



**Alternativas de gestión de lodos residuales. Caso de estudio: Laguna de estabilización de
Ábrego, Norte de Santander**

Geraldine Cárdenas Torrado

Trabajo de investigación para optar al título de Magíster en Gestión Ambiental

Tutor

Francisco José Molina Pérez Doctor (PhD) en Ingeniería Química y Ambiental

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería

Maestría en Gestión Ambiental

Medellín, Antioquia, Colombia

2022

Cita	(Cárdenas Torrado, 2022)
Referencia	Cárdenas Torrado, G (2022). Alternativas de gestión de lodos residuales. Caso de estudio: Laguna de estabilización de Ábrego, Norte de Santander [Tesis de maestría]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



Maestría en Gestión Ambiental

Grupo de Investigación Gestión y Modelación Ambiental (GAIA).

Sede de Investigación Universitaria (SIU).



Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

Le dedico mis logros a:

A Dios por permitirme culminar mi posgrado, por guiarme en cada uno de mis pasos y por brindarme la sabiduría necesaria en los momentos requeridos.

A mi mamá Eloina Torrado Torrado por ser tan paciente, por su colaboración sin importar las condiciones y por su amor incondicional

A mi papá Otoniel Cárdenas Bayona, por ser tan sabio, por sus consejos, por su apoyo incondicional en cada uno de mis pasos y por su amor

A mi hermana Lenith Cárdenas Torrado por sus consejos y su sabiduría durante todo mi estudio

A mi esposo Daniel Alejandro Martínez Trujillo por su sabiduría, su amor y por su capacidad para escucharme y apoyarme durante mi estudio

A todas aquellas personas que de una u otra forma colaboraron para la realización del mismo

Agradecimientos

A la Universidad de Antioquia por brindarle el apoyo para la realización de la investigación y permitirme adelantar mi posgrado de manera satisfactoria, al profesor Francisco José Molina Pérez por brindarme acompañamiento y conocimiento en la realización del presente trabajo

Tabla de contenido

RESUMEN	8
ABSTRACT	8
INTRODUCCIÓN.....	9
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	10
2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE:	12
2.1 Gestión de lodos de lagunas de estabilización.....	12
2.2 Definición de las lagunas de estabilización	12
2.3 Tipos de lagunas de estabilización	13
2.4 Laguna de estabilización de Ábrego, Norte de Santander	13
2.5 Alternativas de extracción de lodos.....	15
2.6 Alternativas de tratamiento para lodos residuales	15
2.7 Aprovechamiento de biosólidos residuales	17
2.8 Selección de alternativas de tratamiento y aprovechamiento de los lodos.....	19
3. OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	20
3.1 Objetivo general.....	20
3.2 Objetivos específicos	20
4. METODOLOGÍA.....	20
4.1 Tipo de investigación	20
4.2 Etapa metodológica.....	21
5. RESULTADOS	26
5.1 Primera etapa	26
5.2 Segunda etapa	39
5.3 Tercera etapa.....	49
6. CONCLUSIONES	71
ANEXOS.....	72
Anexo A.....	72
Anexo B.....	74
Anexo C.....	82
Anexo D.....	104
Anexo E.....	125
Anexo F	145

Lista de tablas

Tabla 1. Tratamientos para lodos residuales 16

Tabla 2. Alternativas de aprovechamiento de los biosólidos..... 17

Tabla 3. Variables a caracterizar de los lodos y las categorías de los biosólidos..... 23

Tabla 4. Parámetros físicos 24

Tabla 5. Criterios y subcriterios 25

Tabla 6. Comparaciones pareadas 25

Tabla 7. Porcentajes de remoción de diseño de la laguna de estabilización de Ábrego 27

Tabla 8. Síntesis de la percepción de los actores..... 33

Tabla 9. Deficiencias del sistema de tratamiento de Ábrego, N.S 36

Tabla 10. Habitantes del municipio de Ábrego, N.S 37

Tabla 11. Tasa de acumulación de lodos de la laguna de estabilización de Ábrego 37

Tabla 12. Identificación de las muestras analizadas 40

Tabla 13. Características microbiológicas de las muestras de lodos 41

Tabla 14. Características fisicoquímicas de las muestras de lodos 41

Tabla 15. Análisis de las alternativas de extracción de los lodos 50

Tabla 16. Alternativas deshidratación..... 52

Tabla 17. Alternativas de estabilización de los lodos..... 55

Tabla 18. Alternativas de aprovechamiento de los lodos 60

Tabla 19. Convenciones de los criterios del AHP 66

Tabla 20. Vectores de prioridad total para las alternativas de deshidratación 67

Tabla 21. Vectores de prioridad total para las alternativas de estabilización..... 68

Tabla 22. Especificaciones técnicas de la extracción de lodos por vía seca 74

Tabla 23. Especificaciones técnicas de la electrobomba 75

Tabla 24. Disponibilidad de recursos en Colombia de la extracción por vía seca 75

Tabla 25. Presupuesto de la extracción por vía seca 76

Tabla 26. Análisis ambiental de la extracción por vía seca 77

Tabla 27. Disponibilidad de recursos en Colombia de la extracción por vía húmeda 79

Tabla 28. Presupuesto de la extracción por vía húmeda..... 80

Tabla 29. Análisis ambiental de la extracción por vía húmeda 81

Tabla 30. Disponibilidad de recursos en Colombia para la deshidratación por lechos 84

Tabla 31. Presupuesto de la deshidratación por lecho de secado..... 85

Tabla 32. Análisis ambiental de la deshidratación por lecho de secado 87

Tabla 33. Disponibilidad de recursos en Colombia para la deshidratación con geotubos 91

Tabla 34. Presupuesto de la deshidratación con geotubos..... 92

Tabla 35. Análisis ambiental de la deshidratación con geotubos 94

Tabla 36. Disponibilidad de recursos en Colombia para la deshidratación con filtro prensa..... 96

Tabla 37. Presupuesto de la deshidratación por filtro prensa 97

Tabla 38. Análisis ambiental de la deshidratación con filtro prensa..... 99

Tabla 39. Disponibilidad de recursos en Colombia de la deshidratación con centrífuga 101

Tabla 40. Presupuesto de la deshidratación con centrífuga	102
Tabla 41. Análisis ambiental de la deshidratación con centrífuga.....	104
Tabla 42. Disponibilidad de recursos en Colombia de la estabilización de compostaje	107
Tabla 43. Presupuesto de la estabilización de compostaje con paja de trigo	108
Tabla 44. Análisis ambiental de la estabilización de compostaje con paja de trigo.....	109
Tabla 45. Clasificación taxonómica de la lombriz Eisenia foetida	110
Tabla 46. Disponibilidad de recursos en Colombia de la estabilización de vermicompostaje	111
Tabla 47. Presupuesto de la estabilización con vermicompostaje	113
Tabla 48. Análisis ambiental de la estabilización con vermicompostaje	114
Tabla 49. Disponibilidad de recursos en Colombia de la estabilización con cal	115
Tabla 50. Presupuesto de la estabilización con cal.....	116
Tabla 51. Análisis ambiental de la estabilización con cal	118
Tabla 52. Disponibilidad de recursos en Colombia de la estabilización/solidificación	119
Tabla 53. Presupuesto de la estabilización/solidificación con cemento.....	120
Tabla 54. Análisis ambiental de la estabilización/solidificación con cemento	121
Tabla 55. Análisis ambiental de la estabilización con oxidación de agua supercrítica (OASC)	124
Tabla 56. Disponibilidad de recursos en Colombia del aprovechamiento de vermicompost	125
Tabla 57. Presupuesto del aprovechamiento de vermicompost	126
Tabla 58. Análisis ambiental del aprovechamiento de vermicompost.....	127
Tabla 59. Disponibilidad de recursos en Colombia del aprovechamiento de fertilizantes.....	128
Tabla 60. Presupuesto del aprovechamiento de fertilizantes de lodos con cal.....	129
Tabla 61. Análisis ambiental del aprovechamiento de fertilizantes de lodos con cal	130
Tabla 62. Disponibilidad de recursos en Colombia del aprovechamiento de fertilizantes.....	131
Tabla 63. Presupuesto del aprovechamiento de fertilizantes con lodos con paja.....	132
Tabla 64. Análisis ambiental del aprovechamiento de fertilizantes de lodos con paja	133
Tabla 65. Disponibilidad de recursos en Colombia del aprovechamiento con ladrillos	135
Tabla 66. Presupuesto del aprovechamiento con ladrillos.....	136
Tabla 67. Análisis ambiental del aprovechamiento con ladrillos	137
Tabla 68. Disponibilidad de recursos en Colombia del aprovechamiento en rellenos	139
Tabla 69. Presupuesto del aprovechamiento en operación de rellenos sanitarios	140
Tabla 70. Análisis ambiental del aprovechamiento en operación de rellenos sanitarios.....	141
Tabla 71. Disponibilidad de recursos en Colombia del aprovechamiento como cemento	142
Tabla 72. Presupuesto del aprovechamiento como cemento	143
Tabla 73. Análisis ambiental del aprovechamiento como cemento	144
Tabla 74. Ponderación de los criterios	145

Lista de figuras

Figura 1. Municipio de Ábrego, N.S y laguna de estabilización	14
Figura 2. Estructura AHP.....	20
Figura 3. Malla de puntos y esquema de la laguna de estabilización	22
Figura 4. Esquema de la laguna de estabilización de Ábrego, Norte de Santander	26

Figura 5. Canal de entrada de las aguas residuales.....	27
Figura 6. Compuerta de desagüe del sistema de tratamiento	28
Figura 7. Remoción de lodos secos	29
Figura 8. Limpieza de canales.....	29
Figura 9. Compuertas de entrada	30
Figura 10. Compuertas de desagüe	30
Figura 11. Área disponible para implementar alternativas	31
Figura 12. Entrevista a los actores involucrados	32
Figura 13. Entrevista a los actores involucrados	32
Figura 14. Actores involucrados en la gestión de los lodos residuales	33
Figura 15. Ítems necesarios para lograr la eficiencia del sistema de tratamiento	36
Figura 16. Extracción de muestras	40
Figura 17. Envasado y etiquetado de muestras	40
Figura 18. Análisis de coliformes fecales en los biosólidos de la laguna de estabilización	44
Figura 19. Análisis de Huevos de Helmintos viables en los biosólidos.....	44
Figura 20. Análisis de cobre en los biosólidos de la laguna de estabilización.....	45
Figura 21. Análisis de cromo en los biosólidos de la laguna de estabilización	46
Figura 22. Análisis de mercurio en los biosólidos de la laguna de estabilización	47
Figura 23. Análisis de níquel en los biosólidos de la laguna de estabilización.....	48
Figura 24. Análisis del plomo en los biosólidos de la laguna de estabilización	48
Figura 25. Análisis del zinc en los biosólidos de la laguna de estabilización	49
Figura 26. Esquema del AHP de las alternativas de deshidratación	67
Figura 27. Esquema del AHP de las alternativas de estabilización	68
Figura 28. Esquema de las alternativas establecidas para la gestión de los lodos.....	70
Figura 29. Esquema del lecho de secado.....	83
Figura 30. Extracción y confinamiento de lodos	89
Figura 31. Draga eléctrica.....	89
Figura 32. Funcionamiento de los geotubos.....	93
Figura 33. Esquema del filtro prensa	99
Figura 34. Dimensiones de la pila de compostaje	106

Resumen

La presente investigación tuvo como objetivo el establecimiento de alternativas eficientes de gestión de los lodos del caso de estudio de la laguna de estabilización de Ábrego, Norte de Santander. Las alternativas se establecieron al definir el estado actual de la laguna y estimar el volumen de los lodos en la misma. Posteriormente, se determinaron las características fisicoquímicas y microbiológicas de los lodos de la laguna de estabilización mediante muestreos. Las alternativas de gestión como extracción, tratamiento y aprovechamiento de los lodos se analizaron con base en criterios técnicos, económicos, sociales y ambientales. Además, las alternativas de tratamiento de los lodos se evaluaron a través del proceso analítico jerárquico. Los resultados mostraron que la laguna cuenta con un canal de entrada para el ingreso del agua residual y una compuerta de desagüe para la salida del agua residual. Además, se observó que la extracción de los lodos que se lleva a cabo es por vía seca, extracción que consiste en la desviación del afluente de la laguna, en donde se disminuye el volumen de agua mediante evaporación y bombeo. Al mismo tiempo, con dicha investigación se estimó un volumen de lodos remanentes de 9.877 m³ y un volumen de lodos a tratar de 7.901 m³, al dejar un inóculo del 20% para la digestión de los lodos nuevos. Por otra parte, según la caracterización de los lodos, se determinó que dichos residuos presentaban microorganismos como *Salmonella sp* y coliformes fecales y metales pesados. En conclusión, los lodos de la laguna de estabilización de Ábrego, con base en la normatividad vigente y los resultados de la caracterización fisicoquímica y microbiológica, se clasificaron como categoría B, la cual presenta mayores restricciones para su uso que la categoría A de acuerdo con el Decreto 1287 de 2014. Sin embargo, estabilizar los lodos previamente extraídos y deshidratados, aumentaría las opciones de aprovechamiento de los mismos. Es por ello que teniendo en cuenta la presente investigación, se estableció que las alternativas más eficientes para la gestión de los lodos del caso de estudio son la extracción por vía húmeda, deshidratación de lodos con geotubos, estabilización con compostaje de paja de trigo y aprovechamiento de los lodos como fertilizantes.

Palabras claves: Aprovechamiento, biosólido, extracción, laguna de estabilización, tratamiento

Abstract

The present research aimed to establish efficient alternatives for the management of sludge in the case study of the stabilization lagoon of Ábrego, North of Santander. The alternatives were established by defining the current state of the lagoon and estimating the volume of the sludge in it. Subsequently, the physicochemical and microbiological characteristics of the sludge from the stabilization lagoon were determined by sampling. Management alternatives such as extraction, treatment and use of sludge were

analyzed based on technical, economic, social and environmental criteria. In addition, the sludge treatment alternatives were evaluated through the hierarchical analytical process. The results showed that the lagoon has an inlet channel for the entry of wastewater and a drainage gate for the exit of wastewater. In addition, it was observed that the extraction of the sludge that is carried out is by dry method, extraction that consists of the diversion of the tributary of the lagoon, where the volume of water is reduced by evaporation and pumping. At the same time, this investigation estimated a volume of remaining sludge of 9877 m³ and a volume of sludge to be treated of 7901 m³, leaving an inoculum of 20% for the digestion of new sludge. On the other hand, according to the characterization of the sludge, it was determined that said residues contained microorganisms such as *Salmonella sp* and fecal coliforms and heavy metals. In conclusion, the sludge from the Ábrego stabilization lagoon, based on current regulations and the results of the physicochemical and microbiological characterization, were classified as category B, which presents greater restrictions for its use than category A according to Decree 1287 of 2014. However, stabilizing the previously extracted and dehydrated sludge would increase the options for its use. That is why, taking into account the present research, it was established that the most efficient alternatives for the management of the sludge in the case study are wet extraction, dehydration of sludge with geotubes, stabilization with wheat straw composting and reuse of sludge as fertilizers.

Keywords: Use, biosolid, extraction, stabilization lagoon, treatment

Introducción

Las lagunas de estabilización son sistemas de tratamiento de aguas residuales usados desde mediados del siglo pasado debido a sus bajos costos de operación y construcción, poca complejidad en la operación y buena retención de sólidos, cuyo tratamiento es natural y altamente sostenible. En las lagunas de estabilización las aguas residuales son tratadas mediante procesos naturales, involucrando la participación de las algas y bacterias (Cross, 2014). El tratamiento de las aguas residuales genera lodos que tienen altos contenidos de nutrientes, especialmente de nitrógeno y fósforo. En el mundo, diariamente se genera una gran cantidad de lodos residuales, los cuales se han convertido en un problema y una preocupación ya que son considerados en su mayoría como residuos contaminantes, siendo dispuestos en rellenos sanitarios. La disposición final de los lodos en rellenos sanitarios, ha disminuido el volumen disponible de los mismos. De igual manera, la aplicación de los lodos en la tierra ha estado muy restringida debido a las preocupaciones ambientales respecto a la presencia de contaminantes en los mismos. Estos contaminantes incluyen productos farmacéuticos, contaminantes orgánicos, metales pesados, entre otros. Por lo cual, existe la necesidad de estudiar la gestión de los lodos residuales con el fin de disminuir el impacto generado por ellos y propender por el aprovechamiento de los mismos.

