2 Lodo como insumo para proyectos civiles.	9
Capítulo 2	11
2. Metodología.....	12
2.1 Técnica de muestreo	12
2.2 Caracterización de lodos.....	13
2.2.1 Caracterización	13
2.3 Diseño experimental.....	20
2.3.1 Abono agrícola.....	20
2.3.1.1 Etapa inicial: Investigación y análisis de caracterización.....	20

2.3.1.1.1 <i>Planta ornamental</i>	23
2.3.1.2 Etapa desarrollo: Proceso de elaboración de prototipo.	24
2.3.1.3 Etapa desarrollo: Validación de prototipo.....	26
2.3.2 Material de construcción	26
2.3.2.1 Etapa Inicial: Investigación del procedimiento y normativas.....	26
2.3.2.2 Etapa de Desarrollo: Seguimiento del procedimiento.	28
2.3.2.3 Etapa de Validación del Prototipo.	31
Capítulo 3	36
3. Resultados y análisis	37
3.1 Caracterización.....	37
3.2 Material de Construcción.....	45
3.3 Abono Agrícola	49
3.4 Análisis Económico	59
3.4.1 Análisis económico del material de Construcción	59
3.4.2 Análisis económico del abono agrícola	63
Capítulo 4	64
4. Conclusiones y Recomendaciones.....	65
4.1 <i>Conclusiones</i>	65
4.2 <i>Recomendaciones</i>	66
Referencias	68

Abreviaturas

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
PTAP	Planta de Tratamiento de Agua Potable
SUCS	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos
LL	Límite Líquido
LP	Límite Plástico
IP	Índice de Plasticidad
INEN	Instituto Ecuatoriano de Normalización
FCV	Facultad de Ciencias de la Vida
FICT	Facultad de Ciencias de la Tierra
VAN	Valor actual neto
TIR	Tasa interna de retorno

Simbología

mg	Miligramo
g	Gramo
cm	Centímetro
kg	Kilogramo
mS	Milisiemens
psu	Unidades práctica de salinidad
pH	Potencial de Hidrógeno
m	Metro
mV	Milivoltio
Cu	Cobre
Ni	Níquel
C	Carbono
Mn	Manganeso
P	Fósforo
Ec	Conductividad

Índice de figura

<i>Figura 1 Muestreo del lodo en la depositadora de la presurizadora</i>	12
<i>Figura 2 Diagrama de bloque del proceso de la PTAP</i>	13
<i>Figura 3 Masa del recipiente y la materia prima seca</i>	14
<i>Figura 4 Ensayo de granulometría</i>	15
<i>Figura 5 Procedimiento para el ensayo del Límite de Atterberg Líquido (LL)</i>	16
<i>Figura 6 Procedimiento para el ensayo del Límite de Atterberg Plástico (LP)</i>	17
<i>Figura 7 Carta de Plasticidad</i>	18
<i>Figura 8 Prototipo de plantaciones (ornamental y alimenticia)</i>	26
<i>Figura 9 Esquema de procedimiento de los bloques</i>	28
<i>Figura 10 Prototipo de los bloques con las diferentes mezclas</i>	29
<i>Figura 11 Bloques luego de secarlos al sol y en el horno</i>	31
<i>Figura 12 Procedimiento del ensayo de resistencia</i>	34
<i>Figura 13 Gráfica de %Humedad vs N° Golpes.</i>	40
<i>Figura 14 Diagrama de Barras de los Límites de Atterberg en cada muestra</i>	46
<i>Figura 15 Comparación entre la composición y los Límites de Atterberg</i>	46
<i>Figura 16 Diagrama de Fuerza contra Compresión respecto a las distintas composiciones.</i>	47
<i>Figura 17 Día 1 de plantación vs día 39 de crecimiento de la lechuga</i>	50
<i>Figura 18 Crecimiento de la lechuga a lo largo del tiempo</i>	51
<i>Figura 19 Crecimiento de la lechuga al finalizar el seguimiento</i>	51
<i>Figura 20 Día 1 de plantación vs día 39 de crecimiento del rábano</i>	52
<i>Figura 21 Crecimiento del rábano a lo largo del tiempo</i>	53
<i>Figura 22 Crecimiento del rábano al finalizar el seguimiento</i>	54
<i>Figura 23 Día 1 de plantación vs día 39 de crecimiento de la Zinnia Gigante</i>	54
<i>Figura 24 Seguimiento del crecimiento de zinnia</i>	56
<i>Figura 25 Día 1 de plantación vs día 39 de crecimiento de la Zinnia Gigante</i>	56
<i>Figura 26 Día 1 de plantación vs día 39 de crecimiento del girasol</i>	57
<i>Figura 27 Seguimiento del crecimiento del girasol</i>	58
<i>Figura 28 Día 1 de plantación vs día 39 de crecimiento del girasol</i>	59

Índice de tablas

<i>Tabla 1 Métodos para los análisis de macro y micronutrientes.....</i>	<i>19</i>
<i>Tabla 2 Característica de la tierra para sembrar.....</i>	<i>20</i>
<i>Tabla 3 Mezclas de tierra de sembrar y lodo de la PTAP.....</i>	<i>22</i>
<i>Tabla 4 Mezclas con sus respectivas composiciones para la formación de los bloques.....</i>	<i>30</i>
<i>Tabla 5 Mediciones de las caras del bloque.....</i>	<i>33</i>
<i>Tabla 6 Humedad del lodo.....</i>	<i>37</i>
<i>Tabla 7 Resultados del análisis de granulometría.....</i>	<i>38</i>
<i>Tabla 8 Análisis de límite líquido – límites de Atterberg.....</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 9 Análisis de límite plástico – límites de Atterberg.....</i>	<i>41</i>
<i>Tabla 10 Resultado de límites de Atterberg.....</i>	<i>41</i>
<i>Tabla 11 Resultados fisicoquímicos.....</i>	<i>43</i>
<i>Tabla 12 Clasificación del tipo de material.....</i>	<i>45</i>
<i>Tabla 13 Comparación de los parámetros del ensayo para los bloques.....</i>	<i>47</i>
<i>Tabla 14 Resistencia de los bloques comparando con la normativa.....</i>	<i>48</i>
<i>Tabla 15 Costos de los equipos para la elaboración del material de construcción.....</i>	<i>60</i>
<i>Tabla 16. Producción estimada de bloques con la composición de la muestra 5.....</i>	<i>61</i>
<i>Tabla 17. Costo del servicio básico del agua.....</i>	<i>61</i>
<i>Tabla 18. Costos del servicio básico de electricidad.....</i>	<i>62</i>
<i>Tabla 19. Costos fijos, variables y servicios básicos.....</i>	<i>62</i>
<i>Tabla 20 Resultados de inversión futura.....</i>	<i>63</i>

Capítulo 1

1. Introducción

En el proceso de tratamiento de agua para el consumo humano se consideran las etapas de coagulación, floculación y filtración como generadoras de residuos debido a que en estas fases se genera un volumen considerable de lodo conformado principalmente por sólidos extraídos del proceso y residuos químicos como coagulante y floculante (Lozano, et al., 2023). Las características del lodo de una planta de tratamiento de agua potable (PTAP) dependerá de la calidad del agua cruda y las condiciones de coagulación que se apliquen en el proceso.

Es inevitable la generación de lodos en una PTAP, por lo que es necesario el manejo correcto de este residuo para evitar problemas ambientales y sanciones derivadas de la ley. La principal característica que dificulta la disposición final del lodo es por el alto contenido de humedad y elevada resistencia a la deshidratación, por lo que se considera como disposición final en cuerpos de agua superficiales o rellenos sanitarios (Torres et al., 2012). Cabe mencionar que antes de ser desechados es necesario realizar la validación de propiedades tanto químicas y física según normativas ambientales.

El manejo de los lodos de una PTAP está en evolución debido a que se buscan alternativas para la reinserción en el proceso productivo, además de la disminución de costos que implica el tratamiento y disposición final, actualmente los estudios se enfocan en la reutilización de estos lodos como material útil para construcción con el fin de la reducción de áreas para la disposición final de estos (Aldana, A. & Pérez, R., 2017).

1.1 Descripción del problema

Actualmente, la generación de lodos en una PTAP implica gastos debido a que es necesaria la gestión del tratamiento, traslado y disposición final. Además, para este proceso es imprescindible considerar el volumen del lodo generado por una planta de este tipo. La cantidad de este desecho está asociada a las características del agua cruda tratada, y del crecimiento poblacional, debido a que al aumentar la expansión demográfica se incrementa la demanda del agua potable para lograr abastecer a la población.

La PTAP en la que se centra el presente proyecto tiene como etapas de potabilización la coagulación, floculación, sedimentación, filtración, osmosis inversa, desinfección, ajuste de pH. En cuanto a los lodos provenientes del proceso son de las etapas de coagulación, sedimentación, y filtración, antes de la disposición final el lodo es presurizado con el fin de reducir el volumen mediante la reducción del líquido, el agua retenida de esta etapa es ubicada nuevamente en el proceso de potabilización, mientras que el lodo es considerado como un desecho del proceso, cuya disposición final es un botadero de cielo abierto. La PTAP en estudio solo genera 350 kg en un lapso de 7 días, lo que implica que 1 vez por semana se debe de transportar el lodo a su disposición final para evitar excesivo volumen de lodo en la presurizadora, es necesario mencionar que además de la presurización no se realiza algún otro tratamiento debido a que este lodo tiene los parámetros físicos y químicos dentro de los rangos ambientales permitidos para poder realizar una disposición final directa, esto puede deberse a que para el tratamiento de potabilización como agua cruda se utiliza agua de mar o agua salobre razón por la que el proceso de potabilización es básicamente una desalinización.

Al colocar el lodo en su desecho final no genera un valor agregado para la empresa. Considerando el aspecto ambiental, la generación de lodos ocupará una mayor área alterando el ecosistema con residuos hasta tal punto que la PTAP no tenga lugar para depositar los residuos provenientes del proceso.

1.2 Justificación del problema

La reutilización de los lodos de una PTAP es pertinente ya que disminuirá principalmente costos asociados a la disposición final y tratamiento fisicoquímico, además reducirá el impacto ambiental por tanto ya no se colocará el lodo en botaderos, rellenos sanitarios o cuerpos de agua, por el contrario, tendrá un valor agregado para la sociedad.

La implementación de un tratamiento para la reutilización de lodos creará un nuevo modelo de producción asociados a las PTAP, este nuevo proceso contribuirá a la sostenibilidad del proceso de potabilización y aumentará la ganancia en la producción asociados un producto secundario del proceso.

La reutilización de los lodos provenientes de una PTAP implica la recuperación de recursos naturales y disminución del impacto ambiental negativo, puesto a que se transforma un desecho en un producto a favor de la sociedad implicando un mayor lucro para la empresa, debido a que ofrecería además de agua potable un nuevo beneficio con un valor agregado a las ganancias de la planta potabilizadora.

1.3 Objetivos

1.3.1 *Objetivo general*

Proponer una alternativa factible del tratamiento de lodos en una planta potabilizadora de agua mediante la caracterización y experimentación de la muestra para su aprovechamiento y disminución del impacto ambiental.

1.3.2 *Objetivos específicos*

- Evaluar la muestra de lodos mediante caracterización de microelementos, macroelementos y fisicoquímicos.
- Comparar los prototipos de las alternativas de reutilización propuestas mediante el análisis de sus propiedades de uso y factibilidad de implementación del proceso de producción.

- Justificar la viabilidad económica mediante la proyección de los costos y ganancias del proceso.

1.4 Marco Teórico

1.4.1 Plantas de Tratamiento de Agua Potable

Las PTAP son instalaciones conformadas por estructuras capaces de convertir agua cruda en agua potable. La dificultad del proceso dependerá principalmente de dos factores; social, dado que la planta tiene que considerar mediciones estadísticas que involucran el crecimiento poblacional de la zona a la que se desea abastecer para lograr cumplir la demanda. Por otro lado, el factor de producción, la cual depende principalmente de la materia prima, es decir el tipo de agua cruda que se usará en el proceso.

El objetivo de una PTAP es proporcionar a la ciudad agua idónea para el consumo humano cumpliendo con la extracción de turbiedad, microorganismos, sólidos suspendidos, olor, color y dureza; por lo que para lograrlo se aplican principales procesos como coagulación, floculación, sedimentación, clarificación, filtración y desinfección. Estos procesos pueden variar dependiendo del agua a tratar, por lo general una planta potabilizadora convencional trabaja con agua dulce donde se encarga de eliminar sedimentos y microorganismos mediante químicos que cumplan la función de coagular y flocular.

Por otro lado, se tienen plantas potabilizadoras que tratan agua de mar mediante osmosis inversa, este proceso es considerado uno de los más actuales debido a la implementación del sistema de membranas semipermeables para lograr desalinizar el agua de mar, mediante la aplicación de presión externa al agua con mayor soluto con el fin de que el solvente pase a través de la membrana logrando un equilibrio iónico, lo retenido del proceso es salmuera concentrada (Albergamo et al, 2019). Cabe mencionar que antes del proceso de osmosis inversa es necesario la utilización de filtros que

retengan los sedimentos que pueden llegar a afectar el proceso. Finalmente, el agua es estabilizada mediante el ajuste de pH y desinfección mediante el cloro gas.

Una planta potabilizadora tiene distintas etapas de tratamiento para que el agua pueda ser usada de forma segura, las industrias tienen diferentes metodologías para realizar el proceso, pero las etapas son: captación, que es el momento de obtención del recurso hídrico, aquí se debe de considerar la profundidad y localización, dado que permite tener un mejor control de no tener aguas contaminadas, el siguiente paso es el pretratamiento, donde se utilizan rejillas que permite la separación de las especies marinas o elementos que podrían obstruir en el proceso, es necesario que se realice mantenimiento a las rejas para lograr un flujo constante de agua, también se suele utilizar tamices para las partículas que son más finas, Posteriormente, se tiene la coagulación-floculación, la parte de coagulación es el proceso donde se elimina la turbiedad y el color, además se añaden químicos que permiten la desestabilización de las partículas coloidales, permitiendo disminuir las fuerzas de repulsión entre ellas y formando así aglomeraciones, los coagulantes que se suelen añadir son sulfato de aluminio, cloruro férrico o sulfato de hierro, para la parte de floculación, se adiciona carbonato de sodio, hidróxido de sodio o hidróxido de calcio, para poder ajustar la alcalinidad y el pH, además de fomentar el crecimiento del flóculo con el fin de que se pueda sedimentar más rápido (CONAGUA, 2016). Luego de que se forman los flocs, se prosigue con la sedimentación, en esta etapa se tiene una remoción de aproximadamente el 95% de la turbiedad y bacterias del agua cruda, ya que por la gravedad y baja velocidad del agua estas pueden sedimentarse, el tiempo estimado para esta etapa son dos horas aproximadamente (Alegría, 2005). En el proceso de la filtración se busca remover las partículas suspendidas que quedaron de los procesos anteriores, se realiza mediante el transporte del agua con impurezas a través de un lecho granular a una velocidad lenta, el más usado y antiguo es la filtración con arena (Parsons & Jefferson, 2006), finalmente para asegurarse de que se tenga agua

totalmente potable, esta es sometida a una fase de desinfección con cloro para eliminar las bacterias que pudieron haber quedado (CONAGUA, 2016).

1.4.2 Lodos de una PTAP

En toda PTAP se tiene como desecho del proceso lodos, los cuales tienen propiedades distintas según el tipo de agua que se utilice en la planta y el tipo de coagulante y floculante que se use en el tratamiento, estos se eligen según el costo y tipo de agua cruda. El lodo de una planta potabilizadora está compuesto por impurezas coloidales y suspendidas, traza de metales, partículas húmicas y microorganismos provenientes del agua cruda tratada. Estas impurezas son eliminadas mediante procesos de neutralización de cargas, adsorción y filtración (Martins et al, 2022). La mayor cantidad de volumen de lodo proviene de las etapas de floculación y coagulación. En el proceso de coagulación se purifica el agua mediante la aglomeración de partículas por medio de la neutralización de la doble capa eléctrica de coloides finos. Los químicos utilizados con mayor frecuencia son sulfato de aluminio o alumbre $[(Al_2(SO_4)_3)]$, sulfato de hierro III $[Fe_2(SO_4)_3]$, cloruro de hierro III $[FeCl_3]$ y clorhidrato de aluminio $[Al_2(OH)_5Cl]$ (Ling et al, 2017).

