

**EVALUACIÓN TÉCNICA PARA EL TRATAMIENTO Y APROVECHAMIENTO DE LODOS  
PROVENIENTES DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE DE  
BOSCONIA COMO INSUMO PARA TÉCNICAS DE CONSTRUCCIÓN EN TIERRA**

**Juan David Vásquez Montaña**

**Escuela de ingenierías**

**Facultad de ingeniería civil / Facultad de ingeniería ambiental**

**Universidad Pontificia Bolivariana**

**2020**

**EVALUACIÓN TÉCNICA PARA EL TRATAMIENTO Y APROVECHAMIENTO DE LODOS  
PROVENIENTES DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE DE  
BOSCONIA COMO INSUMO PARA TÉCNICAS DE CONSTRUCCIÓN EN TIERRA**

**Juan David Vásquez Montaña**

**Proyecto de grado para optar por los títulos de Ingeniero civil e Ingeniero ambiental**

**Dirigido por:**

**Ing. Alexandra Cerón Vivas PhD.**

**Ing. Sergio Manuel Pineda Vargas PhD.**

**Escuela de ingenierías**

**Facultad de ingeniería civil / Facultad de ingeniería ambiental**

**Universidad Pontificia Bolivariana**

**2020**

**Nota de aceptación**

---

---

---

---

---

---

**Presidente del jurado**

---

**Jurado calificador**

---

**Jurado calificador**

## **Agradecimientos**

A mi madre, por darme apoyo incondicional durante mi formación como persona y como profesional.

A mis directores Alexandra Cerón Vivas y Sergio Manuel Pineda Vargas, por darme la oportunidad de trabajar con ellos y por el apoyo que me dieron durante el desarrollo del presente proyecto.

Al Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, por su apoyo para poder realizar el proyecto, en especial al ingeniero John Barreneche, a la ingeniera Yolanda Arboleda y a los operarios de la planta de Bosconia.

A los laboratoristas de las facultades de ingeniería civil y ambiental, por su colaboración durante las pruebas desarrolladas dentro de los laboratorios.

A los docentes de la Universidad Pontificia Bolivariana que han aportado a mi formación profesional, así como a mis compañeros que me han ayudado y acompañado en este arduo proceso.

## Tabla de contenido

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO .....	10
GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE .....	11
Introducción .....	12
1. Objetivos .....	16
1.1. Objetivo general .....	16
1.2. Objetivos específicos.....	16
2. Marco teórico .....	17
2.1. Movimiento verde y sostenibilidad .....	17
2.2. Construcción sostenible.....	19
2.3. Construcción en tierra .....	21
2.3.1. Tapia pisada .....	24
2.3.2. Bahareque .....	24
2.3.3. Bloques de tierra comprimida.....	25
2.4. Potabilización del agua.....	26
2.5. Tratamiento de lodos .....	28
2.5.1. Espesamiento de lodos .....	28
2.5.2. Secado de lodos.....	29
2.5.3. Otros tratamientos.....	30
2.6. Aprovechamiento de lodos de la potabilización .....	30
3. Metodología .....	33
3.1. Tratamiento y caracterización de lodos.....	33
3.1.1. Obtención de lodos .....	34
3.1.2. Caracterización inicial de lodos .....	35
3.1.3. Espesamiento de lodos .....	36
3.1.4. Caracterización de los lodos espesados .....	37
3.1.5. Deshidratación de lodos .....	37
3.1.6. Preparación del producto obtenido .....	37
3.1.7. Caracterización del producto del tratamiento de lodos.....	38
3.2. Aprovechamiento de lodos en la construcción en tierra .....	39
3.2.1. Obtención del material granular.....	40
3.2.2. Caracterización del material granular y de los lodos secos como aditivo .....	40
3.2.3. Preparación de las mezclas .....	42
3.2.4. Caracterización de las mezclas .....	42

3.2.5.	Fabricación de probetas .....	43
3.2.6.	Ensayo de compresión de cubos .....	45
3.3.	Evaluación técnica del aprovechamiento de los lodos .....	45
4.	Resultados y Análisis .....	46
4.1.	Tratamiento y caracterización de lodos.....	46
4.1.1.	Composición de los lodos crudos .....	47
4.1.2.	Composición de los lodos espesados .....	50
4.1.3.	Tratamiento de los lodos .....	51
4.1.4.	Composición de los lodos tratados .....	54
4.2.	Aprovechamiento de lodos en la construcción en tierra .....	57
4.2.1.	Caracterización del suelo .....	57
4.2.2.	Caracterización de los lodos .....	59
4.2.3.	Caracterización de las mezclas .....	61
4.2.4.	Comportamiento mecánico a la compresión.....	63
4.3.	Evaluación técnica del aprovechamiento de los lodos .....	66
5.	Conclusiones .....	74
6.	Recomendaciones .....	76
7.	Bibliografía .....	77
Anexos	.....	79

## Listado de tablas

Tabla 1. Objetivos de desarrollo del milenio y de desarrollo sostenible .....	19
Tabla 2. Propiedades del suelo para construcción en tierra .....	23
Tabla 3. Composición química de diferentes lodos de plantas potabilizadoras. ....	27
Tabla 4. Propiedades geotécnicas de diferentes tipos de lodos de potabilización. ....	32
Tabla 5. Metodología utilizada para la determinación de sólidos. ....	36
Tabla 6. Metodología utilizada para el análisis químico de los lodos. ....	39
Tabla 7. Metodología para la caracterización del material granular y de los lodos.....	40
Tabla 8. Parámetros utilizados para la fabricación de probetas.....	43
Tabla 9. Bitácora de muestreo .....	46
Tabla 10. Resumen de los resultados EDS .....	55
Tabla 11. Composición de metales en los lodos. ....	57
Tabla 12. Resultados caracterización de mezclas .....	61
Tabla 13. Resultados tipos de falla en las probetas .....	66
Tabla 14. Matriz de evaluación para el aprovechamiento de lodos .....	71

## Listado de figuras

Figura 1. Metodología.....	33
Figura 2. Descarga de lodos al río Suratá. ....	34
Figura 3. Punto de salida de lodos al río Suratá.....	35
Figura 4. Columnas de sedimentación. ....	36
Figura 6. Preparación de los lodos para uso como aditivo. ....	38
Figura 6. Obtención del material granular .....	40
Figura 7. Metodología utilizada para el ensayo de cohesión. ....	42
Figura 8. Modelo del pisón para la fabricación de probetas y modelo real para la fabricación de las probetas .....	44
Figura 9. Resultados Sólidos sedimentables .....	48
Figura 10. Resultados composición de Sólidos de los lodos crudos.....	49
Figura 11. Relación turbiedad removida y sólidos .....	50
Figura 12. Resultados composición de Sólidos de los lodos espesados .....	51
Figura 13. Pérdida de contenido de agua del proceso de espesamiento .....	52
Figura 14. Resultados de la deshidratación de lodos de filtros.....	53
Figura 15. Resultados de la deshidratación de lodos de sedimentadores .....	53
Figura 16. Curva granulométrica del suelo.....	58
Figura 17. Curva humedad vs peso unitario seco .....	59
Figura 18. Curva granulométrica de los lodos tratados .....	60
Figura 19. Clasificación S.U.C.S. de las mezclas .....	62
Figura 20. Variación en la compactación de las mezclas .....	63
Figura 21. Resultados ensayo de compresión de cubos .....	64
Figura 23. variación en las densidades de las probetas.....	65

## **Listado de anexos**

Anexo 1. Triángulo de clasificación de suelos .....	79
Anexo 2. Carta de plasticidad del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos .....	79
Anexo 3. Parámetros de la norma de Biosólidos .....	80
Anexo 4. Resultados EDS punto 1.....	81
Anexo 5. Resultados EDS punto 2.....	82
Anexo 6.Resultados EDS punto 3.....	83
Anexo 7.Resultados EDS punto 4.....	84

## RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

**TITULO:** EVALUACIÓN TÉCNICA PARA EL TRATAMIENTO Y APROVECHAMIENTO DE LODOS PROVENIENTES DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE DE BOSCONIA COMO INSUMO PARA TÉCNICAS DE CONSTRUCCIÓN EN TIERRA

**AUTOR(ES):** Juan David Vásquez Montaña

**PROGRAMA:** Facultad de Ingeniería Civil

**DIRECTOR(A):** Alexandra Cerón Vivas, Sergio Manuel Pineda Vargas.

### RESUMEN

El presente proyecto se enfoca en la evaluación del aprovechamiento de lodos producidos de la PTAP de Bosconia para ser usados como insumo en técnicas de construcción en tierra, mediante una caracterización respecto a su composición y tratamiento; así como de un análisis del cambio de algunas propiedades del suelo y del diseño y aplicación de una matriz de evaluación teniendo en cuenta tres técnicas de construcción en tierra. La construcción en tierra es una técnica atractiva como parte de la construcción sostenible, debido a sus beneficios ambientales y económicos. Sin embargo, el material no siempre es apropiado, requiriendo de aditivos para mejorarlo, los cuales tienen impactos ambientales asociados que ponen en duda la sostenibilidad de la técnica. Una solución consiste en incursionar en aditivos poco convencionales, como pueden ser los lodos de la potabilización de agua, un residuo que requiere de una disposición final adecuada para evitar afectaciones al medio ambiente. De los resultados obtenidos se pudo confirmar que el contenido de sólidos y materia orgánica de los lodos varían con las características y el tratamiento del agua cruda, y que su tratamiento puede realizarse mediante un espesamiento y deshidratación natural. Por otro lado, se pudo observar que la adición al suelo de los lodos tratados mejora propiedades como la cohesión y plasticidad, sin embargo, el incremento del contenido de limos hasta de 5.64% y de materia orgánica hasta de 2.98%, así como la disminución de la resistencia a la compresión hasta en un 59.72% a los 28 días, limitan su aprovechamiento en la construcción en tierra. Se concluye de la evaluación, que su uso no es recomendado para técnicas que dependan únicamente del material granular, sin embargo, pueden ser utilizados junto con una estabilización granulométrica para garantizar un mejor comportamiento del suelo y que la técnica sea sostenible.

### PALABRAS CLAVE:

Construcción sostenible, aprovechamiento de residuos, construcción en tierra, lodos, potabilización.

### V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

## GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

**TITLE:** TECNICAL EVALUATION OF THE TREATMENT AND POTENTIAL USAGE OF SLUDGE PRODUCED IN THE BOSCONIA WATER TREATMENT PLANT AS AN ADDITIVE IN EARTH CONSTRUCTION TECHNIQUES.

**AUTHOR(S):** Juan David Vásquez Montaña

**FACULTY:** Facultad de Ingeniería Civil

**DIRECTOR:** Alexandra Cerón Vivas, Sergio Manuel Pineda Vargas.

### ABSTRACT

This project focuses on the evaluation of the use of sludge produced from Bosconia WTP to be used as an additive in earth construction techniques, by characterizing its composition and treatability. Additionally, an analysis is made of the change of some soil properties and the design and application of an evaluation matrix that considers three earth construction techniques. Building with earth is an attractive technique within the framework of sustainable construction, due to its environmental and economic benefits. However, the available material is not always appropriate and requires additives to improve it, which brings with it additional environmental impacts that call into question the sustainability of the technique. A possible solution to this problem can be given by entering into less conventional additives, such as sludge from water purification, a waste that requires an adequate final disposal to avoid environmental damage. The results confirm that the sludge solids and organic matter content vary with the quality and treatment of the raw water, and that they can be treated through a process of thickening and a natural dehydration. Also, it was found that they help to improve soil properties such as cohesion and plasticity. Nonetheless, the increase of silt content (5.64%) and organic matter (2.98%), as well as the decreasing in compression resistance by 59.72%, limit its usage in earth construction techniques. It is then concluded from the evaluation, that its use is not recommended for techniques that depend solely on the granular material, although it has the potential to be used in conjunction with a granulometric stabilization to ensure better soil performance and that the technique's sustainability.

### KEYWORDS:

Sustainable building, waste management, rammed earth construction, sludge, purification.

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

## Introducción

La construcción sostenible surge a partir del movimiento verde y del trazado de los objetivos del milenio y de los objetivos de desarrollo sostenible, antecedentes de gran importancia para la humanidad que han generado un cambio significativo en la relación entre hombre y su entorno, teniendo en cuenta factores económicos, sociales y ambientales (Raffino, s.f.) (UNDP, s.f.); a partir de esto nace la iniciativa de la construcción sostenible, enfocada en la creación de estructuras y en el uso de recursos y procesos con un enfoque en la responsabilidad ambiental durante la vida útil de la edificación (EPA , 2008) (Ministerio de ambiente , 2015), todo esto con la finalidad de disminuir los impactos ambientales que la construcción convencional trae consigo, principalmente por el uso de energía, la producción de gases de efecto invernadero y el consumo del recurso hídrico (Bedoya Montoya, 2011).

Una de las técnicas que forma parte de la construcción sostenible y que ha tomado fuerza en los últimos años es la construcción en tierra, la cual consiste en el uso de material granular *In-situ* para la construcción de edificaciones; esta técnica ha sido utilizada desde los inicios de la humanidad y ha formado parte de la cultura de muchas civilizaciones, encontrando diferentes estructuras y monumentos fabricados con tierra a lo largo de la historia y alrededor del mundo (Minke, 2001). Sin embargo, fue hasta hace unos años que se empezó a utilizar como parte de la construcción sostenible debido a que permite disminuir los impactos asociados con el uso y transporte de materiales que se utilizan en la construcción convencional, como el cemento y el acero, así como la disminución de residuos de construcción, ya que este material puede ser reutilizado una vez terminada la vida útil de la estructura; adicionalmente, esta técnica tiene otros beneficios a nivel arquitectónico y de confort, debido a la estética que pueden llegar a tener estas estructuras y a que

las propiedades del suelo permiten el intercambio de humedad con el exterior y la filtración del aire, generando un mejor ambiente en el interior de la edificación (Bedoya Montoya, 2011).

A pesar de los beneficios que ofrece la construcción en tierra, su uso se ve limitado en algunas ocasiones debido a la deficiencia del material granular que se encuentra o a la poca resistencia que ofrece este; por esta razón se ha incursionado en el uso de materiales como aditivo para hacer de esta técnica una más flexible y viable, estos materiales pueden variar desde el uso de cal y cemento, hasta químicos sintéticos como resinas y ácidos, sin embargo, estos materiales traen consigo impactos ambientales durante su fabricación, haciendo menos sostenible esta técnica (Bedoya Montoya, 2011) (Minke, 2001). Una solución, para evitar o disminuir los impactos adicionales por los aditivos comúnmente utilizados en la construcción en tierra, consiste en el uso de materiales poco convencionales, materiales que no generen impactos ambientales adicionales, que su uso prevenga la generación de otros impactos ambientales o que estos impactos sean menores a los utilizados convencionalmente; sin embargo, el uso de estos nuevos aditivos requiere de investigación para evaluar su viabilidad de modo que puedan ser utilizados en obras que involucren esta técnica constructiva de manera segura y confiable. (Bedoya Montoya, 2011)

Uno de los materiales con potencial para su uso en la construcción en tierra que cumple con las características mencionadas para nuevos aditivos, son los lodos provenientes de plantas de potabilización de agua, debido a que son residuos generados a partir de este proceso, cuya composición depende de la fuente de abastecimiento y del tratamiento aplicado al agua. Estos lodos han sido probados como aditivos en materiales utilizados en la construcción convencional, entre estos el cemento, concreto, ladrillos de mampostería y baldosas, encontrando resultados prometedores (Gomesa, Zhou, Li, & Long, 2019), sin embargo, su uso como aditivo para la construcción en tierra no ha sido explorado a fondo.

Los lodos de la potabilización del agua se producen principalmente a partir de los procesos de sedimentación y filtración, los cuales tienen como objetivo la remoción de material suspendido en el agua y que usualmente van acompañados de un proceso de coagulación y floculación con ayuda de agentes químicos a base de aluminio y/o hierro que permiten la aglomeración y posterior remoción de estas partículas, por tanto, la composición de estos lodos estará definida por el tipo de químicos utilizados durante el tratamiento además de la calidad de la fuente de abastecimiento (Romero Rojas, Calidad del agua, 1999). La composición de estos lodos, aunque variable, consiste principalmente de hidróxidos de aluminio y hierro que se forman a partir del tratamiento del agua, incrementando la cantidad total de aluminio y hierro que pueden previamente encontrarse en menores cantidades en el agua cruda, estos metales pueden facilitar la cohesión de las partículas, cuando se agregan al suelo, mejorando su comportamiento ante cargas, sin embargo, estos no son los únicos metales que pueden estar presentes en los lodos, existen algunos que pueden limitar su uso debido a su peligrosidad, como lo son el Mercurio y el Cadmio. (EPA, 1996) (Ramírez Quirós, 2008).

Para la disposición final y el aprovechamiento de estos lodos, se debe realizar un tratamiento con la finalidad de remover agua y/u otros componentes que puedan afectar estos procesos. El tratamiento convencional de los lodos consiste en el espesamiento y la deshidratación, los cuales pueden ser realizados de manera natural o mecánica, dependiendo de la cantidad de lodos generados, la disponibilidad de recursos para su tratamiento y el uso que se les quiera dar (Romero Rojas, Potabilización Del Agua, 1999). El espesamiento de lodos se realiza con la finalidad de disminuir el volumen de los lodos para facilitar el tratamiento posterior o su disposición final, esto se puede realizar mediante sedimentadores o por medio de equipos mecánicos como espesadores de bandas rotatorias, tambores rotatorios y centrifugas, y la deshidratación consiste en la remoción

del agua restante en los lodos, usualmente mediante lechos de secado que permiten la filtración y evaporación del agua o mediante equipos mecánicos como filtros prensa (Valencia, 2000) (Ramírez Quirós, 2008).

El presente proyecto tiene como finalidad la caracterización y evaluación del aprovechamiento en la construcción en tierra de los lodos producidos en la planta de tratamiento de agua potable de Bosconia. Esta planta se encuentra bajo la jurisdicción del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga y se encarga de tratar el agua del río Suratá mediante un tratamiento convencional con sulfato de aluminio, sin embargo, de su proceso se derivan residuos, entre estos los lodos de la purga de sedimentadores y del lavado de filtros, los cuales son vertidos a la fuente de abastecimiento sin un tratamiento preliminar, generando afectaciones al ambiente y gastos al acueducto debido al pago de tasas retributivas (Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, s.f.); debido a esto, es necesario crear referentes para su tratamiento y aprovechamiento.

La caracterización de los lodos se realizó teniendo en cuenta su composición respecto a sólidos sedimentables, totales y disueltos, a su contenido de materia orgánica, a su composición elemental y a la cuantificación de cinco metales de interés, adicionalmente realizando un análisis de la pérdida de humedad durante el espesamiento y secado para determinar la viabilidad en su tratamiento; para evaluar el aprovechamiento en la construcción en tierra se analizó el efecto que tienen estos lodos en el suelo con la adición de diferentes concentraciones inferiores al 5% de los lodos como aditivo, las propiedades analizadas fueron: Granulometría, Compactación y humedad óptima, límites de Atterberg, Cohesión, pH, Materia orgánica y Resistencia a la compresión.

# 1. Objetivos

## 1.1. Objetivo general

Evaluar de manera técnica el proceso de deshidratación y el uso potencial como insumo en tres técnicas de construcción en tierra, el Bahareque, la Tapia pisada y Bloques de tierra comprimida, de los lodos provenientes de la planta de tratamiento de agua potable de Bosconia.

## 1.2. Objetivos específicos

- Analizar la pérdida de humedad de los lodos provenientes de la planta de tratamiento de agua potable de Bosconia mediante la construcción de curvas de deshidratación, como un factor determinante para la evaluación del tratamiento de estos lodos.
- Determinar la influencia que tiene la adición de lodos deshidratados de la planta de tratamiento de agua potable de Bosconia en el material granular utilizado en la construcción en tierra, respecto a la resistencia a la compresión, como un factor para la evaluación del aprovechamiento de estos lodos en la construcción.
- Evaluar técnicamente el tratamiento y aprovechamiento de los lodos provenientes de la planta de tratamiento de agua potable de Bosconia, mediante el diseño y aplicación de una matriz de evaluación, que permita la identificación de fortalezas y debilidades en la deshidratabilidad de los lodos y en su uso como insumo en la construcción en tierra.

## 2. Marco teórico

Dentro de las principales temáticas a tratar dentro del marco conceptual se encuentran los fundamentos de la sostenibilidad con el movimiento verde, la construcción sostenible, la construcción en tierra, el tratamiento del agua para su potabilización y las características, tratamiento y aprovechamiento de los lodos de potabilización; todos estos se abarcan a continuación.

### 2.1. Movimiento verde y sostenibilidad

El movimiento verde es una tendencia nacida en Europa a raíz de la revolución industrial, la cual se enfoca en la defensa del medio ambiente a través de iniciativas como la promoción de la educación ambiental, la denuncia de acciones que vayan en contra del ambiente y la modificación y creación de políticas públicas, económicas y sociales en pro de la conservación y la recuperación del ambiente; siempre considerando al hombre como parte de la naturaleza y no como su dueño ni explotador (Raffino, s.f.). Este movimiento ha tenido un crecimiento exponencial desde sus inicios, principalmente debido a los aportes de Estados Unidos, en donde este movimiento tuvo la oportunidad de crecer y globalizarse con la publicación y divulgación de la obra de Rachel Carson, “*Silent Spring*”, en esta obra, la bióloga expresaba su preocupación respecto a la destrucción de la vida debido al uso masivo de pesticidas químicos en la agricultura, provocando grandes cambios en la conciencia de los estadounidenses y de la población mundial frente a las problemáticas ambientales del momento, este cambio eventualmente llevó a la creación de la Agencia de Protección Ambiental (EPA) y de otras instituciones ambientales a nivel mundial (Raffino, s.f.) (Lallanilla, 2018).

A partir de la globalización del movimiento verde y de la unión mundial frente a problemáticas sociales, económicas y ambientales, en el 2000 surgen 8 objetivos conocidos como los Objetivos

de Desarrollo del Milenio (ODM), los cuales tuvieron como foco principal acabar con la pobreza mundial, así como mejorar la calidad de vida de las personas, la educación, la igualdad de género, la creación de asociaciones entre países y la sostenibilidad del medio ambiente, abordando temáticas sociales, económicas y ambientales, de manera general y en desigualdad entre estas, sin embargo, con los problemas mundiales que incrementaban en estos tres ámbitos, en el 2012 se formulan 17 nuevos objetivos, los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), que remplazarían a los ODM logrando abarcar mayor cantidad de problemáticas mundiales abordándolas desde los tres aspectos de la sostenibilidad: sociedad, economía y ambiente (UNDP, s.f.) (ONU, s.f.).

Los ODS son mucho más específicos que sus predecesores, en la Tabla 1 se muestran estos objetivos en paralelo, pudiendo observar que mientras los ODM se enfocaban simplemente en garantizar la sostenibilidad del medio ambiente, los ODS tienen entre sus objetivos temáticas directamente relacionados con el ambiente, así como otros que promueven conductas para la preservación y el cuidado del medio ambiente, entre estos la Construcción de infraestructura resiliente, y lograr que las ciudades y los asentamientos sean sostenibles, que se pueden lograr a partir de la construcción sostenible.

Establecidos los ODM y posteriormente los ODS, las políticas mundiales empezaron a cambiar y a enfocarse en los ideales de sostenibilidad que planteaban estos objetivos, tal es el caso de Colombia, que cambia su estructura para dar paso a estos ideales, esto se evidencia en la fundación del Consejo Colombiano de Construcción Sostenible (CCS) en el 2008 y con la inclusión de temas de desarrollo sostenible en sus Planes Nacionales de Desarrollo, cambiando la manera en que el país aborda temas de educación, salud, movilidad, industrialización, conservación y recuperación del ambiente, entre otros (Congreso de la República de Colombia, 9 Junio 2015).