Las alternativas de tratamiento no sólo buscan reducir la cantidad de lodo, sino eliminar, estabilizar o reducir los contaminantes presentes. Elegir la mejor alternativa requiere de un análisis detallado con base en criterios técnicos, económicos, sociales y ambientales. El tratamiento de los lodos permite ampliar las opciones de aprovechamiento de los mismos, ya que estos se pueden usar como fuente de energía, micronutrientes o biocombustibles (Teoh y Li, 2020). Numerosos estudios han informado de la remoción de contaminantes en los lodos, el aprovechamiento de los mismos en materiales para la construcción y la fabricación de fertilizantes a partir de los lodos (Erdogmus et al., 2021). El municipio de Ábrego, Norte de Santander, tiene una laguna de estabilización la cual ha estado colmatada por los lodos generados, situación que ha conllevado a una reducción del volumen útil del sistema de tratamiento. En la actualidad, algunos de los lodos extraídos son dispuestos en el relleno sanitario, desaprovechando el potencial nutricional de los mismos. Es por ello que la presente investigación tuvo como objetivo establecer alternativas eficientes de gestión de lodos para el caso de estudio de la laguna de estabilización de Ábrego.

1. Planteamiento del problema

En Colombia, las lagunas de estabilización son los sistemas de tratamiento de aguas residuales más usados, reportando un estimativo del 26%, en segundo lugar, se encuentran los lodos activados (17%), constituyendo sistemas con alta remoción de materia orgánica, en el tercer lugar se encuentran los reactores anaerobios UASB (8%). Por último, los filtros percoladores (3%), usados frecuentemente como mejoramiento posterior a un tratamiento previo. Otros tratamientos corresponden a sistemas de cloración, tratamientos primarios y preliminares y emisarios submarinos (28%) y el 18% no reporta información al sistema único de información (Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia-CTA, 2017). Con base en la información anteriormente reportada, se aprecia la importancia de estudiar las lagunas de estabilización en Colombia y lograr la gestión efectiva de los lodos generados en dichos sistemas de tratamiento.

Las lagunas de estabilización se utilizan como sistemas de tratamiento de aguas residuales en algunos municipios de Colombia debido a sus bajos costos de operación y fácil mantenimiento. No obstante, dichos sistemas de tratamiento han causado rechazo en las comunidades, especialmente las lagunas anaerobias por la posible generación de olores ofensivos y proliferación de vectores. Las lagunas de estabilización presentan deficiencias en cuanto a su operación, mantenimiento y construcción, ocasionadas por la percepción que se tiene de dichos sistemas, ya que se cree que pueden trabajar adecuadamente sin ninguna supervisión (Gama, 2017). Incluso, se piensa que dichos sistemas de tratamiento no requieren mantenimientos periódicos como limpieza de rejillas y desarenadores, remoción de lodos, corte de maleza, prevención de corrosión, entre otros parámetros (Comisión Nacional del Agua,

2015). Del mismo modo, en algunas ocasiones se considera que la construcción de estos tratamientos no necesita de una atención especial para evitar fallas en el futuro, además de una operación adecuada, la cual influye directamente en la eficiencia de dichos sistemas de tratamiento (Reutelshöfer, 2015). El inadecuado mantenimiento en las lagunas conlleva a que estas funcionen mal, colapsando por los lodos acumulados sin procesos de gestión que acentúan los malos olores (Benavent, 2016).

El municipio de Ábrego, Norte de Santander, cuenta con una laguna de estabilización de tipo facultativa, ubicada en la vereda San Miguel. La laguna trata las aguas residuales domésticas de la zona urbana antes de ser vertidas al río Algodonal. El sistema de tratamiento ha venido presentando problemas en cuanto al manejo de los lodos, ya que no se llevan a cabo actividades eficientes para la gestión de los mismos como extracción, tratamiento y aprovechamiento de dichos subproductos. Las actividades mencionadas buscan aumentar la vida útil del sistema de tratamiento. En la laguna de estabilización hay presencia de vectores como moscas debido a la materia flotante y malos olores originados por la descomposición de la materia orgánica en condiciones anaeróbicas. Así mismo, la laguna de estabilización estuvo colmatada por los lodos generados, lo cual provocó que el agua residual no se tratará adecuadamente por la reducción en el volumen de la laguna y consiguiente reducción del tiempo de retención hidráulico, causando la contaminación del Río Algodonal que abastece del recurso hídrico para consumo humano a la población del municipio de Ocaña y sus alrededores. La colmatación en el sistema de tratamiento se debió principalmente a la falta de mantenimiento de la laguna y a las insuficiencias en el tratamiento y aprovechamiento de los lodos. Las fuertes lluvias que se dan en algunas temporadas en la zona de estudio, han desestabilizado los canales de entrada de las aguas residuales. Las precipitaciones asociadas con las insuficiencias en los tratamientos y aprovechamientos de los lodos, han llevado a la aparición de enfermedades gastrointestinales en los habitantes de la zona (El tiempo, 2013).

La laguna de estabilización estuvo fuera de funcionamiento alrededor de tres años debido a la ruptura del tubo que transporta las aguas residuales municipales hasta dicho sistema, por fallas operacionales y por la acumulación de lodos en el sistema de tratamiento. La laguna de estabilización trata las aguas residuales del 90% de la población urbana del municipio de Ábrego, Norte de Santander (Gobernación de Norte de Santander, 2014). La población urbana es de 18.100 habitantes por zona (Alcaldía de Ábrego, Norte de Santander, 2016). No obstante, según visitas realizadas a la misma, entró en funcionamiento en el mes de Septiembre del 2020 gracias a la extracción de algunos lodos y a la reparación del tubo que transporta las aguas residuales hasta el sistema de tratamiento, evidenciando que dicho sistema no se encuentra actualmente colmatado por los lodos generados. Por otro parte, la laguna cuenta con un canal de entrada, en donde dicho canal llega a una recámara con guías de compuerta para desviar el agua o impedir su entrada, posteriormente cuenta con una compuerta de desagüe

(CORPONOR, 2018). Sin embargo, se logra evidenciar la falta de sistemas de pretratamiento como rejillas, trampa de grasas, desarenador y medidor de caudal. De igual forma, se logra evidenciar la poca remoción de la vegetación con el fin de prevenir daños en las estructuras, la poca limpieza del canal de entrada de las aguas residuales y la nula prevención de la corrosión en las estructuras como las compuertas. Del mismo modo, los lodos extraídos en el último mantenimiento de la laguna, no recibieron procesos de estabilización con el fin de eliminar los malos olores y la posible presencia de organismos patógenos. Igualmente, no se realizó la deshidratación de los lodos con el fin de disminuir la humedad presente y facilitar su transporte. Los procesos de estabilización y deshidratación no sólo permitirían mejorar el funcionamiento de la laguna, sino optimizar los lodos para su posterior aprovechamiento y mejorar la eficiencia de la misma.

Algunas alternativas de tratamiento y aprovechamiento de los lodos tienen sus limitaciones o pocas eficiencias, bien sea por la generación de olores ofensivos, lixiviados o limitantes por metales pesados y altos costos. Con base en lo anterior, la pregunta de investigación que se planteó en esta propuesta fue: ¿Cuáles alternativas son eficientes para la gestión de los lodos del caso de estudio de la laguna de estabilización de Ábrego, Norte de Santander?

2. Marco teórico y estado del arte:

2.1 Gestión de lodos de lagunas de estabilización

La gestión de los lodos es considerada una de las problemáticas más complejas en la actualidad. Los lodos son residuos que requieren ser gestionados ya que pueden contener metales pesados y microorganismos patógenos (González, 2015). La gestión de los lodos parte de una caracterización de los residuos con el fin de conocer las características fisicoquímicas y microbiológicas de los mismos. Posteriormente, los lodos son extraídos para recibir procesos de tratamiento que permitan reducir la humedad y los contaminantes presentes. Finalmente, los lodos tratados son aprovechados en la agricultura, enmienda a suelos o valorización energética, dependiendo de sus características (Díaz, Lorenzo, y Bataller, 2015). Es por ello que la gestión contempla alternativas de extracción, tratamiento y aprovechamiento de los lodos.

2.2 Definición de las lagunas de estabilización

Las lagunas de estabilización son diseños de ingeniería consistentes en excavaciones generalmente impermeabilizadas, en donde el agua residual es almacenada para su tratamiento antes de ser vertida a un curso de agua natural. En la laguna se lleva a cabo un proceso de depuración, donde

tienen lugar fenómenos físicos, biológicos y químicos. Las lagunas son consideradas una alternativa excelente de tratamiento para las aguas residuales domésticas, puesto que son una tecnología de bajo costo y complejidad (Vanegas y Reyes, 2017).

2.3 Tipos de lagunas de estabilización

Según Reutelshöfer (2015), las lagunas de estabilización se clasifican en:

- **Lagunas aerobias:** Las lagunas aerobias tienen una profundidad entre 1 a 1,5 m, en ellas se produce la degradación de la materia orgánica por la acción de los microorganismos aerobios. El oxígeno de la laguna es suministrado por aeración mecánica o por la fotosíntesis de las algas.
- **Lagunas facultativas:** Las lagunas facultativas tienen una profundidad de 2 m a 2,5 m. El color de las aguas residuales es verde, ya que contiene algas que brindan oxígeno para reducir la carga orgánica. Estas lagunas poseen una zona aerobia y otra anaerobia. El objetivo de dichos sistemas es obtener efluentes con una mayor calidad, estabilizando la materia orgánica y reduciendo organismos patógenos.
- **Lagunas anaerobias:** Las lagunas anaerobias poseen una profundidad entre 4 a 5 m, manteniendo condiciones anóxicas y anaerobias en todo el espesor de la misma. El objetivo de estas lagunas es retener la mayor cantidad de los sólidos que se encuentran en suspensión para reincorporarlos en el fondo y eliminar parte de la materia orgánica.
- **Lagunas de maduración:** Estas lagunas reciben el efluente de las lagunas facultativas y se usan para remover del efluente los organismos patógenos de acuerdo con la calidad requerida. Las lagunas de maduración tienen una profundidad de 1 a 1,5 m.

2.4 Laguna de estabilización de Ábrego, Norte de Santander

Según la información presentada anteriormente y la Alcaldía de Ábrego, Norte de Santander (2018), la laguna de estabilización de Ábrego se clasifica como laguna facultativa. La laguna facultativa se caracteriza por su color verde y una profundidad de 2 m. Esta laguna posee una zona aerobia y otra anaerobia y se presenta la actividad conjunta de algas y bacterias. La laguna de estabilización de Ábrego (ver figura 1) trata las aguas residuales que ingresan mediante un canal de concreto. La laguna de estabilización es de forma irregular, con una base mayor de 184,4 m y una base menor de 97,4 m, con una altura de 86,4 m, constituyendo un área de 10.872 m². El caudal es de 32,8 L/s (Alcaldía de Ábrego, Norte de Santander, 2018). La laguna de estabilización trata las aguas residuales del 90% de la población urbana del municipio de Ábrego, Norte de Santander (Gobernación de Norte de Santander, 2014).

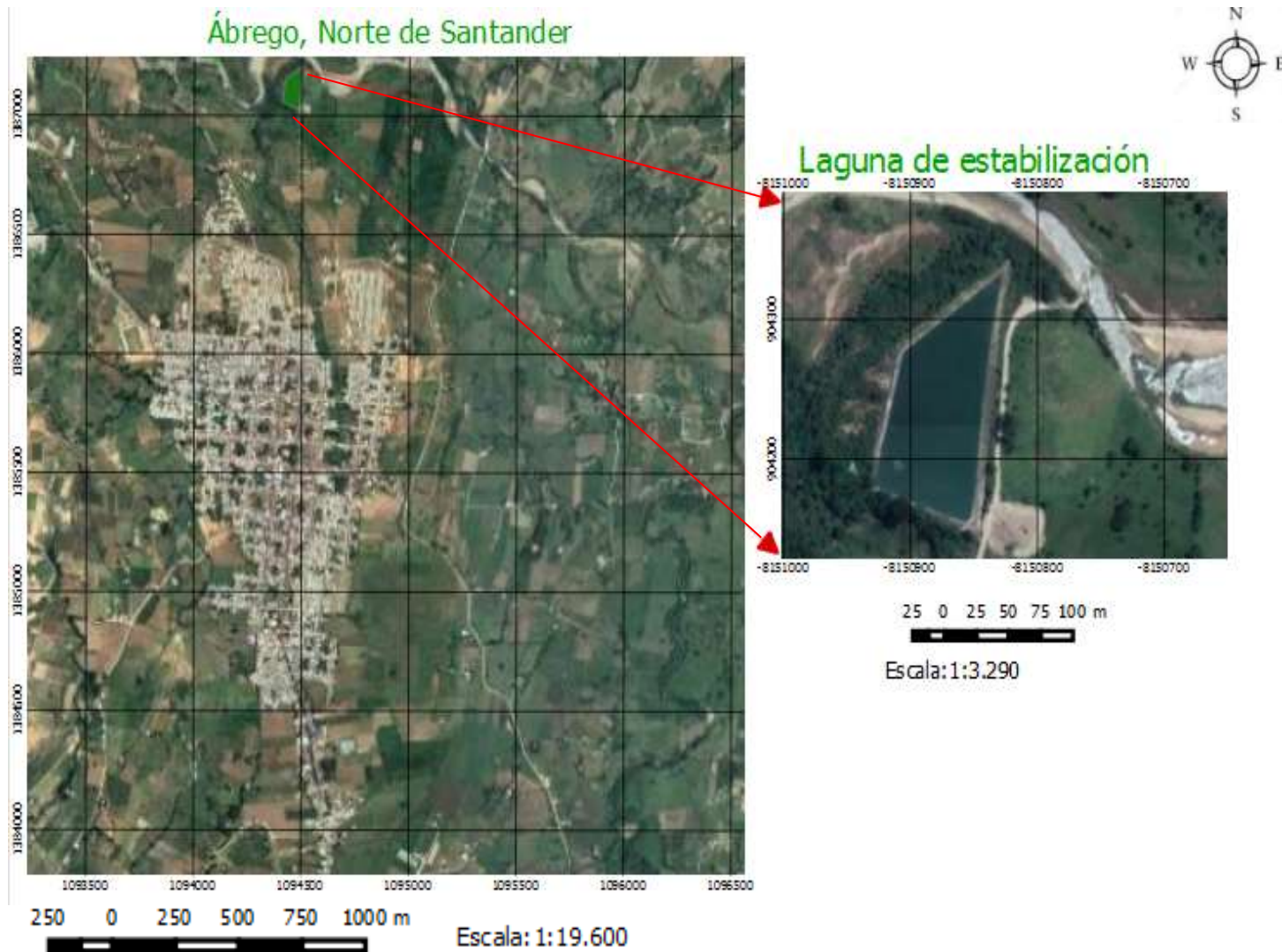


Figura 1. Municipio de Ábrego, N.S y laguna de estabilización
Fuente. Autores

2.5 Alternativas de extracción de lodos

La extracción de los lodos en la laguna de estabilización consiste en la remoción de los sólidos acumulados en el fondo de dichos sistemas. Además, la extracción de los lodos se recomienda cuando el volumen de ellos se aproxima al 25% del volumen total, es decir, se debería realizar de cada cinco a diez años (Reutelshöfer, 2015). Por otro lado, Patiño (2012), recomienda que la profundidad de los lodos se debe revisar cada año, en donde si esta alcanza una tercera parte de la profundidad de diseño de la laguna o está a menos de 10 cm de la tubería de entrada, la laguna debe ser drenada y el lodo retirado. Es importante tener en cuenta que no se debe extraer todo el lodo de la laguna de estabilización, para ello es conveniente dejar el 20% del lodo con el fin de que estos sirvan de inóculo para la digestión de los lodos nuevos.