En el proceso de coagulación por lo general se obtiene lodos de alumbre por el uso de sales de aluminio, como alumbre o PACI, si la producción de estos no se controla podrían causar desequilibrio ambiente porque en su composición contiene grandes cantidades hidróxido de aluminio residual y materias granulares inorgánicas. A pesar de esto, el alumbre presente en el lodo puede mejorar el proceso de deshidratación debido a que el hidróxido de aluminio residual actúa como acondicionar químico, mientras que la materia granular como un acondicionar físico (Ling et al, 2017). En cuanto al residuo del floculante en el lodo dependerá del agente utilizado para la aglomeración de las partículas, para su selección se analizan las cargas de las partículas, el reactivo utilizado puede ser aniónicos o catiónico (García et al., 2017). Algunos floculantes aniónicos son poliacrilato de sodio y polisulfona, mientras que

ejemplos de floculantes catiónicos son la poliacrilamida y el óxido de polietileno (Rankovié et al, 2023).

1.4.3 Disposición final de lodos de una PTAP

Antes de la disposición final de los lodos es imprescindible realizar una caracterización, este análisis por lo general muestra que el lodo de una PTAP está constituido principalmente por 5 elementos oxígeno, silicio, aluminio, hierro y carbono (Ling et al, 2017). También se analiza la presencia de metales pesados y microorganismos presentes en el mismo, bajo el análisis de los resultados de la caracterización del lodo es posible escoger la disposición final rigiéndose a la normativa. Por lo general, antes de la disposición final se realiza un proceso de deshidratación para abaratar costos de transporte, además dependiendo de los resultados de la caracterización se realizan procesos químicos para estabilizarlos y que los parámetros requeridos por la normativa ambiente estén dentro de rango. Cuando el lodo es estabilizado y deshidratados se coloca como disposición final vertederos de cielo abierto, cuerpos de agua dulces tomando en consideración que cumpla los parámetros mencionados en el TULSMA libro VI, además de su aplicativo en suelos agrícolas o forestales por sus propiedades inertes y no presentar toxicidad (García et al, 2017). Dado que, actualmente se presenta un aumento de volumen en los lodos generados en las PTAP, ha aumentado la tendencia a reducir este desecho o en el mejor de los casos convertir los lodos mediante tecnología para su reutilización en el ciclo de producción.

1.4.4 Actuales tratamientos para el lodo de un PTAP

En los últimos 20 años, se ha incursionado en el estudio del tratamiento de lodos de las plantas potabilizadoras para uso en material cerámico y construcciones principalmente. En cuanto a proceso químicos se tiene recuperación de coagulante/iones para ser reinsertados en el proceso de potabilización. Además, también se han estudiado soluciones geotécnicas, como el compostaje y la reinsertación en suelos agrícolas (Martins et al, 2022). Actuales proyectos en los que se enfoque la reutilización

de los lodos (uso en abono y construcción) se muestran a mayor detalle en los siguientes apartados.

1.4.4.1 Lodo como insumo para abono agrícola. Los lodos actúan como fertilizante porque pueden aumentar el contenido de humus, la condición física del suelo enriqueciéndolo con micronutrientes como potasio, fósforo, azufre, magnesio, calcio y macronutrientes. Estudios demuestran que si el lodo es almacenado el contenido de microorganismos y moho puede aumentar siempre y cuando haya condiciones de vida (temperatura, humedad y oxigenación) en el lodo (Ranković et al, 2023). Además, los lodos de una PTAP pueden ser considerado como fertilizante por sus propiedades físicas como capacidad de retención de agua, característica de drenaje y estabilidad estructural. También se deberá considerar la cantidad de nutrientes dependiendo si es un lodo polivinílico o un lodo de alumbra, la diferencia de ambos es la cantidad de nitrógeno y fósforo suministrada a la planta (Skene et al, 1995). Por demás de la relación C/N importante para el proceso microbiológico del compostaje y generación de energía y crecimiento celular, se debe estabilizar el pH del lodo a una neutralidad de 6.5 -7 para que se inhiba el crecimiento de hongos y controlar la temperatura para no alterar a un pH básico que provocaría la volatilización del nitrógeno (Céspedes, S. & Jiménez, M., 2018).

1.4.4.2 Lodo como insumo para proyectos civiles. El estudio de la reutilización de los lodos proveniente del tratamiento del agua surgió con la viabilidad del cambio parcial de materia prima silíceo en la producción de cemento, para esto se estudió el lodo bajo difracciones de rayos X, análisis de cal libre y pruebas de resistencia a la compresión y procedimiento de lixiviación (Chen et al, 2010).

Actualmente, el uso de lodos en la industria de la construcción es considerado como una opción ambientalmente racional y económica a comparación del proceso original. En el estudio del lodo para la reutilización en el proyecto civil es necesario considerar características como morfología, distribución de tamaño, composición y estructura química, comportamiento térmico, pureza, tamaño/volumen del poro y área de superficie (Ling et al, 2017). En cuanto a su incorporación con arcillas para la fabricación de bloques dependerá de propiedades como

granulometría, composición química y mineral, límite de Atterberg, entre otros (Chen et al, 2010). Por otro lado, se tiene la utilización como materia prima para la producción de cemento, para mencionado proceso se deberá realiza la misma caracterización del lodo para verificar propiedades, en donde se destaca por lo general el alto poder calorífico lo que implica la reducción del uso de combustible. Además, si el lodo presentara materiales orgánicos tóxicos y bacterias serían descompuestas debido a que el proceso de producción de cemento implica temperaturas encima de los 1400 °C (Chen et al, 2010).

En China la implementación de lodos en procesos de construcción es apoyo por su gobierno donde se inician con investigaciones en laboratorios y posterior estudio en hornos rotatorio de cemento. El principal factor para analizar en el estudio es la capacidad de combustión del lodo mediante la cantidad de cal libre con el método de glicol – etanol de Clíinker (Chen et al, 2010).

Capítulo 2

2. Metodología.

La metodología seguida en el presente proyecto integrador se detalla a mayor detalle en los siguientes ítems.

2.1 Técnica de muestreo

Se consideró en primera instancia el muestreo bajo el método del cuarteo con el fin de tener una muestra representativa y homogénea; esta técnica consiste en delimitar en un espacio plano la cantidad de lodo obtenida, luego esta dividirla en 4 cuadrantes, tomar muestra de dos cuadrantes, y repetir el proceso hasta llegar a la cantidad que se va a necesitar. No obstante, en la planta PTAP visitada, se genera poco lodo (350 kg en un lapso de 7 días), por lo que, no fue necesario realizar el método del cuarteo, debido a que se tomó todo el lodo (25 kg aproximadamente) de la depositadora de la presurizadora encargada de reducir la humedad del lodo antes de la disposición final.

Figura 1

Muestreo del lodo en la depositadora de la presurizadora

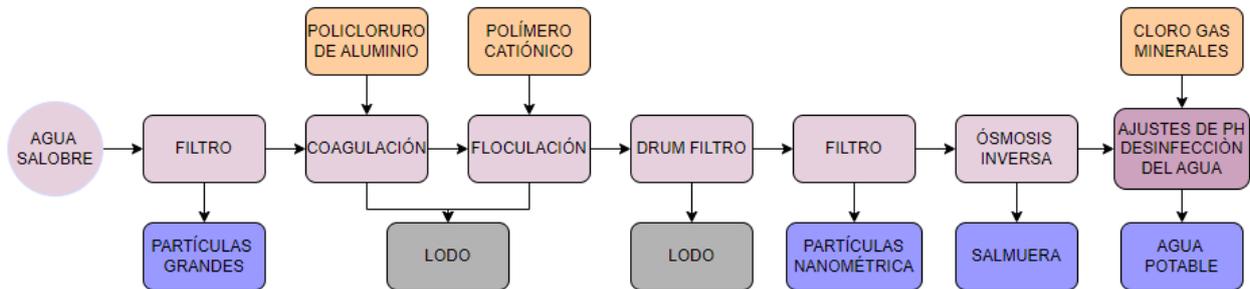


Nota. Recolección de la materia prima para la elaboración de las propuestas.

En la planta se tienen diferentes etapas para potabilizar el agua a niveles óptimos para el consumo de la comunidad, entre estas se tienen dos etapas que generan la mayor cantidad de lodo, estas son la de coagulación y floculación, este desecho se lo deshidrata mediante presión y así al ocupar menos espacio, se lo termina depositando en un terreno.

Figura 2

Diagrama de bloque del proceso de la PTAP



Nota. El diagrama permite conocer las etapas generadoras de lodos.

2.2 Caracterización de lodos

Se analizó el lodo muestreado para conocer sus propiedades físicas y químicas, además se realizó la comparación con las respectivas normas para el establecimiento de criterios y planteamiento de propuestas.

2.2.1 Caracterización

Humedad

Se realizó el análisis de humedad para conocer el contenido de agua presente en el lodo muestreado, este ensayo se realizó en un horno a 105 °C por 16 horas, luego del tiempo transcurrido se obtuvo una masa constante, por lo que se procedió a calcular el contenido en base húmeda, mediante la fórmula 2.1.

$$\%H = \frac{m_1 - m_2}{m_1} * 100\% \quad (2.1)$$

$\%H$ = contenido de humedad en base seca

m_1 = masa de lodo húmedo (masa inicial antes del secado)

m_2 = masa de lodo seco (masa final luego de secado)

Este ensayo fue realizado en el laboratorio de Geotecnia de la facultad de ingeniería en ciencias de la tierra (FICT).

Figura 3

Masa del recipiente y la materia prima seca



Nota. Se pesa la materia prima luego de secarse en el horno para determinar la humedad de la muestra.

Granulometría

Se realizó el ensayo de granulometría para determinar la distribución de las partículas en una muestra de lodo, para este ensayo fue necesario el uso de tamices. Se inició el análisis pesando 500g de muestra de lodo, el cual se disgregó para luego ser sometido en un horno a 60 °C por 24 horas con el fin de reducir su valor de humedad. Al finalizar este lapso se procedió a retirarlo del horno y a esperar un tiempo prudencial para que la muestra se seque y poder pesarlo, este valor fue anotado como valor inicial antes de tamizar.

Se partió de la hipótesis que la muestra de lodo contenía demasiada arena debido a que la materia prima para la planta potabilizadora es el mar, además de acuerdo con técnicos docentes que trabajan con suelos, nos comentaron que era muy fino, por lo que, aconsejaron usar directamente un tamiz 200, al lavar la muestra quedó poca cantidad de sólidos retenidos por lo que, se confirmó el alto contenido de finos. Por tal motivo, no fue necesario el usar los tamices 4,10, y 40, puesto que estos son de mayor tamaño al tamiz 200, así que el porcentaje de retención sería de 0%.

Figura 4

Ensayo de granulometría



Nota. Se lava la muestra sobre un tamiz para luego pesarlo y conocer la retención obtenida.

El lavado de la muestra se realizó hasta que el agua que pasó por el tamiz tuviera poca turbidez, es decir, lo más clara posible. Lo que traspasó por el tamiz fue considerado como fondo (partículas con tamaño menor a 75 μm , por lo general limos y arcillas). El material lavado y retenido en el tamiz fue sometido a un proceso de secado por 24 horas a 60 $^{\circ}\text{C}$, luego de este lapso se procedió a enfriar y anotar el peso para realizar los cálculos de porcentaje retenido con la ecuación 2.2.

$$\% \text{Retenido} = \frac{\text{Masa Retenida}}{\text{Masa Antes del Lavado}} * 100 \quad (2.2)$$

Límite de Atterberg

Se realizó el ensayo de límite de Atterberg para conocer la plasticidad del lodo y poder analizar si es posible remplazar la arena por el lodo luminoso. Para el procedimiento de este ensayo, se necesitó que lodo esté seco, por lo que, se colocó en una mufla a 60 $^{\circ}\text{C}$ por 24 horas, tal y como en el método de granulometría, después se procedió a pulverizar la muestra de lodo seco, dado que, estaba en forma de pequeñas rocas, esto se hizo dado que para el límite de Atterberg, es necesario que esté hecho polvo, esto se tamizó con uno de tamaño #200, para confirmar que el grosor de la partícula sea la adecuada, lo que pasó el tamiz se recolecta en un recipiente, y lo que se retuvo, se volvió a pulverizar hasta que se obtuvo el

tamaño necesario, y obtener una cantidad de 100g. luego se agregó agua destilada en una cantidad de 10ml hasta obtener una consistencia pastosa en el equipo Cuchara de Casagrande, en la cual se colocó a 10mm de altura aproximadamente, esto permitió ver la plasticidad del lodo, se colocó la muestra en forma de arco y se delimitó una línea a la mitad con un ranurador de manera que haga contacto de forma perpendicular con el fondo de la Copa.

Figura 5

Procedimiento para el ensayo del Límite de Atterberg Líquido (LL)



Nota. Se presentan las etapas para la realización del ensayo.

Luego, se contabilizó los golpes, los cuales no debían ser mayores a 40, dado que eso indicaba que le faltaba agua, ni tampoco menos de 10 golpes porque significaba que sobraba agua; se realizó el procedimiento 3 veces a distintas humedades, y con los rangos disponibles de golpe, que son los siguientes: 35-40, 25-35, 20-30, 15-25, 10-15. Los rangos seleccionados para la primera fueron entre 35-40, la segunda se realizó entre 20-30 golpes, y la última se hizo entre 15-25 golpes, se anotó el número de golpes cuando las dos mitades entren en contacto en aproximadamente 13mm de longitud, la cantidad que estaba dentro de la zona de contacto, se la pesó y se anotó el valor. Cabe mencionar, que estos procedimientos pueden hacerse con una mayor cantidad de veces para tener una mejor precisión al momento de graficar la curva de %Humedad vs N° de Golpes.

Por otro lado, para obtener el valor del límite plástico LP, se tuvo que realizar pequeñas muestras en forma elipsoidal con el lodo, para esto, fue necesario que no se pegara a la placa de vidrio, por lo que, se debía de secar hasta que sea manipulable, pero no se quede pegado, cuando tenga esa consistencia se la debe moldear hasta una forma circular, tomando pequeñas cantidades de la muestra, luego, se realizó rollos uniformes, la contextura debe ser lo más fino posible y con muestras de fisuras visibles a lo largo del mismo; se repitió el proceso hasta tener al menos 6 gramos, al tener ya las muestras de LP y LL, estas se colocaron juntas en una sola bandeja y se las secó en una mufla a 110°C durante 24 horas, al término del secado, se esperó a que se enfríe y se pesó las masas obtenidas. Además, para obtener el valor del límite plástico LP, fue con el promedio de los valores de humedad obtenidos. Finalmente, el valor del índice de Plasticidad IP, se lo consiguió como la resta entre el límite líquido LL y el límite plástico LP, estos valores son los más relevantes dado que permite clasificar el lodo.