Tabla 1. Objetivos de desarrollo del milenio y de desarrollo sostenible

Objetivos de desarrollo del milenio (ODM)	Objetivos de desarrollo sostenible (ODS)	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erradicar la pobreza extrema y el hambre.</li> <li>• Lograr la enseñanza primaria universal</li> <li>• Promover la igualdad de género y la autonomía de la mujer.</li> <li>• Reducir la mortalidad infantil.</li> <li>• Mejorar la salud materna.</li> <li>• Combatir VIH/SIDA, paludismo y otras enfermedades</li> <li>• Garantizar la sostenibilidad del medio ambiente</li> <li>• Fomentar una asociación mundial para el desarrollo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Poner fin a la pobreza en todas sus formas en todo el mundo.</li> <li>• Poner fin al hambre, lograr la seguridad alimentaria y la mejora de la nutrición y promover la agricultura sostenible.</li> <li>• Garantizar una vida sana y promover el bienestar para todos en todas las edades.</li> <li>• Garantizar una educación inclusiva, equitativa y de calidad y promover oportunidades de aprendizaje durante toda la vida para todos.</li> <li>• Lograr la igualdad entre los géneros y el empoderamiento de todas las mujeres y niñas</li> <li>• Garantizar la disponibilidad de agua y su ordenación sostenible y el saneamiento para todos.</li> <li>• Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos.</li> <li>• Promover el crecimiento económico sostenido, inclusivo y sostenible, el empleo pleno y productivo y el trabajo decente para todos.</li> <li>• Construir infraestructura resiliente, promover la industrialización inclusiva y sostenible y fomentar la innovación.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reducir la desigualdad en y entre los países.</li> <li>• Lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles.</li> <li>• Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles.</li> <li>• Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos (tomando nota de los acuerdos celebrados en el foro de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático).</li> <li>• Conservar y utilizar en forma sostenible los océanos, los mares y los recursos marinos para el desarrollo sostenible.</li> <li>• Proteger, restablecer y promover el uso sostenible de los ecosistemas terrestres, efectuar una ordenación sostenible de los bosques, luchar contra la desertificación, detener y revertir la degradación de las tierras y poner freno a la pérdida de la diversidad biológica.</li> <li>• Promover sociedades pacíficas e inclusivas para el desarrollo sostenible, facilitar el acceso a la justicia para todos y crear instituciones eficaces, responsables e inclusivas a todos los niveles.</li> <li>• Fortalecer los medios de ejecución y revitalizar la alianza mundial para el desarrollo sostenible.</li> </ul>

Nota: Se muestran los ODS en paralelo con los ODM para demostrar su enfoque en temas de sostenibilidad, entre los cuales se encuentra la construcción sostenible, temática importante para el presente proyecto. Modificado de UNDP.

## 2.2. Construcción sostenible

La construcción sostenible nace como una de las expresiones del Movimiento verde, cuando los arquitectos y constructores se dieron cuenta del rol que podrían cumplir dentro de este, debido a los impactos ambientales asociados a la construcción convencional, sabiendo que esta mentalidad traería beneficios ambientales y eventualmente ventajas económicas y competitivas en la industria

de la construcción; apoyada actualmente por instituciones a nivel local y global para incentivar este tipo de prácticas.

Los impactos ambientales asociados a la construcción convencional comienzan con la extracción de materias primas renovables y no renovables para el uso o la fabricación de materiales, como la madera, la tierra y otros como el acero, el vidrio, el cemento y la mampostería, estos últimos implican un consumo energético, producción de emisiones atmosféricas y generación de residuos durante su elaboración. Otro de los impactos relevantes se presenta durante la etapa de construcción, con la generación de residuos de demolición de estructuras existentes, de remoción de material del suelo y de residuos o re-procesos durante la obra; que en peso y en volumen son significativamente mayores a los residuos sólidos urbanos y que no pueden ser tratados de la misma manera. Por último, se encuentra el alto consumo energético que se presenta durante la construcción para el funcionamiento de maquinaria y el transporte de materiales y durante la vida útil de las edificaciones (Bedoya Montoya, 2011) (Minke, 2001).

A partir de esta expresión y de los impactos que se querían prevenir, se adoptaron diferentes definiciones para la construcción sostenible, por ejemplo, la EPA la define como “la práctica de la creación de estructuras y uso de procesos que sean ambientalmente responsables y eficientes en el uso de recursos durante el ciclo de vida de una estructura, teniendo en cuenta diseño, construcción, operación, mantenimiento, renovación y demolición” (EPA , 2008) y el Ministerio de ambiente de Colombia como “aquella que está en sincronía con el sitio, hace uso de energía, agua y materiales de un modo eficiente y provee confort y salud a sus usuarios. Todo esto es alcanzado gracias a un proceso de diseño consciente del clima y la ecología del entorno donde se construye la edificación” (Ministerio de ambiente , 2015). Estas definiciones obedecen a criterios que se tienen para considerar una construcción como sostenible, los cuales son: eficiencia energética,

eficiencia de agua, materiales de construcción ambientalmente más amigables, reducción de residuos y de uso de compuestos tóxicos, calidad del ambiente interior, sostenibilidad del emplazamiento, crecimiento inteligente y desarrollo sostenible (Ministerio de ambiente , 2015).

En Colombia la construcción sostenible ha avanzado a un paso constante, desde la formación del CCCS, que surge con la misión de concretar oportunidades para la evolución de la industria de la construcción hacia la sostenibilidad, ofreciendo programas y capacitaciones, así como realizando investigación, que permitan impulsar la industria de la construcción hacia un crecimiento verde y desarrollo bajo en carbono (CCCS, s.f.) (CCCS, 2017).

Dentro de las técnicas de construcción sostenible se encuentran, entre otras, la construcción en tierra en sus diferentes expresiones, incluyendo el adobe, la tapia pisada, el bahareque e inclusive mezclas suelo-cemento; la construcción con guadua; la construcción en tubos de cartón reciclado; el reciclaje de materiales de construcción, como el concreto y el cemento y la arquitectura bioclimática. Estas propuestas han surgido en su mayoría de la observación de la naturaleza y la adopción de técnicas antiguas, así como de la necesidad de cerrar ciclos y reutilizar materiales para generar menores impactos al ambiente (Bedoya Montoya, 2011). En Colombia se destaca la construcción en tierra, la cual ha formado parte de la cultura de diferentes regiones del país y que aún se realiza en algunas de estas, siendo beneficioso esto debido al conocimiento y comprensión de las diferentes técnicas de construcción en tierra que facilita su aplicación dentro del marco de la construcción sostenible (Gatti, 2012).

### 2.3. Construcción en tierra

La tierra como material de construcción es tan antigua como la misma humanidad, existiendo registros alrededor del mundo y a lo largo de la historia de construcción principalmente en tierra para viviendas, fortalezas y monumentos; tal es el caso de viviendas en Turquestán del periodo

8000-6000 a.C., cimientos en tierra en Asiria del año 5000 a.C., la construcción inicial de la gran muralla china con tierra apisonada, el centro de la pirámide del sol en México hecha con tierra apisonada en los años 300 a 900 y registros de estructuras en adobe de culturas precolombinas en Sudamérica y Centroamérica; esto sin mencionar la gran cantidad de estructuras existentes como iglesias y viviendas de alrededor de 300 años de antigüedad en Latinoamérica. (Bedoya Montoya, 2011) (Minke, 2001).

La construcción en tierra se divide principalmente en el uso de ladrillos en tierra, adobe, muros en tierra comprimida, tapia pisada, y muros de guadua u otro material similar recubierto de tierra, bahareque; surgiendo variaciones modernizadas con la masificación de estas técnicas que utilizan equipos o técnicas modernas para mejorar su rendimiento, tal es el caso de los bloques de tierra comprimida, que utilizan prensas para la compresión del material, que puede ser mejorado con el uso de aditivos, y permitir que este material sea utilizado para la construcción en tierra (Gatti, 2012).

Todas estas técnicas tienen en común el uso de tierra, sin embargo, no todos los tipos de tierra sirven para todas las técnicas, inclusive pueden no servir ninguna de estas; en general el material utilizado debe estar libre de humus y debe estar compuesto por arcillas, limos y arenas, cuidando que no contenga gravas ni piedras, o que estas se encuentren en pequeñas proporciones. Las propiedades más importantes son su composición granulométrica, plasticidad, retracción, humedad y grado de compactación; que afectarán el comportamiento del suelo y limitarán su uso en la construcción en tierra (Martins Neves, Borges Faria, Rotondaro, Cevallos Salas, & Hoffmann, 2009); adicionalmente se debe tener en cuenta que el agua es clave para la cohesión de las partículas y por tanto para el manejo del suelo como material de construcción, de igual manera

la materia orgánica y las sales también juegan un papel importante en su uso, ya que pueden limitarlo a partir de concentraciones del 2% (Gatti, 2012).

Un resumen de las propiedades más importantes de diferentes tipos de suelos y de las técnicas constructivas en las cuales pueden ser utilizados se muestra en la Tabla 2, siendo los tipos de suelo determinados a partir del triángulo de clasificación que se muestra en el Anexo 1.

*Tabla 2. Propiedades del suelo para construcción en tierra*

Tipo de suelo	Parámetros				Técnica apropiada
	IP (%)	LL (%)	Cohesión	Resistencia	
<b>Arena</b>	-	-	Nula	Nula	No apto
<b>Arenoso</b>	0-10	0-30	Nula o poca	Poca o nula	BTC, Adobe y Tapia pisada
<b>Arenoso-limoso</b>	-	-		Poca o nula	Apto para todo tipo, principalmente BTC con posible adición de arcillas si tiene alta presencia de arena, adicionar aglomerante
<b>Arenoso-arcilloso</b>	-	-		Mediana	Apto para todo tipo, principalmente BTC con posible adición de arcillas en caso de requerirlo
<b>Limo- arcillosa</b>	-	-		Poca o nula	Apto para todo tipo de técnica, BTC principalmente
<b>Limoso</b>	5-25	20-50	Poca	Poca o media	Muy difícil, puede hacerse uso de aglomerantes
<b>Arcilloso con gravas</b>	-	-	Poca o Alta	Media o Alta	Adobe y monolíticos
<b>Arcilloso-arenoso</b>	-	-			Tapia pisada, BTC, puede hacerse uso de aglomerantes
<b>Arcilloso- limoso</b>	-	-			
<b>Arcilloso</b>	>20	>40	Alta	Alta	Adobe con adición de fibras

Nota: se presenta una compilación de las propiedades de diferentes tipos de suelos y la técnica de construcción en tierra en la cual puede ser utilizado. Modificado de (Martins Neves, Borges Faria, Rotondaro, Cevallos Salas, & Hoffmann, 2009)

Otro factor que puede influir en el comportamiento del suelo es el pH, propiedad que ha comprobado tener influencia en la resistencia de mezclas de concreto, mejorando su comportamiento cuando este es alcalino o ácido (Sobhnamayan , Sahebi, & Alborz, 2014); esta propiedad puede ser extrapolada a la construcción en tierra debido a las similitudes entre estos dos materiales, comparando el material granular en la construcción en tierra al concreto en la construcción convencional (Bedoya Montoya, 2011).

### 2.3.1. Tapia pisada

La tapia pisada es una técnica que utiliza material del suelo para la construcción de muros mediante la compactación de este, teniendo similitudes con el concreto en la construcción convencional, sin embargo, se diferencia en que se utilizan formaletas de madera recubiertas con una mezcla cal-arena en vez de formaletas metálicas recubiertas con ACPM y en que el proceso constructivo consiste de la compactación del suelo en capas con la ayuda de un pisón dentro de la formaleta, un proceso más arduo y que requiere de espesores más grandes, logrando espesores entre 0.8 y 0.5 m, y una menor resistencia que en el concreto (Bedoya Montoya, 2011) (Minke, 2001).

A pesar de las limitaciones que tiene esta técnica, sigue siendo atractiva para incorporar a proyectos de construcción moderna, debido a que ofrece beneficios a nivel de confort y ahorro energético, por sus propiedades de inercia térmica y capacidad de intercambio de humedad con el ambiente (Bedoya Montoya, 2011) (Minke, 2001) y a que han surgido variaciones de esta técnica que logran hacerla más accesible en la industria de la construcción como lo son: la tapia prefabricada, la tapia aislada, la tapia postensada y la tapia con dispersores sísmicos (Gatti, 2012).

El material con el que se trabaja la tapia pisada generalmente está compuesto por grava entre 0 y 15%, arenas entre el 40 y el 50%, limos entre el 20 y el 35% y arcillas entre el 15 y el 25%, pudiendo utilizar material de cualquier tipo, exceptuando aquellos que no tengan cohesión, como los de tipo minero o que contienen ferroníquel (SENA, s.f.).

### 2.3.2. Bahareque

El bahareque es una técnica de construcción en tierra que se enfoca en el aprovechamiento de la rigidez de la guadua, u otro material similar, para mejorar la resistencia de la tierra, similar a como lo hace el acero con el concreto en la construcción convencional, logrando así menores

espesores que los de la tapia pisada, por la estabilidad que proporciona la malla de guadua, una menor demanda en cuanto a la calidad del material granular utilizado y un mejor comportamiento sísmico (Bedoya Montoya, 2011) (SENA, s.f.).

Esta técnica, aunque se considera anticuada, fue de gran relevancia para la construcción de viviendas en Colombia y actualmente es una técnica utilizada principalmente en zonas rurales debido a la facilidad en la obtención del material requerido (Bedoya Montoya, 2011).

### 2.3.3. Bloques de tierra comprimida

Los bloques de tierra comprimida es una técnica de construcción en tierra contemporánea, la cual surge a partir del adobe y consiste en la compactación por medio de compresión o prensado del material granular, el cual generalmente es mejorado mediante una estabilización granulométrica o química (Gatti, 2012).

El proceso constructivo de los bloques de tierra comprimidos es similar al de la mampostería convencional, requiriendo un elemento para la unión de los bloques, y tiene la ventaja de poder utilizar otros materiales para dar recubrimiento a la estructura y poder protegerlo de condiciones adversas que no sean compatibles con las del material utilizado (Gatti, 2012).

Aunque esta técnica sea una modernización de la construcción en tierra debido al uso de equipos mecánicos especializados, se puede desarrollar como parte de la construcción sostenible, ya que estos equipos pueden ser de tipo portátil para ser utilizados in-situ; generando como ventajas la fabricación de bloques con dimensiones regulares y precisas, la fabricación de las piezas de manera más rápida, menor requerimiento de humedad durante el proceso y menor área para curado debido a la capacidad de apilamiento de los bloques fabricados (Gatti, 2012).

#### 2.4. Potabilización del agua

Los procesos de purificación o potabilización de agua son de vital importancia para la comodidad y bienestar de las comunidades, contando con gran variedad de tratamientos para lograrlo, dependiendo de la calidad de la fuente de abastecimiento. La línea general de tratamiento está constituida por un tratamiento preliminar y un tratamiento principal, en el cual se incluyen procesos de coagulación, floculación, sedimentación y filtración para la remoción de sólidos que contiene el agua cruda (Romero Rojas, Potabilización Del Agua, 1999) (EPA, 1996).

Debido a los procesos realizados durante la potabilización de agua, se producen diferentes tipos de residuos, de manera general se producen lodos de la sedimentación y filtración, existiendo otros tipos de lodos que se generan del ablandamiento del agua o de otros procesos adicionales (Valencia, 2000). La composición de los lodos de la sedimentación y filtración estará definida por los sólidos presentes en el agua cruda y por los componentes adicionados durante el tratamiento, siendo los primeros principalmente limos, arcillas y otros compuestos minerales, así como compuestos no minerales que puedan estar presentes debido a hojas, plancton y vertimientos aguas arriba de la bocatoma, y los segundos principalmente hidróxidos de hierro y aluminio, hidróxidos de calcio, polielectrolitos, carbón activado, entre otros (EPA, 1996) (Valencia, 2000).

La composición de estos lodos se puede analizar mediante diferentes parámetros que determinan su cantidad y su calidad mediante su composición, entre estos parámetros se encuentran los sólidos sedimentables, sólidos totales, sólidos suspendidos, contenido orgánico y concentración de metales y otros compuestos.

A partir de estudios de diferentes plantas de potabilización, algunos autores han establecido su composición respecto a sólidos sedimentables, la cual varía dependiendo del tipo de lodo y del tratamiento que se le da al agua (EPA, 1996), este parámetro es importante cuando se quiere

determinar la cantidad de lodos que se pueden obtener del espesamiento de los mismos y así poder realizar el diseño de las unidades para este proceso. Respecto a su composición química, se ha comprobado que varía dependiendo de la calidad de la fuente de abastecimiento, sin dejar de ser influenciada por el tratamiento que se le da al agua, valores de la composición química en relación a metales se pueden observar en la Tabla 3, los cuales fueron obtenidos de diferentes estudios de diferentes lodos (EPA, 1996) (Ramírez Quirós, 2008) (Ippolito, Barbarick, & Elliot, 2011).

*Tabla 3. Composición química de diferentes lodos de plantas potabilizadoras.*

Metales (mg/Kg base seca)	Tipo de lodo						
	Aluminio <sup>A</sup>	Hierro <sup>A</sup>	Aluminio <sup>B</sup>	Aluminio <sup>B</sup>	Hierro <sup>B</sup>	Aluminio <sup>C</sup>	Hierro <sup>D</sup>
<b>Aluminio</b>	60111	52095	107000	123000	28600	118700 ± 24260	61390 ± 35920
<b>Arsénico</b>	14.7	14.7	25	32	9.2	-	-
<b>Bario</b>	122.5	127.52	30	<30	230	-	-
<b>Boro</b>	40.7	61.3	-	-	-	-	-
<b>Cadmio</b>	5.15	11.67	1	1	2	0.12 ± 0.02	nd
<b>Calcio</b>	20815	33108	-	-	-	10,360 ± 4,299	nd
<b>Cromo</b>	49.5	56.5	120	130	50	20 ± 7	38 ± 4
<b>Cobre</b>	270.2	326.1	168	16	52	624 ± 581	46 ± 12
<b>Hierro</b>	52751	63642	48500	15200	79500	37,000 ± 19,740	220,900 ± 32,200
<b>Plomo</b>	79.9	100.2	11	9	40	22 ± 12	47 ± 1
<b>Manganeso</b>	385.4	398.5	1180	233	4800	2,998 ± 1,122	1,088 ± 178
<b>Mercurio</b>	1.5	2.5	0.1	<0.1	0.2	0.46	nd
<b>Molibdeno</b>	9.1	12.9	-	-	-	0.9 ± 0.5	nd
<b>Níquel</b>	37.8	53.8	24	23	131	28 ± 10	64 ± 14
<b>Selenio</b>	2.8	1.5	<2	<2	<2	-	-
<b>Estroncio</b>	84.3	60.6	-	-	-	-	-
<b>Vanadio</b>	35.4	17.4	-	-	-	-	-
<b>Zinc</b>	1047.4	3036.1	91.7	393	781	98 ± 31	36 ± 4

Nota: se presenta la composición química de diferentes tipos de lodos por diferentes autores, dividiendo estos en lodos de aluminio y lodos de hierro, dependiendo del uso de coagulantes a base de estos metales.

- A. Estudio de 12 lodos de potabilización aplicados al suelo 10 de aluminio y 2 de hierro (Brobst, 1994)
- B. Análisis de metales totales en lodos de potabilización en un estudio de lixiviación (Cornwell et al., 1992)
- C. Valores del análisis de lodos de aluminio de potabilización del agua (Agyin-Birikorang et al., 2007-2008) y (Babatunde et al. 2008).
- D. Valores del análisis de lodos de hierro de potabilización del agua (Agyin-Birikorang y O'Connor, 2007), (Leader et al. 2008), (Sarkar et al. 2007) y (Sotero-Santos et al. 2005).

En esta tabla se puede observar que para ambos tipos de lodos los principales componentes son el aluminio, el hierro y el calcio, debido a la adición de compuestos durante el tratamiento del agua y que otros como mercurio, selenio, molibdeno, cadmio, se encuentran en menores cantidades, sin

embargo, estos metales tienen diferentes niveles de toxicidad en el ambiente y diferentes efectos en los organismos, de ahí la importancia de conocer las concentraciones de estos metales para determinar el destino de los lodos.

Los efectos que pueden traer estos lodos para el ambiente se observan principalmente en las descargas que se hacen en cuerpos de agua con poco o ningún tratamiento previo; estas descargas producen depósitos o bancos de lodos en zonas de baja velocidad alterando la cadena trófica por el cubrimiento de organismos benthicos, reducción de la estética debido al incremento en la turbiedad del agua, coloración del agua debido a la presencia de carbón activado y toxicidad por aluminio, hierro y otros metales presentes en ellos que pueden afectar la vida acuática o inhibir procesos metabólicos y catabólicos (Romero Rojas, Potabilización Del Agua, 1999).

## 2.5. Tratamiento de lodos

El tratamiento convencional de los lodos procedentes de la potabilización de agua consiste en su espesamiento y secado, pudiendo aplicar otros tratamientos dependiendo de las características del lodo, de la disposición final que se le quiera dar y de las exigencias de las autoridades ambientales.

### 2.5.1. Espesamiento de lodos

El espesamiento de lodos consiste en la disminución de su volumen para poder facilitar un tratamiento posterior o su disposición final; esto se puede realizar de múltiples maneras, siendo la más común el espesamiento por gravedad, debido a la facilidad en su aplicación y a su bajo requerimiento energético, este proceso se basa en una sedimentación y posterior compactación de las partículas contenidas en los lodos, dependiendo de la cantidad de sólidos sedimentables y suspendidos para su diseño (Valencia, 2000) (Ramírez Quirós, 2008).

Otro de los procesos que se utiliza para el espesamiento de lodos es el espesamiento por flotación, en el cual se inyecta aire en la columna de agua de los lodos para arrastrar los sólidos en suspensión y separarlos de la fase líquida,; debido a que este proceso puede llegar a tener una mayor demanda energética, dependiendo de la cantidad de lodos generada, se requiere de un análisis más detallado para determinar la relación costo/beneficio antes de utilizar este proceso (Ramírez Quirós, 2008).

Finalmente, existen otros procesos de espesamiento que involucran el uso de maquinaria especializada con las cuales se asegura el espesamiento rápido y efectivo de los lodos; maquinarias como: cintas de espesamiento por gravedad, tambores rotatorios y centrifugadoras, sin embargo, el uso de esta maquinaria trae consigo una mayor demanda energética y requerimiento de técnicos para mantenimiento o reparación (EPA, 1996) (Ramírez Quirós, 2008).

### 2.5.2. Secado de lodos

El secado de lodos consiste en la remoción del agua contenida en las partículas de los lodos después de un proceso de espesamiento, con la finalidad de obtener un sólido que será más fácil de manejar y que generará menor afectación al ambiente. Este proceso usualmente se realiza de manera menos mecanizada, utilizando lechos de secado, los cuales requieren mayor área y tiempo para esta remoción. Los lechos de secado utilizan el principio de filtración y evaporación, teniendo como filtro una base de arena por la cual pasa el agua que percola de lodos por acción de la gravedad y apoyado de factores climatológicos para la evaporación del agua. Existen también otros procesos para lograr el secado rápido de los lodos, entre ellos procesos mecánicos mediante filtros prensa y procesos térmicos mediante el uso de hornos (EPA, 1996).

### 2.5.3. Otros tratamientos

Otros tratamientos de los lodos de potabilización consisten en la remoción de compuestos que dificulten su aprovechamiento o disposición final, tal es el caso de la remoción de metales pesados como el plomo o el mercurio mediante el uso de cenizas de biomasa (Marichelvam & Azhagurajan, 2018) o tratamiento electroquímicos (Pérez Zúñiga, 2016) y de la recuperación de coagulantes mediante el uso de ácidos (Martinez Cordero, Jiménez, & Vaca Mier), siendo este último de gran importancia para la optimización de procesos en plantas de tratamiento de agua potable.