Según Chunga (2014), define que una vez determinado el volumen de lodos en la laguna, se debe realizar el siguiente proceso de extracción de lodos por vía seca.

- Interrumpir y desviar el afluente de la laguna
- Disminuir el volumen del agua mediante la evaporación y bombeo
- Retirar los lodos secos mediante el uso de maquinaria, dependiendo del tamaño de la laguna
- Retirar manualmente la capa fina de lodos que la maquinaria no pudo movilizar
- Almacenar los lodos removidos con el fin de continuar el proceso de secado
- Rellenar la laguna nuevamente con agua y ponerla en marcha

Ahora bien, según el Ministerio de Medio Ambiente y Agua (2019), establece la necesidad de optar por otra alternativa para la extracción de los lodos que no dependa de las condiciones meteorológicas (extracción por vía húmeda), así:

- Construir un estanque o contar con un contenedor o geotubo
- Bombear los lodos del fondo sin abatir previamente el nivel del agua con una draga
- Disponer el agua residual con lodos en el estanque construido, el contenedor o geotubo
- Dejar sedimentar los lodos
- Dejar secar los lodos y retirar los lodos

2.6 Alternativas de tratamiento para lodos residuales

En el proceso de tratamiento de las aguas residuales se generan subproductos conocidos como lodos, los cuales varían sus características dependiendo del agua tratada. Los lodos residuales requieren

tratamientos con el fin de controlar olores, disminuir organismos patógenos y el contenido de humedad. La tabla 1 describe alternativas de tratamiento para los lodos (ver tabla 1).

Tabla 1.

Tratamientos para lodos residuales

Procesos unitarios	Tecnología o método tecnológico	Descripción
Espesamiento	Por gravedad	El espesamiento por gravedad es un proceso en el cual los mecanismos rotatorios de baja velocidad del tanque permiten que las partículas de los lodos incrementen la sedimentación y compactación. En dicho proceso se obtiene el lodo espesado ubicado en el fondo y sobrenadante que retorna al tratamiento
	Por flotación de aire disuelto	El espesamiento por flotación de aire disuelto consiste en sobresaturar con aire la corriente de agua, generando burbujas que atrapan partículas del lodo para ser extraídas. El espesamiento por flotación de aire disuelto tiene mayor separación entre los sólidos y líquidos que el de gravedad
	Por centrifugación	El espesamiento por centrifugación consiste en introducir el lodo a un tanque, en donde por acción de la fuerza centrífuga, la materia orgánica es empujada hacia las paredes del tanque. Dicho espesamiento no produce olores y maneja grandes cantidades de lodos en espacios pequeños
Estabilización	Estabilización con óxido de calcio	Dicha estabilización genera cambios extensos, además de ventajas sobre estabilizaciones como la digestión aerobia. La estabilización con óxido de calcio permite la eliminación de organismos patógenos y la eliminación de malos olores
	Compostaje	Es una alternativa ecológica y de bajo costo, esta consiste en la degradación biológica en condiciones aerobias para obtener un producto estable. Además, permite la producción de compost y la degradación de materia orgánica
	Vermicompostaje	El vermicompostaje usa lombrices para la deshidratación y estabilización de los lodos. Aunque el vermicompostaje puede estar limitado por la presencia de contaminantes en los lodos como metales pesados, los cuales inhiben la actividad de las lombrices.
	Digestión anaerobia y aerobia	Dichas digestiones permiten la estabilización de lodos, la disminución de patógenos y la degradación de materia orgánica
Deshidratación	Filtro de vacío	La filtración al vacío es uno de los métodos más usados en la deshidratación. En dicha alternativa, el agua se separa aplicando el vacío a través de un medio poroso que retiene los sólidos y permite al líquido pasar.
	Lechos de secado	Los lechos de secado son una de las alternativas más usadas por ser métodos simples y económicos que deshidratan los lodos. Sin embargo, dichos sistemas pueden generar olores desagradables y

		requieren grandes superficies para su funcionamiento.
	Filtros prensa	Los filtros prensa son un dispositivo de separación sólido-líquido que funciona según el principio de filtración a alta presión mediante un medio filtrante de malla relativamente tupida
Desinfección	Incineración	Es otra alternativa que destruye los organismos patógenos, reduce el volumen de los lodos y recupera energía. No obstante, dicha alternativa requiere de diseños eficientes para la recuperación energética y la disminución de las emisiones de gases efecto invernadero

Fuente. Adaptado de (Gualoto, 2016; Díaz, Veliz, Eliet y Venta, 2015)

En la actualidad se estudian tratamientos como:

- La oxidación de agua supercrítica, la cual es eficaz en el tratamiento de los lodos, ya que logra estabilizar los metales pesados, eliminar olores y disminuir los microorganismos patógenos (Yan, Örmeci, Han y Zhang, 2020).
- El tratamiento por oxidación Fenton, el cual es usado como una alternativa eficaz para la deshidratación y desinfección de los lodos ya que reduce el TOC (Carbono orgánico total) hasta en un 50% (Vilardi, Bavasso, Scarsella, Verdone y Luca, 2020).
- La electrodeshidratación por presión (EDW), la cual aplica presión para reducir el volumen de los poros extrayendo el agua del lodo (Rumky et al., 2020).
- La ósmosis directa, acondicionada con cloruro de polialuminio, la cual es una tecnología usada para el espesamiento de los lodos activados. Dicho espesamiento logra concentrar los lodos hasta 52,5 g/L en cada ciclo de operación (Sun, Lu, Shin, Haur y Zhou, 2019).
- El Biochar de cáscara de arroz con cloruro férrico (FeCl_3), el cual es usado en el tratamiento de los lodos como acondicionador y deshidratante, logrando disminuir en un 97,9 % el contenido de humedad a comparación del lodo crudo (Wu et al., 2016).

2.7 Aprovechamiento de biosólidos residuales

Según el Decreto 1287 de 2014, los lodos según sus características fisicoquímicas y microbiológicas se pueden clasificar en categoría A o B y podrían destinarse para los siguientes usos (ver tabla 2):

Tabla 2.

Alternativas de aprovechamiento de los biosólidos

Categoría A	Categoría B
--------------------	--------------------

-
- Zonas verdes (cementerios, separadores viales, campos de golf y lotes vacíos)
 - Producto en áreas privadas (jardines, antejardines, patios, plantas ornamentales y arborización).
 - Agricultura
 - Usos de la categoría B
 - Agricultura
 - Plantaciones forestales
 - Recuperación, restauración o mejoramiento de suelos degradados
 - Insumo en procesos de elaboración de abonos o fertilizantes orgánicos o productos para el suelo
 - Remediación de suelos contaminados, lechos biológicos, soporte físico o sustrato biológico.
 - Insumo en la fabricación de materiales de construcción.
 - Estabilización de taludes
 - Rellenos sanitarios (cobertura diaria y final de cierre, actividades de revegetalización)
 - Revegetalización y paisajismo de escombreras.
 - Valorización energética.
-

Fuente. Basado en el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (2014).

Los biosólidos que no se encuentren clasificados como categoría A o B, podrán usarse en:

- La operación de rellenos sanitarios como cobertura diaria.
- La disposición conjunta con residuos sólidos municipales en rellenos sanitarios y de manera independiente en sitios autorizados.
- Procesos de valorización energética.

En el municipio de Ábrego, Norte de Santander, se realizaron investigaciones relacionadas con el cuerpo receptor de las aguas residuales de la laguna de estabilización (Río Algodonal). Por su parte, Miranda, Ramírez y Angarita (2016), encontraron niveles bajos de contaminación por sólidos suspendidos en los puntos muestreados, a excepción del punto contaminado por el efluente proveniente de la laguna de estabilización. Además, un estudio realizado por Hernández y Ramírez (2016), arrojó como resultado que la calidad del agua del río Algodonal se encontraba en la clase III “aguas moderadamente contaminadas”, posiblemente por la descarga del efluente de la laguna. Dichos estudios permitieron observar que existen vacíos investigativos en la zona, puesto que en nuestro conocimiento sólo se encuentran investigaciones del cuerpo receptor de las aguas residuales. Además, en la laguna de estabilización según Torrado (2020), se realizan cada ocho días mantenimientos como poda de árboles y arbustos en la zona, pero no existen estudios que permitan establecer un proceso eficiente de extracción, tratamiento y aprovechamiento de los lodos en la actualidad.

Según la investigación desarrollada por Araujo, Molina y Noguera (2018), los lodos del tratamiento de las aguas residuales pueden apuntar a diversas alternativas de aprovechamiento. De igual forma, Martín (2018) en su investigación en Perú, recomendó realizar investigaciones en diferentes regiones y países para darle solución a los lodos generados por las lagunas. La investigación de Machado (2019), propuso el uso del compostaje para cultivos y la posibilidad de estudiar otros métodos más eficientes para el uso de los lodos. Por su parte, Rincón (2019), sugirió aprovechar los lodos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales con el fin de disminuir costos y dar un mejor manejo y disposición final de los mismos. Además, los sistemas de tratamiento requieren de investigaciones que dispongan de información actualizada sobre alternativas más eficientes para el tratamiento de los lodos generados.

A nivel mundial, se han implementado diversos sistemas de tratamiento para la gestión de lodos residuales, como es el caso de los lechos de secado que permiten disminuir la humedad presente en dichos subproductos, sistemas de digestión aerobia y anaerobia, entre otros (Castellanos et al., 2018). Además, de la implementación de procesos de compostaje de lodos para la valorización de estos subproductos, analizados con criterios técnicos y económicos (Ramírez y Gallego, 2016). Por otro parte, mediante el proceso analítico jerárquico se estudió la viabilidad de alternativas para el manejo y disposición final de los lodos en el municipio de Melgar, Tolima (Araque y Monsalve, 2018). Además, según Gualoto (2016), en su estudio, se realizó un análisis técnico y económico de alternativas como vermiestabilización y estabilización alcalina. Del mismo modo, las alternativas son analizadas por medio de criterios como el tiempo de implementación, operatividad del proceso, área disponible y costos de inversión (Torres, 2017). En Perú, se implementó un equipo para la deshidratación de los lodos, analizando tanto los costos de implementación, operativos, como de mantenimiento (Leyva, 2017).

2.8 Selección de alternativas de tratamiento de los lodos

La selección de las alternativas de tratamiento de los lodos puede realizarse por diversas metodologías. El proceso analítico jerárquico (AHP) es una técnica de análisis multicriterio, la cual busca evaluar diferentes alternativas. El AHP (ver figura 2) parte de la definición del objetivo del problema, seguido de los criterios y subcriterios con base en los cuales se tomará la decisión y por último la definición de las alternativas a evaluar (Saaty, 1980). El AHP es versátil ya que logra convertir un problema muy complejo en una jerarquía flexible y simple, siendo fácil en la toma de decisiones entre un conjunto de alternativas, logrando adaptarse a los problemas (Zhou y Yang, 2020). Según Ardjmand y Amin (2020), dicha técnica de análisis ha permitido seleccionar el modelo más adecuado para perforar los

desechos. El AHP es usado para la selección de los medios de transporte renovables, proyectos de ingeniería, medio ambiente, entre otros (Rojas y Herrera, 2019).

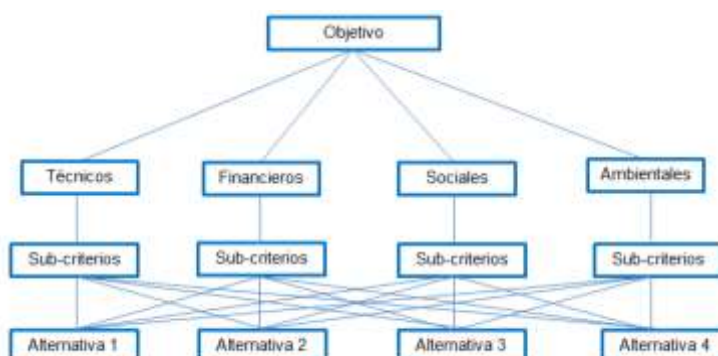


Figura 2. Estructura AHP

Fuente. Adaptado de Gómez (2018)

3. Objetivos del proyecto

3.1 Objetivo general

Establecer alternativas eficientes de gestión de lodos para el caso de estudio de la laguna de estabilización de Ábrego.

3.2 Objetivos específicos

Evaluar el estado actual de la laguna de estabilización en el municipio de Ábrego, Norte de Santander, mediante revisiones bibliográficas y visitas y entrevistas ejecutadas en la zona de estudio.

Determinar las características fisicoquímicas y microbiológicas de los lodos, empleando muestreos compuestos y puntuales en la laguna de estabilización.

Analizar las alternativas de gestión de los lodos atendiendo a criterios técnicos, económicos, sociales y ambientales.

4. Metodología

4.1 Tipo de investigación

De acuerdo con Hernández, Fernández y Baptista (2014), la presente investigación fue de enfoque cuantitativo con un alcance descriptivo, es decir, se estudiaron los lodos generados en la laguna de

estabilización de Ábrego para establecer alternativas eficientes de gestión de los mismos, como extracción, tratamiento y aprovechamiento de dichos subproductos.

4.2 Etapas metodológicas

Las siguientes etapas se desarrollaron teniendo en cuenta los objetivos específicos planteados.

- Primera etapa: Evaluación del estado actual de la laguna de estabilización en el municipio de Ábrego, Norte de Santander, mediante revisiones bibliográficas y visitas y entrevistas ejecutadas en la zona de estudio.

La primera etapa se basó en la revisión bibliográfica de temas relacionados con la presente investigación. Así mismo, el estado actual del sistema de tratamiento de aguas residuales del municipio de Ábrego se fijó con base en visitas y entrevistas. En dichas visitas se definieron las estructuras y diseño del sistema de tratamiento, su funcionamiento, aspectos operativos, zonas disponibles para implementar alternativas de tratamiento y aprovechamiento de los lodos y las condiciones actuales de extracción, tratamiento y aprovechamiento de los lodos en dicha zona. De igual forma, mediante las entrevistas se recolectó información para observar la percepción de los actores directamente impactados por la problemática de la laguna y los encargados de su operación. Estos actores estaban constituidos por el director de la unidad de servicios públicos de Ábrego, la comunidad aledaña a la laguna de estabilización, los operarios de dicho sistema y la Corporación Autónoma Regional de la Frontera Nororiental (CORPONOR). Además, con el fin de diagnosticar la acumulación y volumen de lodos en la laguna de estabilización se llevó a cabo la estimación de los mismos mediante información del sistema de tratamiento.

- Segunda etapa: Caracterización fisicoquímica y microbiológica de los lodos, mediante muestreos compuestos y puntuales en la laguna de estabilización.

La segunda etapa se basó en determinar las características fisicoquímicas y microbiológicas de los lodos de la laguna de estabilización. Dicha determinación se llevó a cabo para establecer alternativas eficientes de gestión como extracción, tratamiento y aprovechamiento de los lodos estudiados mediante revisión bibliográfica. La metodología de toma de muestra fue la siguiente:

El caudal de la laguna de estabilización es de 32,8 L/s, es por ello que se realizaron tres muestreos del lodo a través de muestras compuestas, cada una de ellas constituida por 27 muestras puntuales para el análisis fisicoquímico. Igualmente, para el análisis microbiológico se tomaron tres muestras puntuales.

Las muestras se dejaron decantar durante dos horas con el fin de que los sólidos se depositaran y se pudiera retirar el exceso de agua.

Las muestras se tomaron aleatoriamente en la laguna de estabilización y en el centro de cada punto a muestrear. La selección de los puntos fue realizada con base en el esquema de la laguna de estabilización a escala 1:1000 y con la construcción de una malla de puntos según el IDEAM (2007), (ver figura 3). Las muestras se recolectaron con una draga Ekman ya que eran sedimentos superficiales que se encuentran debajo de una capa de líquido en movimiento o un líquido estacionario. Éstas se depositaron en bolsas con cierre hermético. Así mismo, las muestras se conservaron a una temperatura de $5^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ con el fin de prevenir procesos de digestión. De igual forma, dichas muestras se etiquetaron y transportaron con su respectiva cadena de custodia.