Figura 6

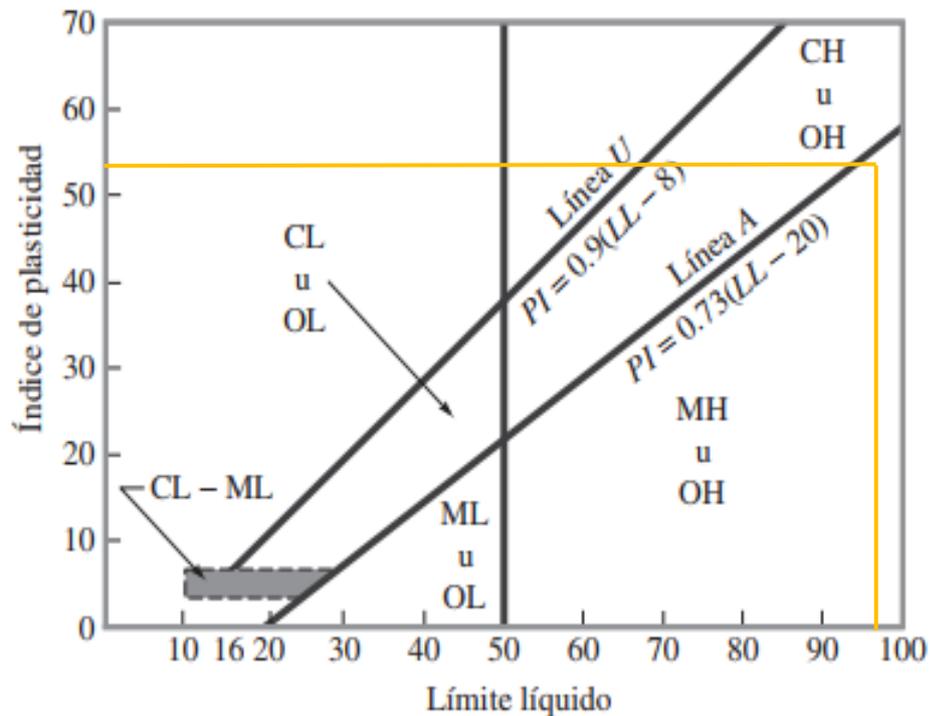
Procedimiento para el ensayo del Límite de Atterberg Plástico (LP)



Al analizar los resultados obtenidos se puede llegar a la conclusión que el lodo presenta características de un suelo limoso elástico, esto se lo determina mediante el uso de la Carta de Plasticidad junto con los valores obtenidos de LL y el IP, se lo puede ver en la Figura 7, la cual permite que se realice la clasificación de los suelos mediante el sistema AASHTO.

Figura 7

Carta de Plasticidad



Nota. La gráfica es obtenida del libro Fundamentos de Ingeniería Geotecnia, pero la línea amarilla indica el modo de determinar la clasificación del lodo.

Potencial de hidrógeno

Se realizó el análisis de pH (potencial de hidrógeno) mediante una muestra en proporción de agua destilada: suelo (5:1), este ensayo permitió determinar si la muestra de lodo presentaba un grado de alcalinidad o acidez, considerando la escala de menor a 7 una solución ácida y mayor a 7 un medio básico, teniendo en cuenta una temperatura de 25 °C en una solución acuosa. Este ensayo fue realizado en un laboratorio externo, el valor de pH lo obtuvieron mediante un multiparámetro.

Salinidad

Se realizó el análisis de salinidad para conocer la concentración de sales en la muestra del lodo, este ensayo fue realizado por un laboratorio externo, el cual utilizó una solución en

proporción de agua destilada: lodo (5:1) para medir el valor de salinidad en la muestra mediante un multiparámetro. Los valores obtenidos fueron evaluados dependiendo al prototipo realizado.

Conductividad eléctrica

Se analizó la conductividad eléctrica para conocer la concentración de sales disueltas o ionizadas en la solución. Este análisis fue realizado por un laboratorio externo, el método utilizado fue realizar una solución acuosa en proporción agua destilada: lodo (5:1). El valor obtenido fue expresado en unidades de mS/cm y comparado con los valores del Acuerdo Ministerial No. 0.28 en el apartado de criterios de remediación para conocer la factibilidad de reutilización.

Micro, macronutrientes y metales pesado

Este análisis fue realizado en un laboratorio externo para conocer la composición de macro, micronutrientes y metales pesados en la muestra de lodo, estos parámetros fueron realizados mediante los métodos mostrados en la tabla 1, posteriormente se comparó los resultados obtenidos con el Acuerdo Ministerial No. 0.28 en el apartado de criterios de remediación con el fin de conocer si la muestra analizada es apta para la reutilización.

Tabla 1

Métodos para los análisis de macro y micronutrientes

Parámetro	Método
Determinación de macro, micronutrientes.	Muestra pulverizada a 850 μm y leída por
Determinación de metales pesados.	Fluorescencia de Rayos X (XRF, ZSpec-EMax).

Nota. Los métodos son de acuerdo con el laboratorio que se mandó a analizar la muestra de materia prima.

2.3 Diseño experimental

2.3.1 Abono agrícola

Se realizó una investigación bibliográfica y se observó que actualmente existe la iniciativa de utilizar el lodo de una PTAP como abono agrícola, siempre y cuando los parámetros físicos, químicos y toxicológicos se encuentren dentro de la normativa. Por lo que para el presente proyecto se analizaron los resultados de la caracterización con base a al Acuerdo Ministerial No. 0.28 en el apartado de criterios de remediación. Además, se realizó prototipos de plantaciones con diferentes especies para analizar el comportamiento del lodo como sustituto de abono agrícola mediante diferentes mezclas de lodo de la PTAP y tierra de sembrar.

2.3.1.1 Etapa inicial: Investigación y análisis de caracterización. En primera instancia se analizó los resultados de la caracterización de lodo principalmente el pH, conductividad, salinidad, macronutrientes, micronutrientes y metales pesados, estos parámetros fueron comparados con la normativa del Acuerdo Ministerial No. 0.28 en el apartado de criterios de remediación. Asimismo, se realizó un análisis de los parámetros mencionados a la tierra de sembrar utilizada para el desarrollo del prototipo de plantaciones, con el fin de conocer condiciones de la materia prima utilizada para sembrar las plantas. Además de la normativa se encontró las siguientes características generales de la tabla 2 para el crecimiento efectivo de una planta.

Tabla 2

Característica de la tierra para sembrar

Parámetro	Límite permitido/ Característica óptima
Tipo de suelo	Suelo húmedo y bien drenado,
Salinidad	Suelo pobre en sal Conductividad (1-2 ds/m)
Conductividad	1.7 ms/cm
pH	5.5 – 7.5
Temperatura ambiente	23-29 °C

Nota. Datos tomados de Calidad química del agua subterránea de la Ciénega de Chapala como factor de degradación del suelo (2006).

Se realizó una investigación acerca de las posibles especies a cultivar, para esto se consideró tiempo de cosechas y condiciones de crecimiento de la planta. Además, para tener una visión más amplia del comportamiento del fertilizante se seleccionó 4 tipos de plantas de los siguientes grupos: ornamental y alimenticia, 2 plantas de cada grupo respectivamente. Para estudiar la efectividad del fertilizante se analizó el comportamiento y desarrollo del cultivo, mediante el registro de la altura de la planta. Además, a modo de muestra patrón se realizó de cada una de las 4 variables, una plantación con tierra de sembrar al 100%. Cabe mencionar, que nos capacitamos acerca del cuidado de las plantas, para poder conocer sobre las necesidades de las semillas, con el fin de que puedan desarrollarse sin ninguna anomalía. En esta capacitación pudimos obtener información sobre mezclas óptimas de tierra de sembrar y abono para el crecimiento de una planta, en el caso de la experta es considerado un 40% abono y 60% tierra de sembrar mezcla ideal para sembrar, de esta hipótesis se partió para realizar las composiciones de lodo y tierra de sembrado, a mayor detalle se muestra la información en la figura 3. En la capacitación también logramos obtener las semillas de las plantas con rápido crecimiento, estas fueron Girasol, Zinnia, lechuga y Rábano.

Tabla 3

Tipo	Planta	Mezcla: Tierra de sembrar + lodo							
Ornamental	Girasol	Tierra de sembrar 100 %	MT:369 ML:0g	50%Tierra de sembrar + 50% lodo de PTAP	MT:190g ML:190g	60%Tierra de sembrar + 40% lodo de PTAP	MT:228g ML:152g	40%Tierra de sembrar + 60% lodo de PTAP	MT:152g ML:228g
	Zinnia Gigante	Tierra de sembrar 100 %	MT:189g ML:0g	50%Tierra de sembrar + 50% lodo de PTAP	MT:94g ML:94g	60%Tierra de sembrar + 40% lodo de PTAP	MT:113g ML:75g	40%Tierra de sembrar + 60% lodo de PTAP	MT:75g ML:113g
Alimenticia	Lechuga	Tierra de sembrar 100 %	MT:1600g ML:0g	50%Tierra de sembrar + 50% lodo de PTAP	MT:800g ML:800g	60%Tierra de sembrar + 40% lodo de PTAP	MT:960g ML: 640g	40%Tierra de sembrar + 60% lodo de PTAP	MT:640g ML:960g
	Rábano	Tierra de sembrar 100 %	MT:1600g ML:0g	50%Tierra de sembrar + 50% lodo de PTAP	MT:800g ML:800g	60%Tierra de sembrar + 40% lodo de PTAP	MT:960g ML:640g	40%Tierra de sembrar + 60% lodo de PTAP	MT:640g ML:960g

Mezclas de tierra de sembrar y lodo de la PTAP

Nota. Se propone realizar diferentes composiciones de tierra de sembrar y lodo. MT: masa de tierra de sembrar y ML: masa de lodo.

2.3.1.1.1 *Planta ornamental.* Se seleccionó las plantas ornamentales para el presente proyecto debido a que el lodo de la PTAP puede obtener material tóxico, por lo que se evaluará el crecimiento de la planta con fin decorativo.

Girasol

El girasol es una planta ornamental perteneciendo a la familia Asterácea, cuyo nombre científico es *Helianthus annuus*, se desarrolla en diferentes tipos de suelos, con diferentes texturas que tengan buen drenaje y corta profundidad en la capa arable. En caso de que el suelo presenta características tóxicas esta planta es capaz discretizar residuos químicos sin afectar su desarrollo. La necesidad de agua varía de 600 a 1000 ml, esta cantidad dependerá del clima y duración del período vegetativo. Las plantas de girasol son poco tolerables a niveles altos de salinidad. Además, su crecimiento óptimo se observa en suelos neutros o alcalinos (Guaynalla, S., 2020). El ciclo de vida de esta planta está comprendido entre 100 a 150 días, la variación del tiempo de cosecha dependerá del tipo de genotipo, época de siembra y cantidad de nutrientes suministrado a la planta (Santana, M. & Rita, C., 2023).

Zinnia gigante

La planta *Zinnia gigante* también conocida como rosa mística es una planta ornamental de origen mexicano perteneciente a la especie *Z. (elegans Jacq.)* Es considerada una planta muy resistente y adaptable. El desarrollo de esta planta se da entre los días 10 a 14, y las flores podrán ser cosechadas entre la semana 4 a 6. Para el desarrollo de esta planta es necesario considerar el que el pH y conductividad, esta última puede detener el desarrollo, también puede

presentar pétalos necróticos marchitez de pétalo y tallo torcido (Carlson, A. & Dole, J., 2013).

2.3.1.1.2 Planta alimenticia. Se evaluó dos plantas alimenticias con el fin de identificar si los frutos obtenidos tienen alguna afectación por el uso de lodo como abono agrícola.

Lechuga

La lechuga (*Lactuca sativa*) es una hortaliza de hojas se desarrolla en clima fresco para la etapa de desarrollo se consideran temperaturas de 14 – 18 °C por el día y 5 – 8 °C por la noche. El crecimiento óptimo se da en suelos francos y frescos con buen drenaje y alto contenido de materia orgánica que presente un pH de 6.8 a 7.4, es muy susceptible a los suelos ácidos. Presencia de fósforo y potasio pueden afectar en que las lechugas repollen mal y en mal soltura de las hojas. En cuanto a la cosecha se considera un periodo de 30 a 70 días después de la plantación, normalmente en el día 21 se considera que la planta ha absorbido el 70% de nitrógeno del suelo, en este lapso se forma el cogollo (Nuncum, L., 2023).

Rábano

El rábano (*Raphanus Sativus*) es una planta alimenticia que necesita suelo húmedo para crecer, se considera un pH óptimo para el desarrollo de 5.5 como mínimo, además de que el suelo para el cultivo sea profundo y libre para crecer. Es considerada una planta de rápida absorción de nutrientes pues el tiempo de cosecha es de 35 días (Cruz et al, 2022).

2.3.1.2 Etapa desarrollo: Proceso de elaboración de prototipo. Antes de iniciar el proceso de plantación se consideró asesoramiento de expertos en el tema de agricultura, para la obtención de información primordial para el cuidado de la planta, de esta indagación se

consideró que el porcentaje de mezcla óptimo es de 60% tierra de sembrar y 40% abono, cabe recalcar que este porcentaje no está establecido y varía según el experto. Bajo esta hipótesis se partió para realizar las mezclas de lodo y tierra de sembrar. Se realizó las mezclas mostradas en la tabla 3, en esta se observa que los porcentajes de lodo utilizado fueron de 0%, 40%, 50% y 60%. La muestra control para la experimentación fue de 100% de tierra de sembrar.

Para la plantación de ornamental y alimentaria se utilizó distintos tipos de maceta, para las de tipo alimenticia se utilizó macetas alargada para no incurrir en un trasplanta de la especie, las macetas largas utilizadas fueron compartidas para sembrar en diferentes mezclas de lodo y tierra de sembrar, cabe mencionar que para la plantación se utilizó 15 semillas en cada compartimiento. Por otro lado, para las plantas ornamentales se utilizó pequeñas macetas (botella de plástico cortada por la mitad) para comparar la efectividad de la muestra se utilizó solo 2 semillas en cada maceta. Tanto para las plantas ornamentales y alimenticias las semillas fueron colocadas a una profundidad de 1.5 cm y luego se tapó con la misma muestra realizada. Para la elaboración de las distintas mezclas, en primera instancia se pesó la tierra de sembrar referentes a los porcentajes ya mencionados, luego de tener ambas muestras se procedió a mezclar manualmente ambas muestras hasta obtener una tierra homogénea y proceder a sembrar. En la figura 8 se observa los tipos de macetas utilizados y las plantas en su proceso de crecimiento.

Figura 8

Prototipo de plantaciones (ornamental y alimenticia)



Nota. En la imagen a) se muestra el recipiente que se usó para plantas ornamentales, mientras que el b) fue usado para las alimenticias.

2.3.1.3 Etapa desarrollo: Validación de prototipo. La validación del prototipo se realizó mediante la medición del crecimiento para cada una de las especies. El crecimiento se observó mediante la medición de la altura de la planta, además del aspecto físico como color, grosor y firmeza de la especie. El seguimiento se realizó cada 7 días en una bitácora, en la cual se agregó fotos, altura y observaciones relevantes de cada una de las plantas.

2.3.2 Material de construcción

Al realizar una investigación exhaustiva, se recopiló información donde una opción viable para la reutilización de lodos de PTAP, son para la formación de bloques, donde se utilizó una parte para la mezcla, esto influye en la disminución del costo de producción, de todas maneras, es importante acotar que para que esto se realice de manera satisfactoria, se debe tener una caracterización del lodo previa para conocer si conviene hacer un bloque de lodo con cemento o con arcilla.

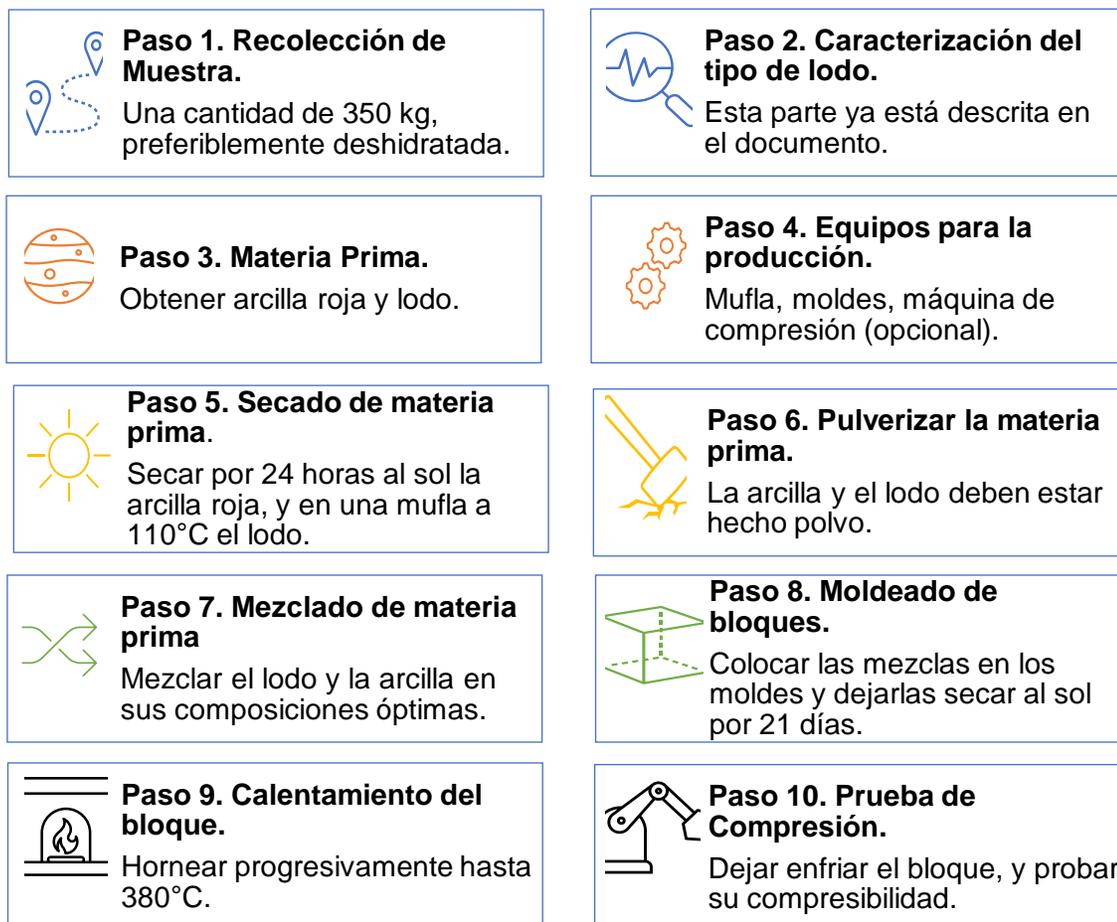
2.3.2.1 Etapa Inicial: Investigación del procedimiento y normativas.