### 2.6. Aprovechamiento de lodos de la potabilización

El aprovechamiento de lodos obtenidos de la potabilización de agua se puede hacer de diversas maneras dependiendo de sus características, sin embargo, son pocas las normativas a nivel mundial sobre el aprovechamiento de los sólidos obtenidos de su tratamiento, ya que las normativas se enfocan en el aprovechamiento del producto obtenido del tratamiento de lodos de plantas de agua residual, llamados Biosólidos. Los biosólidos pueden ser utilizados dependiendo de su composición, como se muestra en el Anexo 3, en donde se listan sus usos y la composición de estos respecto a metales, pudiendo ser utilizados en suelos, en diferentes industrias y en algunos procesos ambientales; en la construcción pueden ser utilizados para la fabricación de cemento, mampostería y cerámicos y como aditivo en mezclas de concreto (EPA, 1996) (Ministerio de vivienda, 2014).

De manera similar a los Biosólidos, los sólidos producto del tratamiento de lodos de potabilización se pueden utilizar en campos similares, variando su efectividad debido a las diferencias en la composición entre estos dos tipos de lodos, más notablemente la cantidad de materia orgánica, de microorganismos patógenos, y de compuestos de nitrógeno y fósforo, todas

menores en los lodos de potabilización, y al contenido de metales y material mineral, mayores en los lodos de potabilización.

En el suelo los lodos de potabilización se pueden aplicar directamente o en conjunto con otros materiales para mejorar sus propiedades e incrementar la concentración de macro y micronutrientes, teniendo en cuenta los riesgos existentes por la presencia de compuestos como el aluminio, el hierro y otros metales; aun así, su uso es atractivo debido a que mejoran la estructura del suelo, ajustan su pH, mejora la retención de agua y sirve para la recuperación de áreas degradadas. En la industria, uno de los principales usos es en la construcción, por su menor contenido de materia orgánica y mayor cantidad de compuestos de minerales, que lo hacen atractivos para su uso en materiales de construcción como aditivo en la fabricación de mampostería o baldosas, como parte de mezclas de concreto e inclusive como insumo en la fabricación de cemento, reduciendo la materia prima requerida en este proceso. Finalmente, dentro de procesos ambientales, se pueden utilizar en el control de malos olores provocados por la producción de ácido sulfhídrico ( $H_2S$ ) (Di Bernardo & Dantas , 2005).

En el área de la construcción existen antecedentes en su uso como aditivo para la producción de baldosas, agregados aligerados, ladrillos, cemento y geo polímeros, para lo cual se requiere de un estudio de sus propiedades geotécnicas, las cuales tienen gran influencia para predecir el comportamiento del suelo o de los materiales a los cuales se adicionarán, algunos valores de estas propiedades de diferentes autores se presentan en la Tabla 4, pudiendo observar los elevados límites de los lodos de aluminio y de hierro, debido a su naturaleza hidrofílica que les permite absorber gran cantidad de agua antes de cambiar sus propiedades, también se puede destacar que los lodos de aluminio y de hierro tienen una gran plasticidad, lo cual indica una gran cohesión en sus partículas (EPA, 1996) (Gomesa, Zhou, Li, & Long, 2019).

Tabla 4. Propiedades geotécnicas de diferentes tipos de lodos de potabilización.

Propiedad	Tipo de lodo					
	Aluminio <sup>A</sup>	Aluminio <sup>A</sup>	Hierro <sup>A</sup>	Aluminio <sup>B</sup>	Hierro <sup>C</sup>	Cal <sup>D</sup>
<b>Límite líquido (%)</b>	423	550	108	80-550	108	38-72
<b>Límite plástico (%)</b>	137	239	47	60-325	47	32-53
<b>Índice de plasticidad (%)</b>	286	311	61	20-225	61	4-19
<b>Gravedad específica</b>	-	-	-	1.86-2.33	2.26-2.72	2.57-2.62
<b>Clasificación S.U.C.S.</b>	-	-	-	Arcilla de alta plasticidad	Arcilla de alta plasticidad	Limo de baja plasticidad

Nota: se muestran las propiedades geotécnicas de diferentes autores

- A. Cornwell et al., 1992
- B. Komlos et al. (2013); O’Kelly and Quille (2009); Wang et al. (1992); Watanabe et al. (2011)
- C. Wang et al. (1992); Baker et al. (2005)
- D. Baker et al. (2005); Ramer and Wang (2000); Kashyap and Datta (2017).

De acuerdo con estudios realizados para el aprovechamiento de estos lodos en el área de la construcción, se ha encontrado que se pueden utilizar como aditivos en la fabricación de materiales para la construcción. Estos estudios han comprobado el uso de lodos de aluminio y de hierro en concentraciones inferiores al 10% para la fabricación de ladrillos, sin embargo, los lodos de hierro logran una mejora del comportamiento mecánico, mientras que los de aluminio disminuyen levemente su resistencia sin comprometer su uso, por otro lado, también se ha comprobado su efectividad en mezclas de concreto en concentraciones hasta del 5% de lodos remplazando el cemento o el agregado fino, sin comprometer el comportamiento mecánico de elementos estructurales y no estructurales (Gomesa, Zhou, Li, & Long, 2019).

### 3. Metodología

El desarrollo metodológico del proyecto se realizó en tres fases, la primera fue el tratamiento y caracterización de lodos, la segunda el aprovechamiento de lodos en la construcción en tierra y la tercera la evaluación técnica para el aprovechamiento de los lodos en la construcción en tierra, estas fases se describen a continuación y se muestran en la Figura 1, especificando procedimientos y ensayos realizados dentro de cada una de estas.

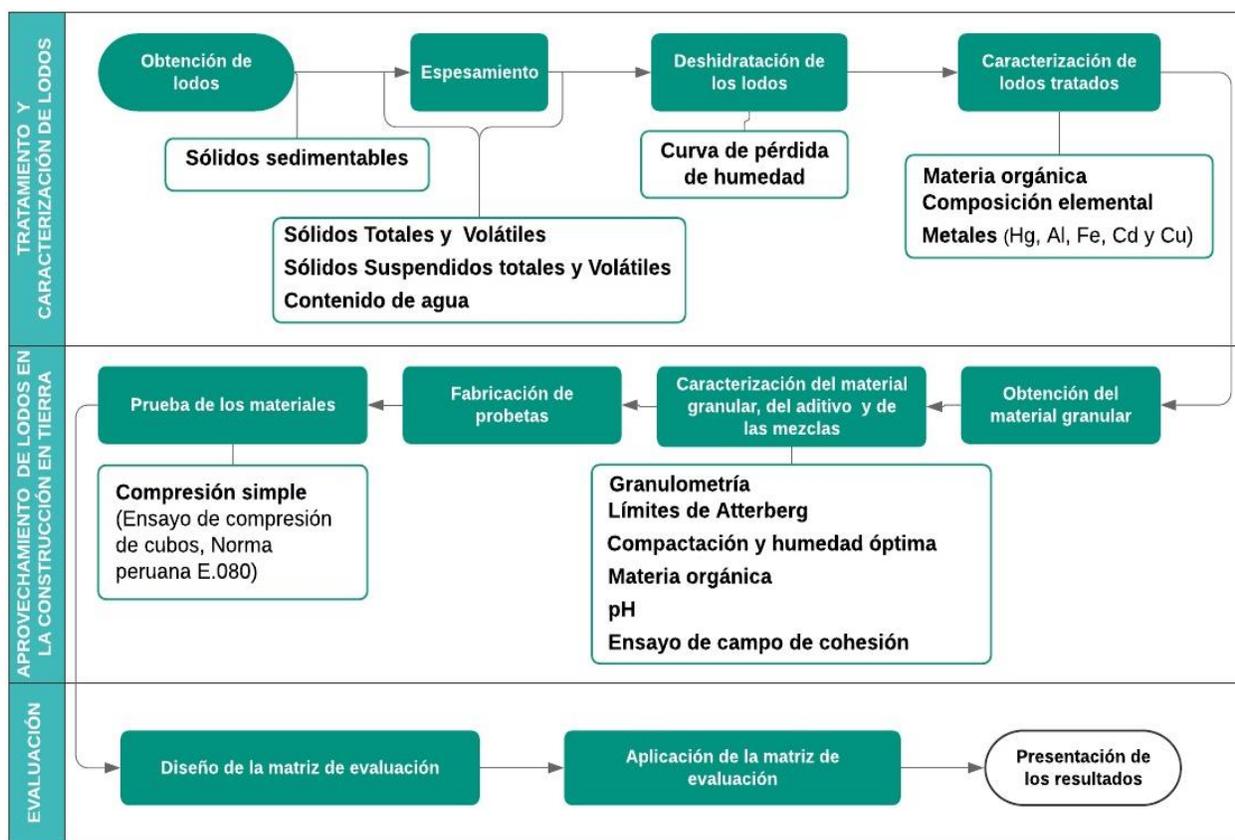


Figura 1. Metodología.

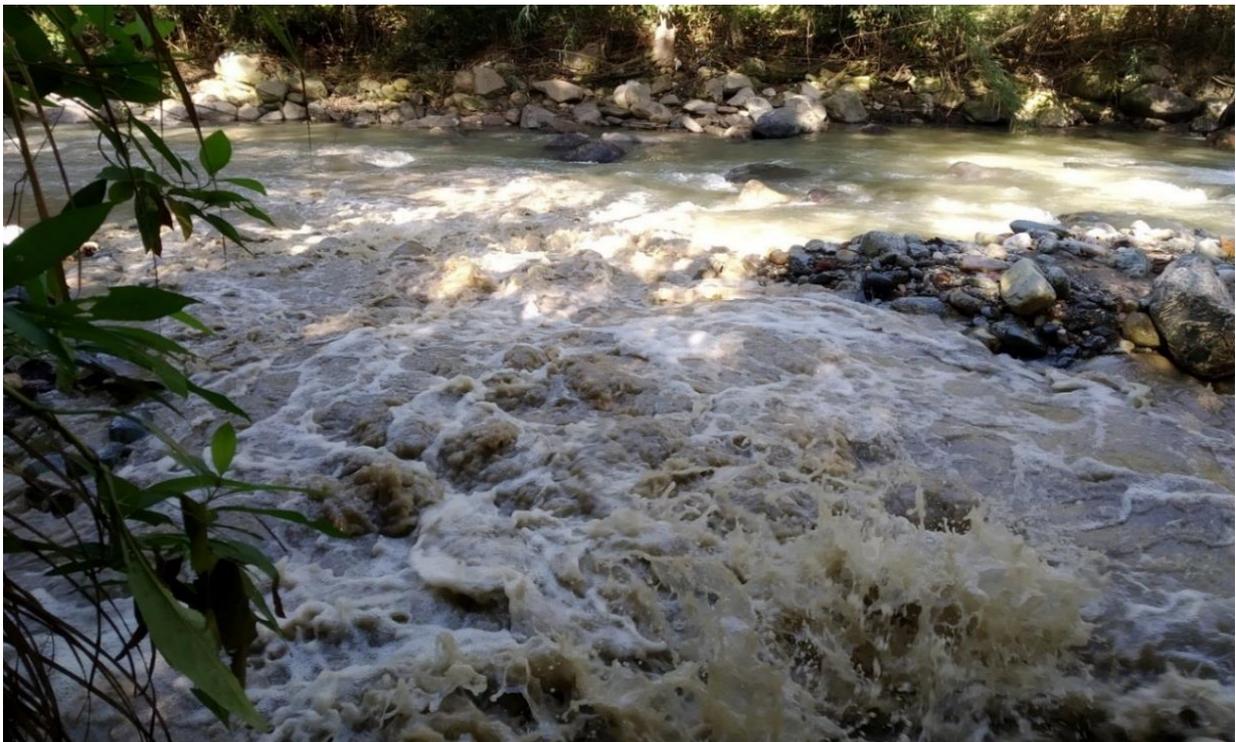
#### 3.1. Tratamiento y caracterización de lodos

Esta fase de la metodología se enfocó en la obtención de los lodos y en su caracterización respecto a contenido de sólidos, tratamiento y composición, con la finalidad de poder determinar la viabilidad en su aprovechamiento respecto a su cantidad, calidad y tratamiento.

### 3.1.1. Obtención de lodos

Los lodos utilizados para el desarrollo experimental fueron los generados a partir de los procesos de sedimentación y filtración en la planta de tratamiento de agua potable de Bosconia, la cual forma parte del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga y se encarga de la potabilización del agua del Río Suratá. En esta planta se realiza un tratamiento convencional por medio de coagulación con sulfato de aluminio, floculación mecánica vertical, sedimentación de alta tasa, filtración y desinfección; asimismo se tienen en cuenta las concentraciones de mercurio que se pueden presentar en el agua cruda, por lo cual se utiliza un método de coagulación por barrido, aumentando las concentraciones de coagulante utilizado, para asegurar su remoción.

Actualmente estos lodos son descargados a la fuente de abastecimiento, aguas abajo de la bocatoma, sin un tratamiento previo, como se muestra en la Figura 2, donde se puede ver el vertimiento de lodos provenientes de la purga del sedimentador 1 al río Suratá.



*Figura 2. Descarga de lodos al río Suratá.*

La recolección de los lodos se realizó en el canal de descarga al río Suratá, tomando lodos del lavado de filtros y/o de la purga de sedimentadores por medio de pimpinas de 5 galones y procurando una recolección homogénea durante el proceso de lavado o purga; en la Figura 3 se puede observar primero el punto de salida de la planta de tratamiento al canal de descarga, segundo la salida de lodos provenientes del lavado de filtros y tercero la salida de lodos provenientes de la purga de sedimentadores.



*Figura 3. Punto de salida de lodos de la planta de Bosconia al río Suratá.*

### 3.1.2. Caracterización inicial de lodos

Los lodos obtenidos en la planta de Bosconia fueron llevados al laboratorio de agua residual de la Universidad Pontificia Bolivariana con la finalidad de realizar su caracterización inicial en cuanto a Sólidos sedimentables, Sólidos totales y totales volátiles y Sólidos suspendidos totales y suspendidos volátiles, siguiendo los ensayos que se mencionan en la Tabla 5. Adicionalmente a esta metodología, el realizar el procedimiento para la determinación de los Sólidos totales, se tomó el peso de los lodos previo al secado con la finalidad de calcular el contenido de agua de los lodos y compararlo con el de las diferentes fases del tratamiento.

*Tabla 5. Metodología utilizada para la determinación de sólidos.*

	Parámetro	Unidades	Norma	Método
<b>Sólidos</b>	Sólidos sedimentables	mL/L	Standard methods 2540 F	Volumétrico
	Sólidos totales y totales volátiles	mg/L	Standard methods 2540 G	Gravimétrico
	Sólidos suspendidos y volátiles	mg/L	Standard methods 2540 D y 2540 E	Gravimétrico

### 3.1.3. Espesamiento de lodos

El espesamiento de lodos se realizó por medio de un espesamiento natural en tres columnas cilíndricas de acrílico dejando sedimentar los diferentes tipos de lodo por la acción de la gravedad por un periodo de 1 hora, al cabo de este tiempo se removió el sobrenadante y se recolectaron los lodos espesados para ser caracterizados; en la Figura 4, se pueden observar las columnas utilizadas para la sedimentación de los lodos, en la primera columna la sedimentación de los lodos provenientes del lavado de filtros y en la segunda los de la purga de sedimentadores, ambos al inicio del proceso de espesamiento.



*Figura 4. Columnas de sedimentación.*

#### 3.1.4. Caracterización de los lodos espesados

La caracterización de los lodos espesados se realizó teniendo en cuenta los parámetros de Sólidos totales y totales volátiles y Sólidos suspendidos totales y suspendidos volátiles, mediante los mismos ensayos mencionados en la Tabla 5 para los lodos crudos; de igual manera calculando el contenido de agua de los lodos espesados durante la determinación de los Sólidos totales.

#### 3.1.5. Deshidratación de lodos

La deshidratación de lodos se realizó en un horno a 105 °C, analizando su comportamiento por medio del cálculo del contenido de agua, de la manera que se muestra en la Ecuación 1. El procedimiento se realizó por triplicado, tomando entre 10 y 20 gramos de cada muestra de lodos sedimentados en recipientes de aluminio y calculando el peso de la muestra durante el proceso de secado a diferentes tiempos (0h, 2h, 2h30m, 3h, 3h20m, 3h40m, 4h, 4h20m, 4h40m, 5h y 24h).

$$W[\%] = \frac{\text{Peso del agua contenida en los lodos [g]}}{\text{Peso lodos húmedos [g]}} * 100\% \quad (\text{Ecuación 1})$$

Los lodos sobrantes fueron puestos en recipientes de aluminio de mayor tamaño y llevados al horno a 105°C para remover completamente el agua y obtener la cantidad deseada de lodos secos para continuar el desarrollo experimental.

#### 3.1.6. Preparación del producto obtenido

La preparación de los sólidos obtenidos de la deshidratación de los lodos consistió en la recolección de este material, trituración con un pistilo en un mortero y almacenamiento en bolsas; en la Figura 5 se puede observar el proceso de preparación de los lodos desde la obtención de la deshidratación en el horno hasta el almacenamiento del lodo pulverizado.



*Figura 5. Preparación de los lodos para uso como aditivo.*

### 3.1.7. Caracterización del producto del tratamiento de lodos

Para la caracterización de los sólidos obtenidos del tratamiento de los lodos, ya preparados para ser utilizados como aditivos, se tuvieron en cuenta 3 aspectos: el contenido de materia orgánica, su composición elemental y su composición química teniendo en cuenta algunos metales de interés.

#### 3.1.7.1. Materia orgánica

El contenido de materia orgánica se determinó por el método de ignición, utilizando una muestra de los lodos deshidratados y pulverizados, siguiendo el procedimiento indicado en la norma INV-E-121-13, obteniendo el porcentaje de materia orgánica gravimétricamente.

#### 3.1.7.2. Composición elemental

La composición elemental de los lodos se realizó mediante un análisis por fluorescencia de rayos X por energía dispersiva (EDS), con un equipo detector de rayos x marca BRUKER, en el microscopio electrónico de barrido (SEM), marca TESCAN-Modelo MIRA 3 FEG-SEM de la Universidad Pontificia Bolivariana. Este análisis se hizo en 4 puntos diferentes de la muestra de lodos deshidratados y pulverizados, con la finalidad de determinar otros compuestos o elementos presentes en los lodos.

### 3.1.7.3. Composición química

La composición química de los lodos se determinó teniendo en cuenta 5 metales de interés para su caracterización: hierro (Fe), aluminio (Al), mercurio (Hg), cadmio (Cd) y cobre (Cu), mediante los ensayos que se muestran en la Tabla 6, realizados en los laboratorios del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga; estos metales fueron escogidos debido a la importancia que tienen en la composición de los lodos y a factores relacionados con el tratamiento del agua.

*Tabla 6. Metodología utilizada para el análisis químico de los lodos.*

Metal	Parámetro	Unidades	Norma	Método
<b>Hierro</b>	Hierro total	mg Fe/Kg	Standard methods 3500-Fe B Ed.23	Colorimétrico
<b>Aluminio</b>	Aluminio total	mg Al/Kg	Standard methods 3500-Al B Ed.23	Erlocromo clarina R
<b>Mercurio</b>	Mercurio total	mg Hg/Kg	Standard methods 3112 B Ed.23	Absorción atómica- Vapor frío
<b>Cadmio</b>	Cadmio total	mg Cd/Kg	Standard methods 3111I B Ed.23	Absorción atómica
<b>Cobre</b>	Cobre total	mg Cu/Kg	Standard methods 3111I B Ed.23	Absorción atómica

El hierro y el aluminio fueron seleccionados debido al aporte durante el tratamiento del agua, por el coagulante utilizado, también porque estos metales pueden presentar un riesgo para la salud y para el ambiente por su toxicidad en altas cantidades; el mercurio fue seleccionado debido a su presencia en la fuente de abastecimiento por la minería que se realiza en la zona, ya que este se acumula en los lodos; el cadmio fue seleccionado de manera similar al aluminio y al hierro, ya que está relacionado con el coagulante utilizado y a las impurezas en este; finalmente, el cobre fue seleccionado porque también está ligado a la minería al igual que el mercurio.

### 3.2. Aprovechamiento de lodos en la construcción en tierra

Esta fase de la metodología se enfocó en el uso del producto obtenido del tratamiento de lodos como aditivo en la construcción en tierra, teniendo en cuenta la caracterización del material granular a utilizar, la caracterización de los lodos tratados como aditivo y el efecto que tienen los lodos en las propiedades y comportamiento mecánico ante la compresión del material granular en concentraciones del 5% e inferiores.

### 3.2.1. Obtención del material granular

El material granular utilizado se obtuvo del Laboratorio de Construcciones de la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga, ya que para el presente proyecto no se determinó un tipo de suelo específico con el cual trabajar. Este se preparó disgregándolo y pasándolo por un cernidor para retirar el material más grueso (gravas); en la Figura 6 se puede observar la preparación del material granular.



*Figura 6. Obtención del material granular*

### 3.2.2. Caracterización del material granular y de los lodos secos como aditivo

La caracterización de ambos materiales se realizó teniendo en cuenta los parámetros que se muestran en la Tabla 7, sin embargo, no se realizaron todos los ensayos para ambos materiales.

*Tabla 7. Metodología para la caracterización del material granular y de los lodos.*

Parámetro	Resultado	Norma utilizada
<b>Granulometría por tamizado</b>	Curva de distribución granulométrica	INV-E-123-13
<b>Granulometría por el método del hidrómetro</b>	Curva de distribución granulométrica	INV-E-123-13
<b>Gravedad específica</b>	Gravedad específica	INV-128-13
<b>Límite líquido</b>	Curva de fluidez y límite líquido	INV-E-125-13
<b>Límite plástico</b>	Límite plástico	INV-E-126-13
<b>Índice de plasticidad</b>	Índice de plasticidad	INV-E-126-13
<b>Compactación y humedad óptima</b>	Humedad óptima de compactación	INV-E-141-13
<b>Cohesión</b>	Humedad y longitud de rotura.	Manual de construcción de tierra, Minke
<b>Materia orgánica por ignición</b>	Porcentaje de materia orgánica	INV-E-121-13
<b>pH</b>	pH en agua destilada y en solución de cloruro de calcio	INV-E-121-13

El análisis granulométrico se realizó con la finalidad de determinar la cantidad de grava, arena, limos y arcillas en el suelo, así como para facilitar la clasificación del suelo dentro del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S.), mediante la carta de plasticidad que se muestra en el Anexo 2, para esto se tuvieron en cuenta las dos metodologías, por medio de tamices y por medio del hidrómetro, para el suelo y solamente la segunda para los lodos, adicionando un análisis de la cantidad de finos para los lodos. Para el ensayo de granulometría por el método del hidrómetro se realizó el cálculo de la gravedad específica de ambas muestras.

Los límites líquido y plástico se realizaron para la determinación del índice de plasticidad, con la finalidad de la clasificación de las muestras según el S.U.C.S., este ensayo se realizó para el suelo y para los lodos, sin embargo, en el caso de los lodos no fue posible completar los ensayos debido a dificultades en el procedimiento que se profundizarán más adelante.

El ensayo de compactación y humedad óptima se realizó para el suelo utilizando diferentes humedades para encontrar la humedad óptima de compactación con la que se trabajó para la fabricación de las probetas, logrando la mayor densidad posible.