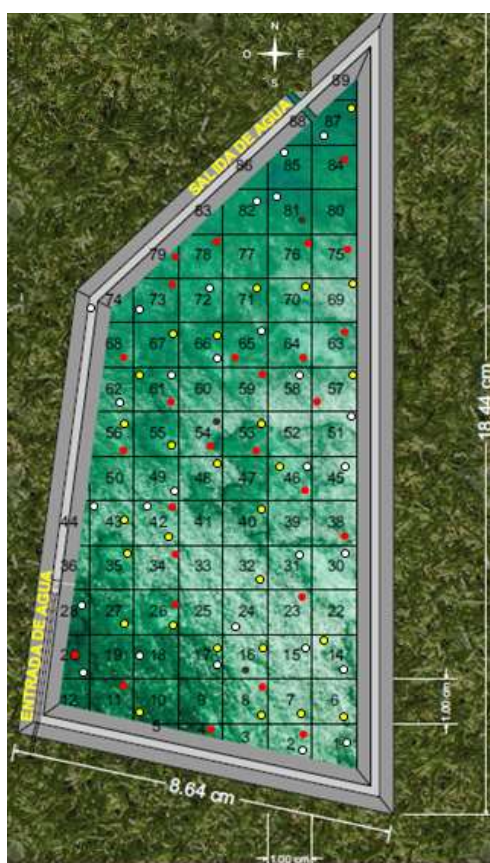


Figura 3. Malla de puntos y esquema de la laguna de estabilización

Fuente. Autores

Escala 1:1000

Convenciones:

- 27 puntos de muestreo (1 muestra compuesta)
- 27 puntos de muestreo (2 muestra compuesta)
- 27 puntos de muestreo (3 muestra compuesta)
- 3 muestras puntuales:

Número 81: Extracción de muestra en la parte superior de la laguna

Número 54: Extracción de muestra en la parte central de la laguna

Número 16: Extracción de muestra en la parte inferior de la laguna

Los parámetros o variables caracterizadas se observan en las tablas 3 y 4

Según el Decreto 1287 de 2014, se definen los valores máximos permisibles de categorización de los biosólidos para su uso y las variables caracterizadas de los lodos.

Tabla 3.

Variables a caracterizar de los lodos y las categorías de los biosólidos

Propiedad	Variables	Método analítico	Unidad de medida	Categoría del biosólido. Valores máximos permisibles	
				A	B
Químicos- metales	Cadmio	EPA 3052 (1996), SM 3111 B (2017)	mg/Kg de biosólido (base seca)	8	40
	Cobre	EPA 3052 (1996), SM 3111 B (2017)		1000	1750
	Cromo	EPA 3052 (1996), SM 3111 D (2017)		1000	1500
	Mercurio	EPA 3052 (1996), SM 3112 B (2017)		10	20
	Níquel	EPA 3052 (1996), SM 3111 B (2017)		80	420
	Plomo	EPA 3052 (1996), SM 3111 B (2017)		300	400
	Zinc	EPA 3052 (1996), SM 3111 B (2017)		2000	2800
Microbiológicos	Coliformes Fecales	SM 9222D Ed. 23 de 2017	UFC/g de biosólido (base seca)	<1,00 E (+3)	<2,00 E (+6)
	Huevos de Helmintos Viable	NOM-004-ECOL- 2002	Huevos de Helmintos viables/4 g de biosólido (base seca)	<1,0	<10,0
	<i>Salmonella</i>	NTC 5167 con	Colonias-UFC/en	Ausencia	<1,00E(+3)

<i>sp.</i>	modificaciones	25 g de biosólido (base seca)
------------	----------------	----------------------------------

Fuente. Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (2014)

Tabla 4.*Parámetros físicos*

Propiedad	Parámetro	Metodología
Física	Olor	Percepción
	Color	Observación

Fuente. Autores

Luego de determinar las características fisicoquímicas y microbiológicas de los lodos, éstas se analizaron con base en los parámetros establecidos en la tabla 3 para definir la categoría a la que pertenecen dichos subproductos según la normatividad vigente. Además, se tuvo en cuenta la NTC 5167 de 2011 en la cual se establece los requisitos que deben cumplir los lodos para ser usados como abonos o fertilizantes.

- Tercera etapa: Análisis de las alternativas de gestión de los lodos atendiendo a criterios técnicos, económicos, sociales y ambientales.

Con base en las etapas anteriores, la alternativa de extracción de los lodos (ver numeral 2.5) de la laguna de estabilización de Ábrego, se definió con base en la estimación del volumen de los mismos. Además, las alternativas de extracción se analizaron atendiendo a criterios técnicos, económicos, sociales y ambientales.

Así mismo, las alternativas de tratamiento y aprovechamiento (ver tablas 1, 2 y numeral 2.6) se establecieron teniendo en cuenta los resultados de la estimación del volumen de los lodos y los análisis fisicoquímicos y microbiológicos. Posteriormente, las alternativas se analizaron con base en criterios técnicos, económicos, sociales y ambientales. Por último, el AHP fue usado para evaluar las diversas alternativas de tratamiento con base en los criterios y subcriterios establecidos.

El AHP tuvo en cuenta la asignación de criterios (ver tabla 5). Luego, los criterios, subcriterios y alternativas se compararon por pares (ver tabla 6) con el fin de determinar la importancia relativa de los elementos en cada nivel de la jerarquía. Posteriormente, se establecieron las alternativas más eficientes de tratamiento y aprovechamiento de los lodos.

Con base en los resultados de la presente investigación se elaboró un informe con alternativas eficientes para la gestión de los lodos del caso de estudio de la laguna de estabilización de Ábrego, Norte de Santander.

Tabla 5.

Criterios y subcriterios

Criterios	Subcriterios	Descripción	
Técnicos	Especificaciones técnicas	Características técnicas de la alternativa	
	Disponibilidad de recursos	Disponibilidad en el mercado de la materia prima, insumos o equipos necesarios para la implementación de la alternativa	
	Zona disponible	Zona disponible para la implementación de la alternativa	
	Rendimiento		Rendimiento de la alternativa de extracción, tratamiento o aprovechamiento
			*Extracción: Remoción eficiente de los lodos
			*Tratamiento: Rendimiento de la alternativa con base en la eficiencia de la deshidratación, espesamiento o estabilización de los lodos.
			*Aprovechamiento: Rendimiento del aprovechamiento acorde a las características del lodo
Económicos	Presupuesto	Costo invertido en materia prima, insumos, mano de obra, equipos o infraestructura	
	Servicios industriales básicos	Servicios industriales básicos como agua, electricidad, combustibles, involucrados en el desarrollo de las alternativas	
Sociales	Aceptación de la alternativa	Aceptación de la alternativa por las partes interesadas y la comunidad en general	
	Mano de obra	Personal requerido para la operación de la alternativa	
	Emisiones	Generación de emisiones de la alternativa	
Ambientales	Residuos líquidos	Generación de residuos líquidos de la alternativa	
	Residuos sólidos	Generación de residuos sólidos de la alternativa	
	Material vegetal	Remoción de material vegetal para la implementación de la alternativa	
	Vectores	Generación de vectores	
	Energía	Consumo de energía	

Fuente. Autor

Tabla 6.

Comparaciones pareadas

Intensidad	Definición
1	Igual importancia
3	Moderada importancia de uno sobre otro
5	Fuerte importancia

7	Muy fuerte importancia
9	Extremada importancia
2,4,6,8	Valores intermedios o de compromiso
Recíprocos	Para comparación inversa

Fuente. Yajure (2015)

5. RESULTADOS

En esta sección se encuentran los resultados de la presente investigación con base en los objetivos específicos planteados, esto con la finalidad de responder a la pregunta de investigación planteada.

5.1 Primera etapa

Con base en las visitas y entrevistas realizadas en la zona de estudio, junto con la revisión bibliográfica, se evaluó el estado actual del sistema de tratamiento de aguas residuales del municipio de Ábrego, Norte de Santander, obteniendo la siguiente información:

Estado actual de la laguna de estabilización

a) Estructura, diseño, funcionamiento y aspectos operativos de la laguna

La laguna de estabilización de Ábrego (ver figura 4) trata las aguas residuales que ingresan a dicho municipio. La laguna de estabilización es de forma irregular, con una base mayor de 184,4 m y una base menor de 97,4 m, con una altura de 86,4 m y una profundidad de 2 m, constituyendo un área de 12.173 m². El caudal es de 32,8 L/s y cuenta con un tiempo de retención hidráulico de 1 a 2 días (Alcaldía de Ábrego, Norte de Santander, 2018). Por otro lado, en la tabla 7 se presentan los porcentajes de remoción de diseño de la laguna (ver tabla 7).

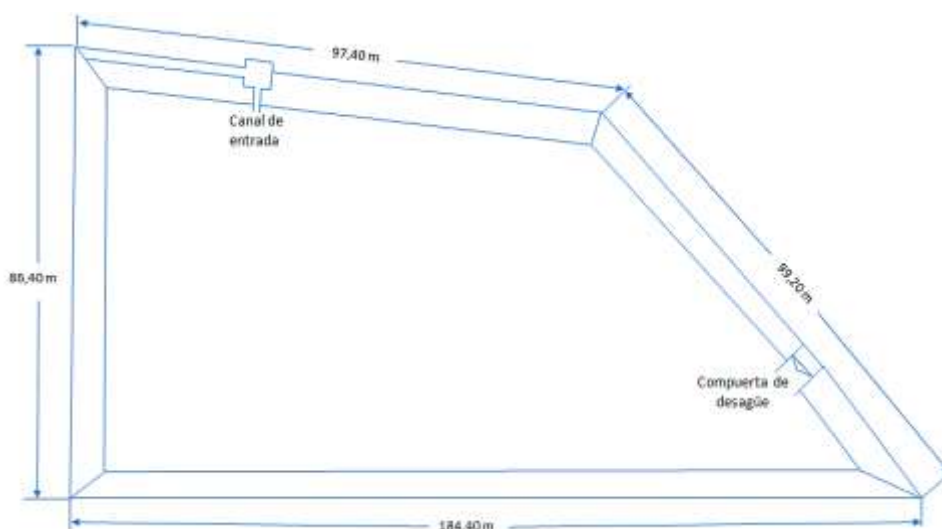


Figura 4. Esquema de la laguna de estabilización de Ábrego, Norte de Santander

Fuente. Autores

Tabla 7. *Porcentajes de remoción de diseño de la laguna de estabilización de Ábrego*

Parámetro	Eficiencias proyectadas (%)
DBO ₅	87,45
DQO	86,2
SST	94,21
Grasas y aceites	21,2
Coliformes fecales	99
Coliformes totales	97,9

Fuente. CORPONOR (2010)

Ahora bien, según la tabla 7 se observa en las eficiencias proyectadas para el parámetro grasas y aceites un bajo porcentaje de remoción, ya que según el Decreto 1076 de 2015, se esperaría que dicho sistema de tratamiento tuviera una remoción de grasas y aceites mayor o igual al 80% (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015).

Por otra parte, la laguna de estabilización facultativa tiene las siguientes estructuras (ver figuras 5,6):

- Canal de entrada: Controla el ingreso del agua residual a la laguna mediante una recámara con guías de compuerta, permitiendo desviar, si es el caso, el agua residual al río Algodonal.



Figura 5. *Canal de entrada de las aguas residuales*

Fuente. Autores

- Compuerta de desagüe: Salida del agua residual



Figura 6. *Compuerta de desagüe del sistema de tratamiento*

Fuente. Autores

La laguna facultativa se caracteriza por su color verde, indicando altos valores de pH y OD durante el día, además, la presencia de algas en la zona, demuestra que el sistema se encuentra en buenas condiciones. No obstante, en la laguna de estabilización del municipio de Ábrego, la compuerta de desagüe en algunas ocasiones permanece abierta debido a que el agua residual se rebosa, permitiendo que el efluente llegue a la fuente receptora sin tratamiento previo.

Por otra parte, a inicios del año 2020 se visitó la laguna de estabilización y se entrevistó al director de la unidad de servicios públicos de Ábrego, la comunidad aledaña a la laguna de estabilización, CORPONOR y los operarios de dicho sistema con el fin de conocer la laguna de estabilización. Durante dicha visita en el año 2020, se evidenció la colmatación de los lodos en el sistema de tratamiento y por medio de quejas por parte de la comunidad en medios públicos sobre el estado de la laguna, se logró que los entes públicos realizaran el mantenimiento de la misma, entrando en normal funcionamiento en Septiembre de 2020.

Ahora bien, los mantenimientos periódicos que se realizan con el fin de operar correctamente la laguna de estabilización están a cargo del operario contratado para dicho fin. Sin embargo, la mayoría de las visitas realizadas se caracterizó por la ausencia de dicho trabajador, argumentando la razón por la cual se realizan pocos mantenimientos en la laguna de estabilización.

b) Condiciones actuales de extracción, tratamiento y aprovechamiento de los lodos en la laguna de estabilización

En la laguna de estabilización de Ábrego, los lodos generados son vistos como un residuo y no como un subproducto aprovechable. Es por ello que en la laguna sólo se realiza la extracción de los lodos luego de presentarse situaciones de emergencia que pongan en peligro la salud de las personas como fue el caso del año 2020, donde la comunidad estaba inconforme con el agua residual sin previo tratamiento que llegaba a la fuente hídrica abastecedora de agua potable.

La extracción de algunos lodos en el año 2020 se realizó mediante el desvío del afluente de la laguna hacia el río Algodonal, esto con el fin de disminuir el volumen de agua mediante evaporación.

Posteriormente los lodos secos se retiraron mediante el uso de maquinaria, mientras la capa fina de lodos fue removida manualmente utilizando palas. Una vez removido el lodo, este no recibió procesos de tratamiento, ya que no se tiene conocimiento sobre las características del mismo. Es por tal que se evidenció la falta de tratamiento en dichos lodos, optando por disponerlos en el relleno sanitario y en terrenos cercanos al sistema de tratamiento, desperdiciando la posibilidad de incluso ser aprovechados en la agricultura por el contexto del lugar de trabajo. De igual forma, se realizó el mantenimiento de las compuertas del canal de entrada y la compuerta de desagüe con el fin de sustituir aquellas que tenían oxidación. Además, la vegetación fue erradicada y se procedió a la remoción de los lodos (ver figuras 7, 8, 9 y 10).



Figura 7. *Remoción de lodos secos*

Fuente. (Unidad de Servicios Públicos de Ábrego USPA, 2020)



Figura 8. *Limpieza de canales*

Fuente. (Unidad de Servicios Públicos de Ábrego USPA, 2020)



Figura 9. *Compuertas de entrada*

Fuente. (Unidad de Servicios Públicos de Ábrego USPA, 2020)



Figura 10. *Compuertas de desagüe*

Fuente. (Unidad de Servicios Públicos de Ábrego USPA, 2020)

c) Zonas disponibles para implementar alternativas

La laguna de estabilización cuenta con un área de 21.043 m² alrededor de la misma para la posible implementación de alternativas de extracción, tratamiento y aprovechamiento de los lodos (Alcaldía de Ábrego, Norte de Santander, 2016) (ver figura 11).



Figura 11. *Área disponible para implementar alternativas*

Fuente. Autores

d) Percepción de los actores directamente impactados por la problemática de la laguna y los encargados de su operación

Por otra parte, las entrevistas en la zona de estudio (Ver figuras 12 y 13) permitieron recolectar información para observar la percepción de los actores directamente impactados por la problemática de la laguna y los encargados de su operación (ver tabla 8 y anexo A). En dicha entrevista se realizaron preguntas como:

1. ¿Cuáles son las estructuras del sistema de tratamiento?
2. ¿Se previene la corrosión de las estructuras del sistema de tratamiento? ¿Cómo?
3. ¿Dónde se disponen los lodos removidos de la laguna de estabilización?
4. ¿Los lodos fueron deshidratados antes de su disposición final?
5. ¿El lodo removido es aprovechado? ¿Cómo?
6. ¿Qué acciones propondría para mejorar el sistema de tratamiento?