Para poder implementar el prototipo del área de construcción, se realizó una investigación de las etapas a seguir para que se dé una buena formación del bloque,

por lo que, lo recopilado acerca del procedimiento se lo encuentra representado en el esquema de la figura 9. Cabe recalcar, que la duración del secado de los bloques, se los hizo mediante experimentación, dado que se tiene un tipo de materia prima exclusiva de la empresa que lo genera, por tal motivo sus características son distintas a las de investigaciones encontradas, es así que el procedimiento fue mediante prueba y error para encontrar la cantidad adecuada de tiempo de secado y de la mezcla a utilizar; para comprobar que estos fueran funcionales se les realizó análisis y se los comparó con la normativa para comprobar que se encuentren dentro de los parámetros establecidos.

Figura 9

Esquema de procedimiento de los bloques



2.3.2.2 Etapa de Desarrollo: Seguimiento del procedimiento. Se analizó el lodo muestreado para conocer sus propiedades físicas, químicas y biológicas, también se realizó la comparación con las respectivas normas para el establecimiento de criterios y planteamiento de propuestas. Además, se hizo un análisis preliminar del proceso de fabricación de cemento, para lo cual fue necesario tener una caracterización previa del tipo de lodo con el que se hizo la mezcla para la formación del bloque, los análisis que se realizaron fueron: Granulometría, Límites de Atterberg y Humedad. Luego de saber que el tipo de lodo que tenemos es limoso elástico con contextura fina, se conoce que es

preferible usar arcilla roja en lugar de cemento para la mezcla de los bloques, cabe mencionar, que es necesario hacer los mismos análisis antes mencionados a la arcilla.

Para la realización del prototipo se prevé el tener un molde del mismo tamaño para todas las mezclas con composiciones distintas, con el fin de poder comparar los resultados en las pruebas de compresión. Además, según investigaciones realizadas, la cantidad óptima de lodo con la arcilla debe ser menor al 10%, por lo que, hicimos bloques con la composición de lodo en 0%, 5% y 10%, sin embargo, como estas cantidades representan una cantidad muy baja de lodo, se realizaron bloques con mezclas al 25%, 50% y 100%.

Figura 10

Prototipo de los bloques con las diferentes mezclas



Nota. Al estar la mezcla húmeda de los bloques, el etiquetado se lo puso de forma lateral con su respectiva composición.

Para obtener las mezclas en las composiciones mencionadas, se consideró que se debía tener la cantidad suficiente de lodo y arcilla para poder realizar las mezclas en seco, por lo que, se pulverizaron las materias primas hasta que quedaron con una contextura de polvo, luego se tomó una cantidad de 600g como masa total para la primera muestra, con el fin de verificar la cantidad aproximada que se usaba por bloque, se realizó la prueba con el bloque de 100% arcilla, luego añadimos agua hasta tener

una contextura moldeable, comenzamos agregando agua en un 20% del total de la masa total dado que según investigaciones sobre mezclas de arcilla con lodo esa era la cantidad de agua se suele poner, pero como todavía no tenía la contextura deseada, se le agregó más hasta llegar a un 30% aproximadamente, cabe mencionar que como se tienen diferente tipo de lodo, la cantidad de agua que se le debe añadir lo hicimos experimentalmente; adicional a esto, para que no se peguen las mezclas, se colocó grasa en las paredes del molde.

También se debe mencionar que la cantidad de la mezcla utilizada no se la usó completamente para realizar los bloques, ya que, se debían de realizar análisis de Límites de Atterberg para cada mezcla, hicimos una mayor cantidad de mezcla total para luego tomar alrededor de 110g para ese ensayo, y lo demás se lo utilizaría para la mezcla con lodo y agua para la formación de los bloques, estos tenían una medida de 5cm por cada lado, por lo que, su capacidad era limitada, así que lo que sobraba se desechaba; las composiciones realizadas se las puede ver en la tabla 4.

Tabla 4

Mezclas con sus respectivas composiciones para la formación de los bloques

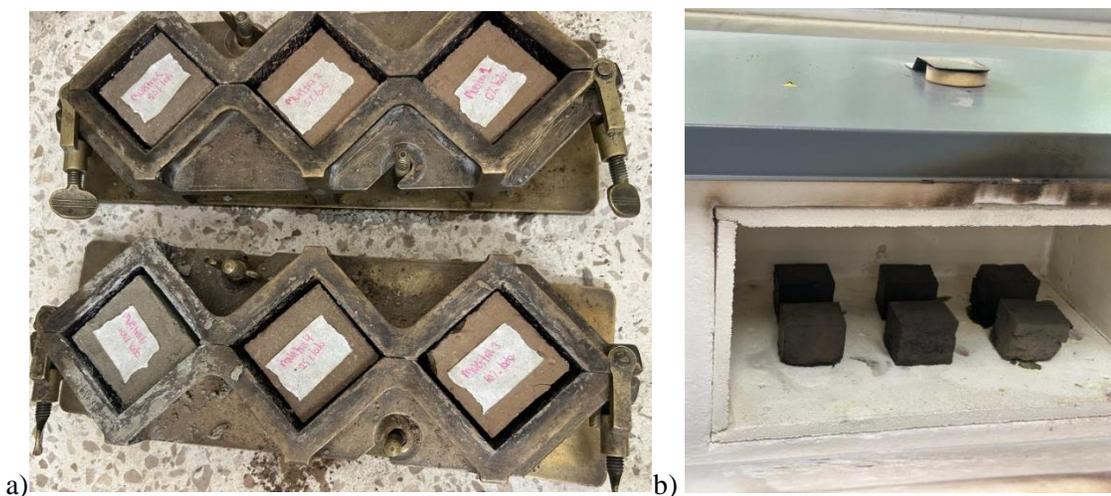
Mezcla	Composición	Peso de lodo (g)	Peso de arcilla (g)	Agua (g)
M1	0% lodo + 100% arcilla	0	600	180,29
M2	5% lodo + 95% arcilla	20	380,34	99,1
M3	10% lodo + 90% arcilla	40,03	360,04	103,08
M4	25% lodo + 75% arcilla	100,02	300,66	18,48
M5	50% lodo + 50% arcilla	200,08	200,03	25,81

M6	100% lodo + 0% arcilla	400	0	67,92
-----------	------------------------------	-----	---	-------

Las mezclas en los moldes deben dejarse secando por al menos 21 días, pero fuimos revisando constantemente su estado para comprobar si el bloque se encontraba formado con días de anticipación o si le faltan más días de secado, dado que luego se sacan los moldes y se los mete al horno donde subió progresivamente hasta una temperatura de 380°C, pasado este tiempo, ya se tendrían los bloques formados, así como en la figura 11.

Figura 11

Bloques luego de secarlos al sol y en el horno



Nota. En la imagen a) son los bloques secos luego de 21 días, mientras que en la imagen b) se muestran luego de hornearlos, deben quedar de un color uniforme y no se debe pasar el tiempo, sino pueden quebrarse.

2.3.2.3 Etapa de Validación del Prototipo. Una etapa importante es la comprobación de la funcionalidad del prototipo, por lo que se hacen curvas respecto a la mezcla con la composición usada y la resistencia que obtuvo en la prueba de compresibilidad, estas gráficas

podrán ser realizadas al finalizar los prototipos. Según los resultados obtenidos, se puede hacer una comparación con las normativas para poder clasificar el bloque y comprobar que sus parámetros estén dentro del rango establecido para que sea segura su implementación.

Las normativas INEN que se emplean para la validación del prototipo de ladrillos de arcilla en el país son:

- **Norma 292:** Muestreo, permite tener una guía para la inspección de los ladrillos, esto es para cuando se tengan en una cantidad masiva de producción y no se puedan revisar cada uno.
- **Norma 293:** Definiciones, Clasificación y Condiciones Generales, se mencionan las dimensiones que deben tener los ladrillos según la forma en que se fabrique.
- **Norma 294:** Determinación de la resistencia a la compresión, indica la metodología para establecer la resistencia máxima que puede tener un bloque.
- **Norma 295:** Determinación de la resistencia a la flexión, da un método de ensayo para realizar este tipo de procedimiento de manera adecuada y ver la resistencia máxima del bloque realizado.
- **Norma 296:** Determinación de la absorción de la humedad, establece un método de ensayo para determinar la absorción de humedad que tienen los ladrillos.
- **Norma 297:** Requisitos. Permite la clasificación del tipo de ladrillo según la resistencia a la compresión y flexión, además de la absorción de la humedad que puede tener.
- **Norma 317:** Dimensiones modulares de ladrillos cerámicos.

Para poder realizar el ensayo de compresibilidad, se tuvo que poner a hornear los bloques con el fin de hacer que su estructura sea más compacta y resistente, luego para poder colocarlos en el equipo es necesario el dato de su longitud, así que se realizaron tres

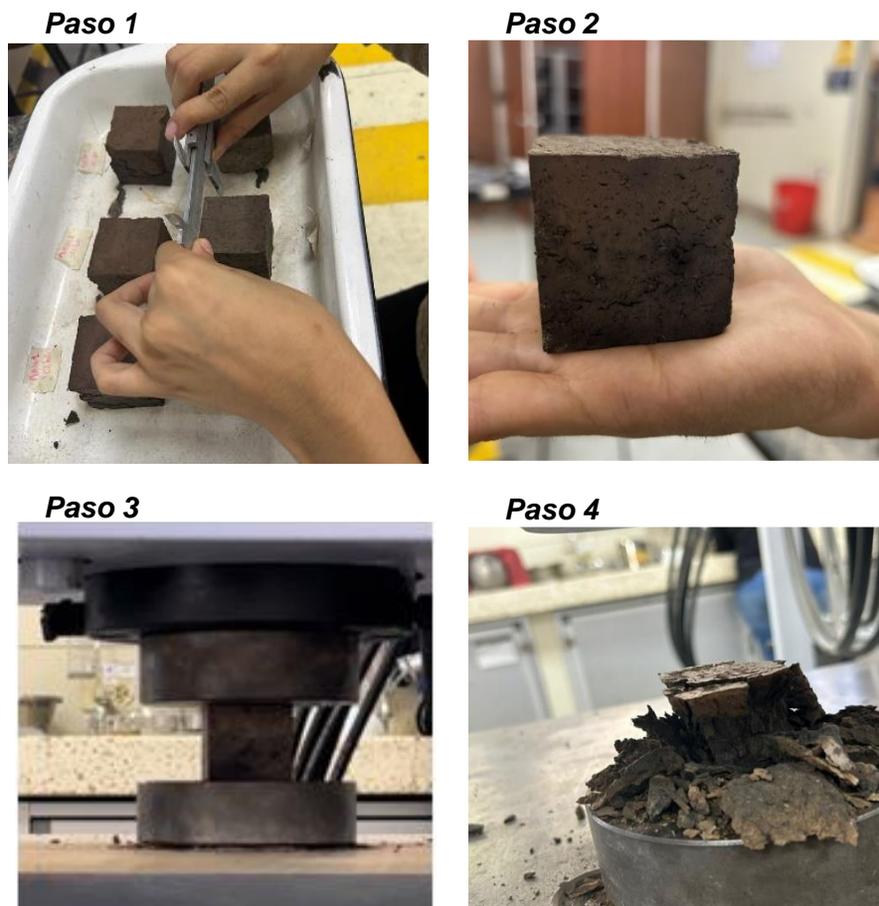
mediciones con un calibrador Vernier, de manera vertical y horizontal, para sacar un promedio de estos, en la cara más uniforme del bloque, como se muestra en la figura 12.

Tabla 5

Mediciones de las caras del bloque

Muestra	M1 (0%)	M2 (5%)	M3 (10%)	M4 (25%)	M5 (50%)	M6 (100%)
Horizontal (mm)	46.8	45.9667	46.7	45.033	45.933	45.6
Vertical (mm)	46.63	45.8667	45.0667	44.9667	45.7667	46.433

Nota. Las mediciones de los bloques permiten conocer si los lados del bloque son regulares, para que la fuerza aplicada pueda distribuirse uniformemente.

Figura 12*Procedimiento del ensayo de resistencia*

Luego de realizar el ensayo de resistencia, el equipo mostró los datos de tiempo, fuerza, compresión, y desplazamiento, nos enfocamos principalmente en los datos de la compresión, dado que estos pueden ser comparados con la normativa INEN 297 para poder clasificar los bloques, es decir, con esto se puede verificar que la mezcla sea adecuada según el tipo de ladrillo a elaborar, los que se indican en la normativa son los siguientes:

- **Macizo Tipo A:** Ladrillo reprensado, con ángulos y aristas rectos, sin manchas ni quemados en caras o aristas.
- **Macizo Tipo B:** Ladrillo de máquina, puede tener pequeñas imperfecciones en sus caras exteriores, así como variaciones de rectitud en sus aristas hasta 5 mm.

- **Macizo Tipo C:** Puede ser fabricado a máquina o a mano, además de tener imperfecciones en sus caras exteriores y variaciones en la rectitud en sus aristas hasta de 8 mm.
- **Hueco Tipo D:** Debe ser con una máquina, puede emplearse en la construcción de muros soportantes, tabiques divisorios no soportantes y relleno de losas alivianadas de hormigón armado.
- **Hueco Tipo E:** Fabricado a máquina, sólo para construcción de tabiques divisorios no soportantes y rellenos de losas alivianadas de hormigón armado.
- **Hueco Tipo F:** Elaborado con una máquina, solo para relleno de losas alivianadas de hormigón armado.

(Norma INEN 297, 1976)

Capítulo 3

3. Resultados y análisis

Se procede a detallar los datos conseguidos de las pruebas realizadas, para posteriormente analizar si las propuestas son adecuadas, iniciando con la caracterización de la materia prima.

3.1 Caracterización

Humedad

En la tabla 6 se observa la humedad del lodo, se considera la humedad obtenida relativamente alta, además se debe considerar la característica higroscópica de los lodos aluminosos, que impide el secado al aire libre.

Tabla 6

Humedad del lodo

Parámetro	Cantidad	Unidad
Peso de Recipiente	148.9	g
Peso de Recipiente + muestra húmeda	448.8	g
Peso de muestra húmeda	299.9	g
<i>Luego, pasa por un secado durante 24 horas</i>		
Recipiente + muestra seca	281.2	g
Muestra seca	132.3	g
Cálculo de Humedad		
H	55.8853	%

Nota. El horno se lo colocó a 100°C para secar la muestra.

Granulometría

Al seguir el procedimiento de granulometría se realizó el cálculo de la masa retenida determinado con el valor de la masa recipiente y muestra lavada, y restando el valor de la masa del recipiente, lo cual quedó como 0.26g, mientras que el valor de la masa antes del lavado, se lo obtiene como la masa del recipiente y la muestra sin lavar, luego restando el valor del recipiente, estos valores se los encuentra en la tabla 7.