El ensayo de cohesión se realizó siguiendo el procedimiento modificado que se plantea en el Manual de construcción en tierra, siguiendo las recomendaciones planteadas en dicho manual, fabricando un molde con las dimensiones propuestas para la cinta de suelo y una superficie para deslizarla con un radio de caída de 1 cm (Minke, 2001), la ejecución del ensayo se observa en la Figura 7, donde se muestra la fabricación de la cinta y su deslizamiento en la superficie hasta la rotura de esta. Adicional a la longitud de rotura de la cinta se midió la humedad a la cual esta se encontraba.



*Figura 7. Metodología utilizada para el ensayo de cohesión.*

La materia orgánica se determinó en el suelo para determinar si esta sería suficiente para influir en las propiedades del suelo, como se mencionó anteriormente, es uno de los factores a tener en cuenta en la construcción en tierra, en el caso de los lodos, se utilizó el valor determinado en la fase anterior.

Finalmente, el pH se determinó tanto para el suelo como para los lodos en agua destilada y solución de cloruro de calcio, para determinar si el suelo y los lodos son ácidos, alcalinos o neutros y poder comparar los resultados con el comportamiento mecánico de las probetas.

### 3.2.3. Preparación de las mezclas

Las mezclas de suelo se prepararon a partir de los pesos secos del suelo y de los lodos, haciendo mezclas del 1, 2, 3, 4 y 5%, para realizar su caracterización y las probetas.

### 3.2.4. Caracterización de las mezclas

La caracterización de las mezclas se realizó teniendo en cuenta los ensayos de Límite líquido, Límite plástico, Índice de plasticidad, Cohesión y pH, mediante las normas mencionadas en la Tabla 7; adicionalmente se realizó un punto del ensayo de compactación y humedad óptima para

las mezclas con la humedad óptima el suelo, para determinar la variación de la densidad con la adición de los lodos.

### 3.2.5. Fabricación de probetas

Para la fabricación de las probetas se tuvieron en cuenta los parámetros que proporciona la Norma Peruana E080 para la determinación de la resistencia del material tierra a la compresión, modificando las dimensiones de las probetas de 0.1m de arista a 0.05m de arista, de modo que fueran iguales a las de las probetas utilizadas en los ensayos de compresión de cubos de mortero y disminuyendo el peso del pisón a la mitad del recomendado por la Norma Peruana, esto debido a experiencias previas en el laboratorio que recomiendan utilizar este valor para asegurar la adecuada compactación del suelo; en la Tabla 8 se muestran los parámetros utilizados para la fabricación de las probetas en comparación a lo que dice la Norma E80, cabe resaltar que dicha norma no proporciona suficientes parámetros a tener en cuenta, dificultando el procedimiento.

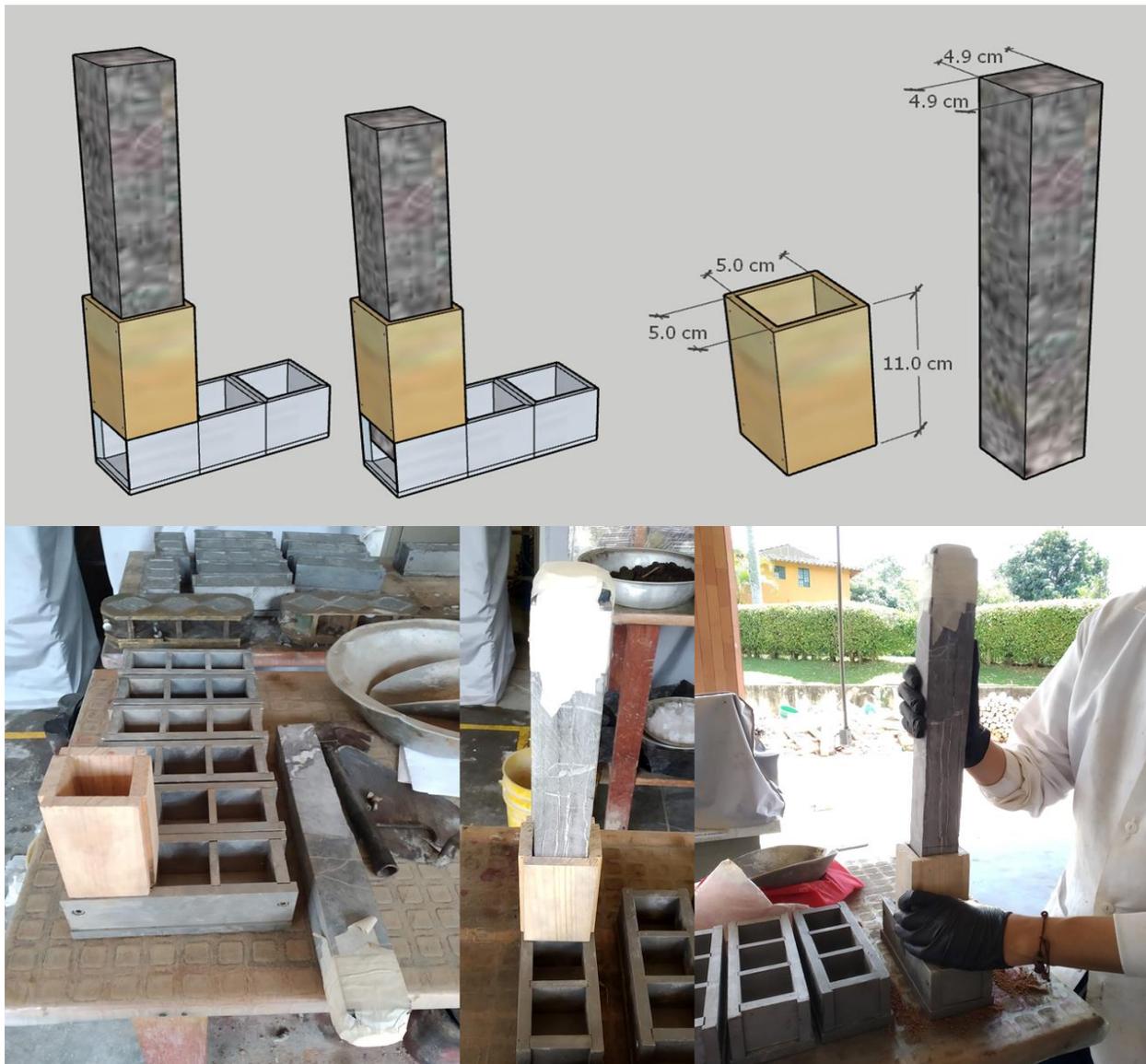
*Tabla 8. Parámetros utilizados para la fabricación de probetas.*

Parámetro	Norma peruana E80	Utilizado
<b>Arista de los cubos (m)</b>	0.1	0.05
<b>Peso del pisón (Kg)</b>	5	2.5
<b>Material del pisón</b>	No especificado	Piedra caliza
<b>Altura de caída (m)</b>	No especificado	0.1
<b># Golpes</b>	10	10
<b># Capas</b>	No especificado	3
<b>Espesor de capa (m)</b>	No especificado	0.02

Adicional a los parámetros de fabricación se realizó un análisis del proceso de compactación de las probetas para asegurar el buen desempeño durante este, el cual culminó con el diseño de un modelo para la compactación, el cual se muestra en la Figura 8 junto con el modelo real utilizado.

El análisis del proceso de compactación se realizó teniendo en cuenta dos aspectos: el área de impacto del pisón y el modo de aplicación de los golpes, ambos teniendo en cuenta experiencias

previas en el laboratorio. El área del pisón debe ser la suficiente para ejercer impacto sobre toda la superficie y que no disipe la fuerza de compactación debido a fricción con las paredes del molde; y el modo de aplicación de los golpes debe hacerse de manera que se distribuyan uniformemente y que se pueda asegurar una altura de caída adecuada; culminando con las dimensiones para el pisón que se muestran en la figura y de un riel para direccionarlo adecuadamente, medir la altura de caída adecuadamente y evitar fallos en el proceso.



*Figura 8. Modelo del pisón para la fabricación de probetas y modelo real para la fabricación de las probetas*

### 3.2.6. Ensayo de compresión de cubos

El ensayo de compresión de cubos se realizó siguiendo la metodología utilizada para la compresión de cubos de mortero, a los 7, 14 y 28 días de la fabricación de las probetas, aplicando fuerza mediante una prensa utilizando un adaptador para cubos de mortero de modo que se distribuya uniformemente la fuerza a una velocidad de 900 a 1800 N/s hasta registrar la fuerza máxima aplicada antes del fallo de la probeta.

Previo a las pruebas de compresión se realizó una medición de las dimensiones y del peso de las probetas, con la finalidad de determinar el área real de aplicación de la fuerza de compresión y determinar la densidad de las probetas; después del fallo de las probetas se analizó el tipo de falla que tuvo y se utilizó como valor de referencia para determinar la viabilidad del uso de este suelo y de las mezclas en la construcción en tierra que recomienda la norma peruana de 1Mpa.

### 3.3. Evaluación técnica del aprovechamiento de los lodos

Esta fase de la metodología se enfocó en la construcción y aplicación de una matriz de evaluación para determinar la viabilidad del uso de lodos producidos en la planta de tratamiento de agua potable de Bosconia como aditivo en la construcción en tierra. Para esto se realizó un análisis de los resultados obtenidos de las dos fases anteriores, así como de otros aspectos relevantes, teniendo en cuenta: la obtención de los lodos, su tratamiento, su composición y el cambio de las propiedades del suelo; teniendo en cuenta criterios como: la generación de lodos y el tratamiento que se le debe dar.

## 4. Resultados y Análisis

Los resultados obtenidos del desarrollo experimental son los que se presentan a continuación para cada una de las fases desarrolladas; estos se resumen y se describen analizando cada uno de ellos en relación con los objetivos del proyecto.

### 4.1. Tratamiento y caracterización de lodos

Los resultados del tratamiento y de la caracterización de lodos se dividen en la composición de los lodos respecto a sólidos, su tratamiento y la caracterización de los lodos tratados. Adicional a los resultados obtenidos se realizó una bitácora de muestreo, como se muestra en la Tabla 9, donde se pueden observar los días en los que se realizaron los muestreos, el tipo de lodo obtenido y las características promedio del agua tratada en la planta de acuerdo con la frecuencia de la purga de sedimentadores y del lavado de filtros; los parámetros medidos en la planta que se tuvieron en cuenta fueron la turbiedad del agua antes, durante y después del tratamiento y la cantidad de mercurio en el agua cruda y en el agua tratada, con la finalidad de relacionarlos con los resultados obtenidos en la metodología realizada.

*Tabla 9. Bitácora de muestreo*

Fecha de muestreo	Fuente del lodo	Calidad promedio del agua				
		Cruda		Sedimentada	Filtrada	
		Turbiedad (UNT)	Mercurio ( $\mu\text{g/L}$ )	Turbiedad (UNT)	Turbiedad (UNT)	Mercurio ( $\mu\text{g/L}$ )
18/07/2019	Lavado Filtro No. 1	29.67	0.13	1.78	0.11	N.D.
	Purga Sedimentador No.1	31.00	0.12	1.67	0.11	N.D.
23/07/2019	Purga Sedimentador No.1	16.00	0.02	1.13	0.11	N.D.
31/07/2019	Lavado Filtro No. 2	30.33	0.12	1.73	0.11	N.D.
	Purga Sedimentador No.1	23.00	0.10	1.83	0.11	N.D.
6/8/2019	Purga Sedimentador No.1	18.00	0.10	1.11	0.10	N.D.
13/08/2019	Purga Sedimentador No.1	19.00	0.12	1.20	0.15	N.D.
20/08/2019	Purga Sedimentador No.1	15.00	0.12	1.19	0.11	N.D.
27/08/2019	Purga Sedimentador No.1	22.00	0.16	0.80	0.11	N.D.
19/09/2019	Lavado Filtro No. 2	116.33	0.35	1.25	0.10	N.D.

Nota: se muestran los valores obtenidos en planta sobre el tipo de lodo tomado y la calidad del agua durante el proceso de tratamiento, se realizó un promedio de estos parámetros de 1 día previo al muestreo para los de purga de sedimentadores y 3 días previos al muestreo para los de lavado de filtros, debido a la frecuencia de estos procesos, los cuales se realizan cada 8 horas y 2 veces a la semana, respectivamente.

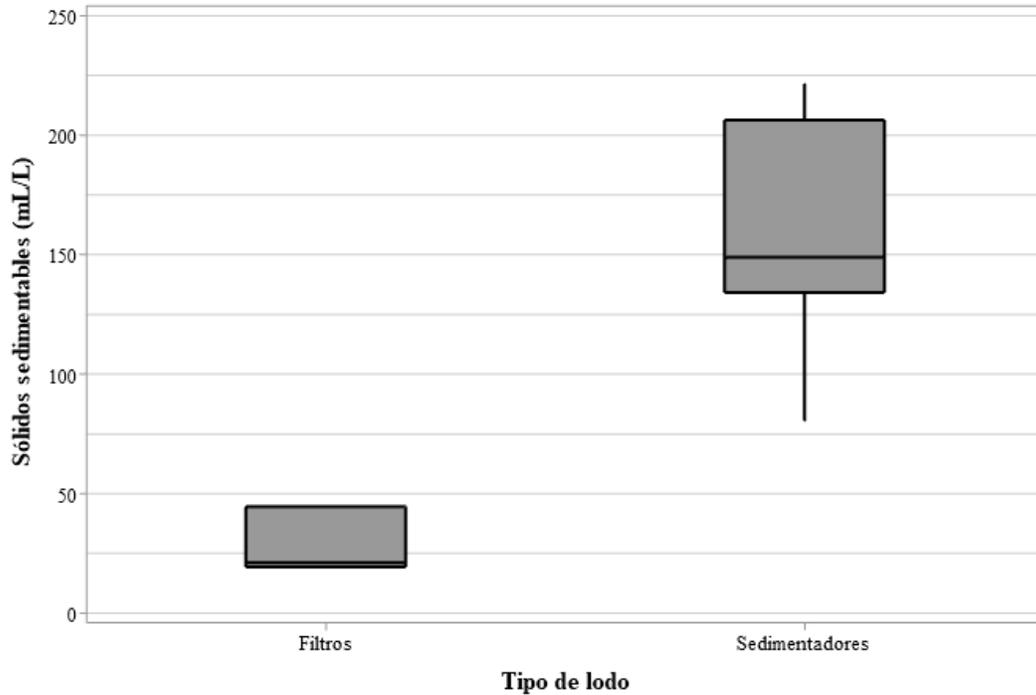
En esta bitácora se observa que el muestreo se realizó obteniendo mayor cantidad de lodos de la purga de sedimentadores y en mayor frecuencia, ya que estos se generan en mayor cantidad a comparación de los de lavado de filtros, debido a que su purga se realiza de manera más frecuente y a que sus sólidos son mucho mayores en tamaño, lo cual se puede apreciar en la remoción de turbiedad del agua durante el tratamiento. Respecto a la cantidad de mercurio se puede observar que esta se mantiene en entre 0.10 y 0.16  $\mu\text{g/L}$ , presentando concentraciones por fuera de este rango; también se confirma que la cantidad de mercurio no depende únicamente de la turbiedad del agua sino de otros factores como la minería en zonas aledañas.

#### 4.1.1. Composición de los lodos crudos

De la composición de los lodos se pudo observar una gran diferencia entre los lodos del lavado de filtros y de la purga de sedimentadores, como era de esperarse debido a las diferencias entre los procesos de sedimentación y filtración, entre estas la remoción de turbiedad y el tamaño de las partículas que remueven.

Su composición respecto a Sólidos sedimentables se puede observar en la Figura 9, donde se evidencia que, aunque existe una alta dispersión entre los datos, hay una gran diferencia entre el volumen de sólidos sedimentables de los dos tipos de lodo, siendo mayor en el caso de los sedimentadores. En promedio, los sólidos sedimentables de los lodos de la purga de sedimentadores están en 160.7 mL/L, mientras que para los de lavado de filtros están en 28.5 mL/L, que representan un 16.07 y 2.85% en volumen, respectivamente. De estos resultados se puede comprobar que la cantidad de lodos generados de la purga de sedimentadores es mucho mayor a los producidos en el lavado de filtros, sin embargo, ambos deben ser tenidos en cuenta,

para la determinación de los caudales de entrada para el espesamiento y de la salida del sobrenadante, así como su capacidad.



*Figura 9. Resultados Sólidos sedimentables*

De igual manera, la composición de los lodos respecto a sus sólidos totales (ST) y suspendidos (SST) es similar al de los sólidos sedimentables, tal como se puede observar en la Figura 10, ya que estos varían en cada una de las tomas, generando una dispersión en los datos, y se encuentran en mayor concentración en los lodos del sedimentador, siendo más notable la diferencia en los sólidos totales que en los suspendidos.

Por otro lado, su composición respecto a sólidos totales volátiles (STV) y los sólidos suspendidos volátiles (SSV) tiene menos dispersión, siendo mayor en el caso de los lodos de sedimentadores, pero más representativos en el caso de los de filtros, estando en un porcentaje entre 13 y 53 % en peso respecto a sus sólidos totales, mientras que en los sedimentadores están

entre el 6 y 13%, indicando que los lodos provenientes de los sedimentadores son principalmente inorgánicos mientras que los de filtros pueden llegar a tener un contenido orgánico alto.

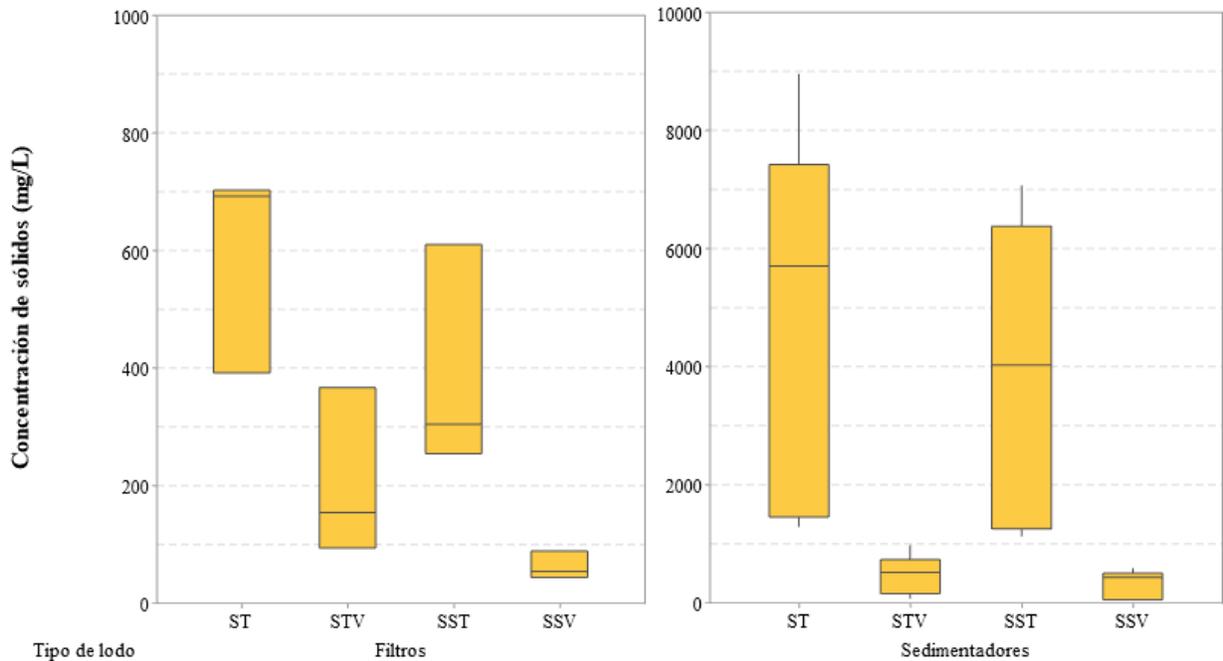


Figura 10. Resultados composición de Sólidos de los lodos crudos

Adicionalmente, se puede observar una relación con la turbiedad removida en cada unidad (filtros y sedimentadores) con los diferentes tipos de sólidos: sedimentables, totales y suspendidos, observando un incremento de estos cuando hay una mayor remoción de la turbiedad en el proceso de tratamiento, tal como se observa en la Figura 11. Esta relación es coherente con el tratamiento que se le da al agua cruda, ya que en los procesos de coagulación y floculación permiten la remoción de la mayor cantidad de las partículas suspendidas mediante un proceso de sedimentación, dejando partículas suspendidas más pequeñas que son removidas durante la filtración.

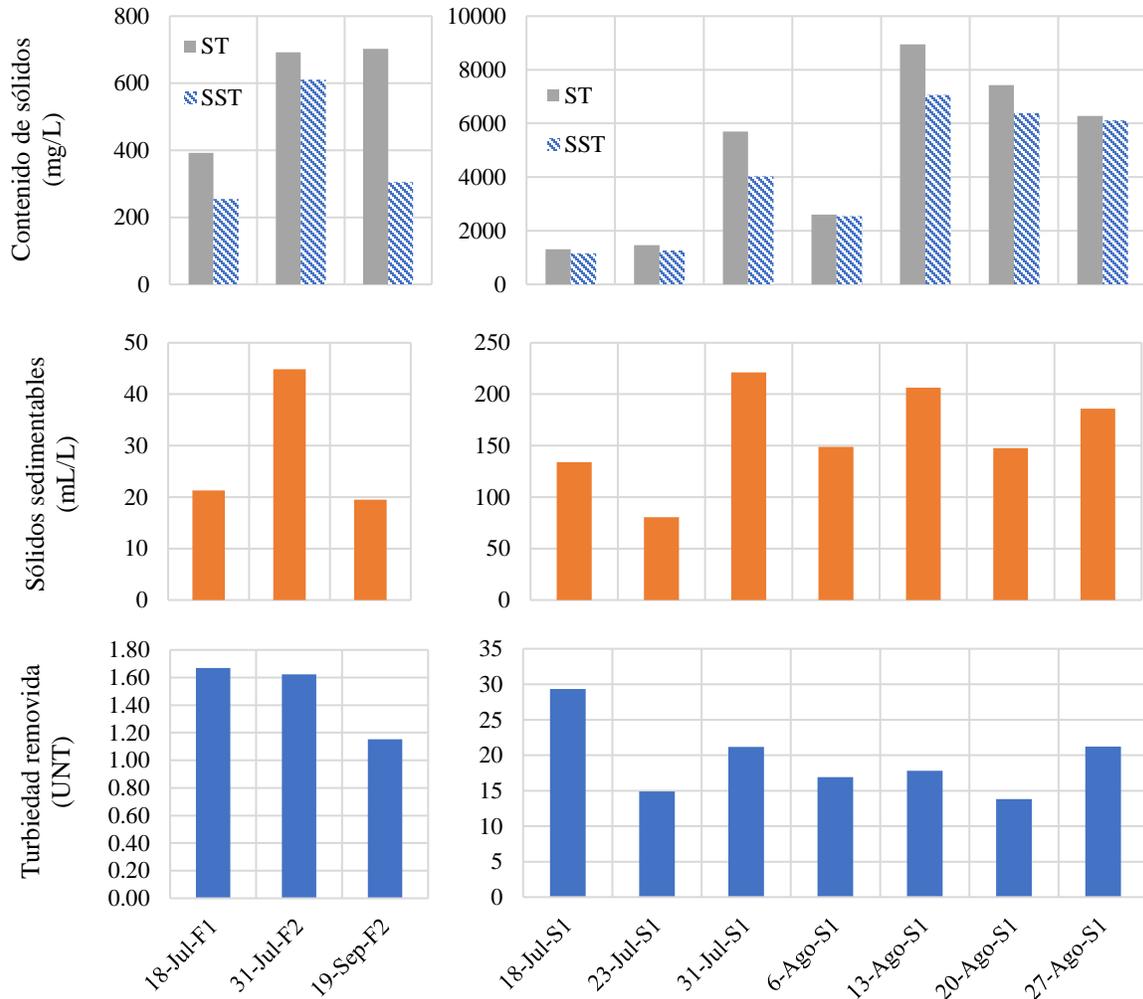
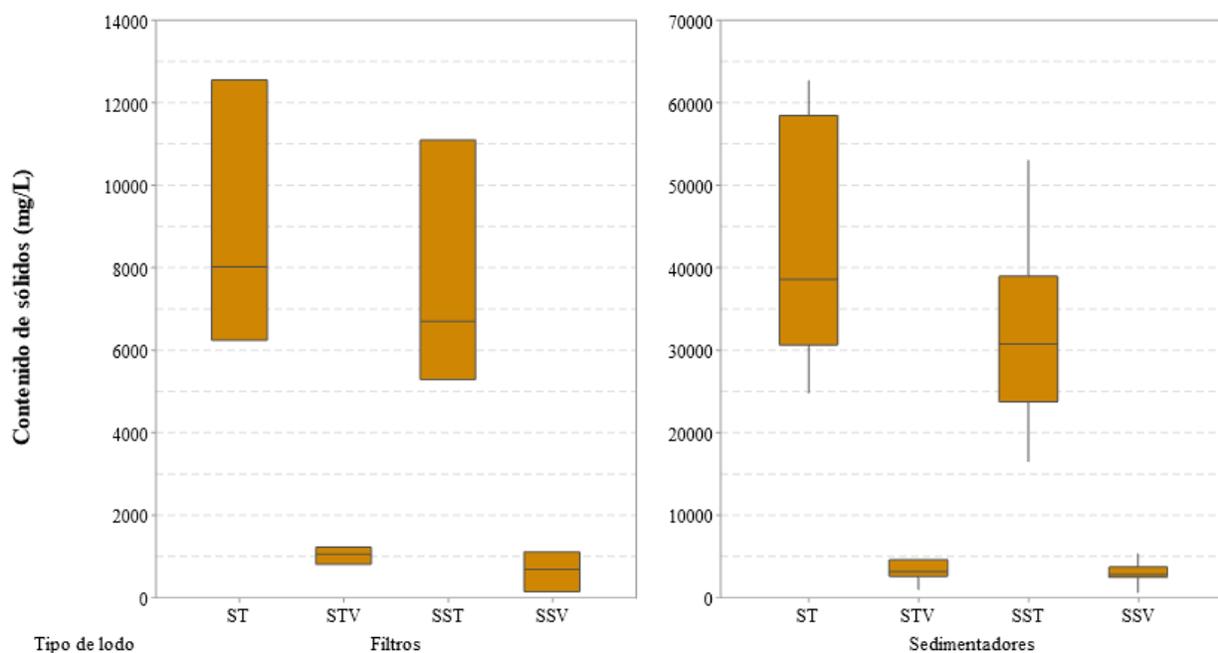


Figura 11. Relación turbiedad removida y sólidos

Nota: Se muestran los valores de los criterios de turbiedad removida, sólidos sedimentables y sólidos totales y suspendidos en los diferentes muestreos para los filtros y los sedimentadores. La turbiedad removida corresponde a la diferencia entre la turbiedad anterior al proceso (filtración o sedimentación) y la turbiedad posterior al mismo.