Figura 12. *Entrevista a los actores involucrados*

Fuente. Autores



Figura 13. *Entrevista a los actores involucrados*

Fuente. Autores

Ahora bien, estos actores están conformados por: La Unidad de Servicios Públicos, la Corporación Autónoma Regional de la Frontera Nororiental (CORPONOR), la Alcaldía de Ábrego, el operario de la laguna y la comunidad aledaña al sistema (Ver figura 14).



Figura 14. Actores involucrados en la gestión de los lodos residuales

Fuente. Autores

Tabla 8.

Síntesis de la percepción de los actores

Actores	Síntesis de la percepción	Anexo
Director de la unidad de servicios públicos	<ul style="list-style-type: none"> *Desarrollo de mantenimientos periódicos cada ocho días como poda de árboles y arbustos. *Extracción de algunos lodos en el año 2020 *Falta de tratamiento y aprovechamiento de los lodos extraídos *Disposición de lodos extraídos en el relleno sanitario y zonas cercanas al sistema *Quejas por parte de la comunidad debido a los malos olores *Necesidad de deshidratación de lodos para mejorar su transporte 	
Corporación autónoma regional de la Frontera Nororiental (CORPONOR) y la alcaldía de Ábrego	<ul style="list-style-type: none"> *Tiempo de operación de la laguna de 36 años *Inspección y vigilancia por parte de la corporación y el alcalde de la laguna, observando fallas en la misma *Desarrollo de mantenimientos oportunos en la laguna *Disposición de residuos sólidos en terrenos cercanos a la laguna y el relleno sanitario 	Ver anexo A
Operario de la laguna de estabilización	<ul style="list-style-type: none"> *Realización de mantenimientos en la laguna de estabilización *Ausencia de rejillas en el sistema de tratamiento *Carencia de programación para la extracción de los lodos *La colmatación de lodos permitía el ingreso de animales al sistema de tratamiento 	

	*Se requiere tratamiento oportuno de los lodos
Comunidad aledaña de la laguna	*Poca atención y compromiso en el sistema de tratamiento *Quejas por la generación olores ofensivos y presencia de vectores *Construcción de un depósito de materia orgánica y no una laguna para tratar las aguas residuales

Fuente. Autores

Análisis de la información presentada por los actores involucrados en dicha problemática

Con base en la información anteriormente presentada (ver tabla 8), todos los actores fueron enfáticos en el mantenimiento llevado a cabo en el año 2020, el cual permitió la reactivación del sistema de tratamiento. Por su parte, la comunidad aledaña a la laguna y el operario de la misma, concuerdan en que debe existir mayor atención y compromiso por parte de los entes encargados del sistema, lo cual permita la realización de actividades eficientes para la extracción, tratamiento y posterior aprovechamiento de los lodos generados, evitando con ello la colmatación del sistema de tratamiento, la presencia de vectores en la zona y malos olores. Mientras que CORPONOR, siendo el ente encargado de la vigilancia y control del sistema, sólo cumple sus funciones cuando recibe quejas por parte de las poblaciones afectadas a pesar de que dentro de sus funciones según la Ley 99 de 1993, dicha corporación debería prohibir, restringir o regular la fabricación, distribución, uso, disposición o vertimiento de sustancias causantes de degradación ambiental, además de ejercer funciones de evaluación, control y seguimiento ambiental de los usos del agua, el suelo, el aire y los demás recursos naturales renovables, lo cual comprende el vertimiento a las aguas en cualquiera de sus formas.

Ahora bien, para el director de la unidad de servicios públicos de Ábrego, realizar ciertos mantenimientos es suficiente para que el sistema opere adecuadamente, sin tener en cuenta alternativas que permitan la correcta gestión de los lodos residuales. No obstante, cabe resaltar que de acuerdo a la Ley 99 /93, los municipios tienen funciones ambientales como: Elaborar los planes, programas y proyectos ambientales municipales articulados a los planes, programas y proyectos regionales, departamentales y nacionales. Es por ello que los entes municipales están en la obligación de realizar la correcta gestión de los residuos sólidos generados en dicho sistema (Congreso de Colombia, 1993). Además, según el Decreto 1287 de 2014, los productores de lodos tienen el deber de caracterizar por lotes los biosólidos de acuerdo con los métodos certificados internacionales, nacionales y reglamentaciones técnicas vigentes (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2014). Del mismo modo, la alcaldía en su plan de desarrollo 2020-2023, tiene como prioridad en el eje cuatro: El mejoramiento de la laguna de estabilización, pero en la actualidad sólo se ha evidenciado el reemplazo de ciertas estructuras que presentaban corrosión.

e) **Principales causas por las cuales fallan las lagunas de estabilización. Caso de estudio: Laguna de estabilización de Ábrego, Norte de Santander**

Las lagunas de estabilización a pesar de ser sistemas muy importantes en el tratamiento de las aguas residuales, a menudo se descuidan. En general se pueden encontrar dos tipos de lagunas facultativas, por un lado, aquellas lagunas primarias que reciben el agua residual después de un pretratamiento o aquellas lagunas secundarias, en las cuales ingresa el agua que fue sedimentada previamente, bien sea mediante lagunas anaerobias u otros dispositivos.

En el caso del municipio de Ábrego, la laguna de estabilización no cuenta con pretratamientos como:

- Desarenador: Esta estructura permite que la arena se sedimente, evitando que las demás estructuras sufran procesos de desgaste. Es por ello que es recomendable la limpieza del mismo al menos una vez al mes (Mamani, 2017).
- Rejillas: Dichas rejillas constituyen una sección muy importante dentro del tratamiento de las aguas residuales, ya que su función radica en retener los sólidos de gran tamaño como madera, piedras, entre otros, evitando posibles taponamientos o daños en el sistema de tratamiento. Además, con el fin de mantener en óptimas condiciones dichas estructuras, estas deben limpiarse como mínimo dos veces al día, bien sea mediante el uso de palas o rastrillos, usando los elementos de protección personal apropiados (Reutelshöfer, 2015).
- Trampa de grasas: Estas trampas retienen grasas y aceites en la superficie al ser estructuras cuya pared ingresa unos pocos centímetros en el agua residual, evitando interferencia durante los procesos biológicos (Henry et al., s.f).
- Medidor de caudales: Dichos medidores miden el caudal de entrada del sistema de tratamiento mediante estructuras como los vertederos en (V) o canaletas Parshall (Reutelshöfer, 2015).

Ahora bien, según Reutelshöfer (2015), la eficiencia de la laguna de estabilización depende de ítems como una adecuada operación, mantenimiento y control (ver figura 15). Es por ello que a continuación se describen las principales fallas encontradas en dichos ítems en la laguna de estabilización de Ábrego, Norte de Santander (ver tabla 9).



Figura 15. *Ítems necesarios para lograr la eficiencia del sistema de tratamiento*

Fuente. (Reutelshöfer, 2015)

Tabla 9.

Deficiencias del sistema de tratamiento de Ábrego, N.S

Deficiencias encontradas en la operación y mantenimiento de la laguna de estabilización
Poca remoción de la vegetación con el fin de prevenir daños en las estructuras y membranas de la laguna, así como poca remoción de materia flotante
Poca limpieza del canal de entrada de las aguas residuales
Nula prevención de la corrosión en las estructuras de hierro como compuertas
Falta de programación para la extracción de los lodos residuales
Nulo tratamiento y aprovechamiento de los lodos extraídos
Deficiencias encontradas en el control de la laguna de estabilización
Falta de estructuras que permitan la medición de caudal
Nulas investigaciones acerca del sistema de tratamiento que ayuden a determinar las características fisicoquímicas y microbiológicas de los lodos

Fuente. Autores

- f) Estimación del volumen de lodos del sistema de tratamiento.**
- **Tasa de acumulación de lodos en lagunas facultativas**

La acumulación de lodos en las lagunas primarias como es el caso de la laguna de estabilización de Ábrego, puede ser mayor, disminuyendo el volumen útil dentro de ella. Y pese a que es inevitable la acumulación de lodos en dichos sistemas, pocas veces se consideran datos como las tasas de acumulación de lodos (Nelson et al., 2004). Estas tasas permiten determinar la frecuencia de extracción de los lodos. Es por ello que en dicha investigación se determinó con base en revisiones bibliográficas la tasa de acumulación promedio en sistemas primarios facultativos. Para ello se tuvo en cuenta la siguiente información:

Parámetros como la temperatura de la zona, entradas de agua provenientes de alcantarillados por industrias y aguas lluvia, pueden influir en la tasa de acumulación de lodos. No obstante, a pesar de que diversos parámetros pueden incidir en dicha tasa de acumulación de los lodos, según Nelson et al. (2004) a menudo se recomienda trabajar con valores de $0,04 \text{ m}^3/\text{hab.}\text{año}$ para lagunas facultativas primarias con temperaturas superiores a $20 \text{ }^\circ\text{C}$ como es el caso de Ábrego. De igual forma, según Arceivala (como se citó en Sperling y Chernicharo, 2005), la tasa promedio de acumulación de lodos en lagunas facultativas es del orden de $0,03$ a $0,08 \text{ m}^3/\text{hab.}\text{año}$. Así mismo lo asegura Gloyna (como se citó en Rolim, 2003), con una tasa de acumulación promedio entre $0,03$ y $0,05 \text{ m}^3/\text{hab.}\text{año}$. Es por ello que con base en las referencias antes mencionadas, se estima que la acumulación promedio de lodo en lagunas facultativas es de $0,05 \text{ m}^3/\text{hab.}\text{año}$.

Por otro lado, con el fin de estimar la tasa de acumulación de lodos de la laguna de Ábrego, se tuvo en cuenta los siguientes datos (ver tabla 10 y 11).

- **Datos de la laguna de estabilización de Ábrego, Norte de Santander**

Tabla 10.

Habitantes del municipio de Ábrego, N.S

Laguna de estabilización de Ábrego, Norte de Santander		
Año	Número de habitantes urbanos	90% de la población urbana
2005	14.000	12.600
2015	17.009	15.308
2018	18.144	16.329
2019	18.100	16.290
Promedio		15.131

Fuente. Alcaldía de Ábrego, N.S (2016) y Alcaldía de Ábrego, N.S (2020)

Tabla 11.

Tasa de acumulación de lodos de la laguna de estabilización de Ábrego

Ítem	Datos
Volumen de lodos acumulados (Removidos durante el último mantenimiento)	9.600 m ³
Periodo de acumulación	11 años
Volumen anual	9.600 m ³ /11 años=872,73 m ³ /año
Población promedio	15.131 hab
Acumulación per cápita	(872,73 m ³ /año)/ 15.131hab=0,06 m ³ /hab.año

Fuente. Autores

- Tasa de acumulación promedio según revisión bibliográfica: 0,05 m³/hab.año
- Tasa de acumulación según información de la laguna de Ábrego: 0,06 m³/hab.año

Con base en los datos de la laguna, se estima una acumulación per cápita de 0,06 m³/hab.año, lo cual se aproxima a la tasa de acumulación promedio de lodos estimada por diversos autores. Ahora bien, estimando un promedio entre la tasa de acumulación per cápita de la laguna de estabilización de Ábrego y las referencias antes mencionadas, se obtiene un valor de 0,05 m³/hab.año.

- **Cálculo del volumen y área superficial de la laguna de estabilización**

$$V = \frac{B + b}{2} * h * p$$

$$V = \frac{184,4 m + 97,4 m}{2} * 86,4 m = 12.173 m^2 * 2m = 24.347 m^3$$

Donde

- B: Base mayor de la laguna de estabilización

- b: Base menor de la laguna de estabilización
- h: Altura de la laguna de estabilización
- p: profundidad de la laguna

Área superficial (S): 12.173 m²

Volumen de la laguna (V): 24.347 m³

- **Acumulación anual de lodo y cantidad de lodo generado por m/año**

La acumulación anual de lodo y la cantidad de lodo generado por m/año se hallaron con base en las fórmulas establecidas por Sperling y Chernicharo (2005).

Acumulación anual de lodo en la laguna m³/año (C)

C=Promedio de la población * tasa de acumulación promedio de lodo

C=15.131 hab *0,05 m³/hab.año=756 m³/año

Cantidad de lodo generado por m/año (L)

$$L = \frac{C}{S} = \frac{756\text{m}^3/\text{año}}{12.173\text{m}^2} = 0,06 \text{ m/año}$$

Con base en lo anterior, anualmente se generan 756 m³ de lodo, mientras que cada año el lodo sube 6 cm.

- **Volumen de lodos remanentes en la laguna de estabilización**

En el año 2020, la laguna de estabilización de Ábrego estaba colmatada aproximadamente un 80% del volumen total, por lo cual se estimó un volumen de lodos de aproximadamente 19.477 m³. Sin embargo, en dicho año se extrajo un volumen de lodos de 9.600 m³, estimando un volumen de lodos remanentes de 9.877 m³.

$$U = N - A = 19.477 \text{ m}^3 - 9.600 \text{ m}^3 = 9.877 \text{ m}^3$$

Donde:

U: Volumen de lodos remanentes en la laguna de estabilización

N: 80% del volumen de la laguna

A: Volumen de lodos extraídos

Con base en el volumen de lodos remanentes de 9.877 m³ y teniendo presente que se debe dejar el 20% del lodo con el fin de que estos sirvan de inóculo para la digestión de los lodos nuevos, el volumen de lodos a tratar sería de 7.901 m³.

- **Cantidad de tiempo requerido para la extracción de los lodos**

Cada cierta cantidad de años, la laguna de estabilización de Ábrego requiere la extracción de los lodos con el fin de evitar la colmatación por los mismos y por ende su mal funcionamiento (Comisión Nacional del Agua, 2015). Al mismo tiempo, según Patiño (2012), la extracción de los lodos se debe realizar cuando se alcanza una tercera parte de la profundidad de diseño de la laguna. Es decir que la extracción se debería realizar cuando el lodo alcance una profundidad de 0,7 m, al tener en cuenta una profundidad de diseño de 2 m. Para hallar el tiempo requerido para alcanzar 1/3 de la profundidad de la laguna, se usó la fórmula estimada por (Sperling y Chernicharo, 2005).

$$t = \frac{p/3}{L} = \frac{2m/3}{0,06m/año} = 11 \text{ años}$$

- t= Tiempo requerido para alcanzar 1/3 de la profundidad de la laguna
- p: Profundidad de la laguna

Con base en lo anterior, el lodo de la laguna de estabilización se debería remover aproximadamente cada 11 años.

5.2 Segunda etapa

La determinación de las características fisicoquímicas y microbiológicas de los lodos de la laguna de estabilización, se realizó mediante muestreos de lodos en la zona de estudio. Para el análisis fisicoquímico se llevaron a cabo tres muestreos de lodo a través de muestras compuestas, cada una de ellas constituida por 27 muestras puntuales, mientras que para el análisis microbiológico se tomaron tres muestras puntuales (ver figuras 16 y 17). Cabe resaltar que los lodos de la laguna de estabilización de Ábrego pueden recibir el nombre de biosólidos ya que con base en la primera etapa de la presente investigación y según el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (2014), los biosólidos se definen como aquel producto resultante de la estabilización de la fracción orgánica de los lodos generados en el tratamiento de aguas residuales municipales.



Figura 16. *Extracción de muestras*

Fuente. Autores



Figura 17. *Envasado y etiquetado de muestras*

Fuente. Autores

Las variables fisicoquímicas como Cadmio, Cobre, Cromo, Mercurio, Aluminio, Níquel, Plomo, Zinc fueron analizadas por el laboratorio del Grupo de Investigación en Gestión y Modelación Ambiental-GAIA de la Universidad de Antioquia, Fisicoquímicos e Instrumental. Las variables microbiológicas como *Salmonella sp* y Coliformes Fecales, fueron analizadas por el laboratorio de Microbiología y Bioensayos de la Universidad de Antioquia del grupo GAIA. Mientras que la variable Huevos de Helmintos Viables se analizó por un laboratorio contratado en la ciudad de Medellín. Las características analizadas se pueden observar en la tabla 12.