Tabla 7

Resultados del análisis de granulometría

Parámetro	Cantidad	Unidad
Masa Recipiente	375.07	g
Masa Recipiente + Muestra sin lavar	149.94	g
Masa Muestra sin lavar	225.13	g
<i>Luego del lavado en el tamiz #200 con abertura de 0.075 mm</i>		
Masa Recipiente + Muestra Lavada	150.2	g
Masa Retenida (Muestra Lavada)	0.26	g

Después, se utilizó la ecuación 2.2, con los valores antes mencionados y se obtuvo qué %Retención es 0.1155%, esto indica que la hipótesis antes mencionada se confirma, dado que no hubo casi nada de sólidos retenidos.

Límite de Atterberg

De acuerdo con la metodología descrita se anotó el número de golpes cuando las dos mitades entren en contacto en aproximadamente 13mm de longitud, la cantidad que está dentro de la zona de contacto, se la pesó y se anotó el valor, estos datos se los

visualiza en la tabla 8. Cabe mencionar, que estos procedimientos pueden hacerse con una mayor cantidad de veces para tener una mejor precisión al momento de graficar la curva de %Humedad vs N° de Golpes.

Tabla 8

Análisis de limite líquido – límites de Atterberg

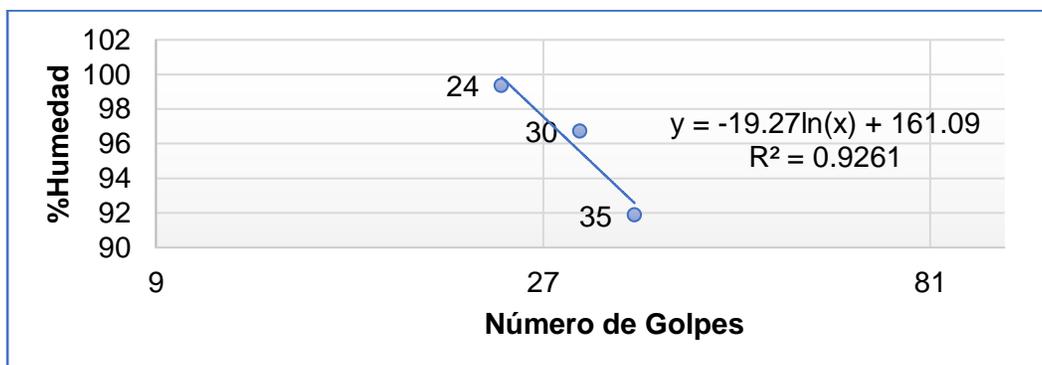
Análisis del Lodo	Límite Líquido		
	Repetición del procedimiento con distintos números de golpes		
	1	2	3
Nombre del recipiente	38	21	71
A: Masa del recipiente (g)	6.15	6.32	5.97
N: Número de Golpes	35	30	24
B: Masa de suelo húmedo + recipiente (g)	16.53	16.53	15.24
C: Masa de suelo seco + recipiente (g)	11.56	11.51	10.62
D = B - C: Masa de agua evaporada (g)	4.97	5.02	4.62
E= C - A: Masa de suelo seco (g)	5.41	5.19	4.65
Humedad D/E*100 (%)	91.86691	96.72447	99.35484

Nota. Es necesario que la diferencia entre el valor del número de golpes sea distante para poder tener una mejor curva.

Luego se realizó la curva con los valores mencionados y se obtuvo la línea de escurrimiento, se la puede visualizar en la figura 13, con la cual se puede determinar la ecuación de la curva, que representa los golpes para el límite LL, el punto de intersección entre la humedad y la línea de escurrimiento, junto con el número de 25 golpes, reemplazando los valores en la ecuación de la curva, se obtuvo el valor de LL que es 99%.

Figura 13

Gráfica de %Humedad vs N° Golpes.



Por otro lado, para obtener el valor del límite plástico LP, se tuvo que realizar pequeñas muestras en forma elipsoidal con el lodo, para esto, fue necesario que no se pegara a la placa de vidrio, por lo que, se esperó que seque hasta el punto de que sea manipulable como una plastilina, cuando tenga esa consistencia se la debe moldear hasta una forma circular, tomando pequeñas cantidades de la muestra, luego, se hizo rollos uniformes, la contextura debe ser lo más fino posible y con muestras de fisuras visibles a lo largo del mismo; se repitió el proceso hasta tener al menos 6 gramos, al tener ya las muestras de LP y LL, estas se colocaron juntas en una sola bandeja y se las secó en una mufla a 110°C durante 24 horas, al término del secado, se esperó a que se enfríe y se pesó las masas obtenidas, los valores para el límite LL y LP, son indicados en la tabla 8 y tabla 9, respectivamente.

Tabla 9*Análisis de límite plástico – límites de Atterberg*

Análisis del Lodo	Límite Plástico	
	Repetición del procedimiento	
	1	2
Nombre del recipiente	104	41
A: Masa del recipiente (g)	6.06	5.99
B: Masa de suelo húmedo + recipiente (g)	11.37	10.52
C: Masa de suelo seco + recipiente (g)	9.66	9.14
D = B - C: Masa de agua evaporada (g)	1.71	1.38
E = C -A: Masa de suelo seco (g)	3.60	3.15
Humedad D/E*100 (%)	47.50%	43.81%

Nota. Se necesita hacer el proceso dos veces para sacar un valor promedio y tener una mejor aproximación.

Además, para obtener el valor del límite plástico LP, fue con el promedio de los valores de humedad obtenidos, se calcula que LP = 46%. Finalmente, el valor del índice de Plasticidad IP, se lo consiguió como la resta entre el límite líquido LL y el límite plástico LP, lo cual da un resultado de 53%, estos valores son los más relevantes dado que permite clasificar el lodo, por lo que se los representa en la tabla 10.

Tabla 10*Resultado de límites de Atterberg*

Límite líquido LL	99%
Límite plástico LP	46%
Índice plástico IP	53%

Al analizar los resultados obtenidos se puede llegar a la conclusión que el lodo presenta características de un suelo limoso elástico, esto se lo determina mediante el

uso de la Carta de Plasticidad junto con los valores obtenidos de LL y el IP, se lo puede ver en el Anexo A, la cual permite que se realice la clasificación de los suelos mediante el sistema AASHTO.

De acuerdo con la Gráfica de Plasticidad, se puede observar que, en nuestro caso, la intersección se encuentra debajo de la Línea A, además de que sabemos que el suelo es fino, dado que pasó la mayoría de los sólidos por el tamiz #200, y como el Límite Líquido LL es mayor a 50, se puede ver que con estas condiciones en el Anexo A, nos indica que el símbolo del grupo al que pertenece es el MH.

Ahora, como sabemos que el valor del límite líquido LL es mayor a 50, y que el símbolo del grupo al que pertenece el suelo es MH, además de que lo que se retuvo en el tamiz #200 fue menor al 15%, se puede ver que según el Anexo B, el lodo estaría clasificado como limo elástico.

Con la Gráfica de Plasticidad, se pudo observar que, en nuestro caso, la intersección se encuentra debajo de la Línea A, además de que sabemos que el suelo es fino, dado que pasó la mayoría de los sólidos por el tamiz #200, y como el Límite Líquido LL es mayor a 50, se puede ver que con estas condiciones en la tabla del Sistema Unificado de Clasificación de Suelo (SUCS) del libro Fundamentos de Ingeniería Geotecnia, nos indicó que el símbolo del grupo al que pertenece es el MH.

Ahora, como sabemos que el valor del límite líquido LL es mayor a 50, y que el símbolo del grupo al que pertenece el suelo es MH, además de que lo que se retuvo en el tamiz #200 fue menor al 15%, se puede ver que el lodo estaría clasificado como limo elástico según el diagrama de flujo de nombres de los grupos para lino orgánico y suelos arcillosos del libro Fundamentos de Ingeniería Geotecnia.

Análisis fisicoquímicos

Los resultados del análisis fisicoquímico de la tierra de sembrar y el lodo se muestran en la tabla 11, para mejor comprensión de lo obtenido se marcó de rojo los valores que incumplen los límites del acuerdo ministerial N° 28, normativa con la que se puede avalar la reutilización del lodo, esta comparación solo se hizo para los resultados del lodo de la PTAP. Cabe recalcar que no todos los parámetros analizados se encontraron en esta normativa, pero sirvieron de respaldo en el seguimiento del crecimiento de la planta.

Tabla 11

Resultados fisicoquímicos

Parámetro	Unidades	Tierra de sembrar	Lodo	Valor permisible – residencial	Valor permisible – Agrícola
Conductividad	mS/cm	0.4959	5.80	1.99	1.99
pH	-	8.03	6.93	6-8	6-8
Salinidad	psu	0.24	3.15	-	-
Macroelementos					
Calcio	mg/kg	13400	9200	-	-
Potasio	mg/kg	57200	11400	-	-
Hierro	mg/kg	63300	54500	-	-
Microelementos					
Cobre	mg/kg	105.06	81.58	63	63
Manganeso	mg/kg	1100	737.07	-	-
Níquel	mg/kg	67.80	52.68	100	50
Zinc	mg/kg	184.92	143.19	200	200
Metales pesados					
Arsénico	mg/kg	8.14	13.88	12	12
Plomo	mg/kg	10.49	14.06	140	60
Cadmio	mg/kg	0.39	0.20	4	2
Cromo	mg/kg	108.33	100.21	64	65

Nota. ciertos valores no constan en la normativa para regular su utilización en la remediación.

A manera general al realizar la comparación entre los resultados obtenidos del lodo de la PTAP y los límites de la normativa correspondiente se observan parámetro que presentan desviación, tal es el caso de algunos macronutrientes como el cobre y níquel, y metales pesados como el arsénico y cromo, se considera que estos elementos provienen principalmente de la materia prima, en este caso del agua de mar, debido a que en el proceso de potabilización solo se utilizan químicos como el sulfato de aluminio y polímero.

Por otro lado, se realizó la comparación entre los resultados obtenido de la tierra de sembrar y el lodo de la PTAP y se observó que algunos parámetros de la tierra de sembrar se encuentran fuera de rango, por ejemplo, el pH de la tierra de sembrar analizada está en un medio básico, además de estar fuera del rango establecido por normativa, mientras que el lodo se encuentra en un medio neutro y dentro de los límites permisibles. Otro parámetro necesario en destacar son los metales pesados, se observa mayor cantidad de cromo en la muestra de tierra de sembrar que en el lodo, ambos valores fuera del rango permitido, un alto contenido de cromo en un suelo apto para sembrío implica alteración en material genético en la planta y posibilidad de causar cáncer por la ingesta de alimentos cosechados de estas tierras. En cuanto a los microelementos, el parámetro a destacar es la comparación de cobre, este valor en la tierra de sembrar y en el lodo se encuentran por encima del rango permitido, lo que puede implicar en el sembrío disminución en la biomasa y actividad metabólica, afectando los tejidos aéreos y estomas involucradas en el intercambio gaseoso (Apaza et al., 2019).

En cuanto a la comparación de los resultados de la caracterización del lodo y los límites permisibles para uso residencial o construcción se pudo observar que microelementos como el cobre y el níquel se encuentran por encima del rango permitido. De igual modo se observó que de los metales pesados analizados los resultados de arsénico y cromo se encontraban en un

rango superior al aceptado por la normativa. La desviación de estos parámetros pudo afectar en el proceso de compactación al elaborar el bloque de arcilla y lodo.

3.2 Material de Construcción

Al realizar el procedimiento de caracterización de los bloques con las distintas composiciones de lodo, se encontró que los límites de Atterberg difieren, por lo que, su tipo de material también varía según el resultado obtenido, esto se lo determina mediante la Carta de Plasticidad y la tabla del SUCS, con lo cual se determina el símbolo del grupo, se lo representa en la tabla 12.

Tabla 12

Clasificación del tipo de material

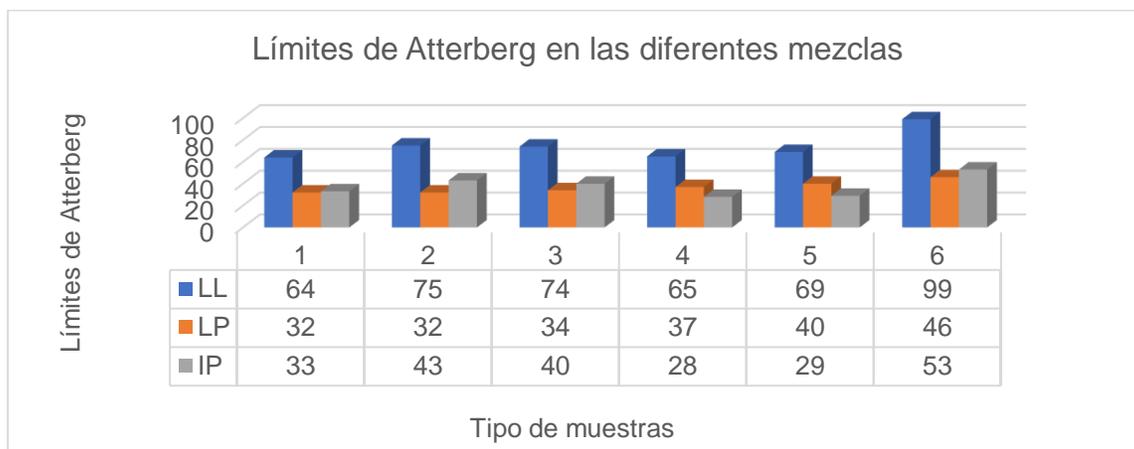
Muestras	1	2	3	4	5	6
Composición	0%	5%	10%	25%	50%	100%
Símbolo del grupo	CH	CH	CH	MH	MH	MH

Nota. Indica la cantidad de lodo que tiene cada muestra y por consiguiente su tipo de suelo representado por el símbolo del grupo según al SUCS.

Esto indica que la composición influye en el tipo de material que se tiene, dado que a mayor cantidad de lodo hace que sea un tipo de suelo de grano más fino; los símbolos del grupo MH indica que son limos inorgánicos de alta compresibilidad y arcillas orgánicas, mientras que el símbolo CH es para limos inorgánicos de plasticidad alta, dado que la M representa el limo inorgánico y la C la arcilla inorgánica, la letra H indica que es de alta plasticidad, es decir cuando el límite de Atterberg líquido mayor a 50, esto se muestra en la figura 14.

Figura 14

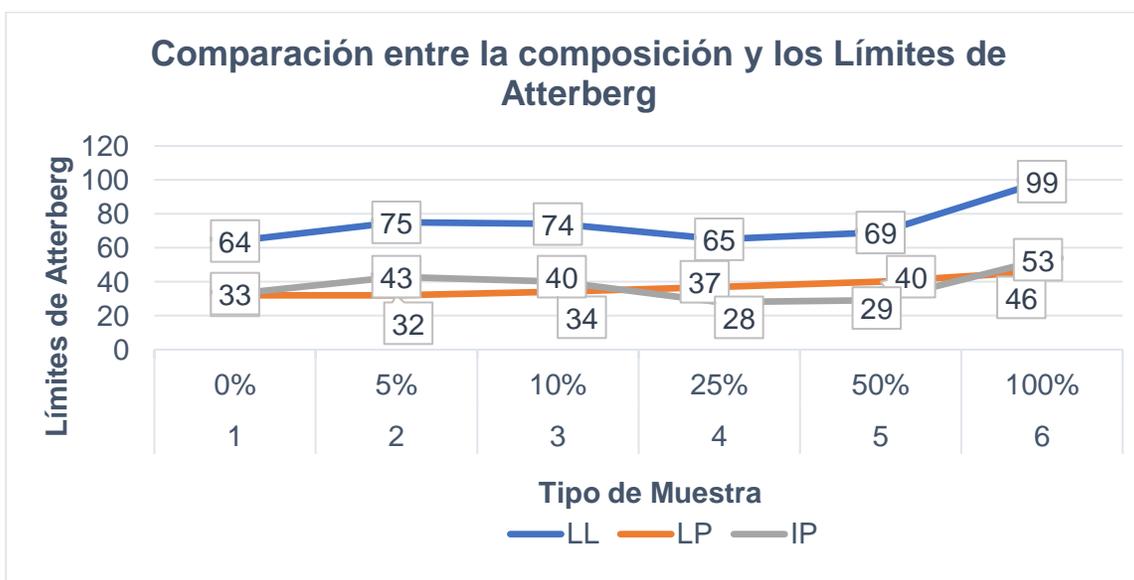
Diagrama de Barras de los Límites de Atterberg en cada muestra



Al realizar la comparación de los límites de Atterberg LL, LP e IP en cada muestra se puede observar que la muestra 6 (100% lodo) es la que mayor número de LL, mientras que el de la muestra 1 (0% lodo) tiene el menor valor de LL, de igual manera sucede con el valor de LP, esto quiere decir que, por lo general mientras más lodo tenga la mezcla es más probable que los valores de los límites aumenten, así como se indica en la figura 15.