#### 4.1.2. Composición de los lodos espesados

Como se mencionó en la metodología, después del espesamiento de los lodos crudos se volvieron a determinar las propiedades de los lodos respecto a sus sólidos totales, suspendidos y las fracciones volátiles de estos dos, de este análisis se obtuvieron los resultados que se muestran en la Figura 12, encontrando un incremento de los sólidos totales de 8 hasta 20 veces para los lodos de filtros y para los de sedimentadores de 4 a 43 veces. Siendo mucho más variables estos últimos debido a la variación en los sólidos suspendidos en los lodos crudos de purgas de sedimentadores.



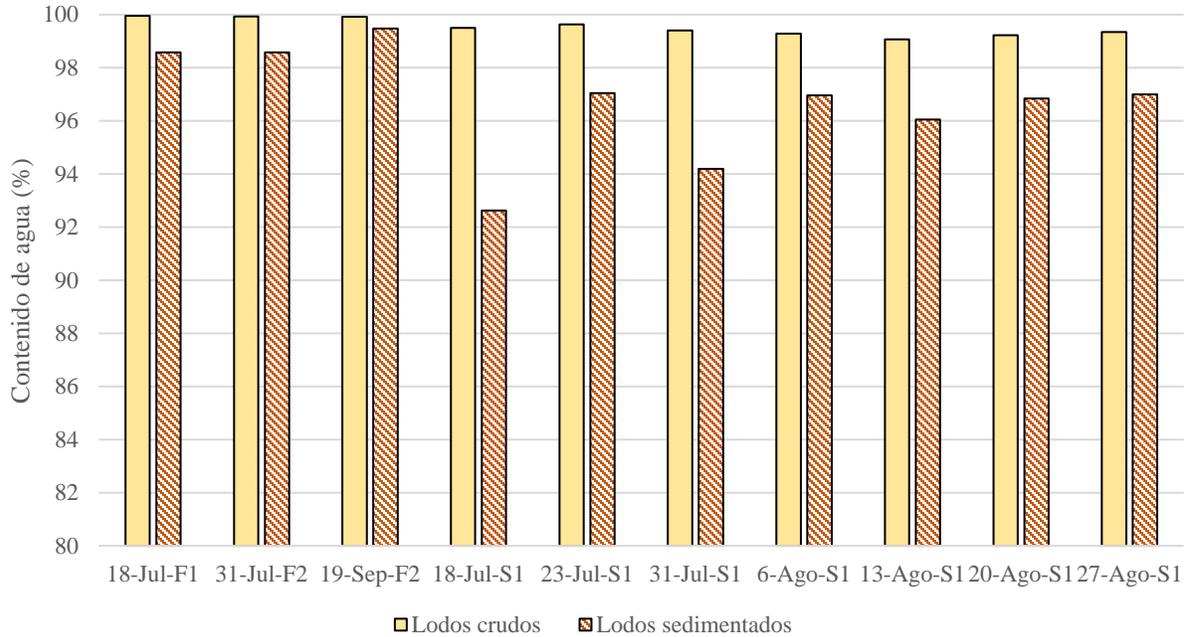
*Figura 12. Resultados composición de Sólidos de los lodos espesados*

Con relación a la fracción volátil de los lodos espesados, se puede observar una gran disminución con relación a los lodos crudos, representando del 8 al 15% de los sólidos totales en el caso de los de filtros y del 1 al 12% en el caso de los de los sedimentadores, lo cual indica que la mayor parte de los sólidos volátiles de los lodos de filtros se encuentran en la fracción no sedimentable y/o disuelta, la cual se pierde con el sobrenadante durante el espesamiento.

#### 4.1.3. Tratamiento de los lodos

Del tratamiento de los lodos, enfocado en la pérdida de agua durante su tratamiento, se pudo observar que el contenido de agua, calculado como se mencionó en el numeral 3.1.5, no varía significativamente durante el espesamiento de los lodos, como se muestra en la Figura 13, logrando una reducción máxima del 1.38% en el caso de lavado de filtros y del 6.91% en el caso de purga de sedimentadores, sin embargo, esta pérdida representa una generación grande de agua en peso y

en volumen y es mayor para los provenientes del lavado de filtros debido a que estos poseen menor cantidad de sólidos.



*Figura 13. Pérdida de contenido de agua del proceso de espesamiento*

Adicional a estos resultados se obtuvieron las curvas de deshidratación para cada una de las muestras de lodo espesado de lavado de filtros y de purga de sedimentadores, las cuales se pueden observar en la Figura 14 y en la Figura 15. Cabe resaltar que los resultados obtenidos en esta parte del tratamiento fueron limitados debido a la disponibilidad del laboratorio y a la carencia de equipos que permitieran obtener una curva de deshidratación más completa; ya que la toma de pesos se vio limitada por los horarios del laboratorio y la precisión de estos fue afectada por la falta de equipos que faciliten su toma, ya que tuvieron que hacerse en caliente.

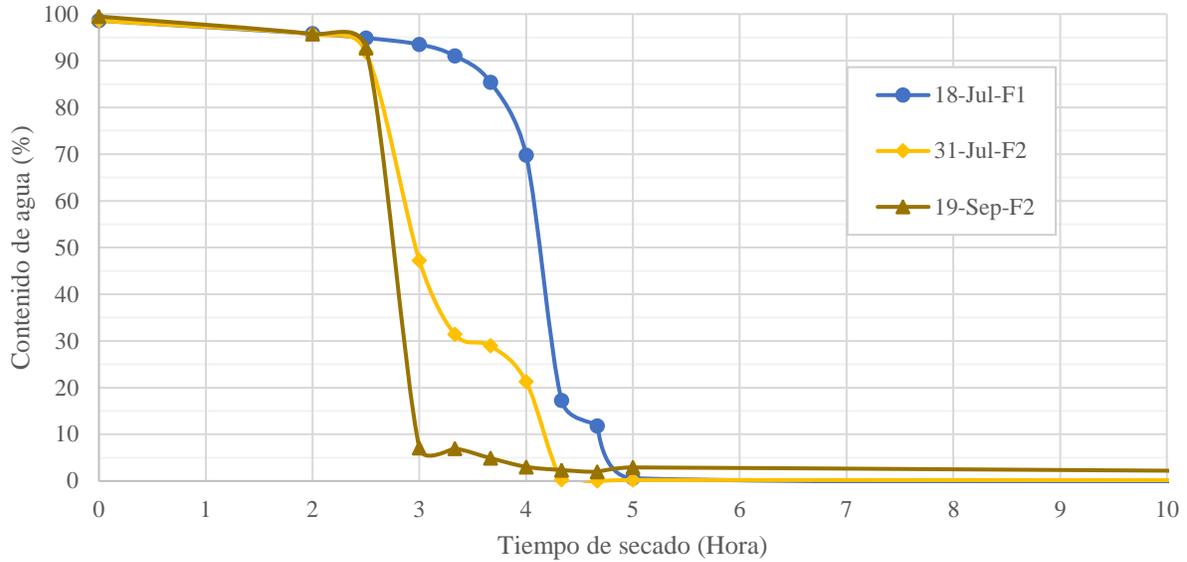


Figura 14. Resultados de la deshidratación de lodos de filtros

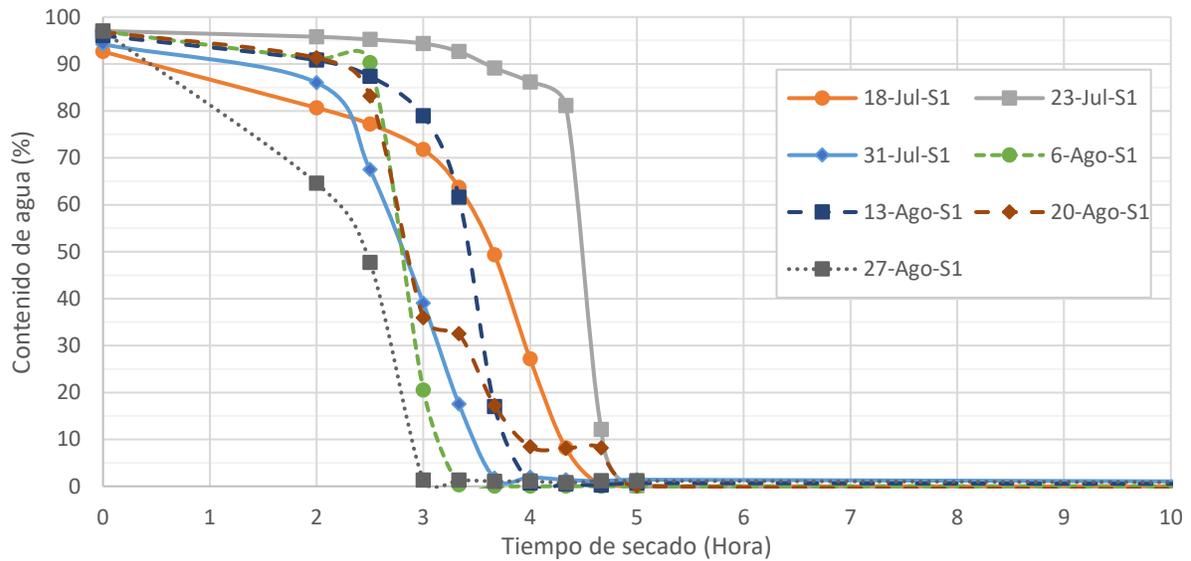


Figura 15. Resultados de la deshidratación de lodos de sedimentadores

De estas curvas de humedad se pueden observar tres zonas del proceso de secado, la primera es una zona de pérdida lenta de agua que se puede asociar con la pérdida del agua libre presente en los lodos, la cual finaliza entre las 2h30m y las 3h20m para los de lavado de filtros y entre las 2h y las 4h20m para los de purga de sedimentadores. La segunda zona es una de rápida pérdida que está asociada con el agua intersticial y superficial de los lodos, que por su cantidad representan un menor contenido de agua, esta zona finaliza cuando las pérdidas del contenido de agua no son

significantes y termina entre las 3 y 5h en ambos casos. Finalmente, la tercera zona es una zona en la que la velocidad de pérdida disminuye, esta zona está asociada a la humedad químicamente ligada, que es de las más difíciles de remover.

A partir de las curvas de deshidratación se pudo determinar que los tiempos de secado, definido como el momento en el que la variación del contenido de agua es mínima y se encuentra por debajo del 5%, están entre las 4 y 5h para los de filtros y entre las 3 y 5h para los de sedimentadores, demostrando que tienen una mayor variación en su tiempo de secado, los provenientes de la purga de sedimentadores y dando como tiempo aceptable de secado de los lodos 5h.

Teniendo en cuenta los resultados del tratamiento de lodos se puede observar que ambos tipos de lodo pueden ser sometidos a un proceso de espesamiento por gravedad, ya que se obtuvieron resultados prometedores sobre la remoción de agua y el aumento de la concentración de sólidos, sin embargo, se puede incrementar el tiempo de sedimentación para lograr una mayor disminución del volumen de los sólidos y facilitar el tratamiento posterior. De igual manera, se observó que los lodos espesados no tienen tiempos elevados en la pérdida del contenido de agua, por tanto, pueden ser deshidratados fácilmente por medios térmicos o inclusive mediante lechos de secado, debido a que la mayor porción del tiempo de secado está relacionada con el agua libre en los lodos, la cual puede ser removida mediante el proceso de filtración que ofrecen los lechos de secado.

#### 4.1.4. Composición de los lodos tratados

Finalmente, de la última parte de esta fase se obtuvieron los resultados de la composición de los lodos tratados, respecto a materia orgánica, composición elemental y composición química del análisis de los metales de interés.

El contenido de materia orgánica de los lodos listos para ser utilizados como aditivo fue del 10%, obteniendo que son ligeramente orgánicos, sin embargo, el aporte orgánico que darían estos lodos como aditivo en concentraciones menores al 5% en peso seco, no sería mayor a 5 g de contenido orgánico por tonelada de mezcla, que en un suelo con poco contenido orgánico no sería un factor que impida su uso para la construcción en tierra.

El análisis elemental se realizó inicialmente en dos puntos de una misma muestra, para poder abarcar una mayor área de la muestra y poder detectar de manera más completa los principales elementos presentes en los lodos, sin embargo, se realizaron dos puntos adicionales debido a que no se detectó aluminio en los EDS, aun así, no se logró registrar este elemento en ninguno de los puntos analizados, posiblemente porque se encuentra muy disperso en la muestra y por eso no pudo ser detectado en el análisis. Estos resultados se pueden ver en la Tabla 10, donde se presentan los puntos analizados y los resultados más significantes, anexando en el documento los resultados detallados de cada uno de los puntos.

*Tabla 10. Resumen de los resultados del análisis EDS*

	Punto 1*	Punto 2*	Punto 3*	Punto 4*
Elementos encontrados (porcentaje másico del análisis EDS)	Carbono (36.69%)	Carbono (42.92%)	Carbono (31.24%)	Carbono (39.05%)
	Oxígeno (16.09%)	Oxígeno (15.93%)	Oxígeno (16.88%)	Oxígeno (12.32%)
	Magnesio (7.57%)	Magnesio (8.03%)	Magnesio (11.04%)	Magnesio (9.05%)
	Potasio (7.30%)	Potasio (6.08%)	Hierro (10.23%)	Hierro (7.57%)
	Silicio (5.99%)	Silicio (5.33%)	Zinc (6.06%)	Fósforo (4.97%)
	Fósforo (5.55%)	Zinc (4.42%)	Potasio (5.59%)	Zinc (4.85%)
	Cobre (4.67%)	Hierro (4.15%)	Silicio (4.44%)	Potasio (4.70%)
	Zinc (4.51%)	Fósforo (3.89%)	Fósforo (4.29%)	Calcio (4.41%)
	Hierro (3.96%)	Calcio (3.12%)	Calcio (3.84%)	Silicio (4.23%)
	Manganeso (3.93%)	Cobre (2.99%)	Cobre (3.26%)	Cobre (3.94%)
	Calcio (3.22%)	Manganeso (2.75%)	Manganeso (2.70%)	Manganeso (3.38%)
	Nitrógeno (0.53%)	Nitrógeno (0.39%)	Nitrógeno (0.47%)	Nitrógeno (1.53%)

Nota: los resultados mostrados corresponden a un resumen de los análisis EDS de la muestra de lodos tratados que consiste en los elementos encontrados en orden descendente a partir del porcentaje másico corregido, los resultados completos se pueden observar en los anexos del documento.

\* Los puntos corresponden a cada uno de los análisis EDS realizados en la muestra de lodos listos para ser utilizados como aditivo.

De estos resultados se pudo observar que se encontraron los mismos elementos en todos los puntos en proporciones similares, siendo los principales elementos carbono y oxígeno, los cuales están presentes en diferentes compuestos como materia orgánica e hidróxidos, de igual manera se puede observar que de los metales de interés se pudieron identificar únicamente el hierro y el cobre, en cantidades medianas del análisis. Sin embargo, los otros metales no se encontraron, en el caso del mercurio y cadmio debido a que sus cantidades deben ser bajas, tal como indica la composición de los lodos de acuerdo con los diferentes autores, y el aluminio por las razones expresadas anteriormente; adicional a los elementos mencionados, otros elementos que se encuentran en proporciones similares al hierro y el cobre son el silicio, potasio, fósforo, zinc, manganeso y calcio, todos asociados con la composición del suelo, sin embargo, el zinc debe ser estudiado para verificar su cumplimiento con la normativa de Biosólidos debido a su cercanía con la proporción del cobre encontrada en el análisis.

De los resultados de la composición química respecto a los metales de interés, que se muestran en la Tabla 11 en paralelo con los límites establecidos en la normativa colombiana de Biosólidos, se pudo encontrar que el hierro y el aluminio, aunque no tienen límites establecidos, se encuentran en concentraciones similares a las mostradas en la literatura, que se muestran en la Tabla 3. Encontrándose una mayor cantidad de aluminio debido al coagulante utilizado en el tratamiento del agua, que el mercurio se encuentra en concentraciones mayores a las que se muestran en la literatura, debido a su presencia en el agua cruda y a la remoción que se le da durante el tratamiento del agua y por tanto se acumula en los lodos, limitando su uso a solamente a los de tipo B el cual incluye su uso en la construcción, de acuerdo con la normativa de Biosólidos que se resume en el Anexo 3, finalmente, el cadmio y el cobre se encuentran por debajo de los niveles establecidos

por la norma, sin embargo el cadmio se encuentra en concentraciones superiores a los valores de la literatura, pudiendo relacionarlo con impurezas en el coagulante.

*Tabla 11. Composición de metales en los lodos.*

*Fuente: Propia*

Parámetro Concentración (mg/Kg)		Límite, Decreto 1287 de 2014 (mg/Kg)	
		Tipo A	Tipo B
<b>Hierro total</b>	55762	-	-
<b>Aluminio total</b>	92937	-	-
<b>Mercurio total</b>	16.7	10	20
<b>Cadmio total</b>	7.5	8	40
<b>Cobre total</b>	627.3	1000	1750

#### 4.2. Aprovechamiento de lodos en la construcción en tierra

De esta fase de la metodología se obtuvo la caracterización del suelo utilizado, de los lodos y de las mezclas suelo-lodos, respecto a sus propiedades geotécnicas a partir de los ensayos mencionados en la metodología, también los resultados de los ensayos de compresión simple realizados para los cubos de suelo y de las mezclas.

##### 4.2.1. Caracterización del suelo

Los resultados de la caracterización del suelo fueron los del análisis granulométrico y la determinación de los límites de Atterberg, para la clasificación del suelo según el S.U.C.S., así como la determinación de la humedad de compactación óptima, cohesión, pH y Materia orgánica.

De la granulometría del suelo, que se puede observar en la Figura 16, se pudieron determinar los porcentajes de la distribución de las partículas del suelo, pudiendo detallar a partir de este análisis un contenido de finos del 52.32%, clasificando a este suelo como uno fino, que posee un 0.21% de gravas, 47.27% de arenas, 27.62% de limos y 24.9% de arcillas, de acuerdo con los rangos establecidos por el S.U.C.S., estos valores son aceptables para un suelo para construcción de tierra, ya que los porcentajes de arena son mayores a los de limos y arcillas y los de gravas son

muy bajos, ubicando este suelo en el triángulo de clasificación como una tierra arcillosa, la cual puede ser utilizada para la construcción en tierra.

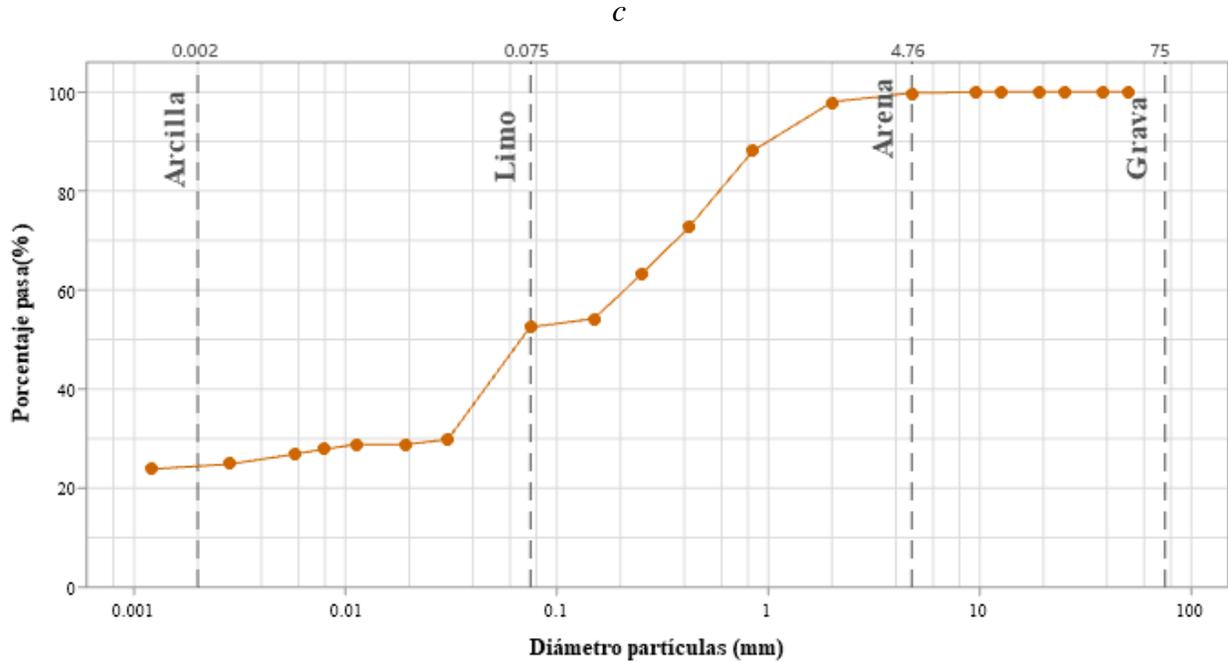


Figura 16. Curva granulométrica del suelo

La determinación de los límites de Atterberg dio como resultado un límite líquido de 38.64%, un límite plástico de 23.49% y un índice de plasticidad de 15.15%, logrando una clasificación del suelo de una Arcilla de baja plasticidad (CL), de acuerdo con el procedimiento del S.U.C.S.