Tabla 12.

Identificación de las muestras analizadas

Código de la muestra	Descripción	Características analizadas
1.1	1 muestra compuesta	Fisicoquímicas
1.2	2 muestra compuesta	Fisicoquímicas
1.3	3 muestra compuesta	Fisicoquímicas

2.1	Muestra extraída de la parte superior de la laguna (ver figura 3)	Microbiológicas
2.2	Muestra extraída de la parte central de la laguna (ver figura 3)	Microbiológicas
2.3	Muestra extraída de la parte inferior de la laguna (ver figura 3)	Microbiológicos

Fuente. Autores

Seguidamente, una vez analizadas las muestras de lodos en la laguna de estabilización de Ábrego, Norte de Santander, se obtuvieron los siguientes resultados (ver tabla 13 y 14).

Tabla 13.

Características microbiológicas de las muestras de lodos

Análisis de microbiológicos							
Variables	Unidad de medida	Laguna de estabilización de Ábrego, N.S			Normatividad vigente		
		Código de muestra	Concentración de biosólido en cada muestra	Promedio de muestras	Decreto 1287 de 2014		Requisito NTC 5167 de 2011
					A	B	
Coliformes Fecales	UFC/g de biosólido	2.1	66.500	99.333	<1X10 ³	<2X10 ⁶	<1x10 ³
		2.2	113.000				
		2.3	118.500				
Huevos de Helminthos Viable	Huevos de Helminthos viables/4 g de biosólido	2.1	0	0	<1	<10	<1
		2.2	0				
		2.3	0				
<i>Salmonella sp</i>	No aplica	2.1	Presencia	Presencia	Ausencia	<1X10 ³	Ausencia
		2.2	Presencia				
		2.3	Presencia				

Fuente. Autores

Tabla 14

Características fisicoquímicas de las muestras de lodos

Análisis de fisicoquímicos (mg/Kg de biosólido)			
Variables	Laguna de estabilización de Ábrego, N.S	Normatividad vigente	
		Decreto 1287 de	NTC 5167

	Código de muestras	Concentración de biosólido en cada muestra	Promedio de muestras	2014		de 2011
				A	B	
Cadmio	1.1	<10	<10	8	40	39
	1.2	<10				
	1.3	<10				
Cobre	1.1	92,95	91,84	1000	1750	-
	1.2	76,55				
	1.3	106,04				
Cromo	1.1	65,86	68,85	1000	1500	1200
	1.2	66,97				
	1.3	73,73				
Mercurio	1.1	0,42	0,31	10	20	17
	1.2	0,28				
	1.3	0,23				
Níquel	1.1	30,75	31,08	80	420	420
	1.2	25,73				
	1.3	36,78				
Plomo	1.1	26,01	24,56	300	400	300
	1.2	19,02				
	1.3	28,66				
Zinc	1.1	845,03	812,61	2000	2800	-
	1.2	650				
	1.3	942,82				

Fuente. Autores

Los resultados de los análisis de las muestras del lodo de la tabla 14, se encuentran expresados en base seca, es decir, que los contaminantes encontrados no se concentrarán aún más después de llevar a cabo procesos de deshidratación. El color del lodo era negro, presentando un olor a sulfuro de hidrógeno.

Variables microbiológicas analizadas

En cuanto a las figuras que se presentan a continuación, la variable (x) corresponde al código de la muestra y la variable (y) corresponde a los resultados.

Salmonella sp

Los microorganismos *salmonella sp*, tienen la capacidad de sobrevivir a diversos sistemas de tratamiento. Igualmente, tienen una alta capacidad de adaptación, lo cual podría explicar la presencia de dichos microorganismos en los lodos de la laguna de estabilización de Ábrego (Song et al., 2009).

Con base en la tabla 13, el biosólido de la laguna de Ábrego, no cumple con los requerimientos establecidos por el Decreto 1287 de 2014 para clasificarse como categoría A al encontrarse la presencia de *Salmonella sp.* Paralelamente, no se podría estimar si dicho lodo podría clasificarse como categoría B según dicho decreto, puesto que no se cuenta con resultados expresados en cantidades. Ahora bien, según la NTC 5167 de 2011, dicho lodo no cumple con los requisitos para elaborar abonos o fertilizantes orgánico-minerales sólidos.

Coliformes fecales

Los coliformes fecales son indicadores de contaminación fecal, por lo tanto, es común que dichos microorganismos se encuentren en altas concentraciones en las aguas residuales de origen doméstico como es este el caso (Barrios y Jiménez, 2000).

Según la tabla 13 y figura 18, el parámetro de coliformes fecales se encontró en un rango entre 66.500 y 118.500 UFC/g de biosólidos, con un promedio de 99.333 UFC/g de biosólidos. Con base en lo anterior, el biosólido de la laguna de estabilización de Ábrego sobrepasa los límites permisibles de la NTC 5167 de 2011 (1000 UFC/g de biosólido) de acuerdo a los microorganismos coliformes fecales. Al mismo tiempo, sobrepasa los valores máximos permisibles para clasificarse como categoría A (<1000 UFC/g de biosólido) según el Decreto 1287 de 2014, pero no sobrepasa los límites permisibles para clasificarse como categoría B (2×10^6 UFC/g de biosólido).

Ahora bien, teniendo en cuenta los rangos de variación de los resultados de coliformes fecales, hubo menor concentración de coliformes fecales en la muestra tomada en la parte superior de la laguna, la cual se refiere a la zona más cerca de la compuerta de desagüe de la laguna. Esto posiblemente se debió a que la parte superior de la laguna es la zona más alejada del punto de entrada de las aguas residuales, ocasionando un mayor grado de estabilización a comparación de la muestra tomada cerca del punto de entrada del afluente. Además, el sistema de tratamiento se caracteriza por presentar solamente un canal de entrada, favoreciendo que el lodo no se distribuya uniformemente en la laguna de estabilización.

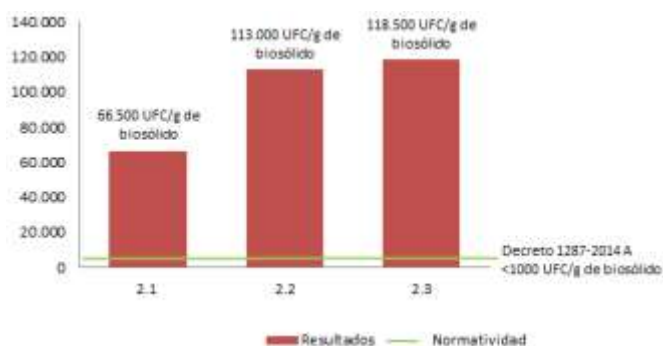


Figura 18. *Análisis de coliformes fecales en los biosólidos de la laguna de estabilización*

Fuente. Autores

Huevos de helmintos viables

Los huevos de helmintos viables, son microorganismos que logran sobrevivir años, convirtiéndolos en grandes indicadores de contaminación (Ortiz, 2010). Además, los huevos de helminto son microorganismos muy resistentes tanto química como mecánicamente por sus capas, caracterizándose como patógenos difíciles de destruir (Escobar et al., 2014).

Los biosólidos de la laguna de estabilización, según la tabla 13 y la figura 19, no contienen huevos de helmintos viables, cumpliendo con el valor máximo permisible para la categorización de A de <1 Huevos de Helminto/4 g de biosólido, según el Decreto 1287 de 2014. Además, el biosólido de la laguna con base al parámetro analizado, cumple con el requisito para ser usado como abono, fertilizante o enmienda al suelo.

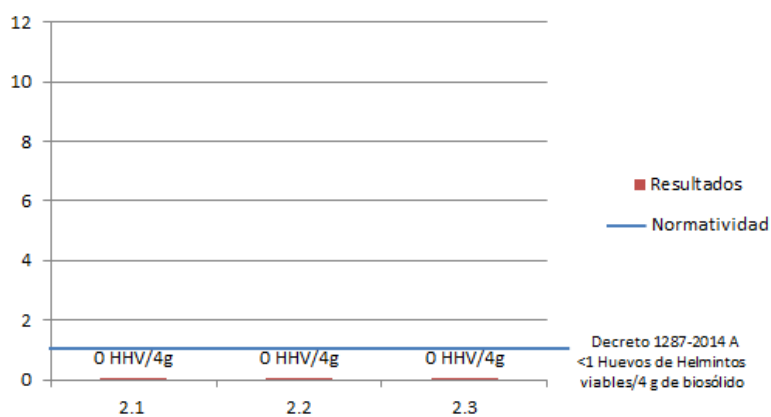


Figura 19. *Análisis de Huevos de Helmintos viables en los biosólidos*

Fuente. Autores

Variables fisicoquímicas analizadas

En cuanto a las figuras que se presentan a continuación, la variable (x) corresponde al código de la muestra y la variable (y) corresponde a los resultados.

Cadmio

El cadmio es considerado un metal pesado con alta toxicidad. La aplicación de lodos con altas concentraciones de cadmio, puede conllevar a problemas en los seres vivos al interrumpir las actividades

biológicas de los mismos, causando con ello alteraciones. Al mismo tiempo, aplicar lodos con metales pesados como el cadmio en la agricultura, puede producir cambios en el crecimiento de las especies vegetales y problemas en la salud de las personas (Prieto et al., 2009). El cadmio, es un disruptor endocrino, causante de enfermedades como el cáncer (Sánchez, 2016).

Según la tabla 14, en los biosólidos de la laguna de estabilización no se encontraron concentraciones del metal pesado cadmio por encima del límite de detección reportado de 10 mg/ Kg de biosólido, cumpliendo con los valores máximos permisibles del Decreto 1287 del 2014 en la categoría B (40 mg/Kg de biosólido) y la NTC 5167 de 2011 (39 mg/Kg de biosólido).

Cobre

El cobre puede ser considerado como un micronutriente con alto potencial en la agricultura, permitiendo que el lodo se aproveche como fertilizante. No obstante, el cobre en los lodos no debe sobrepasar los límites permisibles, ya que las altas concentraciones pueden perturbar las funciones de las proteínas y la actividad enzimática. Este metal generalmente está asociado con las actividades mineras, alterando las características fisicoquímicas de los suelos al aplicar lodos con altas trazas de cobre (Gaete et al., 2010).

Según la tabla 14 y la figura 20, el metal pesado cobre se encontró en los biosólidos de la laguna entre un rango de 76,55 y 106,04 mg/Kg de biosólido, con un promedio de 91,84 mg/Kg de biosólido. Con base en dichos resultados, el biosólido de la laguna de estabilización de Ábrego no sobrepasó los límites permisibles de la categoría A (1000 mg/Kg de biosólido) y B (1750 mg/Kg de biosólido) del Decreto 1287 de 2014. La NTC 5167 de 2011 no regula este parámetro.

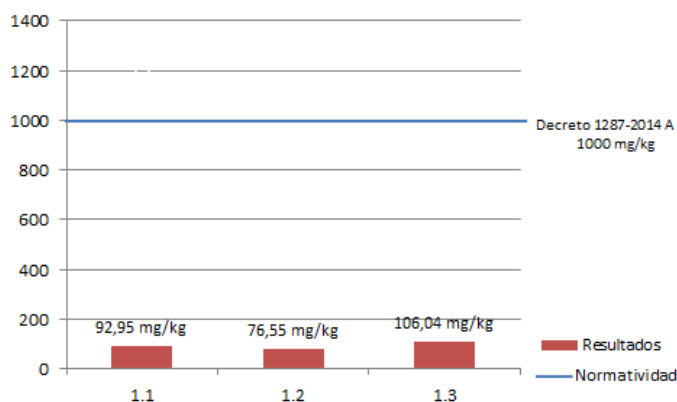


Figura 20. Análisis de cobre en los biosólidos de la laguna de estabilización

Fuente. Autores

Cromo

El cromo es un metal muy tóxico, el cual no se degrada de manera fácil al presentar altas concentraciones, logrando bioacumularse en el medio ambiente. Además, dicho metal al entrar en contacto con el suelo, puede alterar las características fisicoquímicas del mismo, perturbando la calidad (Hincapié y Puerto, 2019).

Según la tabla 14 y la figura 21, el metal pesado cromo se encontró en los biosólidos de la laguna de estabilización entre un rango de 65,86 y 73,73 mg/Kg de biosólido y un promedio de 68,85 mg/Kg de biosólido. Teniendo en cuenta lo anterior, dichos resultados no sobrepasan los límites permisibles de la categoría A (1000 mg/Kg de biosólido) y B (1500 mg/Kg de biosólido) del Decreto 1287 de 2014 y la NTC 5167 del 2011 (1200 mg/Kg de biosólido).

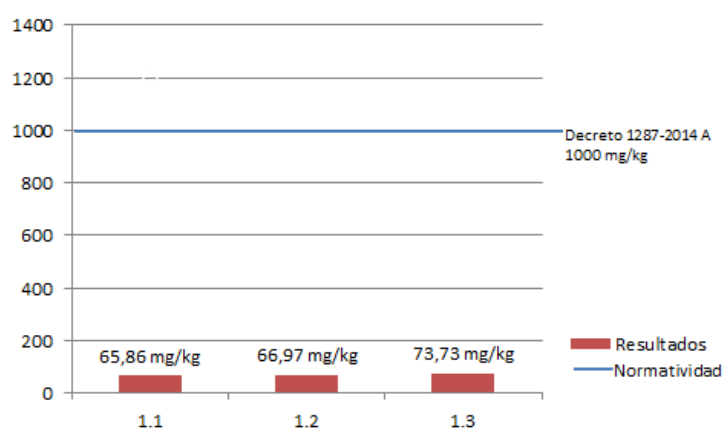


Figura 21. Análisis de cromo en los biosólidos de la laguna de estabilización

Fuente. Autores

Mercurio

El mercurio es un metal altamente tóxico, cuyo poder acumulativo y poca biodegradabilidad, impacta negativamente la cadena trófica y los ecosistemas (Busto, Cabrera y Peralta, 2010). Además, las sales de mercurio, al ser liberadas a cuerpos hídricos, se pueden transformar en compuestos de metilmercurio, siendo un compuesto soluble en grasa y muy tóxico (Pinzón y Sotelo, 2016).

Según la tabla 14 y la tabla 22, el metal pesado mercurio, se encontró en los biosólidos de la laguna entre un rango de 0,23 y 0,42 mg/Kg de biosólido y un promedio de 0,31 mg/Kg de biosólido. Con base en dichos resultados, las concentraciones de mercurio en los biosólidos de la laguna no exceden los límites permisibles de la categoría A (10 mg/Kg de biosólido) y B (20 mg/Kg de biosólido) del Decreto 1287 de 2014 y la NTC 5167 del 2011 (17 mg/Kg de biosólido).