Figura 15

Comparación entre la composición y los Límites de Atterberg



A medida que incrementa la composición de Lodo, el límite de Atterberg LL tiene tendencia a incrementar su valor, de igual forma sucede con los valores del LP, así mismo, el valor del IP empieza con una cantidad menor en la primera mezcla con respecto al de la sexta muestra. Por otro lado, para el ensayo de compresión, es necesario considerar los parámetros de: tiempo, fuerza, compresión y desplazamiento, dado que permite determinar la mezcla que hizo el bloque más resistente, se dan los resultados en la tabla 13.

Tabla 13

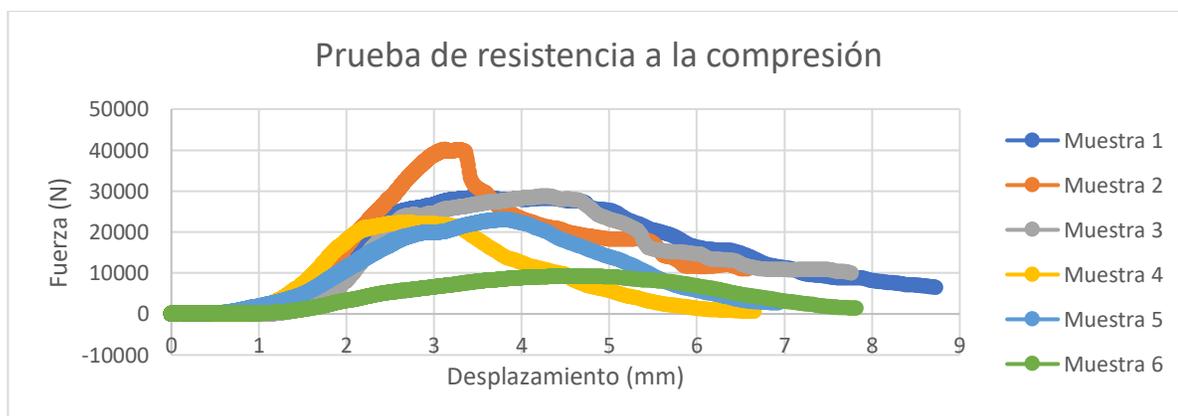
Comparación de los parámetros del ensayo para los bloques

Muestra	Máxima Fuerza (N)	Máxima Deformación (%)	Máxima Compresión (MPa)	Máximo Desplazamiento (mm)
1	28381	6.91800	13.0052	3.45900
2	40084	6.2355	19.0094	3.11775
3	28670.6	8.57900	13.6217	4.2895
4	22220.5	5.43875	10.9731	2.71938
5	22961	7.60825	10.9223	3.80413
6	9138.27	9.53125	4.31619	4.76563
Promedio	25242.6	7.38513	11.97465	3.69257

Las muestras que tienen mayor cantidad de lodo tienen una compresión menor, esto se debe a que este material es más fino, por lo tanto, hace que no sea tan resistente.

Figura 16

Diagrama de Fuerza contra Compresión respecto a las distintas composiciones.



Cabe indicar que este procedimiento también permite clasificar los bloques mediante la comparación de la compresión acorde a la norma INEN 297.

Tabla 14

Resistencia de los bloques comparando con la normativa

Muestra	Compresión Máxima (MPa) Bloques Elaborados	Compresión Mínima (MPa) Normativa INEN 297	Tipo de Ladrillo Normativa INEN 297
1 (0% Lodo)	13.0052	8 MPa	Macizo Tipo C
2 (5% Lodo)	19.0094	16 MPa	Macizo Tipo B o C
3 (10% Lodo)	13.6217	8 MPa	Macizo Tipo C
4 (25% Lodo)	10.9731	8 MPa	Macizo Tipo C
5 (50% Lodo)	10.9223	8 MPa	Macizo Tipo C
6 (100% Lodo)	4.31619	4 MPa	Hueco Tipo E
		3 MPa	Hueco Tipo F

Nota. Se compara la compresión máxima que resistieron los bloques con lo mínimo requerido según la normativa para determinar qué tipo de bloque podría ser usado según su composición.

Acorde a lo antes mostrado, se tiene que el bloque más resistente es el de la muestra 2, sin embargo, es importante mencionar que todos los bloques fueron elaborados de manera manual, y acorde a la normativa INEN 297, solo los bloques macizos tipo C se pueden hacer sin máquina, por lo que, siguiendo esa indicación, todos los bloques a excepción del último podrían realizarse, dado que cumplen con la compresión mínima de 8MPa, y al comparar las composiciones, es preferible usar el de la mayor cantidad de lodo, puesto que así se puede reutilizar más desecho y permite disminuir los costos de materia prima al tener que utilizar menos arcilla para la elaboración de los mismos, es así que con esas dos premisas se tiene que el bloque 5 con una composición de 50% lodo sería el más óptimo para utilizar. Dado que los ladrillos a elaborar son del tipo común, dado que son moldeados a mano, por lo que, acorde con la Normativa INEN 293, las dimensiones de los ladrillos deben de ser con un largo de 39cm, ancho de 19cm y con altura de 9cm, es imprescindible indicar que por limitaciones de tiempo y recursos no se los pudo realizar de este tamaño, dado que, a medida que incrementa

el tamaño, se necesita de más materia prima, además su tiempo de secado al sol debe ser más riguroso para que la mezcla se compacte de manera adecuada.

3.3 Abono Agrícola

A continuación, se muestran los resultados obtenidos del seguimiento de las plantas en las diferentes concentraciones de lodo.

Lechuga

Al realizar el seguimiento del crecimiento de esta especie en las diferentes mezclas de lodo y tierra de sembrar se observó desde los primeros días que el crecimiento era favorable en la tierra de sembrado, además se observó la reproducción de la semilla a más del doble de las colocadas en el primer día de plantación. Después de 23 días las plantas tenían una altura considerable, donde de igual manera predominaba un mayor crecimiento en la muestra 100% tierra de sembrado, pero se visualizaba que las demás muestras detuvieron su crecimiento e incluso empezaron a marchitarse. Al llegar al término del seguimiento de las plantas solo se tuvo de muestra las plantas de la maceta 100% tierra de sembrar, mientras que en las demás no se visualizó ningún tipo de crecimiento e incluso la tierra se tornó color verdoso, esto puede atribuirse a la propiedad higroscópica del lodo, que retuvo cantidad excesiva de agua permitiendo el crecimiento de hongo que desfavoreció a la planta. En la figura 17 se observa la comparación del primer y último día de cosecha.

Figura 17

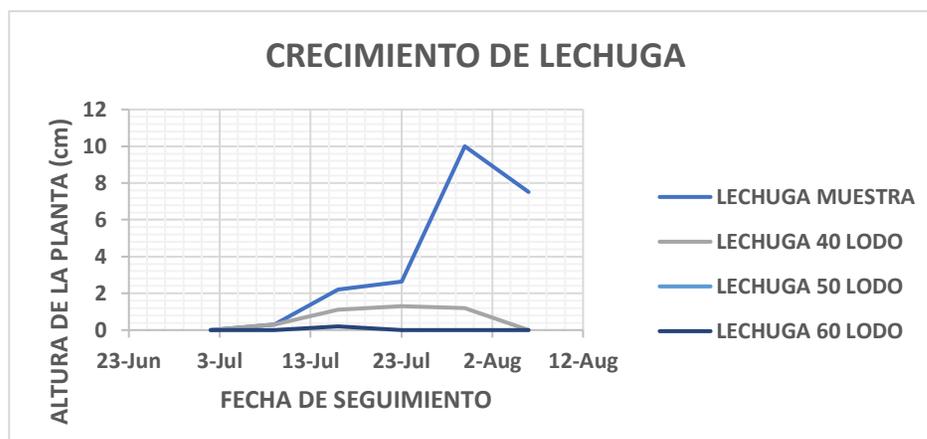
Día 1 de plantación vs día 39 de crecimiento de la lechuga



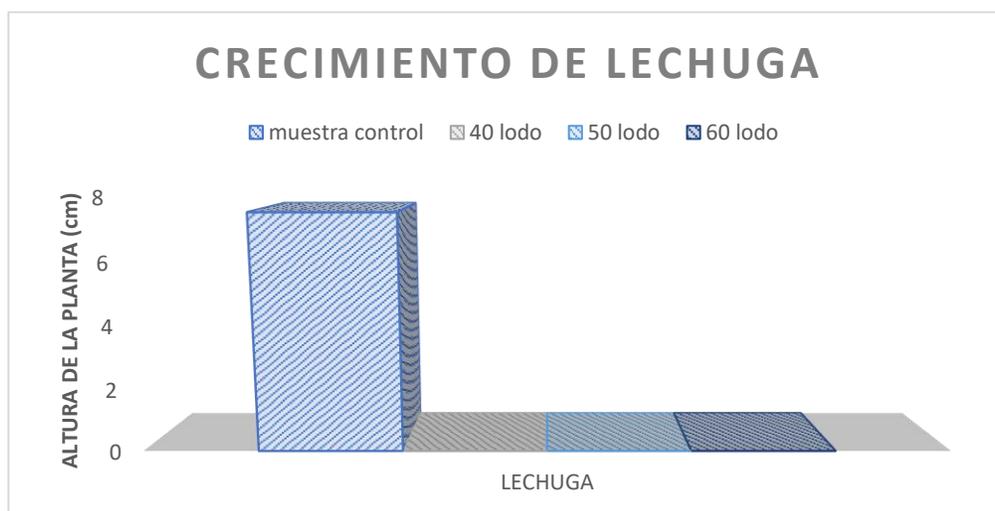
Mediante este seguimiento se observó que el lodo no es recomendable utilizarlo para la plantación de lechuga, pues retrasa su crecimiento y atrae la presencia de hongos en la tierra porque el agua no es drenada por la maceta debido a la consistencia del lodo. En la figura 18 se evidencia el crecimiento a lo largo del tiempo de la lechuga en las cuatro muestras, se observa una tendencia de crecimiento solo en la muestra control. Además, en la figura 19 se detalla a manera general la altura total de la lechuga al final del seguimiento, se observa que la muestra control tuvo un crecimiento de 6.7 cm aproximadamente mientras que las muestras con adición de lodo como sustrato la planta no creció.

Figura 18

Crecimiento de la lechuga a lo largo del tiempo

**Figura 19**

Crecimiento de la lechuga al finalizar el seguimiento



Rábano

Al realizar el seguimiento del rábano se observó que el mayor crecimiento de la planta predominó en la muestra de 100% tierra de sembrado. Mientras que en las muestras con lodo se observó un crecimiento más lento, además las plantas presentaron decoloración en las

hojas, estas se tornaron amarillentas por falta de agua, nuevamente la propiedad higroscópica del lodo no permitió que la planta absorbiera la cantidad necesaria para poder desarrollarse con normalidad. Al término del seguimiento se cumplieron los 35 días, lapso en el que normalmente se cosecha un rábano, a pesar de esto se realizó el proceso de cosecha y no se logró obtener ningún rábano, ni crecimiento de este en ninguna muestra. A más del lodo, se infiere en la fertilidad de la semilla la que provocó que no se logre cosechar ningún rábano, pues ni en la tierra más apta como la de sembrar se pudo cosechar.

De igual manera que la lechuga la tierra de las muestras con un cierto porcentaje de lodo empezaba a tornarse verdoso, lo que hace inferir que en muestras grandes el drenaje del agua es una dificultad mayor para la planta, debido a que para las plantas en macetas pequeñas esta característica verdosa del suelo no ocurrió en ninguna muestra. En la figura 20 se observa la comparación del primer y último día del seguimiento de esta especie.

Figura 20

Día 1 de plantación vs día 39 de crecimiento del rábano

Día 1 de plantación



Día 39 de plantación

100% Tierra de sembrar/60%Lodo



50%Lodo/40%Lodo



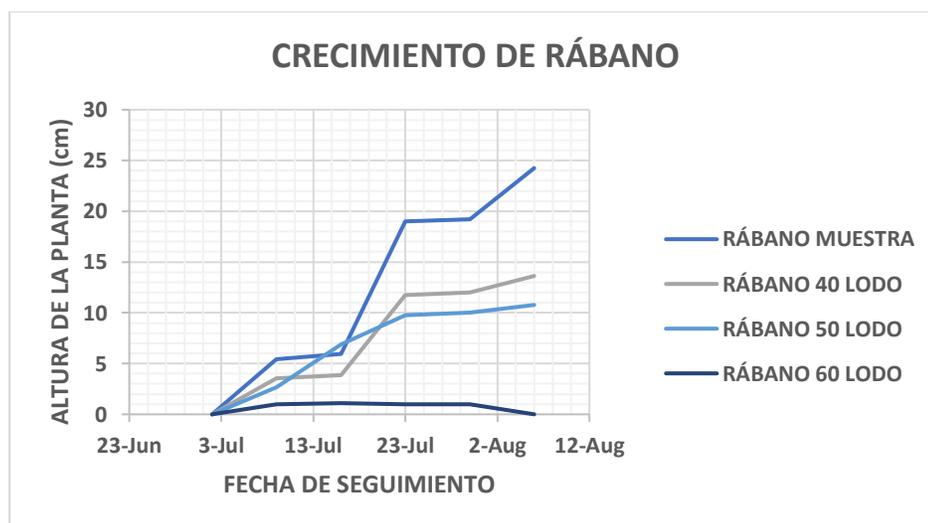
Resultados de la cosecha



Para mayor visibilidad del crecimiento de la planta se realizó la figura 21, que muestra la altura de la planta con respecto al tiempo, se puede observar que la mayor tendencia de crecimiento pertenece a la muestra control de 100% tierra de sembrar.

Figura 21

Crecimiento del rábano a lo largo del tiempo

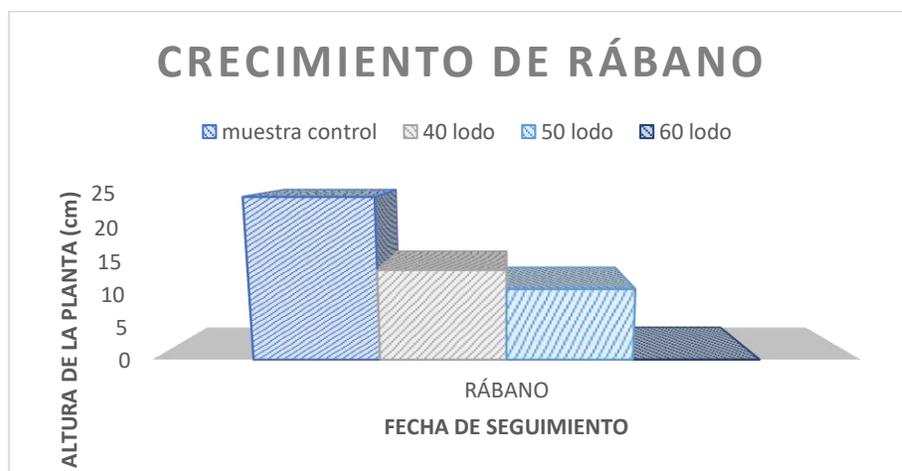


En la figura 22 se observa la altura final de la planta al término del seguimiento, se puede evidenciar que todas las muestras se desarrollaron, pero el crecimiento predominante

pertenece a la muestra control de 100% tierra de sembrado, descartando los demás prototipos como útiles para el crecimiento de esta especie.