Del ensayo de compactación se pudo una humedad de compactación óptima del 16.08%, en la cual se alcanza una densidad seca de 1.76 g/cm<sup>3</sup>, la cual fue determinada a partir de la curva de humedad vs peso unitario seco, que se muestra en la Figura 17.

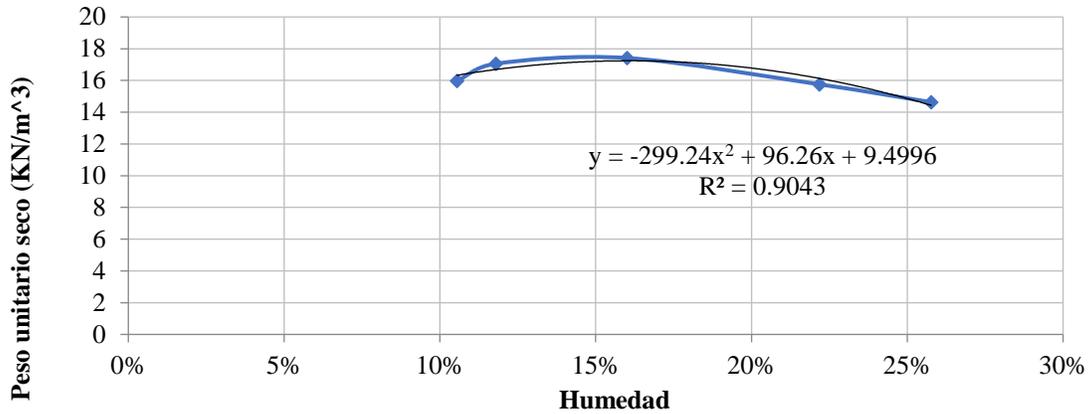


Figura 17. Curva humedad vs peso unitario seco

Por último, los ensayos de cohesión, pH y materia orgánica arrojaron resultado de longitud promedio de rotura de 19cm con una humedad del 24.2%, pH de 4.9 y 4.7, en agua destilada y en solución de cloruro de calcio respectivamente, y 6.26% de contenido de materia orgánica. Los valores de pH lo categorizan como un suelo ligeramente ácido y su contenido de materia orgánica como uno ligeramente orgánico, pudiendo interferir esta materia orgánica en el comportamiento del suelo al estar por encima del 2%.

#### 4.2.2. Caracterización de los lodos

Los resultados de la caracterización de los lodos se dividieron en el análisis granulométrico y en su pH, debido a que no fue posible la determinación exacta de los límites de Atterberg por sus propiedades hidrofílicas que impidieron el uso adecuado de la copa de Casagrande y de la superficie para determinar el límite plástico; estas propiedades también impidieron realizar el ensayo de cohesión debido a que no se alcanzó la contextura adecuada para la fabricación de la cinta.

El análisis granulométrico de los lodos arrojó los resultados que se muestran en la Figura 18, en donde se puede observar que tiene aproximadamente un contenido de finos del 82.12%, lo cual indica que es un suelo altamente fino, con unos porcentajes de 17.88% de arena, 56.72% de limos

y 23.33% de arcillas, categorizándolo como una tierra limo-arcillosa de acuerdo con el triángulo de clasificación. Esta composición de los lodos puede generar inconvenientes en la construcción en tierra, ya que las arcillas son de vital importancia para el uso del suelo en diferentes técnicas.

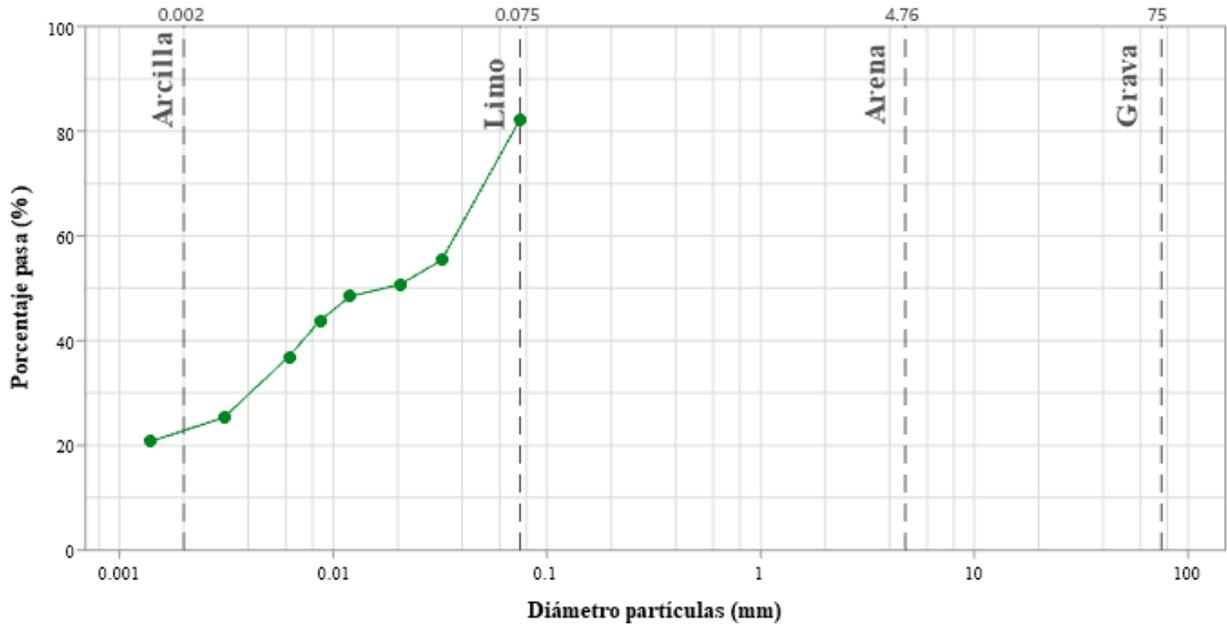


Figura 18. Curva granulométrica de los lodos tratados

De la medición del pH de los lodos se obtuvo un pH neutro de 7.03 y 6,92 en agua destilada y solución de cloruro de calcio, respectivamente, el cual puede no ser favorable en términos de resistencia.

Por último, de las pruebas para la determinación de los límites de Atterberg, aunque no arrojaron resultados concisos, se pudo determinar que los límites líquidos y plásticos se encuentran por encima de las humedades del 133.86% y del 65.56%, respectivamente, lo cual es coherente con los datos presentados por diferentes autores y que se muestran en la Tabla 4.

#### 4.2.3. Caracterización de las mezclas

Los resultados de la caracterización de las mezclas son los que se muestran en la Tabla 12, en donde se muestran las diferentes propiedades analizadas, en comparación con las propiedades del suelo (0%) y los lodos (100%).

*Tabla 12. Resultados caracterización de mezclas*

Mezcla		0%	1%	2%	3%	4%	5%	100%
Propiedad								
Contenido del suelo	Cantidad de Grava (%)	0.21	0.21	0.20	0.20	0.20	0.20	0.00
	Cantidad de Arena (%)	47.27	46.97	46.68	46.38	46.09	45.80	17.88
	Cantidad de Limo (%)	27.62	27.93	28.25	28.56	28.87	29.18	58.79
	Cantidad de Arcilla (%)	24.90	24.89	24.87	24.86	24.84	24.82	23.33
	Cantidad de finos (%)	52.53	52.82	53.12	53.41	53.71	54.01	82.12
	Materia orgánica (%)	6.26	6.30	6.34	6.38	6.41	6.45	10.00
Límites de Atterberg	Límite Líquido (%)	38.50	45.74	45.66	46.68	46.10	46.29	>133.86
	Límite Plástico (%)	22.58	25.52	27.24	27.24	28.35	27.39	>65.56
	Índice de plasticidad (%)	15.92	20.23	18.42	19.44	17.75	18.90	-
Clasificación S.U.C.S.		CL	CL	CL	CL	ML	CL	-
Cohesión	Longitud de rotura (cm)	19.0	15.3	23.3	24.7	22.7	21.8	-
	Humedad (%)	24.2	23.0	25.0	26.4	25.2	27.0	-
pH	en agua destilada	4.90	4.94	5.37	5.88	5.48	5.47	7.03
	en sol cloruro calcio	4.70	4.57	4.84	4.81	4.93	5.04	6.92

Nota: se muestran los resultados obtenidos para cada una de las propiedades analizadas en el laboratorio; los resultados del contenido del suelo para las mezclas se calcularon teóricamente a partir de las cantidades en el suelo y en los lodos.

De estos resultados se puede observar un incremento en la cantidad de finos hasta de un 1.48%, sin embargo, este incremento se ve reflejado en la cantidad de limos, debido a la granulometría de los lodos, disminuyendo la cantidad de gravas, arenas y arcillas; adicional a esto se pudo observar un incremento de materia orgánica hasta de un 0.19% y un aumento de los límites líquido y plástico, así como del índice de plasticidad, cambiando las características del suelo, aumentando su plasticidad y logrando cambiar su clasificación a la de un limo de baja plasticidad en una de sus mezclas, este comportamiento se puede observar en la Figura 19, donde las mezclas se acercan a

la línea A de la carta de plasticidad y a la línea de división entre los de baja y alta plasticidad, sin embargo, este incremento no es notable entre cada una de las concentraciones, presumiendo que se puede lograr un mayor incremento a concentraciones superiores al 10% hasta llegar a una caracterización de un limo de alta plasticidad; esta clasificación y aumento de limos puede afectar su comportamiento mecánico del suelo, ya que un contenido mayor de arcillas está directamente relacionado con la resistencia del suelo y su aptitud para la construcción en tierra.

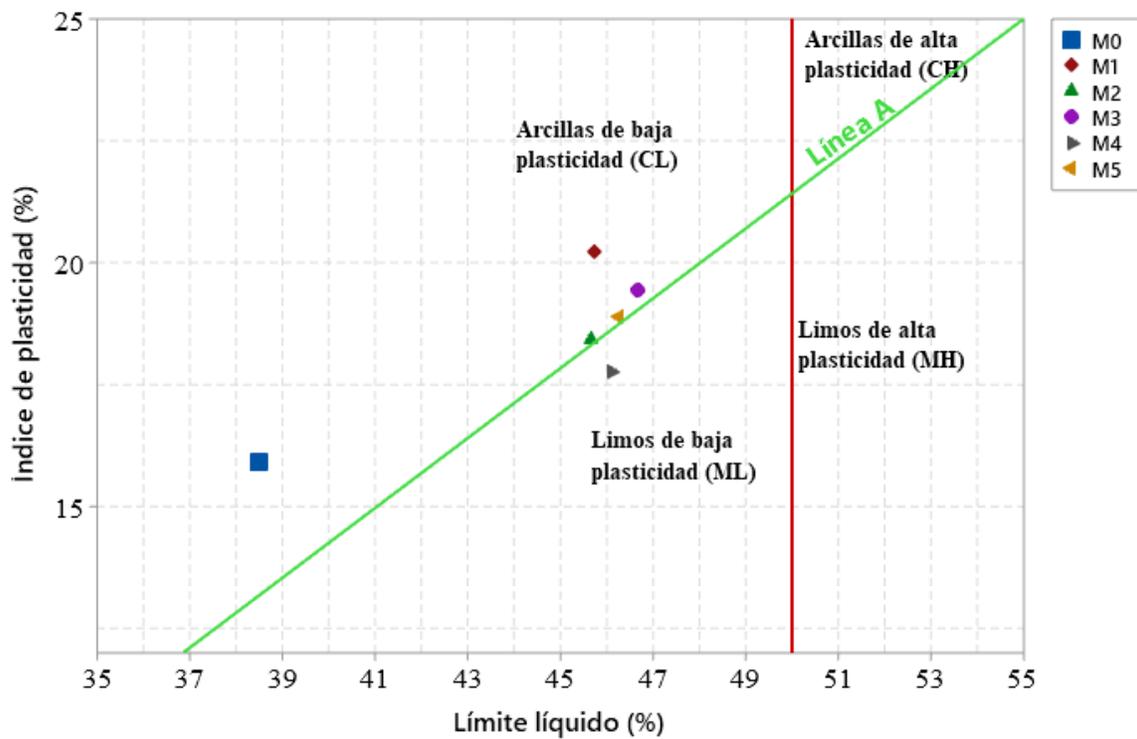


Figura 19. Clasificación S.U.C.S. de las mezclas

También se pudo observar un incremento en la cohesión de las partículas del suelo con la adición de 2% y superior de los lodos, la cual se puede atribuir a la presencia de metales como el hierro y aluminio, ya que los limos tienen poca o nula cohesión, adicionalmente a esto, se puede observar un incremento en la humedad necesaria para realizar el ensayo, lo cual va acorde con el incremento del límite plástico de las mezclas.

Por otro lado, el incremento del pH de hasta 0.57, en la mezcla del 5%, demuestra su capacidad para la estabilización de pH en el suelo, sin embargo, al subir el pH del suelo, se puede ver afectada su resistencia, de tener un comportamiento similar al concreto con respecto a este parámetro.

Adicionalmente a estos resultados se obtuvieron también los del análisis de la variación de la densidad con la adición de los lodos, encontrando que se logra una disminución en el peso unitario hasta de  $16.35 \text{ KN/m}^3$  para la mezcla del 5% (M5), como se observa en la Figura 20, lo cual disminuye la densidad en un 5.19%; esto debido a las propiedades de los lodos, que incorporan el agua en su estructura, aumentando el requerimiento de agua en las mezclas, aun así, para la compactación de las probetas se utilizó la humedad óptima del suelo.

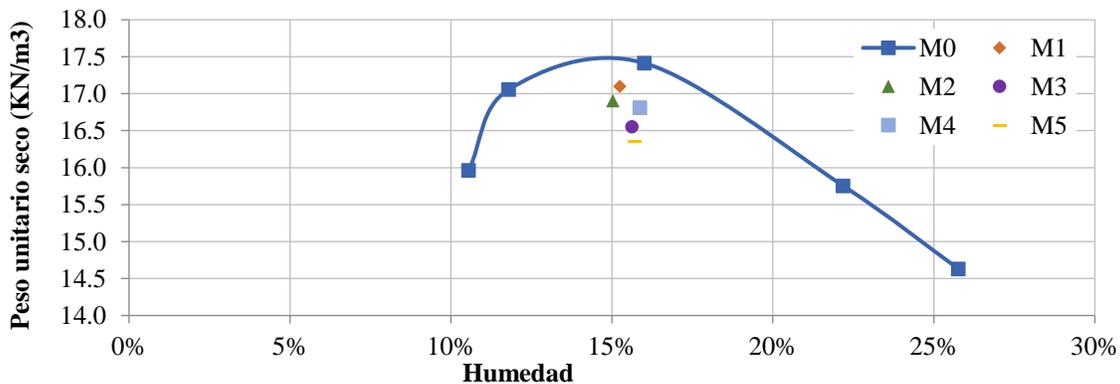


Figura 20. Variación en la compactación de las mezclas

#### 4.2.4. Comportamiento mecánico a la compresión

Los resultados del comportamiento mecánico a la compresión de las probetas de suelo y mezclas suelo-lodo consisten en el análisis de la resistencia de las probetas y su comparación con la resistencia exigida por la norma peruana E080, del análisis de la densidad de las probetas y del análisis de los tipos de falla identificados durante la prueba.

Los resultados del comportamiento mecánico a la compresión se muestran en la Figura 21, donde se grafican los valores obtenidos del esfuerzo último en Mpa para cada una de las mezclas a los 7, 14 y 28 días de curado, junto con el valor exigido en la norma peruana de 1Mpa.

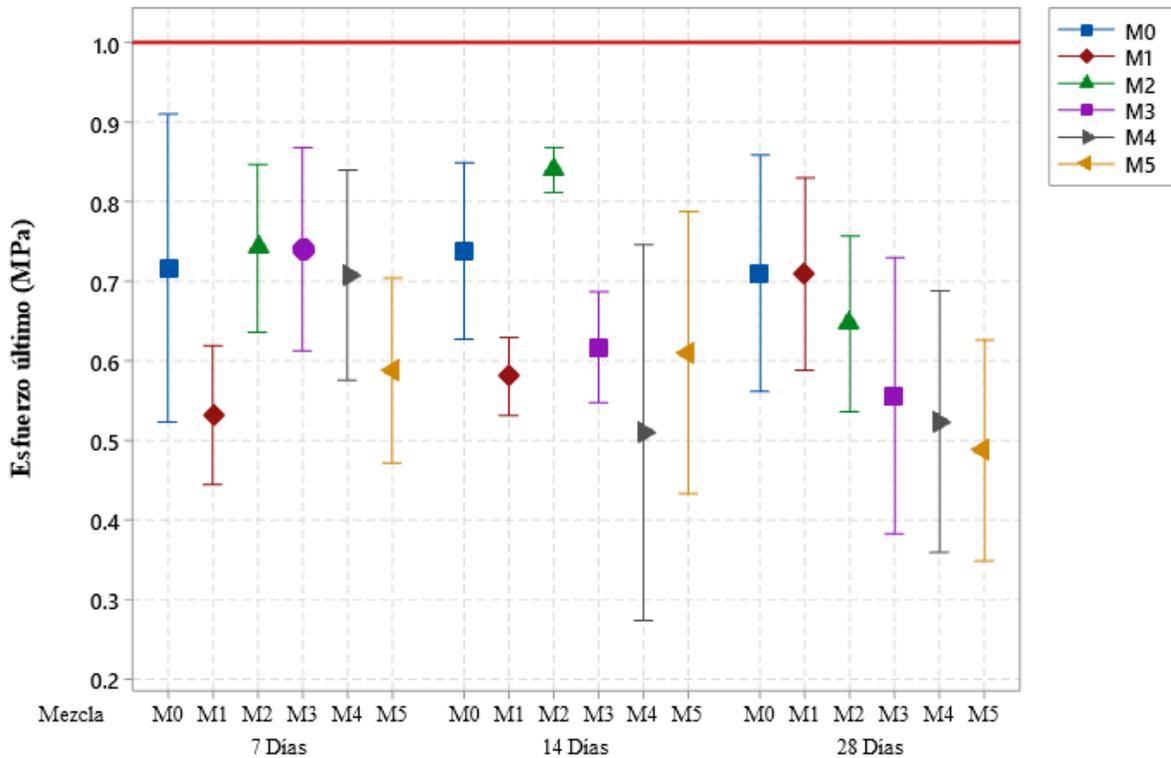


Figura 21. Resultados ensayo de compresión de cubos

De estos valores se puede observar que el suelo utilizado no cumple con los requerimientos de la norma europea, por otro lado, la adición de los lodos en concentraciones del 1% al 5% no mejoran el comportamiento mecánico del suelo a la compresión a los 28 días, por el contrario disminuyen el esfuerzo desde un 18.25 a un 59.72%, sin embargo, en concentraciones del 1 y 2% no disminuyen la resistencia del suelo considerablemente a los 28 días, destacando que para la mezcla del 1% la resistencia a los 7 y 14 días es menor a la del 2% considerablemente y pudiendo observar una pequeña relación con el incremento del pH, sin poder comprobar que es un factor determinante por la metodología aplicada.

De la medición de la densidad de las probetas se obtuvieron los resultados que se muestran en la Figura 22, donde se puede observar una disminución de la densidad húmeda de las probetas al adicionar lodos como aditivo, similar a como ocurrió en al realizar puntos del ensayo de compactación y humedad óptima para las mezclas; similar a la resistencia, la densidad tuvo una disminución menor en el caso de las mezcla del 1y 2%. Esta disminución en la densidad se puede relacionar con la disminución de la resistencia ya que tiene un comportamiento similar a esta.

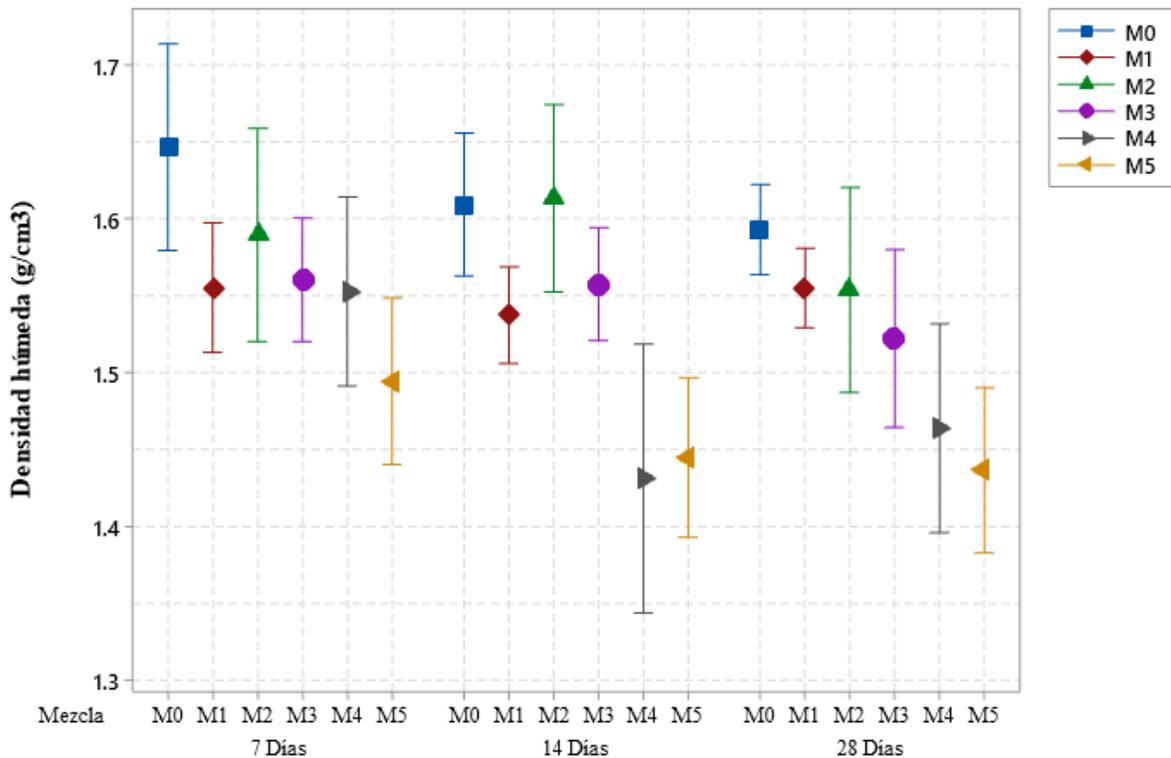


Figura 22. Variación en las densidades de las probetas

Finalmente se realizó un análisis de los tipos de falla en las probetas del ensayo de compresión de cubos, obteniendo los resultados que se muestran en la Tabla 13, pudiendo identificar 2 tipos de falla, una falla longitudinal en uno de los tercios de la probeta y una falla angular, a partir de las cuales se produjo desprendimiento del suelo, sin embargo, no se pudo observar una relación entre la adición de los lodos y el tipo de falla de las probetas.

Tabla 13. Resultados tipos de falla en las probetas

Mezcla	7 días		14 días		28 días	
<i>M0</i>						
<i>M1</i>						
<i>M2</i>						
<i>M3</i>						
<i>M4</i>						
<i>M5</i>						

Nota: Se muestran los tipos de falla encontrados para cada una de las mezclas y en los diferentes días de curado.