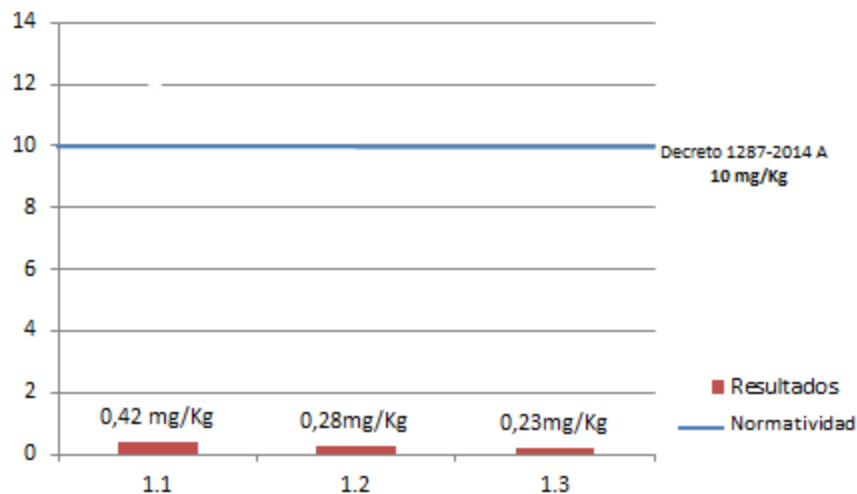


Figura 22. Análisis de mercurio en los biosólidos de la laguna de estabilización

Fuente. Autores

Níquel

El níquel es un metal pesado muy usado y abundante. Se encuentra en las rocas ígneas y la corteza terrestre. El níquel es un mineral muy utilizado en las industrias, primordialmente para la obtención de aceros (Alomá et al., 2013). Lodos con metales pesados como el níquel al ser aplicados a suelos arenosos pueden alterar las plantas. Además, el crecimiento de las algas en aguas superficiales puede reducirse. No obstante, el níquel en bajas concentraciones es un elemento esencial para los animales, no presentando procesos de biomagnificación en la cadena trófica (Doria, 2006). El níquel se absorbe por los sedimentos del suelo, llegando a inmovilizarse, mientras que el níquel en los suelos ácidos puede ser muy móvil, logrando llegar a la matriz ambiental agua (Pérez, 2016).

Según la tabla 14 y la figura 23, el níquel se encontró en los biosólidos de la laguna de estabilización entre un rango de 25,73 y 36,78 mg/Kg de biosólido y un promedio de 31,08 mg/Kg de biosólido. Con base en lo anterior, las concentraciones de níquel en los biosólidos de la laguna de estabilización de Ábrego, no sobrepasan los límites permisibles del Decreto 1287 del 2014 categorías A (80 mg/Kg de biosólido) y B (420 mg/Kg de biosólido) y la NTC 5167 del 2011 (420 mg/Kg de biosólido)

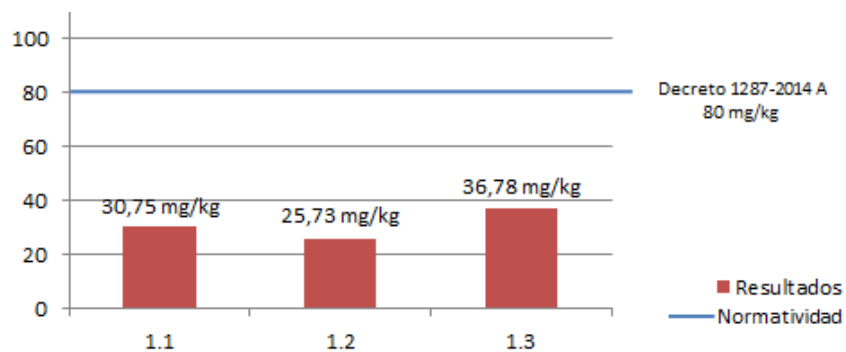


Figura 23. Análisis de níquel en los biosólidos de la laguna de estabilización

Fuente. Autores

Plomo

El plomo es un metal altamente tóxico. Aplicar biosólidos con plomo, puede generar que dicho metal permanezca como residuo por mucho tiempo, conllevando a alteraciones en los animales, plantas y humanos. Según Peláez, Bustamante y Gómez (2016); el plomo se bioacumula en las raíces y tallos de las plantas, reduciendo el crecimiento de las mismas.

Según la tabla 14 y la figura 24, el plomo se encontró en los biosólidos de la laguna de estabilización entre un rango de 19,02 y 28,66 mg/Kg de biosólido y un promedio de 24,56 mg/Kg de biosólido. Con base en lo anterior, la concentración del metal pesado plomo, no sobrepasa los límites permisibles del Decreto 1287 de 2014, categoría A (300 mg/Kg de biosólido) y B (400 mg/Kg de biosólido) y la NTC 5167 de 2011 (300 mg/Kg de biosólido).

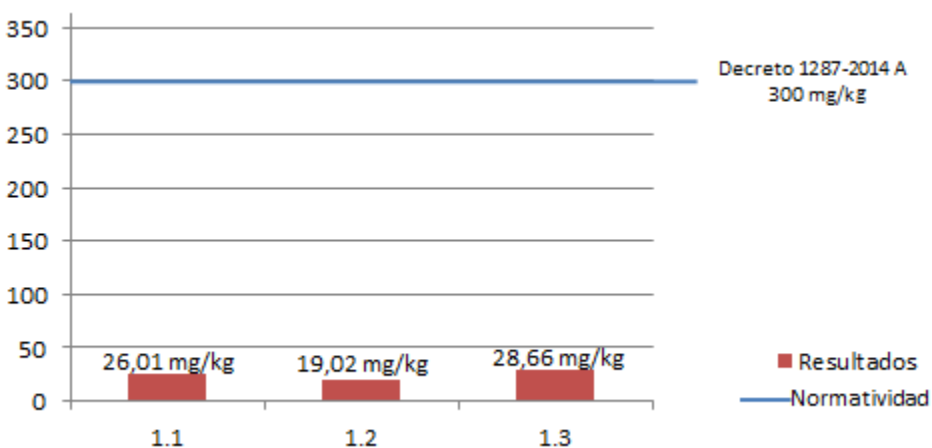


Figura 24. Análisis del plomo en los biosólidos de la laguna de estabilización

Fuente. Autores

Zinc

El zinc es considerado un metal con baja toxicidad a diferencia de otros metales, pero concentraciones altas del mismo en biosólidos puede generar problemas ambientales. El zinc puede contaminar cuerpos hídricos y acumularse en las plantas. Según Fu (2017), el zinc es una amenaza ecológica por su alta presencia en sedimentos y agua.

Según la tabla 14 y la figura 25, el zinc se encontró en los biosólidos de la laguna entre un rango de 650 y 942,82 mg/Kg de biosólido y un promedio de 812,61 mg/Kg de biosólido. Con base en lo anterior, la concentración del metal pesado zinc, no sobrepasa los límites permisibles del Decreto 1287 de 2014, categoría A (2000 mg/Kg de biosólido) y B (2800 mg/Kg de biosólido). Este parámetro no lo regula la NTC 5167 de 2011.

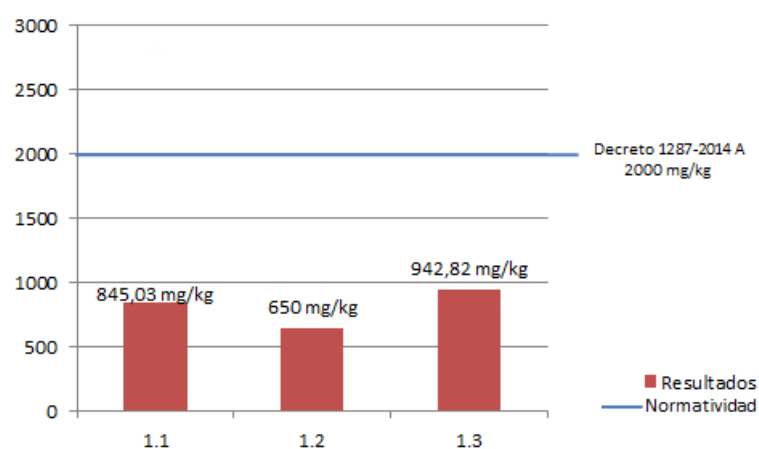


Figura 25. Análisis del zinc en los biosólidos de la laguna de estabilización

Fuente. Autores

Categoría de los biosólidos con base en las características fisicoquímicas y microbiológicas

Los biosólidos de la laguna de estabilización de Ábrego, no presentaron microorganismos patógenos como huevos de helmintos, pero si la presencia de *salmonella sp* y coliformes fecales. Al mismo tiempo, aunque no hubo presencia del metal pesado cadmio, si se presentaron bajas concentraciones de metales pesados como cobre, cromo, mercurio, níquel, plomo y zinc. Ahora bien, la presencia de coliformes fecales estuvo por encima del límite establecido por el Decreto 1287 de 2014 para categoría A, por lo cual se estimó que el biosólido de la laguna de estabilización de Ábrego, se clasificaba como categoría B.

5.3 Tercera etapa

Con base en las etapas anteriores, el lodo de la laguna de estabilización se clasificó como categoría B. Dicha categoría se caracteriza por ser más restrictiva en los aprovechamientos de los biosólidos. Sin embargo, según el Decreto 1287 de 2014, dicho lodo podría usarse en la agricultura,

aplicado al suelo, en plantaciones forestales, restauración de suelos, insumo para la fabricación de materiales de construcción o procesos de valorización energética. No obstante, es importante analizar tratamientos que permitan no sólo reducir la humedad presente en los lodos, lo cual facilita su transporte, sino también analizar alternativas de estabilización que reduzcan la concentración de microorganismos patógenos y metales pesados, pudiendo optar por su clasificación como A.

Ahora bien, la presencia de *salmonella sp* en los lodos de la laguna de Ábrego, limita el uso del biosólido en la agricultura debido a que pueden representar altos riesgos en la salud de las personas, causando enfermedades como fiebre tifoidea. Así mismo, los lodos con coliformes fecales son un riesgo para la salud de las personas y el ambiente, puesto que los coliformes fecales dependiendo de las características del lodo, suelo y el clima, pueden permanecer en el suelo después de un año de aplicado el lodo (Nadal, Gondim, Platero y Navarro, 2015). Es por ello que de acuerdo a lo anterior se requiere el tratamiento de los lodos, haciendo especial énfasis en el tratamiento de la carga microbiana en los mismos. A continuación, se presenta el análisis tanto de alternativas de extracción, tratamiento como aprovechamientos de los lodos.

El análisis de las alternativas de gestión de los lodos se realizó atendiendo a criterios técnicos, económicos, sociales y ambientales, la estimación del volumen de los lodos y la caracterización fisicoquímica y microbiológica de los lodos (ver tablas 15,16, 17 y 18). Durante la elaboración del presupuesto de las alternativas, se tuvo en cuenta las recomendaciones dadas por parte de electricistas y constructores, complementando dicha información con revisiones bibliográficas.

Alternativas de extracción de lodos

Tabla 15.

Análisis de las alternativas de extracción de los lodos

Alternativas de extracción de lodos		
Criterios	Extracción por vía seca	Extracción por vía húmeda
Técnicos	<p>Especificaciones técnicas</p> <ul style="list-style-type: none"> *Interrupción y desviación del afluente de la laguna *Reducción del volumen de agua mediante bombeo *Reducción del volumen de agua mediante evaporación *Secado de los lodos a la intemperie *Retiro de lodos con maquinaria *Retiro de los lodos utilizando mano de obra *Almacenamiento 	<p>Especificaciones técnicas</p> <ul style="list-style-type: none"> *Bombeo de lodos por vía húmeda *Disposición de lodos bombeados en contenedores *Sedimentación y reducción de la humedad de los lodos en los contenedores <p>Disponibilidad de recursos</p> <p>La alternativa tiene disponibilidad de recursos</p> <p>Zona disponible</p> <p>Requiere área para la implementación de los contenedores</p> <p>Rendimiento</p>

	<p>*Rellenado de la laguna y puesta en marcha</p> <p>Disponibilidad de recursos La alternativa tiene disponibilidad de recursos</p> <p>Zona disponible Requiere área para desvío del agua residual</p> <p>Rendimiento *Influenciado por parámetros meteorológicos *Tiempo requerido de aproximadamente seis meses</p>	<p>*No está influenciado por las condiciones meteorológicas de la zona</p> <p>*Alternativa que permite ser operada con la laguna en funcionamiento</p> <p>*Reducción de impactos ambientales al almacenar los lodos bombeados en contenedores</p> <p>*Tiempo requerido de aproximadamente cinco meses</p>
Económicos	Presupuesto	
	\$25.578.100	\$333.728.794
	Servicios industriales básicos	
	La alternativa de extracción por vía seca requiere de servicios industriales como electricidad, diesel y gasolina.	La alternativa de extracción por vía húmeda requiere de servicios industriales como electricidad, diesel y gasolina.
Sociales	Aceptación de las alternativas	
	Disminución de la aceptación de la alternativa al desviar el afluente del sistema de tratamiento al río Algodonal, provocando contaminación ambiental.	Mayor aceptación de la alternativa al no contaminar el río Algodonal por la desviación del afluente de la laguna de estabilización.
	Mano de obra de las alternativas	
	Mano de obra para la capacitación del personal encargado del bombeo y extracción del lodo	<p>Mano de obra para:</p> <p>*Capacitación del personal encargado del bombeo y confinamiento del lodo</p> <p>*Gestión integral de lixiviados</p> <p>*Personal conocedor sobre la capacidad de almacenamiento del contenedor</p>
Ambientales	Análisis ambiental de las alternativas	
	Impactos ambientales generados durante la etapa de construcción, operación y cierre y abandono	
	<p>*Generación de residuos líquidos</p> <p>*Generación de residuos sólidos</p> <p> *Generación de olores</p> <p> *Consumo de energía</p> <p>*Proliferación de vectores</p> <p>*Generación de empleo</p>	<p>*Generación de residuos líquidos</p> <p>*Generación de material particulado</p> <p>*Generación de residuos sólidos</p> <p> *Consumo de energía</p> <p> *Remoción de vegetación</p> <p> *Generación de empleo</p> <p>*Consumo de materia prima</p> <p>*Consumo de combustible</p>
Anexo	B	

Fuente. Autores

Análisis de alternativas de tratamiento de lodos residuales

Tabla 16.

Alternativas deshidratación

Alternativas de deshidratación		
Deshidratación con lechos de secado		Criterios
Especificaciones técnicas		
*Construcción de diez camas, cada una de ellas con un área aproximada de 81 m ² , con 10 m de largo y 8 m de ancho.		
*Profundidad del lecho de 1,2 m, de los cuales 0,5 m son de borde libre, 0,15 m de lodo, 0,3 m de arena, 0,2 m de grava.		
*Recolección de lixiviados a partir de tuberías		
*Cubierta del lecho de secado		
Disponibilidad de recursos		
La alternativa tiene disponibilidad de recursos		Técnicos
Zona disponible		
Los lechos de secado disponen de zonas para su implementación al requerir de un área aproximadamente de 814 m ² .		
Rendimiento de la alternativa		
Dicha alternativa permite reducir la humedad presente en los lodos, pasando del 97% al 6%, luego de tratarlos por cinco meses		
Presupuesto		
\$111.986.897		
Servicios industriales básicos		Económico
La alternativa de extracción por lechos de secado requiere de servicios industriales como electricidad, diesel, gasolina y agua.		
Aceptación de la alternativa		
La operación de los lechos de secado puede generar olor, presencia de vectores como moscas y requerir el manejo de lixiviados, lo cual podría disminuir la aceptación de la alternativa. Aunque los lechos de secado permiten manejar altas cargas de lodos		Sociales
Mano de obra de la alternativa		
Requiere personal capacitado el cual lleve a cabo actividades como el control de plantas e insectos, control de olores, remoción del lodo antiguo y escarificado de la capa de arena y el control de drenaje, el cual se debe verificar visualmente		
Análisis ambiental de la alternativa		
Impactos ambientales generados durante la etapa de construcción, operación y cierre y abandono		
*Generación de residuos sólidos		
*Consumo de combustible		
*Generación de residuos líquidos		Ambientales
*Consumo de materia prima		
*Consumo de agua		
*Generación de empleo		
*Generación de material particulado		
*Remoción de vegetación		
*Generación de olor		
Deshidratación con geotubos		Criterios
Especificaciones técnicas		Técnicos