Figura 22

Crecimiento del rábano al finalizar el seguimiento



Zinnia Gigante

El seguimiento de especie Zinnia Gigante como planta ornamental se registró de igual manera en la bitácora y se observó que los primeros crecimientos fueron la muestra de 100% tierra de sembrado, pero luego de 7 días la muestra del 40% lodo tuvo un crecimiento acelerado predominando como la de mayor crecimiento hasta el fin del seguimiento de la especie, además se observó que en esta muestra el tallo de la planta y hojas se apreciaban más grandes y verdes a comparación de la muestra control de tierra de sembrado. En la figura 23 se observa el desarrollo en el primer y último día del seguimiento.

Figura 23

Día 1 de plantación vs día 39 de crecimiento de la Zinnia Gigante

Día 1 de plantación

Control/100% Tierra de sembrar/60%Lodo/50%Lodo/40%Lodo

**Día 39 fin de seguimiento**

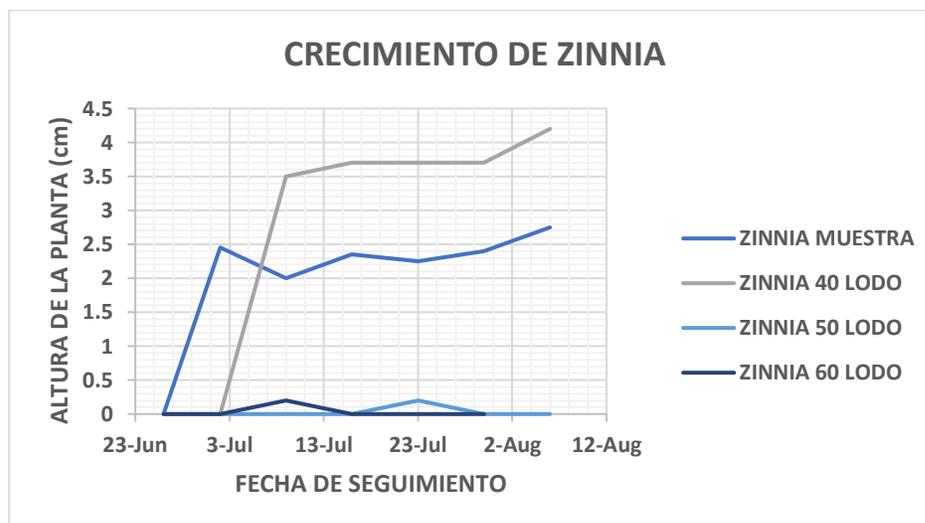
Control/100% Tierra de sembrar/60%Lodo/50%Lodo/40%Lodo



A manera general, se puede indicar que la mezcla óptima para el crecimiento de esta planta es 60% tierra de sembrado y 40% lodo, pero hay que recordar que el lodo tenía valores que están fuera de rango, por lo que no es del todo fiable plantar en esta mezcla. En la figura 24 se observa el crecimiento de la demás especie en distintas composiciones.

Figura 24

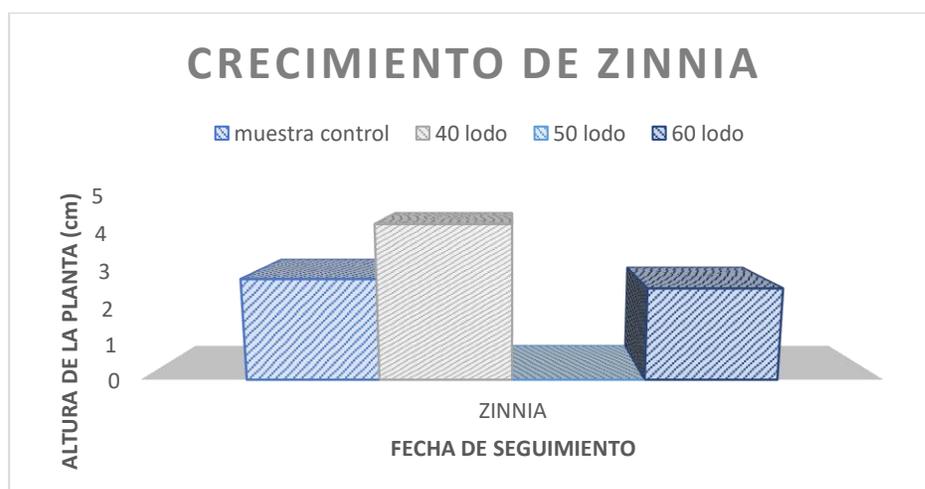
Seguimiento del crecimiento de zinnia



En la figura 25 se detalla el crecimiento final de la especie Zinnia, se observó que el 40% del lodo la planta llegó a 4 cm mientras que en la muestra control alcanzó los 2.3 cm. Esto se pudo dar porque esta especie es silvestre y tiende a adaptarse a cualquier tipo de suelo, el agua retenida en la maceta del 40% lodo pudo ayudar al crecimiento de la planta.

Figura 25

Día 1 de plantación vs día 39 de crecimiento de la Zinnia Gigante



Girasol

En el seguimiento de la especie del girasol se observó en los primeros días que el mayor crecimiento fue para la muestra de 40% lodo, pero al transcurrir el tiempo las muestras que tenía cierto porcentaje de lodo tuvieron una degradación de color en sus hojas, estas se tornaron amarillas y detuvieron su crecimiento, el motivo de este suceso es la falta de agua a la planta, nuevamente relacionada a la propiedad del lodo higroscópica. En la figura 26 se observa la comparación del primer y último día del seguimiento.

Figura 26

Día 1 de plantación vs día 39 de crecimiento del girasol

Día 1 de plantación

Control/100% Tierra de sembrar/60%Lodo/50%Lodo/40%Lodo



Día 39 fin de seguimiento

Control/100% Tierra de sembrar/60%Lodo/50%Lodo/40%Lodo



Al finalizar el seguimiento se observó que el mayor crecimiento se tuvo en la muestra de 100% tierra de sembrado.

Mediante la figura 27 se observa el crecimiento de la planta con respecto al tiempo, la tendencia de mayor altura se reportó en el sustrato de 100% arcilla. Además, en la figura 28 se observa con mayor detalle que el sustrato con mayor crecimiento fue la muestra control.

Figura 27

Seguimiento del crecimiento del girasol

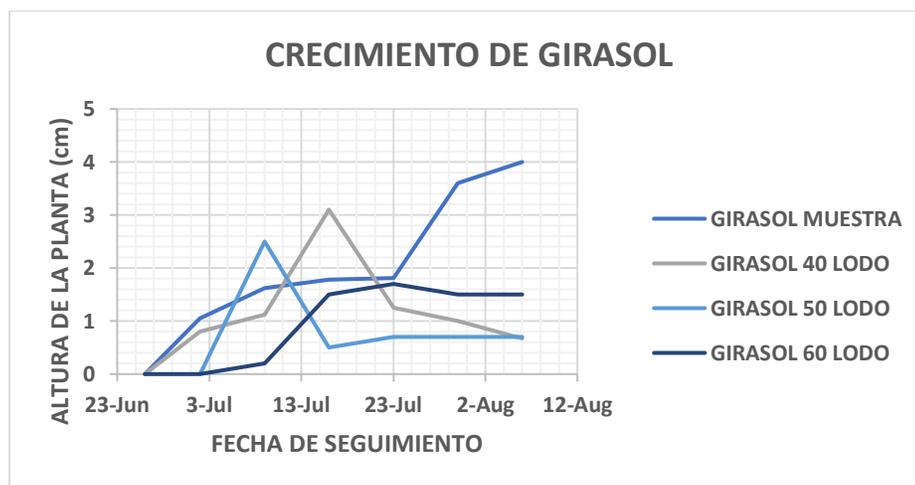
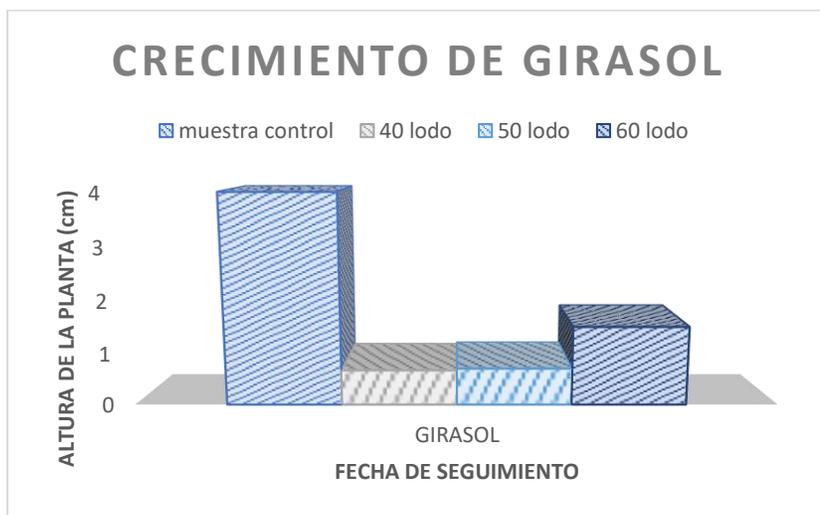


Figura 28

Día 1 de plantación vs día 39 de crecimiento del girasol



A manera general, al analizar la evolución de los 4 sustratos se observó que mezclar la tierra de sembrar con lodo no favorece al crecimiento de la planta, además esta mezcla puede favorecer al crecimiento de hongos por la imposibilidad de drenar el agua del suelo.

3.4 Análisis Económico

Esta sección se muestra el análisis económico de las propuestas planteadas para analizar la rentabilidad económica de implementarla como medida para la revalorización de los lodos de la planta potabilizadora de agua.

3.4.1 Análisis económico del material de Construcción

Es necesario tomar en cuenta los costos que tendrá el comprar los equipos para la elaboración de los bloques, es importante mencionar que el prototipo se lo realizó de forma manual, sin embargo, si se realiza a grandes escalas, es posible realizarlos con maquinaria, dado que el bloque macizo tipo C tiene esta particularidad según se lo indica en la normativa.

Tabla 15

Costos de los equipos para la elaboración del material de construcción

Parámetro	Descripción	Cantidad	Costo Unitario	Total
Maquinaria/ Equipo	Mezcladora y Extrusora	1	\$ 10,000.00	\$ 10,000.00
	Cortadora	1	\$ 180.00	\$ 180.00
	Secador y Horno eléctrico	1	\$ 3,250.00	\$ 3,250.00
Costo Maquinaria Total				\$ 13,430.00

También se debe considerar los costos fijos, variables y de servicios básicos, estos parámetros dependerán de las dimensiones que se le apliquen a los bloques, dado que mientras mayor sea su tamaño, se necesitará más cantidad de materia prima para su elaboración, además de que el horno utilizaría mayor energía para poder compactar el bloque de un mayor tamaño, es así que el uso de la luz incrementaría, es importante recalcar que estas dimensiones son dadas según la normativa 293 donde se clasifica según la elaboración del ladrillo, las medidas de los bloques pueden ser 39cmx19cmx9cm, dado que la normativa menciona que para bloques elaborados de manera manual y a maquinaria usan estas dimensiones; de todas maneras esto queda sujeto al convenio entre el cliente y el fabricante.

Añadiendo a lo antes mencionado, es importante tomar en cuenta que los costos también están relacionados con la tasa de producción esperada, por lo que, se pondrá un estimado acorde a la cantidad de lodo que produce la planta, el cálculo se lo realiza tomando en cuenta el lodo utilizado en la elaboración de la muestra óptima, este dato se lo obtiene de la tabla 4, se requiere hacer una estimación con el volumen de las nuevas dimensiones del bloque que se venderá, y relacionándola con la cantidad de lodo que es necesario para poder elaborar estos bloques, esto se lo realiza comparándola con los datos que se tienen de la experimentación, es decir bloques de dimensiones 5cmx5cmx5cm necesitan 0.2 kg de lodo, por lo que para los nuevos bloques se necesitará 11 kg de lodo aproximadamente, y como se sabe

que la producción semanal de lodo en la planta es de 350 kg, se realiza una proyección mensual y anual de la cantidad de bloques que se podrían realizar, se lo aprecia en la tabla 16.

Tabla 16

Producción estimada de bloques con la composición de la muestra 5

Tiempo	Producción Lodo (kg)	Cantidad de bloques
Semanal	350	33
Mensual	1050	98
Anual	12600	1180

Nota. Cantidad de bloques máximos que se pueden producir según la producción de lodo obtenida.

Luego, para determinar los costos de los servicios básicos, se determinó la cantidad de agua que usará cada equipo y la elaboración de los bloques, se lo indica en la tabla 17.

Tabla 17

Costo del servicio básico del agua

Servicio Básico: Agua					
Parámetro	Cantidad utilizada por bloque (kg/unidad)	Producción mensual (unidad/mes)	Cantidad por producción (kg/mes)	Vol. Utilizado (m3/mes)	Costo Servicio (\$/mes)
Elaboración	1.3771872	98	134.9643456	0.135370457	0.169213071
Equipos	-	-	-	40.86	51.075
Costo Total (\$/mes)				40.99537046	51.24421307

Nota. El precio del agua para industrias se aproximó a 1.25\$ considerando que se consume 40 m3 de agua.

Mientras que, para el servicio básico de la electricidad, se tuvo que ver la cantidad que los equipos necesitan para su funcionamiento, se lo visualiza en la tabla 18.

Tabla 18

Costos del servicio básico de electricidad.

Servicio Básico: Electricidad		
Equipos	Mezcladora y extrusora	Secadora y Horno
Cantidad utilizada (kWh)	1080	23200
Costo Total (\$/mes)		2233.76

Nota. El precio de la electricidad para industrias es de 0.092 \$/kWh y considerando que se use el primer equipo durante 6 h, y el segundo por 2.9 h.

Luego de tener los costos anteriormente mencionados, se realiza una investigación de los costos que pueden conllevar los costos variables y otros, esto se indica en la tabla 19.

Tabla 19

Costos fijos, variables y servicios básicos

Tipo	Descripción	Cantidad	Costo Unitario	Total Mensual	Total Costos
Costos Fijos	Arcilla (kg)	1050	\$ 0.50	\$ 525.00	\$ 975.00
	Lodo (kg)	1050	\$ -	\$ -	
	Sueldos de Empleados	1	\$ 450.00	\$ 450.00	
Costos Variables	Mascarillas	2	\$ 22.00	\$ 44.00	\$ 172.00
	Guantes Térmicos	2	\$ 10.00	\$ 20.00	
	Uniforme	2	\$ 24.00	\$ 48.00	
	Botas	2	\$ 30.00	\$ 60.00	
Servicios Básicos	Agua (m3)	41	\$ 51.24	\$ 2,100.84	\$ 4,334.60
	Electricidad (kWh)	24280	\$ 0.09	\$ 2,233.76	
Costo Total					\$ 5,481.60

Finalmente, se realizó la proyección a 10 años para el prototipo de bloques donde se observó que el proyecto no es viable económicamente para los primeros años, debido a que se tiene como limitante la producción de materia prima, es decir el lodo. Por lo que para la proyección realizada se consideró el aumento de producción con el incremento de materia

prima, pero tomada de otras industrias asociadas al cliente, que como desecho principal tienen lodo, cabe mencionar que para el uso de nuevo lodo como materia prima se debe de realizar una caracterización para observar la viabilidad de uso. Con cantidad extra de lodo, se realiza la proyección del Anexo C, considerando que la venta del bloque aumenta cada año, se presentó una rentabilidad del proyecto para 4 años luego de su implementación. Cabe mencionar que esta proyección fue realizada con una producción industrializada, motivo por el cual los equipos presentan un costo elevado, además se debe de considerar que el precio de estos puede variar según el lugar de adquisición y su nivel tecnológico. Por otro lado, se podría considerar reducción de los gastos iniciales al plantear una producción manual de bloques, en la que se utilice un mínimo de equipos, pero más personal operativo.

En base a la proyección del Anexo C se realizó el cálculo de determinación del VAN (valor actual neto) y TIR (tasa interna de retorno) del proyecto, mostrados en la tabla 20, se puede observar que el TIR presenta un valor de 32.11% indicando factible de inversión en el proyecto para maximizar las ganancias. Finalmente se detalla el flujo de caja acumulado para la proyección en este lapso.