#### 4.3. Evaluación técnica del aprovechamiento de los lodos

De esta última fase se obtuvo el diseño y aplicación de la matriz de evaluación técnica del aprovechamiento de lodos en la construcción en tierra, como se muestran en la Tabla 14, la cual se realizó teniendo en cuenta criterios enfocados en la construcción sostenible y en el uso de aditivos poco convencionales, en este caso los lodos de la planta de tratamiento de agua de

Bosconia, en tres técnicas de construcción en tierra: Tapia pisada, Bahareque y Bloques de tierra comprimida (BTC).

El primer criterio fue el de la obtención de la materia prima, debido a que la fuente del aditivo para que la técnica de construcción en tierra continúe siendo sostenible, debe ser una que no produzca impactos ambientales adicionales y/o que utilice residuos de algún proceso para este fin, previniendo impactos ambientales, tal como se mencionó anteriormente. Teniendo en cuenta lo anterior se evaluaría este criterio teniendo mediante los siguientes aspectos:

- El origen de la materia prima se evaluó teniendo en cuenta si es obtenida a partir de la explotación de otras materias primas, como es el caso de los aditivos comerciales, si es obtenido a partir de un residuo de un proceso temporal, por ejemplo de residuos de demolición o actividades industriales que producen residuos de manera intermitente, y si es obtenido a partir de un residuo de un proceso continuo, como es el caso de los lodos producto de la potabilización del agua o residuos de actividades industriales que se realizan durante todo el año.
- El tipo de generación de la materia prima se evaluó teniendo en cuenta si es generada en cantidades altas o bajas y si lo es de manera constante, por temporadas o de manera ocasional, en el caso de los lodos de potabilización, se generan de manera continua en cantidades altas.
- La composición química de la materia prima se evaluó teniendo en cuenta la presencia de compuestos peligrosos, siendo ideales los residuos que contienen compuestos con algún grado de peligrosidad, ya que estos no serán liberados al ambiente, pudiendo categorizarlos de acuerdo con la presencia o sospecha de presencia de estos compuestos, en caso de ser variables; en el caso de los lodos de potabilización se ha comprobado que

tienen metales en cantidades altas, Hierro y Aluminio principalmente, y otros en cantidades tolerables pero altas como el Mercurio y el Cadmio.

- Finalmente, los impactos ambientales asociados a estos fueron evaluados teniendo en cuenta si el uso de esta materia prima previene impactos ambientales, si no generan impactos ambientales o si generan impactos ambientales de importancia baja o alta; en el caso de los lodos de potabilización de agua, estos previenen impactos asociados a la disposición actual que se les da en la fuente de abastecimiento aguas abajo de la bocatoma.

El segundo criterio fue el tratamiento de la materia prima para utilizarla como aditivo, ya que este tratamiento irá ligado a impactos ambientales adicionales y a la facilidad de la obtención del aditivo; teniendo en cuenta:

- El tipo de tratamiento, definiendo este tratamiento como la remoción de compuestos que puedan afectar su uso como aditivo, siendo ideales los aditivos que no requieran tratamiento previo para ser utilizado y tales que de requerirlo que no tenga una demanda energética alta y que no requiera de equipos especializados ni de personal altamente calificado; en el caso de los lodos de potabilización el tipo de tratamiento consiste en la remoción de agua, el cual puede realizarse de manera natural mediante procesos de espesamiento y secado con poca demanda energética, ya que se ha demostrado que la deshidratabilidad de estos lodos no requiere de procesos especializados.
- La generación de residuos, teniendo en cuenta la cantidad de residuos que genera y su peligrosidad, ya que estos residuos requieren de un análisis para su disposición final o su aprovechamiento en otros procesos, en el caso de los lodos de potabilización el principal residuo es el sobrenadante del espesamiento, el cual se produce en gran cantidad y su

peligrosidad, aunque no se analizó, es inferior a los sólidos obtenidos del tratamiento, con un contenido orgánico mayor.

- Y el proceso de adecuación por el que deba pasar, definiéndolo como un proceso adicional al tratamiento que permita su uso como aditivo en la construcción en tierra, por ejemplo. su pulverización o la separación de una fracción gruesa; en el caso de los lodos este proceso consiste en la pulverización de los sólidos obtenidos del secado.

El tercer criterio fue la composición del aditivo, en la cual se evaluó la cantidad de algunos compuestos de interés para la construcción en tierra, contemplando las diferencias entre las técnicas de construcción en tierra; teniendo en cuenta:

- La presencia de compuestos nocivos para la salud se evaluó debido a que altas concentraciones de este tipo de compuestos interfieren con su uso en la construcción, teniendo en cuenta normativas vigentes para el uso de estos sólidos u otras normativas que se puedan extrapolar, como lo es la normativa colombiana de Biosólidos. Para esto se tuvieron en cuenta las diferencias entre las técnicas de construcción, asignando un porcentaje menor a la técnica de Bloques de tierra comprimida debido a que esta técnica utiliza medios mecánicos para la compactación del material, haciendo mucho más viable el encapsulamiento de estos compuestos, de modo que representarían un menor riesgo, sin embargo, se debería realizar un estudio detallado para verificar esta propiedad.
- El contenido de arcillas se evaluó debido a que estas tienen un papel indispensable en la construcción en tierra, por tanto, aditivos que aumenten su contenido de arcillas serán mejores para las diferentes técnicas.
- El contenido de materia orgánica se evaluó debido a que la materia orgánica tiene un efecto negativo en el comportamiento del suelo para la construcción en tierra en

concentraciones mayores al 2%, siendo aceptable hasta concentraciones del 10% debido a que los aditivos se aplican a concentraciones bajas. Para esto se tuvo en cuenta que, en el bahareque, la calidad del material puede ser menor al de la tapia, debido a que el material adicional utilizado como esqueleto puede compensar esta deficiencia, por tanto, se consideró un porcentaje inferior para esta técnica.

- Finalmente, el contenido de metales se consideró como un factor importante para mejorar las propiedades de los suelos utilizados para la construcción en tierra, teniendo en cuenta que de acuerdo con la literatura compuestos de hierro han demostrado su efectividad en la construcción en tierra, mejor al comportamiento de compuestos de aluminio y de otros metales.

Finalmente, el último criterio que se tuvo en cuenta fue el del cambio de las propiedades en el suelo, teniendo en cuenta:

- El aumento de la cohesión del suelo, de acuerdo con el ensayo de cohesión modificado, teniendo en cuenta que esta propiedad del suelo ayudará en la estabilidad del muro o de los bloques construidos, por tanto, será más beneficioso un aditivo que proporcione cohesión al suelo y más relevante para la construcción de bloques de tierra y para el Bahareque, en el caso de los lodos, estos lo logran a concentraciones mayores al 1%.
- El cambio de pH fue evaluado teniendo en cuenta si varía el pH del suelo hacia uno neutro, lo cual no sería beneficioso de acuerdo con estudios realizados en mezclas de concreto y aunque no se comprobó de manera detallada en el presente proyecto, se pudo ver una relación entre esta propiedad y la resistencia a la compresión.
- La disminución de la densidad del suelo fue evaluada debido a que esta se relaciona directamente con la resistencia del material, siendo un buen aditivo, aquel que no

disminuya la densidad considerablemente; también se tuvo en cuenta que esta disminución se ve relacionada con la demanda de agua para una compactación óptima, que en el caso de los lodos la incrementa levemente.

- El aumento de la resistencia a la compresión se evaluó debido a que en la construcción en tierra es de gran relevancia ya que es una de las propiedades que limita el uso de la tierra como material de construcción y que hace atractivo el uso del concreto o la mampostería en su lugar. Para esto se tuvo en cuenta el efecto que tiene el aditivo en la resistencia del material, siendo mejor un aditivo aquel que aumente o mantenga constante la resistencia a uno que la disminuya y siendo más relevante para los BTC debido a que estos son una técnica contemporánea de la cual se esperan mejores resultados en la construcción.

La aplicación de esta matriz se realizó asignando una puntuación de 1 a 5 a cada uno de los aspectos, teniendo en cuenta los rangos establecidos para cada uno de estos, se multiplicó por el porcentaje asignado y se dividió en 5, para obtener una calificación parcial para cada aspecto. Finalmente se sumaron las calificaciones parciales, obteniendo un porcentaje de viabilidad.

*Tabla 14. Matriz de evaluación para el aprovechamiento de lodos*

Criterio evaluado	Rangos asignados / Puntuación otorgada	Tapia		Bahareque		BTC		
		%	Calif.	%	Calif.	%	Calif.	
Obtención de la materia prima	<b>Origen de la materia prima</b> Residuo de un proceso continuo (4-5) Residuo de un proceso temporal (2-3) A partir de la explotación de otras materias primas (0)	4	3%	2%	3%	2%	3%	2%
	<b>Tipo de generación</b> Constante en cantidades altas (5) Constante en cantidades bajas (4) Por temporadas en cantidades altas (3) Por temporadas en cantidades bajas (2) Ocasional (1)	5	5%	5%	5%	5%	5%	5%
	<b>Composición química</b> Contiene compuestos peligrosos (5) Puede contener compuestos peligrosos (3-4) Contiene compuestos inertes (1-2)	4	3%	2%	3%	2%	3%	2%
	<b>Impactos ambientales</b> Previenen impactos ambientales (5) No genera impactos ambientales (4) Genera impactos ambientales (1-3)	5	10%	10%	10%	10%	10%	10%

Criterio evaluado	Rangos asignados / Puntuación otorgada	Tapia		Bahareque		BTC		
		%	Calif.	%	Calif.	%	Calif.	
Tratamiento	<b>Tipo de tratamiento</b> No requiere (5) Simple con poca demanda energética (4) Complejo con poca demanda energética (3) Simple con alta demanda energética (2) Complejo con alta demanda energética (1)	4	10%	8%	10%	8%	10%	8%
	<b>Generación de residuos</b> No genera residuos (5) Genera residuos no peligrosos en cantidades bajas (4) Genera residuos no peligrosos en cantidades altas (3) Genera residuos peligrosos en cantidades bajas (2) Genera residuos peligrosos en cantidades altas (1)	3	5%	3%	5%	3%	5%	3%
	<b>Adecuación del aditivo</b> No requiere (5) Procesos sencillos y de bajo consumo energético (3-4) Procesos complejos y/o de alto consumo energético (1-2)	4	5%	4%	5%	4%	5%	4%
Composición del aditivo	<b>Presencia de compuestos nocivos para la salud</b> No contiene (5) Contiene en cantidades inferiores a la normativa (3-4) Contiene compuestos nocivos en cantidades superiores a la normativa, removibles (1-2) Contiene superiores a la normativa no removibles (0)	3	10%	6%	10%	6%	4%	2%
	<b>Contenido de arcillas</b> Contenido superior al 60% (5) Contenido entre el 30 y 60% (3-4) Contenido inferior al 30% (1-2)	2	10%	4%	10%	4%	10%	4%
	<b>Contenido de Materia orgánica</b> Contenido inferior al 2% (5) Contenido entre el 2 y el 10% (3-4) Contenido superior al 10% (1-2)	2	5%	2%	3%	1%	5%	2%
	<b>Contenido de metales</b> Mayor contenido de hierro (5) Mayor contenido de aluminio (3-4) Contenido bajo (1-2)	4	3%	2%	3%	2%	3%	2%
Cambio de las propiedades del suelo	<b>Aumento en la cohesión del suelo</b> Aumenta significativamente (5) Aumenta (3-4) No la afecta (1-2) Disminuye (0)	5	6%	6%	8%	8%	8%	8%
	<b>Cambio del pH</b> Varía a uno ácido o alcalino (4-5) No hay variación (3) Varía a uno más neutro (1-2)	2	2%	1%	2%	1%	2%	1%
	<b>Disminución en la densidad</b> No hay disminución (5) Disminuye hasta en un 10% (3-4) Disminuye más de un 10% (1-2)	3	3%	2%	3%	2%	2%	1%
	<b>Aumento en la resistencia a la compresión</b> Aumenta (5) No tiene influencia (4) Disminuye levemente (3) Disminuye considerablemente (1-2)	2	20%	8%	20%	8%	25%	10%
<b>Total</b>			<b>65.80%</b>		<b>67.00%</b>		<b>65.60%</b>	

Nota: Se muestra la matriz de evaluación diseñada, junto con los rangos de puntuación determinados y las puntuaciones asignadas para la evaluación del uso de los lodos de Bosconia como aditivo en la construcción en tierra.

A partir de esta evaluación se pudo observar que los lodos de la potabilización del agua de la planta de Bosconia son una opción atractiva para ser utilizados como aditivo en la construcción en tierra, ya que su origen, producción y facilidad en el tratamiento hacen que contribuyan para la disminución de impactos ambientales y el cierre de ciclos, contribuyendo a la sostenibilidad de la técnica, sin embargo, en la aplicación no se encontraron beneficios en el aumento de la resistencia a la compresión principalmente debido al contenido bajo de arcillas que contiene; adicionalmente se pudo observar que tienen una mayor inclinación hacia el Bahareque, debido a que la demanda de la calidad para el material de esta técnica es menor al de las otras y a que el aumento en la cohesión de las partículas juega un papel importante en el desarrollo de esta técnica.

A partir de estos resultados, no se recomienda el uso de estos lodos como aditivo en la construcción en tierra cuando se utiliza una técnica que depende únicamente del suelo y se tiene un suelo con propiedades deficientes, ya que disminuye su resistencia a la compresión impidiendo el uso de este suelo, sin embargo, pueden ser utilizados en conjunto con una estabilización granulométrica del suelo que incremente la cantidad de arcillas, logrando una mejora de las propiedades del suelo sin comprometer la resistencia del mismo.

## 5. Conclusiones

Los lodos de la planta de tratamiento de agua potable de Bosconia varían en cantidad y composición dependiendo de las características del agua cruda y del proceso del cual se obtienen, siendo mayores en caudal, frecuencia y sólidos sedimentables y totales, los de purga de sedimentadores, por tanto, serán más representativos para su tratamiento y aprovechamiento.

Los lodos de la planta de tratamiento de agua potable de Bosconia son principalmente inorgánicos, con contenidos promedio de materia orgánica de 35.17 y 9.87% para los de filtros y sedimentadores, respectivamente, presente principalmente en la fracción disuelta y/o no sedimentable.

Los lodos de la planta de tratamiento de agua potable de Bosconia tienen potencial para ser tratados mediante un espesamiento por gravedad, logrando disminuciones de volumen de hasta 83.9 y 97.2% y un incremento de sólidos de hasta 20 y 43 veces para los lodos provenientes del lavado de filtros y de la purga de sedimentadores; y un secado por medio de lechos de arena, este último debido a la cantidad de agua libre contenida que se pudo observar en las curvas de deshidratación.

Los sólidos obtenidos del tratamiento de los lodos de la planta de tratamiento de agua potable de Bosconia tienen metales que pueden dificultar su disposición final, como lo son el mercurio, cadmio y cobre, sin embargo, estos se encuentran en concentraciones aceptables por la norma colombiana para Biosólidos de tipo B, pudiendo ser utilizados para la construcción.

Los sólidos obtenidos del tratamiento de los lodos de la planta de tratamiento de agua potable de Bosconia tienen una gran influencia en la plasticidad y cohesión del suelo en concentraciones iguales o inferiores al 5%, ya que incrementan los límites líquido y plástico, así como su índice

de plasticidad, y la cohesión del suelo, sin embargo, al disminuir la resistencia a la compresión en concentraciones superiores al 2%, debido a la cantidad de limos que aportan, limitan su uso como aditivo a suelos con altos contenidos de arcillas y una alta resistencia a la compresión, de modo que su resistencia no se vea comprometida.

Los sólidos obtenidos del tratamiento de los lodos de la planta de tratamiento de agua potable de Bosconia poseen propiedades beneficiosas para el aprovechamiento en el suelo, principalmente la estabilización del pH, retención de agua y aumento en la cohesión de las partículas y contenido de finos.

Finalmente, la evaluación técnica del tratamiento y aprovechamiento de los lodos provenientes de la planta de tratamiento de agua potable de Bosconia, arrojó como resultado que el tratamiento de los lodos para su aprovechamiento trae ventajas debido a que este se puede realizar mediante métodos naturales y sin demanda energética, generando residuos de menor peligrosidad que los lodos crudos, sin embargo, no es viable su uso en la construcción en tierra en técnicas que dependan únicamente de la resistencia del material granular; habiendo dicho esto, podrían ser utilizados como aditivo en técnicas como el bahareque.

## 6. Recomendaciones

Buscar alternativas para determinar las propiedades de los lodos que no pudieron ser cuantificadas en el laboratorio debido a las propiedades de los lodos de potabilización, como lo fueron los límites de plasticidad y cohesión.

Realizar otros proyectos para evaluar el uso de los lodos de la planta de tratamiento de agua potable de Bosconia en la construcción en tierra en conjunto con otras técnicas de mejoramiento de suelos, así como su efecto en diferentes tipos de suelo.

Evaluar el aprovechamiento de los lodos de la planta de tratamiento de agua potable de Bosconia en diferentes áreas, como lo son la recuperación de suelos, estabilización de taludes, revegetalización, valoración energética, entre otros.

## 7. Bibliografía

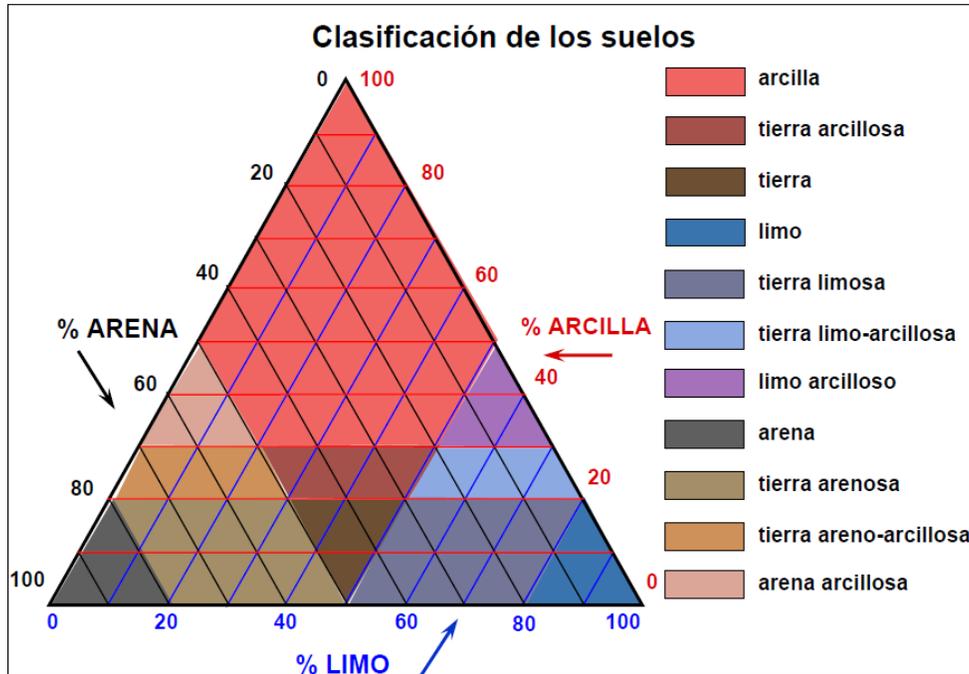
- Acueducto Metropolitano de Bucaramanga. (s.f.). *Acueducto Metropolitano de Bucaramanga*. Recuperado el 20 de 06 de 2019, de <http://www.amb.com.co>
- Bedoya Montoya, C. M. (2011). *Construcción Sostenible, para volver al camino*. Biblioteca jurídica Dike.
- CCCS. (Marzo de 2017). *Informe de impacto 2016*. Recuperado el 19 de Noviembre de 2019, de <https://www.cccs.org.co/wp/download/informe-de-impacto-2016/?wpdmdl=11009>
- CCCS. (5 de Enero de 2017). *Misión de Crecimiento Verde y la construcción sostenible*. Recuperado el 02 de Noviembre de 2019, de <https://www.cccs.org.co/wp/2017/02/05/mision-de-crecimiento-verde-y-el-rol-de-la-construccion-sostenible/>
- CCCS. (s.f.). *Acerca del CCCS*. Recuperado el 19 de Noviembre de 2019, de <https://www.cccs.org.co/wp/acerca-del-cccs/>
- Congreso de la República de Colombia. (9 Junio 2015). Ley 1753. Bogotá.
- Departamento Nacional de Planeación DNP. (s.f.). *Plan Nacional de desarrollo 2018-2022*. Recuperado el 12 de Noviembre de 2019, de <https://www.dnp.gov.co/DNPN/Paginas/Plan-Nacional-de-Desarrollo.aspx>
- Di Bernardo, L., & Dantas, A. (2005). *Métodos y técnicas del tratamiento de agua*. Sao Carlos: Rima.
- Dube, S., Muchaonyerwaa, P., Mapandac, F., & Hughes, J. (2018). Effects of sludge water from a water treatment works on soil properties and the yield and elemental uptake of *Brachiaria decumbens* and lucerne (*Medicago sativa*). *ScienceDirect*.
- EPA . (2008). *Green building strategy*. Recuperado el 05 de 09 de 2019, de [https://archive.epa.gov/greenbuilding/web/pdf/greenbuilding\\_strategy\\_nov08.pdf](https://archive.epa.gov/greenbuilding/web/pdf/greenbuilding_strategy_nov08.pdf)
- EPA. (1996). *Technology transfer handbook: Management of water treatment plant residuals*.
- Gatti, F. (2012). *Arquitectura y construcción en tierra: Estudio comparativo de las técnicas contemporáneas en tierra*. Barcelona: Universidad Politénica de Catalunya.
- Gomesa, S. D., Zhou, J. L., Li, W., & Long, G. (2019). Progress in manufacture and properties of construction materials incorporating water treatment sludge: A review. *Resources, Conservation & Recycling*, 145, 148-159.
- Ippolito, J., Barbarick, K., & Elliot, H. (2011). Drinking Water Treatment Residuals: A Review of Recent Uses. *J. Environmental*.
- Lallanilla, M. (05 de Febrero de 2018). *The History of the Green Movement*. Recuperado el 02 de Noviembre de 2019, de <https://www.thoughtco.com/what-is-the-green-movement-1708810>

- Marichelvam, M., & Azhagurajan, A. (2018). Remoción de mercurio de efluentes utilizando ceniza de cáscaras de banana y hojas de neem. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*.
- Martinez Cordero, M. Á., Jiménez, B. E., & Vaca Mier, M. (s.f.). *Recuperación de sulfato de aluminio de lodos provenientes de un tratamiento primario avanzado*. México: UNAM, UAM.
- Martins Neves, C. M., Borges Faria, O., Rotondaro, R., Cevallos Salas, P., & Hoffmann, M. V. (Octubre de 2009). *Selección de suelos y métodos de control en la construcción con tierra, Prácticas de campo*. Obtenido de redproterra: <http://www.redproterra.org>
- Ministerio de ambiente . (2015). *Guía de construcción sostenible para el ahorro de agua y energía en edificaciones* . Bogotá .
- Ministerio de vivienda, c. y. (2014). Decreto 1287.
- Ministerio de vivienda, ciudad y territorio, Colombia. (2014). Decreto 1287. Ministerio de vivienda, ciudad y territorio, Colombia.
- Minke, G. (2001). *Manual de construcción en tierra: la tierra como material de construcción y su aplicación en la arquitectura actual*. Fin de siglo.
- ONU. (s.f.). *Sustainable development goals*. Recuperado el 03 de Noviembre de 2019, de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/>
- Pérez Zúñiga, M. E. (2016). *Tratamiento de lodos residuales procedentes de PTAR mediante procesos electroquímicos para la disminución de metales pesados*. Cuenca, Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana.
- Raffino, M. E. (s.f.). *Movimiento ecologista* . Recuperado el 02 de Noviembre de 2019, de <https://concepto.de/movimiento-ecologista/>
- Ramírez Quirós, F. (Junio de 2008). *Lodos producidos en el tratamiento de agua potable*. Recuperado el 07 de Noviembre de 2019, de [http://www.sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/2015-03-20\\_10-41-40117483.pdf](http://www.sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/2015-03-20_10-41-40117483.pdf)
- Romero Rojas, J. A. (1999). *Calidad del agua*. Escuela colombiana de ingeniería.
- Romero Rojas, J. A. (1999). *Potabilizacion Del Agua*. Escuela Colombiana de ingeniería.
- SENA. (s.f.). *Guía para la Construcción de muros en tapia y bahareque*. Obtenido de Sena.edu.co.
- Sobhnamayan , F., Sahebi, S., & Alborz, A. (Diciembre de 2014). Effect of Different pH Values on the Compressive Strength of Calcium-Enriched Mixture Cement. *IEJ*.
- UNDP. (s.f.). *Sustainable development goals*. Recuperado el 02 de Noviembre de 2019, de <https://www.undp.org/content/undp/en/home/sustainable-development-goals/background/>
- Valencia, J. A. (2000). *Teoría y práctica de la purificación del agua*. Bogotá : Mc Graw Hill.

## Anexos

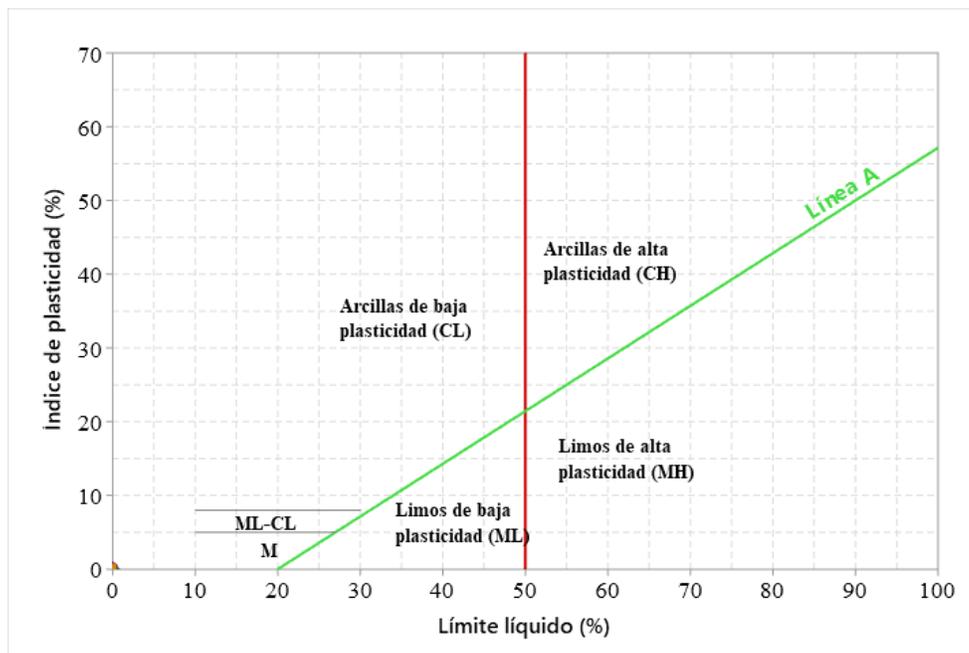
### Anexo 1. Triángulo de clasificación de suelos

Fuente: Tomado de Selección de suelos y métodos de control en la construcción con tierra



### Anexo 2. Carta de plasticidad del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos

Fuente: S.U.C.S.

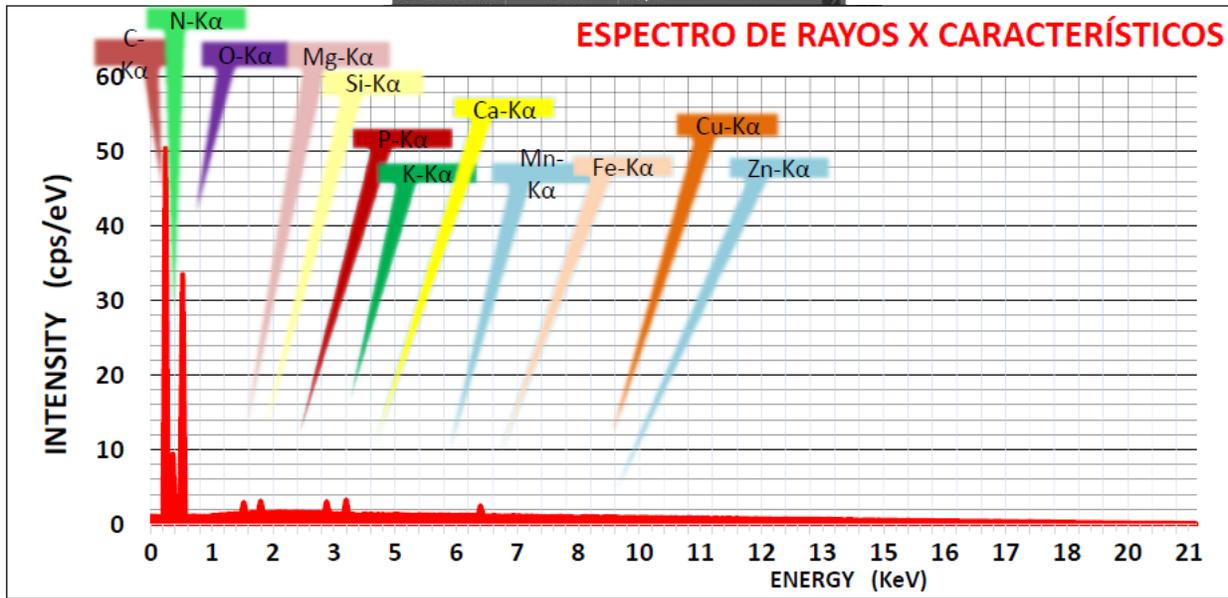
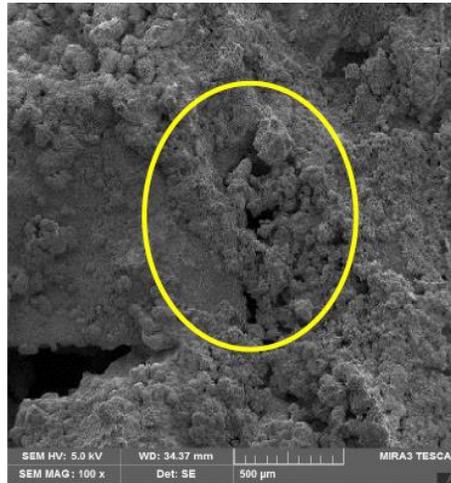


Anexo 3. Parámetros de la norma de Biosólidos

Fuente: Tomado de Decreto 1287 de 2014, Ministerio de vivienda, ciudad y territorio.

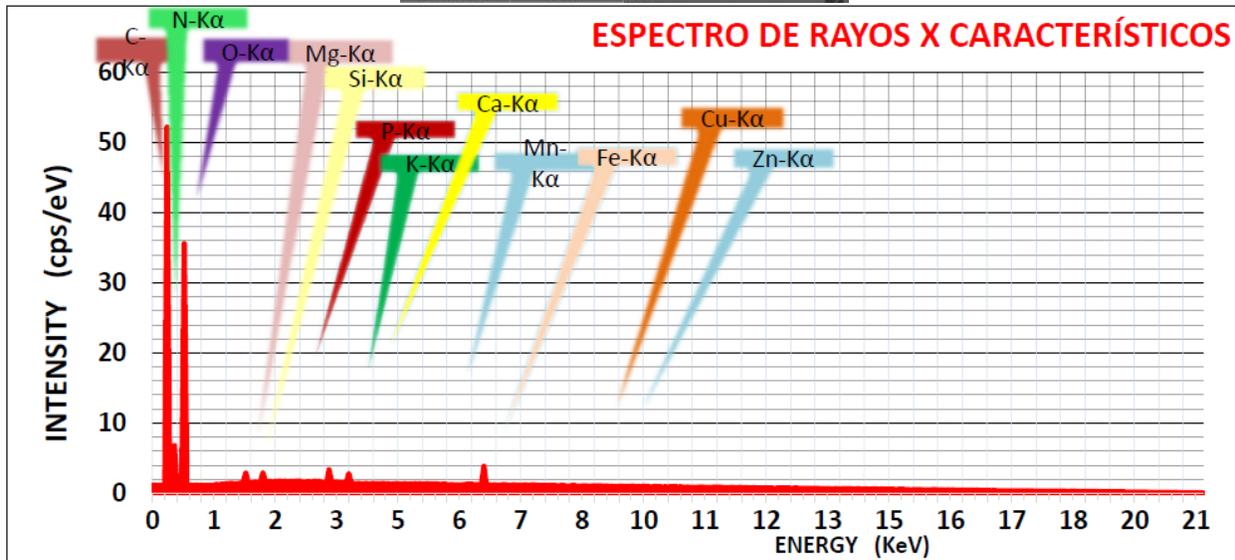
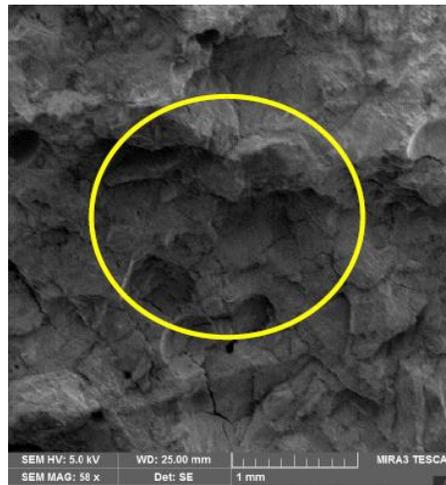
Parámetros		Tipo A	Tipo B
<b>Alternativas de uso de los Biosólidos</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>a) En zonas verdes tales como cementerios, separadores viales, campos de golf y lotes vacíos.</li> <li>b) Como producto para uso en áreas privadas tales como jardines, antejardines, patios, plantas ornamentales y arborización.</li> <li>c) En agricultura.</li> <li>d) Los mismos usos de los lodos tipo B.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) En agricultura, se aplicará al suelo.</li> <li>b) En plantaciones forestales.</li> <li>c) En la recuperación, restauración o mejoramiento de suelos degradados.</li> <li>d) Como insumo en procesos de elaboración de abonos o fertilizantes orgánicos o productos acondicionadores para suelos a través de tratamientos físicos, químicos y biológicos que modifiquen su calidad original. Los procesos de elaboración y características de los productos finales y su uso, queda sujeto a la regulación establecida por el ICA. '</li> <li>e) Para remediación de suelos contaminados, lechos biológicos para el tratamiento de emisiones y vertimientos, soporte físico y sustrato biológico en sistemas de ' filtración. absorción y adsorción.</li> <li>f) Como insumo en la fabricación de materiales de construcción.</li> <li>g) En la estabilización de taludes de proyectos de la red vial nacional, red vial secundaria o terciaria.</li> <li>h) En la operación de rellenos sanitarios tomo: cobertura diaria, cobertura final de cierre y de clausura de plataformas y en actividades de revegetalización y paisajismo.</li> <li>i) Actividades de revegetalización y paisajismo de escombreras.</li> <li>j) En procesos de valorización energética.</li> </ul>
<b>Valores máximos Composición química Metales (mg/Kg base seca)</b>	<b>Arsénico</b>	20	40
	<b>Cadmio</b>	8	40
	<b>Cromo</b>	1000	1750
	<b>Cobre</b>	1000	1500
	<b>Plomo</b>	300	400
	<b>Mercurio</b>	10	20
	<b>Molibdeno</b>	18	75
	<b>Níquel</b>	80	420
	<b>Selenio</b>	36	100
	<b>Zinc</b>	2000	2800

Anexo 4. Resultados EDS punto 1



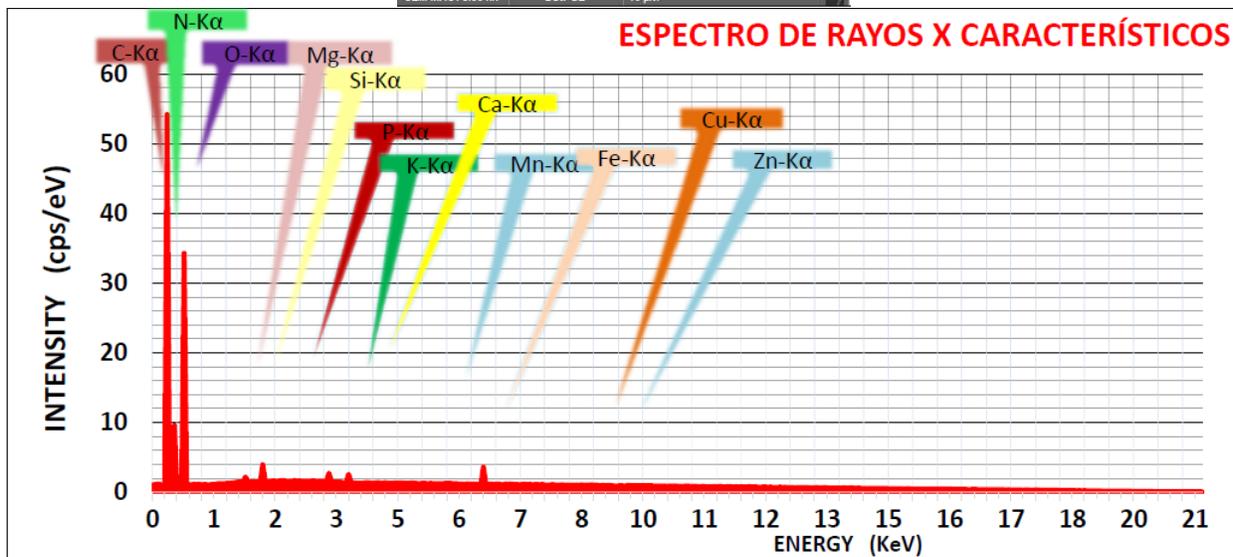
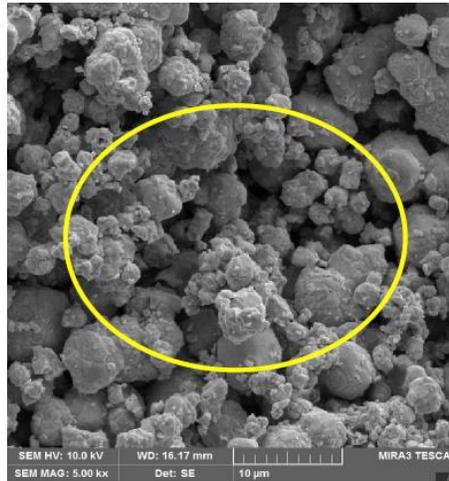
Element	At. No.	Line S.	Netto	Mass [%]	Mass Norm. [%]	Atom [%]	Abs. Error [%] 1 sigma	Abs. Error [%] 2 sigma	Abs. Error [%] 3 sigma
Carbono	6	K-serie	31191,3	29,3494	36,69	46,43	6,18	12,36	18,54
Oxígeno	8	K-serie	18400	12,7148	16,09	19,63	1,28	2,55	3,83
Nitrógeno	7	K-serie	24260,2	0,37864	0,53	0,65	2,49	4,99	7,48
Fósforo	15	K-serie	4552,24	4,60869	5,55	3,33	0,18	0,35	0,53
Calcio	20	K-serie	2397,72	2,4444	3,22	1,96	0,28	0,55	0,83
Silicio	14	K-serie	5758,62	5,0274	5,99	5,04	0,46	0,92	1,38
Hierro	26	K-serie	1481,02	3,24336	3,96	2,68	0,2	0,39	0,59
Potasio	19	K-serie	3087,84	6,132	7,30	4,51	0,39	0,79	1,18
Zinc	30	K-serie	1116	3,69896	4,51	3,58	0,22	0,45	0,67
Cobre	29	K-serie	1126,87	3,55271	4,67	3,67	0,31	0,63	0,94
Manganeso	25	K-serie	1638,12	3,37725	3,93	2,86	0,24	0,49	0,73
Magnesio	12	K-serie	8133,97	6,51184	7,57	5,67	0,35	0,7	1,05
				<b>81,04</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>			

Anexo 5. Resultados EDS punto 2



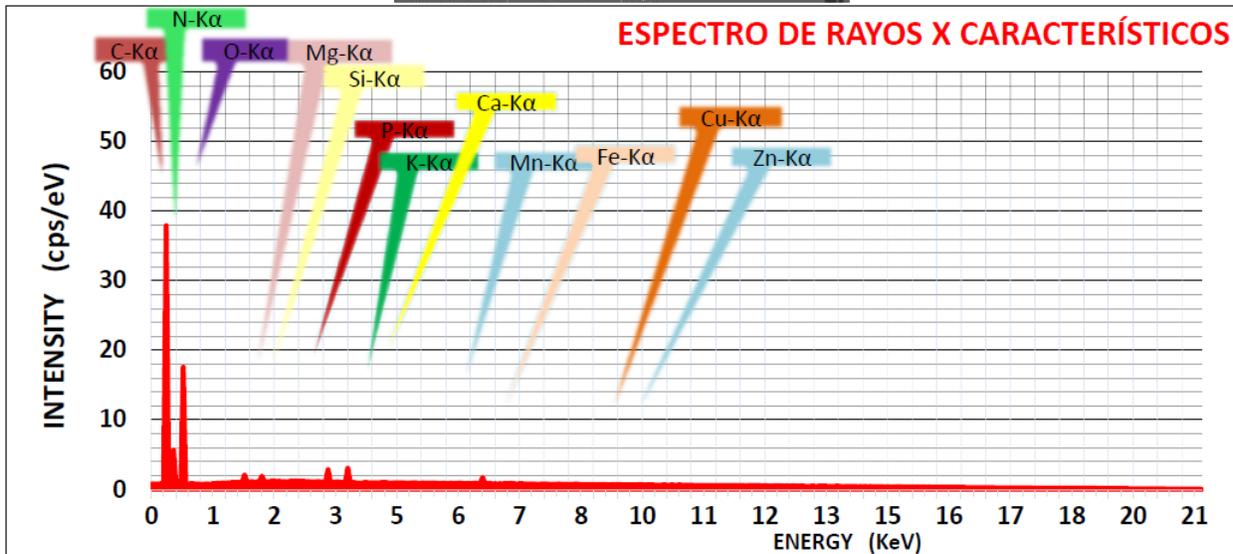
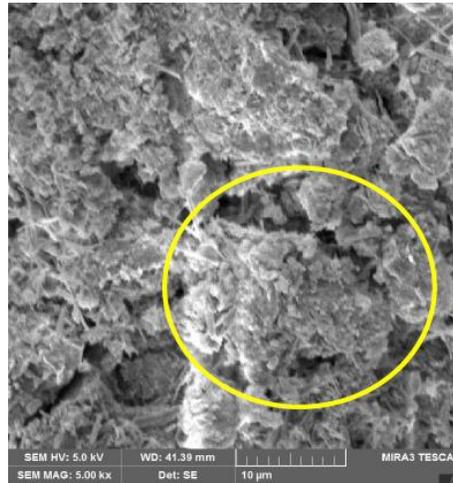
Element	At. No.	Line S.	Netto	Mass [%]	Mass Norm. [%]	Atom [%]	Abs. Error [%] 1 sigma	Abs. Error [%] 2 sigma	Abs. Error [%] 3 sigma
Carbono	6	K-serie	33249,1	33,9095	42,92	52,91	6,18	12,36	18,54
Oxígeno	8	K-serie	16857,1	13,5437	15,93	19,44	1,28	2,55	3,83
Nitrógeno	7	K-serie	23724,5	0,33526	0,39	0,18	2,49	4,99	7,48
Fósforo	15	K-serie	4880,6	2,72079	3,89	2,33	0,18	0,35	0,53
Calcio	20	K-serie	2503,39	2,68305	3,12	2,40	0,28	0,55	0,83
Silicio	14	K-serie	5672,41	3,78192	5,33	3,41	0,46	0,92	1,38
Hierro	26	K-serie	1532,57	2,99022	4,15	2,55	0,2	0,39	0,59
Potasio	19	K-serie	2607,91	5,472	6,08	5,21	0,39	0,79	1,18
Zinc	30	K-serie	994,321	3,53657	4,42	2,78	0,22	0,45	0,67
Cobre	29	K-serie	1104,48	2,4219	2,99	1,57	0,31	0,63	0,94
Manganeso	25	K-serie	1653,38	2,39157	2,75	1,77	0,24	0,49	0,73
Magnesio	12	K-serie	6889,95	6,82228	8,03	5,46	0,35	0,7	1,05
				<b>80,61</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>			

Anexo 6. Resultados EDS punto 3



Element	At. No.	Line S.	Netto	Mass [%]	Mass Norm. [%]	Atom [%]	Abs. Error [%] 1 sigma	Abs. Error [%] 2 sigma	Abs. Error [%] 3 sigma
Carbono	6	K-serie	36714,8	27,1788	31,24	46,25	6,18	12,36	18,54
Oxígeno	8	K-serie	19485,7	13,6728	16,88	20,35	1,28	2,55	3,83
Nitrógeno	7	K-serie	25714,3	0,33254	0,47	-0,26	2,49	4,99	7,48
Fósforo	15	K-serie	4791,04	3,64383	4,29	2,72	0,18	0,35	0,53
Calcio	20	K-serie	2422,11	3,45371	3,84	1,77	0,28	0,55	0,83
Silicio	14	K-serie	5775,86	3,25814	4,40	3,04	0,46	0,92	1,38
Hierro	26	K-serie	1560,69	8,2863	10,23	6,75	0,2	0,39	0,59
Potasio	19	K-serie	2734,68	4,69538	5,59	4,06	0,39	0,79	1,18
Zinc	30	K-serie	1056,9	5,33368	6,06	3,99	0,22	0,45	0,67
Cobre	29	K-serie	1216,42	2,3465	3,26	1,23	0,31	0,63	0,94
Manganeso	25	K-serie	1439,72	1,9188	2,70	0,97	0,24	0,49	0,73
Magnesio	12	K-serie	7918,66	9,60591	11,04	9,13	0,35	0,7	1,05
				<b>83,73</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>			

Anexo 7. Resultados EDS punto 4



Element	At. No.	Line S.	Netto	Mass [%]	Mass Norm. [%]	Atom [%]	Abs. Error [%] 1 sigma	Abs. Error [%] 2 sigma	Abs. Error [%] 3 sigma
Carbono	6	K-serie	34657	28,897	39,05	61,13	6,18	12,36	18,54
Oxígeno	8	K-serie	17657,1	9,61147	12,32	16,74	1,28	2,55	3,83
Nitrógeno	7	K-serie	22576,5	1,2852	1,53	0,55	2,49	4,99	7,48
Fósforo	15	K-serie	4194,03	3,77929	4,97	2,23	0,18	0,35	0,53
Calcio	20	K-serie	2714,71	3,1311	4,41	2,22	0,28	0,55	0,83
Silicio	14	K-serie	5034,48	3,71957	4,23	1,21	0,46	0,92	1,38
Hierro	26	K-serie	1551,32	5,82905	7,57	3,02	0,2	0,39	0,59
Potasio	19	K-serie	2870,51	3,70935	4,70	2,53	0,39	0,79	1,18
Zinc	30	K-serie	1091,67	3,83055	4,85	1,99	0,22	0,45	0,67
Cobre	29	K-serie	1227,61	3,31247	3,94	1,09	0,31	0,63	0,94
Manganeso	25	K-serie	1617,77	2,90523	3,38	0,69	0,24	0,49	0,73
Magnesio	12	K-serie	7177,03	6,97146	9,05	6,59	0,35	0,7	1,05
				<b>76,98</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>			