Tabla 20

Resultados de inversión futura.

Flujo de caja acumulada	\$473.039,90
VAN	\$138.323,71
TIR	32.11%

3.4.2 Análisis económico del abono agrícola

Para el prototipo agrícola no fue posible el cálculo del VAN y el TIR, debido a que ninguno de los prototipos planteados fue factible para ser replicado, por tal razón no se realiza una proyección de ingresos ni egresos.

Capítulo 4

4. Conclusiones y Recomendaciones

4.1 Conclusiones

En el presente proyecto se logró analizar la revalorización del lodo de una PTAP mediante dos propuestas. La primera sobre la reutilización como abono agrícola para plantas ornamentales y alimenticias, siendo esta no factible porque se evidenció que el lodo afecta en el crecimiento de la planta, principalmente porque en su composición tiene déficit de materia orgánica, además afecta en el drenaje del agua de riego por la textura del lodo provocando agua estancada y formación de hongos en la tierra.

En cuanto a la segunda propuesta se evaluó el uso de lodo como materia prima para la elaboración de bloques de arcilla, donde se observó que la muestra de 5% lodo y 95% arcilla alcanzó una resistencia de 19 MPA a comparación de 13 MPA de resistencia de la muestra patrón. En cuanto a las demás muestras se observó que se encuentra por debajo e igual a la resistencia de la muestra patrón, pero dentro del rango de la norma INEN 297, por lo que se consideran factible para su reutilización. A pesar de esto, se toma como muestra óptima para la elaboración de bloques la composición de 50% lodos y 50% arcilla, debido a que permite que se dé la utilización del lodo en una proporción relevante, lo que implica la disminución de costos por materia prima.

La mezcla óptima para el prototipo de construcción es 50% lodo y 50% arcilla, dado que además de tener el parámetro de la comprensión dentro de los rangos establecidos de la normativa INEN 297, permite que se dé la utilización del lodo en una proporción relevante, lo que implica la disminución de costos por materia prima, sin embargo, en las otras proporciones también es posible realizar los bloques.

4.2 Recomendaciones

- El tiempo de secado al sol debe ser lo más cercano a 28 días que se pueda, para que el bloque pueda estar lo suficientemente formado y así poder llevarlo al horno, donde terminará de compactarse y aumentar su resistencia.
- Es recomendable realizar los ensayos de resistencia de flexión y absorción de humedad a los bloques elaborados con el fin de cumplir con los requisitos establecidos en la Norma INEN 297 para bloques cerámicos.
- Se sugiere poner a hornear los bloques de manera individual en el horno, dado que los bloques que tenían mayor composición de lodos son más susceptibles al incremento de temperatura, por lo que se hacen frágiles, hay que revisarlos cada 10 minutos para evitar que los bloques se quemen y se desmoronen.
- Las dimensiones de los bloques deben estar acorde a las normativas antes mencionadas, por limitaciones de tiempo y recursos no se pudo realizar de este tamaño.
- Se recomienda probar las otras mezclas dado que sus parámetros de compresión, y desplazamiento indican que pueden ser usados en otros tipos de bloques.
- En cuanto al prototipo agrícola, validar la fertilidad mediante plantaciones en tierra de sembrar estándar que tenga parámetros dentro de la normativa.
- Con respecto al prototipo agrícola, se sugiere poder analizar el tallo y hojas a la planta haciendo referencia a los parámetros desviados acorde a normativa para observar que tan probable es que los elementos se transfieran a la estructura de la planta y la conviertan en tóxica.
- Para mayor visibilidad, se sugiere que el periodo de seguimiento de las plantas sea de dos meses para obtener más data y crear una curva de tendencia sobre el

crecimiento, con esto se tendría mayor visual sobre cómo afectan los químicos fuera de rango en el desarrollo de la planta.

- Se recomienda, realizar nuevamente la experimentación de sembrar rábano en los 4 sustratos, pero asegurándose de que la semilla sea fértil. Realizar esto con el fin de observar cómo se altera el crecimiento del vegetal en cada muestra.

Referencias

Aldana Tique, A. J., & Pérez Rojas, R. A. (2017). Propuesta para el tratamiento y aprovechamiento de lodos en una PTAP convencional. Caso de estudio: planta de tratamiento de agua potable de El Espinal-Tolima.

Torres, P., Hernández, D. & Paredes, D. (2012). Uso productivo de lodos de plantas de tratamiento de agua potable en la fabricación de ladrillos cerámicos. *Revista Ingeniería de Construcción.*, vol. 27, no. 3, pp. 145-154. DOI: 10.4067/S0718-50732012000300003

Vanegas Chavarría, E. A. (2023). Diseño de una Planta de Tratamiento de Agua potable con Osmosis Inversa.

Albergamo, V., Blankert, B., Cornelissen, E., Hofs, B., Knibbe, W. J. J., Van Der Meer, W., & De Voogt, P. (2019). Removal of polar organic micropollutants by pilot-scale reverse osmosis drinking water treatment. *Water Research*, 148, 535-545. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.09.029>

Martins, D. T., De Paula Ramos, B., Perez, I. D., Pinheiro, J. C., Isique, W. D., & Freire, R. (2022). Sludge from a water treatment plant as an adsorbent of endocrine disruptors. *Journal of environmental chemical engineering*, 10(4), 108090. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108090>

Ling, Y. P., Tham, R., Lim, S., Fahim, M., Ooi, C., Krishnan, P., Matsumoto, A., & Lin, K. A. (2017). Evaluation and reutilization of water sludge from fresh water processing plant as a green clay substituent. *Applied Clay Science*, 143, 300-306. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.04.007>

- García, J. A., Moreno, V. M., & Rodríguez, J. C. (2017). VALORIZACIÓN DE LODOS PROCEDENTES DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE. UNA APUESTA POR LA ECONOMÍA CIRCULAR Y SOSTENIBILIDAD. *Dyna*. <https://doi.org/10.6036/8024>
- Chen, H., Ma, X., & Dai, H. (2010). Reuse of water purification sludge as raw material in cement production. *Cement & Concrete Composites*, 32(6), 436-439. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.02.009>
- Ranković, B., Gajic, V., Mašić, S., Pavićević, V., & Vujčić, I. (2023). Possibility of using ionizing radiation treated sludge from drinking water treatment plant as fertilizer in agriculture: Effects of aging. *Applied Radiation and Isotopes*, 192, 110602. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2022.110602>
- Céspedes Sánchez, S. S. y Jiménez Farieta, M. C. (2018) Desarrollo de un proceso de compostaje para el aprovechamiento de lodos resultantes de la planta de tratamiento de agua potable Francisco Wiesner Eaab-Esp (Trabajo de grado). Fundación Universidad de América. Retrieved from <http://hdl.handle.net/20.500.11839/6852>
- Quintana-Blanco, W. A., Pinzón-Sandoval, E. H., & Torres, D. F. (2016). Evaluación del crecimiento de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) CV ica cerinza, bajo estrés salino. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, 19(1), 87-95.
- Alegría, M. (2005). Planta Potabilizadora. 1, 23–26.
- CONAGUA. (2016). Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento Diseño de Plantas Potabilizadoras de. www.conagua.gob.mx
- Parsons, S., & Jefferson, B. (2006). Introduction to Potable Water Treatment Processes.
- Tchobanoglous, G., Burton, F., & Metcalf & Eddy. (1991). Wastewater engineering: treatment, disposal, and reuse. McGraw-Hill.

Estrada-Godoy, F., Cristobal-Acevedo, D., Silva-García, J. T., & Ochoa-Estrada, S. (2006). Calidad química del agua subterránea de la Ciénega de Chapala como factor de degradación del suelo. *Terra Latinoamericana*, 24(4), 503-513.

Apéndice A

Criterio para la asignación de símbolos de grupo				Símbolos de grupo	
Suelos de grano grueso Más de 50% retenido en el tamiz núm. 200	Gravas Más de 50% de fracción gruesa retenida en el tamiz núm. 4	Gravas limpias	$C_u \geq 4$ y $1 \leq C_c \leq 3^c$	GW	
		Menos de 5% finos ^a	$C_u < 4$ y/o $1 > C_c > 3^c$	GP	
	Arenas 50% o más de la fracción gruesa pasa tamiz núm. 4	Gravas con finos	$PI < 4$ o gráficos por debajo de línea "A" (figura 4.2)	GM	
		Más de 12% finos ^{a,d}	$PI > 7$ y gráficos en o por encima de línea "A" (figura 4.2)	GC	
		Arenas limpias	$C_u \geq 6$ y $1 \leq C_c \leq 3^c$	SW	
		Menos de 5% finos ^b	$C_u < 6$ y/o $1 > C_c > 3^c$	SP	
Suelos de grano fino 50% o más pasa a través del tamiz núm. 200	Limos y arcillas Límite líquido menor que 50	Inorgánico	$PI > 7$ y gráficos en o por encima de línea "A" (figura 4.2) ^e	CL	
		Orgánico	$PI < 4$ o gráficos por debajo de línea "A" (figura 4.2) ^e	ML	
Suelos altamente orgánicos	Limos y arcillas Límite líquido 50 o más	Inorgánico	$\frac{\text{Límite líquido: secado}}{\text{Límite líquido: no secado}} < 0.75$; vea la figura 4.2; zona OL	OL	
			Orgánico	Gráficos PI en o por encima de línea "A" (figura 4.2)	CH
	Materia orgánica principalmente, color oscuro y orgánico	Orgánico	Orgánico	Gráficos PI por debajo de "A" línea (figura 4.2)	MH
				$\frac{\text{Límite líquido: secado}}{\text{Límite líquido: no secado}} < 0.75$; vea la figura 4.2; zona OH	OH
Suelos altamente orgánicos				Pt	

^aGravas con 5 a 12% de finos requieren símbolos dobles: GW-GM, GW-GC, GP-GM, GP-GC.

^bArenas con 5 a 12% de finos requieren símbolos dobles: SW-SM, SW-SC, SP-SM, SP-SC.

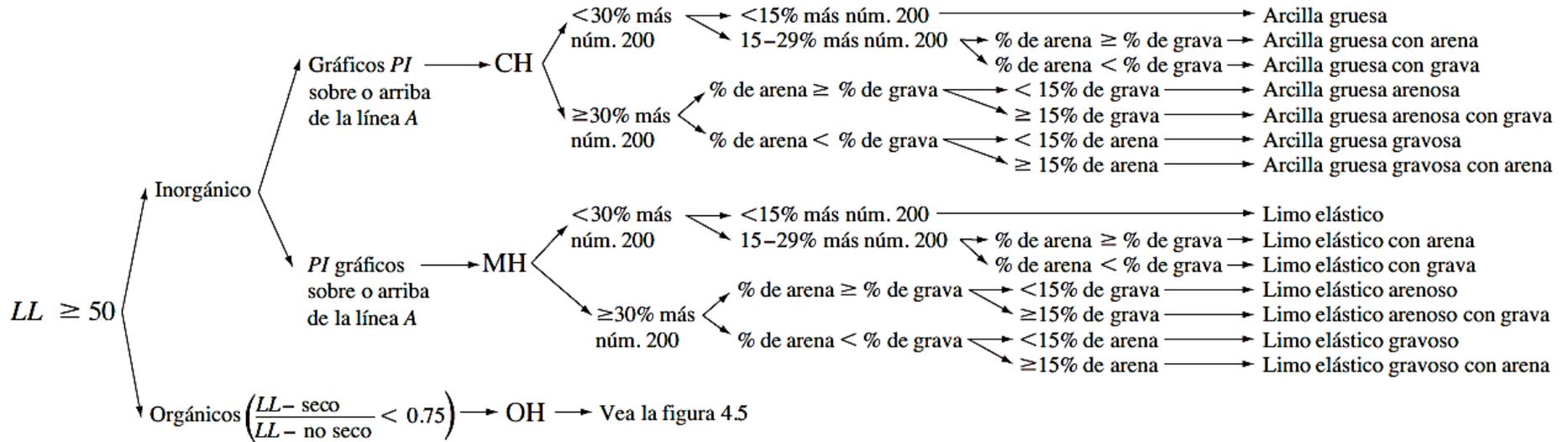
$$^c C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}; \quad C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} \times D_{10}}$$

^dSi $4 \leq PI \leq 7$ y gráficos en la zona rayada en la figura 4.2, se usa doble símbolo GC-GM o SC-SM.

^eSi $4 \leq PI \leq 7$ y gráficos en la zona rayada en la figura 4.2, se usa doble símbolo CL-ML.

Nota. La tabla es tomada del libro Fundamentos de Ingeniería Geotécnica (2013) y representa el Sistema Unificado de Clasificación de Suelo (SUCS) que pasa por el tamiz número 75.

Apéndice B



Nota. El diagrama de flujo es tomado del libro Fundamentos de Ingeniería Geotécnica (2013) y representa los nombres de los grupos para limo inorgánico y suelos arcillosos.

Apéndice C

INGRESOS	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
Estimación de ventas	\$ -	1180,0	2242,0	4259,8	8093,6	15377,9	29218,0	55514,1	105476,9	200406,0	380771,5
Precio Venta		\$ 0,75	\$ 0,80	\$ 0,85	\$ 0,90	\$ 0,95	\$ 1,00	\$ 1,00	\$ 1,00	\$ 1,00	\$ 1,00
Ingresos por venta	\$ -	\$ 885,00	\$ 1.793,60	\$ 3.620,83	\$ 7.284,26	\$ 14.608,98	\$ 29.217,97	\$ 55.514,14	\$ 105.476,87	\$ 200.406,04	\$ 380.771,48
Ingreso por venta de equipamiento											
Ingresos operacionales	\$ -	\$ 885,00	\$ 1.793,60	\$ 3.620,83	\$ 7.284,26	\$ 14.608,98	\$ 29.217,97	\$ 55.514,14	\$ 105.476,87	\$ 200.406,04	\$ 380.771,48

GASTOS	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
Costos Variables		\$ -172,00			\$ -44,00	\$ -48,00	\$ -20,00				\$ -60,00
Costos Fijos	\$ -6.300,00	\$ -6.300,00	\$ -6.300,00	\$ -6.300,00	\$ -6.300,00	\$ -6.300,00	\$ -6.300,00	\$ -6.300,00	\$ -6.300,00	\$ -6.300,00	\$ -6.300,00
Servicios Básicos	\$ -4.334,60	\$ -4.551,33	\$ -4.778,90	\$ -5.017,84	\$ -5.268,73	\$ -5.532,17	\$ -5.808,78	\$ -6.099,22	\$ -6.404,18	\$ -6.724,39	\$ -7.060,61
Compra de equipamiento	\$ -13.430,00										
Sueldos de empleados	\$ -450,00	\$ -450,00	\$ -450,00	\$ -450,00	\$ -450,00	\$ -450,00	\$ -450,00	\$ -450,00	\$ -450,00	\$ -450,00	\$ -450,00
Gastos Operacionales	\$ -24.514,60	\$ -11.473,33	\$ -11.528,90	\$ -11.767,84	\$ -12.062,73	\$ -12.330,17	\$ -12.578,78	\$ -12.849,22	\$ -13.154,18	\$ -13.474,39	\$ -13.870,61

UTILIDADES	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
Utilidades antes de impuestos	\$ -24.514,60	\$ -10.588,33	\$ -9.735,30	\$ -8.147,01	\$ -4.778,48	\$ 2.278,81	\$ 16.639,19	\$ 42.664,92	\$ 92.322,69	\$ 186.931,66	\$ 366.900,88
Impuestos 25%						\$ -569,70	\$ -4.159,80	\$ -10.666,23	\$ -23.080,67	\$ -46.732,91	\$ -91.725,22
Utilidades después de impuestos	\$ -24.514,60	\$ -10.588,33	\$ -9.735,30	\$ -8.147,01	\$ -4.778,48	\$ 1.709,11	\$ 12.479,39	\$ 31.998,69	\$ 69.242,02	\$ 140.198,74	\$ 275.175,66

Flujo de caja acumulada	\$ 473.039,90
-------------------------	---------------

Nota. se consideró la proyección de ventas de un 90% del producto cada año.