<p>*Bombeo de los lodos del fondo de la laguna con una draga o bomba</p> <p>*Disposición del lodo dragado en un geotubo</p> <p>*Deshidratación y sedimentación de los lodos</p> <p>*Efluente del geotubo se retorna a la laguna de estabilización</p> <p>Disponibilidad de recursos</p> <p>La alternativa tiene disponibilidad de recursos</p> <p>Zona disponible de la alternativa</p> <p>La instalación de los geotubos requiere la instalación temporal de una celda de deshidratación de 40 m de ancho x 240 m de largo, observando la disponibilidad para implementar dicha alternativa</p> <p>Rendimiento de la alternativa</p> <p>Más del 93% de los lodos se logran extraer, con reducciones de humedad de -56%</p>		
<p>Presupuesto</p> <p>\$ 925.045.994</p> <p>Servicios industriales</p> <p>La alternativa de deshidratación con geotubos requiere servicios industriales como electricidad, diesel y gasolina.</p>		Económicos
<p>Aceptación de la alternativa</p> <p>Impacto visual por el requerimiento de área para su implementación. Aunque dicho requerimiento puede ser temporal. Esta alternativa consume muy poca energía, además de lograr una clarificación del agua, lo cual aumentaría la posibilidad de ser aceptada por la comunidad en general y las partes interesadas</p> <p>Mano de obra de la alternativa</p> <p>La alternativa requiere de personal capacitado, el cual realice el mantenimiento y limpieza periódica de los geotubos con el fin de evitar el crecimiento de vegetación. De igual manera, los geotubos requieren ser operados adecuadamente con el fin de evitar desgarramientos de los mismos. Además, el personal debe conocer el tipo de draga a usar, la cantidad de geotubos a instalar y la cantidad y tipo de polímeros a usar en el proceso de deshidratación</p>		Sociales
<p>Análisis ambiental de la alternativa</p> <p>Impactos ambientales generados durante la etapa de construcción y montaje de equipos, operación y cierre y abandono</p> <p>*Generación de residuos sólidos</p> <p>*Generación de material particulado</p> <p>*Generación de empleo</p> <p>*Remoción de vegetación</p> <p>*Consumo de combustible</p> <p>*Consumo de materia prima</p> <p>*Consumo de energía</p>		Ambientales
<p>Deshidratación con filtros prensa</p> <p>Especificaciones técnicas</p> <p>*Realización de prueba del lodo</p> <p>*Acondicionamiento previo del lodo</p> <p>*Deshidratación de los lodos previamente extraídos</p> <p>*Filtro prensa cubierto con el fin de evitar alteraciones en el equipo por precipitaciones en la zona</p> <p>Disponibilidad de recursos</p> <p>La alternativa tiene disponibilidad de recursos</p> <p>Zona disponible</p>		Criterios
		Técnicos

<p>La laguna de estabilización cuenta con 21.043 m² disponibles para implementar alternativas. El filtro prensa con base en las dimensiones del mismo y la cubierta, requeriría un área de aproximadamente 9m², contando con disponibilidad suficiente para la implementación de dicha alternativa.</p>	
<p>Rendimiento de la alternativa</p>	
<p>*El filtro prensa permite una sequedad del 30% aproximadamente</p>	
<p>*El acondicionamiento previamente del lodo, permite reducir la humedad hasta un 45%</p>	
<p>Presupuesto</p>	
<p>\$108.111.747</p>	
<p>Servicios industriales</p>	
Económicos	<p>La alternativa de deshidratación con filtros prensa requiere servicios industriales como electricidad, diesel, gasolina y agua.</p>
<p>Aceptación de la alternativa</p>	
<p>La alternativa, aunque permite filtrados limpios, puede disminuir la aceptación de su implementación al presentar una operación discontinua, además de requerir la limpieza de las telas filtrantes. Al mismo tiempo, la operación de la alternativa puede generar ruido y olores desagradables</p>	
<p>Mano de obra de la alternativa</p>	
Sociales	<p>El filtro prensa pueden presentar las siguientes dificultades durante su operación, lo cual exige de mano de obra calificada para la operación y mantenimiento:</p>
<p>*Dificultad en la limpieza de las placas</p>	
<p>*Retiro manual de los lodos al tener muy poco peso o quedarse pegados en las telas filtrantes</p>	
<p>*Operación intermitente del filtro</p>	
<p>Análisis ambiental de la alternativa</p>	
<p>Impactos ambientales generados durante la etapa de construcción, operación y cierre y abandono</p>	
<p>*Generación de residuos sólidos</p>	
<p>*Generación de material particulado</p>	
<p>*Generación de empleo</p>	
<p>*Remoción de vegetación</p>	
<p>*Consumo de combustible</p>	
<p>*Consumo de materia prima</p>	
<p>*Consumo de energía</p>	
<p>*Generación de olores</p>	
<p>*Generación de ruido</p>	
<p>Deshidratación con centrífuga</p>	
Criterios	<p>Especificaciones técnicas</p>
Técnicos	<p>La centrífuga es una alternativa de tratamiento que permite tanto la deshidratación como el espesamiento de los lodos. Sin embargo, en el caso del lodo primario, como es este el caso, no es muy recomendable el uso de las centrífugas debido a la alta capacidad de sedimentación de los lodos y los altos contenidos de sustancias abrasivas que pueden alterar el normal funcionamiento de la alternativa. De igual manera, la centrífuga suele requerir altos voltajes para su funcionamiento, requiriendo de plantas eléctricas, aumentando el costo de la alternativa, la cual además requiere extremados cuidados durante el mantenimiento (Universidade da Coruña, Inditex, 2015).</p>
<p>Disponibilidad de recursos</p>	
<p>La alternativa tiene disponibilidad de recursos</p>	
<p>Zona disponible</p>	

La laguna cuenta con área de 21.043m² para la implementación de alternativas y la deshidratación por centrífuga es recomendable en plantas medianas y grandes sobre todo, pero no requieren grandes espacios para su implementación (Universidade da Coruña, Inditex, 2015).

Rendimiento de la alternativa

Según Gualoto (2016), la deshidratación por centrífuga puede ser un proceso fiable, cuya operación no requiere de mano de obra de manera continua. Agregar acondicionadores como aserrín logran reducciones de humedad del 89%, teniendo la ventaja de ser un producto biodegradable (Gold et al., 2016).

Presupuesto

\$127.607.777

Servicios industriales

Económicos

La alternativa de deshidratación con filtros prensa requiere servicios industriales como electricidad, diesel, gasolina y agua

Aceptación de la alternativa

Según Lee et al., (2002, como se citó en Semiyaga et al., 2017), la alternativa de espesamiento por centrifugación no genera olores desagradables ya que cuenta con una carcasa que los encierra. Sin embargo, la centrifugación puede generar molestias en la comunidad por la generación de ruido.

Mano de obra de la alternativa

Una correcta operación de la centrifugación demanda que el personal esté debidamente capacitado para controlar parámetros como:

- Velocidad del tambor
- Velocidad diferencial entre el tambor y el tornillo.
- Factores de alimentación de fango.
- Empleo de acondicionador

Sociales

La deshidratación por centrifugación a comparación con otros sistemas de tratamiento, no requiere mucho espacio para su implementación, además su operación puede ser automática dependiendo de la calidad y cantidad del lodo de entrada, garantizando su fácil operación, lo cual reduce la necesidad de personal y su manejo es continuo (Rivera, 2016).

Análisis ambiental de la alternativa

Impactos ambientales generados durante la etapa de construcción, operación y cierre y abandono

- *Generación de empleo
- Remoción de la vegetación
- *Generación de residuos sólidos
- *Generación de material particulado
- *Consumo de combustible
- *Consumo de materia prima
- *Consumo de agua
- *Consumo de energía
- *Generación de residuos líquidos
- *Generación de ruido

Ambientales

Anexo

C

Fuente. Autores

Tabla 17.

Alternativas de estabilización de los lodos

Alternativas de estabilización		
Estabilización de compostaje con paja de trigo	Criterios	
Especificaciones técnicas		
<p>*Humedad: Rangos de humedad entre el 50% - 60% (Donado, 2013). Es por ello que se recomienda cubrir las pilas de compostaje con películas plásticas.</p> <p>*Aireación: Se recomienda voltear las pilas de compostaje cada 4 días, lo cual permita además la homogeneización de las mezclas (Kebibeche et al., 2019).</p> <p>*Diseño de las pilas de compostaje: Se recomienda pilas con altos volúmenes, ya que los pequeños volúmenes pueden presentar variaciones de temperatura muy violentas.</p> <p>*Relación C/N: En el compostaje se recomienda una relación de C/N entre 25-35% con el fin de mantener en óptimas condiciones a los microorganismos.</p> <p>*pH: Al iniciar el proceso de compostaje se puede presentar un pH de 6,5, pero un pH entre 7 y 8 permite la maduración del compostaje, con una buena aireación.</p> <p>*Olor y color: El compost maduro se debe caracterizar por tener un olor agradable, el cual debe ser diferente al olor inicial, así mismo se debe caracterizar por un color marrón oscuro o negro.</p> <p>*Lixiviados: El líquido proveniente de la descomposición de la materia orgánica puede ser recolectado y recirculado entre las demás pilas.</p>	Técnicos	
Disponibilidad de recursos		
La alternativa tiene disponibilidad de recursos		
Zona disponible		
La alternativa de compostaje requeriría de un área aproximada de 200 m ² para estabilizar los lodos de la laguna.		
Rendimiento de la alternativa		
El compostaje permite estabilizar los lodos generados en el tratamiento de las aguas residuales, logrando reducciones de microorganismos patógenos y metales pesados por lixiviación (Yáñez, Alonso y Díaz, 2009).		
Presupuesto		
\$94.007.500		
Servicios industriales		Económico
La alternativa de estabilización con compostaje requiere servicios industriales como gasolina y agua		
Aceptación de la alternativa		
Como se mencionó anteriormente, dentro de las fases del compostaje se puede producir olores desagradables. No obstante, dichos olores se pueden prevenir con una correcta aireación, evitando la descomposición anaerobia de los lodos. Al mismo tiempo, el proceso de compostaje podría generar la presencia de vectores como moscas, haciendo necesario el control de dicho parámetro (Cordova, 2016).	Sociales	
Mano de obra de la alternativa		
Se requiere de personal que realice un volteo periódico de las pilas y que además garantice las especificaciones técnicas de la alternativa.		
Análisis ambiental de la alternativa		
Impactos ambientales generados durante la etapa de construcción, operación y cierre y abandono	Ambientales	
<p>*Remoción de la vegetación</p> <p>*Generación de residuos sólidos</p> <p>*Consumo de combustible</p> <p>*Generación de residuos líquidos</p>		

<ul style="list-style-type: none"> *Consumo de materia prima *Consumo de agua *Generación de empleo *Generación de material particulado 	
Estabilización de vermicompostaje	Criterios
<p style="text-align: center;">Especificaciones técnicas</p> <p>*Humedad: Mantener una humedad de aproximadamente el 70% permite que la lombriz se pueda deslizar en el lodo, facilitando además la ingesta de alimento.</p> <p>*Riego: Es importante evitar excesos de agua que produzcan encharcamientos, lo cual conlleve a desarrollar procesos de fermentación anaerobia.</p> <p>*Aireación: La aireación permite la correcta respiración de las lombrices, permitiendo a la vez una buena reproducción de las mismas.</p> <p>*Temperatura: Es recomendable mantener las lombrices en temperaturas que oscilen entre 12 -25 °C.</p> <p>*pH: El pH óptimo es de 7, sin embargo, puede soportar ambientes ácidos y alcalinos, aunque se arriesga la productividad de las lombrices.</p>	Técnicos
<p style="text-align: center;">Disponibilidad de recursos</p> <p style="text-align: center;">La alternativa tiene disponibilidad de recursos</p>	
<p style="text-align: center;">Zona disponible</p> <p>La alternativa de vermicompostaje requeriría de un área de aproximadamente 600 m² para estabilizar los lodos de la laguna.</p>	
<p style="text-align: center;">Rendimiento de la alternativa</p> <p>Según Srivastava (2005), el vermicompostaje <i>con Eisenia foetida</i>, permite reducir la toxicidad de los lodos, disminuyendo además la concentración de metales pesados. Al mismo tiempo, según Contreras (como se citó en Gupt and Garg, 2008), dicho vermicompostaje permite reducir microorganismos patógenos en los lodos.</p>	
<p style="text-align: center;">Presupuesto</p> <p style="text-align: center;">\$38.295.500</p>	
<p style="text-align: center;">Servicios industriales</p> <p>La alternativa de estabilización de vermicompostaje requiere de servicios industriales como agua y gasolina.</p>	Económicos
<p style="text-align: center;">Aceptación de la alternativa</p> <p>La alternativa de vermicompostaje permite estabilizar los lodos residuales, obteniendo un producto aplicable en la agricultura, siendo una alternativa sencilla y económicamente viable. Aunque durante dicho proceso, el vermicompostaje genera lixiviados y malos olores por la degradación anaerobia de los lodos, lo cual podría disminuir la aceptación de dicha alternativa.</p>	Sociales
<p style="text-align: center;">Mano de obra de la alternativa</p> <p>La alternativa de estabilización con vermicompostaje requiere de personal capacitado que garantice las especificaciones técnicas tanto de la lombriz <i>Eisenia foetida</i> como del vermicompostaje, controlando factores como pH, humedad, temperatura, riego, aireación y manejo de lixiviados.</p>	
<p style="text-align: center;">Análisis ambiental de la alternativa</p> <p style="text-align: center;">Impactos ambientales generados durante la etapa de construcción, operación y cierre y abandono</p>	
<ul style="list-style-type: none"> *Generación de residuos sólidos *Generación de material particulado *Consumo de combustible *Generación de empleo 	Ambientales

<ul style="list-style-type: none"> *Consumo de materia prima *Generación de olores *Consumo de agua *Generación de emisiones atmosféricas *Generación de residuos líquidos *Consumo de recursos naturales 	
Estabilización con cal	Criterios
Especificaciones técnicas	
Según la EPA (2003), la reducción de patógenos se puede obtener al aumentar el pH a más de 12, manteniendo ese valor durante más de 72 horas. Al mismo tiempo, es importante conservar la temperatura por encima de 52°C por un tiempo de 12 horas. Según la Comisión Nacional del Agua (2015), establece que el material alcalino a usar, bien sea cal hidratada o viva, requiere analizar previamente el aporte de calcio.	
Disponibilidad de recursos	
La alternativa tiene disponibilidad de recursos	Técnicos
Zona disponible	
La alternativa de estabilización con cal requeriría de un área de aproximadamente 400 m ² .	
Rendimiento de la alternativa	
Según Torres et al., (2009), la estabilización alcalina permite eliminar microorganismos patógenos. Según Liu et al., (2012), la estabilización alcalina permite reducir e inmovilizar metales pesados presentes en lodos residuales.	
Presupuesto	
\$39.724.300	
Servicios industriales	
La alternativa de estabilización con cal requiere de servicios industriales como gasolina.	Económicos
Aceptación de la alternativa	
La estabilización alcalina puede emitir malos olores, además de producir subproductos aplicables primariamente a suelos ácidos. Además, dicha estabilización incrementa el volumen de los biosólidos, en donde la alcalinidad del lodo puede aumentarse por dicho proceso de estabilización.	
Mano de obra de la alternativa	
Es importante capacitar el personal encargado de la estabilización de los lodos con el fin de evitar que el pH caiga por debajo de 11. Además, el personal debe monitorear constantemente el pH y la temperatura del lodo con el fin de lograr la eficiencia del proceso (Comisión Nacional del Agua, 2015).	
Análisis ambiental de la alternativa	
Impactos ambientales generados durante la etapa de construcción, operación y cierre y abandono	
<ul style="list-style-type: none"> *Remoción de vegetación *Generación de residuos sólidos *Generación de material particulado *Consumo de combustible *Generación de empleo *Consumo de materia prima *Generación de olores *Generación de emisiones atmosféricas 	Ambientales
Estabilización/Solidificación de lodos con cemento	Criterios

Especificaciones técnicas

La estabilización de lodos permite convertir residuos peligrosos en formas más estables. Esta alternativa incluye el uso de cemento Portland para dicha estabilización de lodos. El cemento Portland es una de las enmiendas más usadas por su bajo costo, alta disponibilidad y resistente a la biodegradación (Cheilas et al., 2007). Durante la mezcla del lodo con el cemento, se puede inducir un comportamiento plástico, es por ello que es necesario dejar reposar el lodo unos 4 minutos después de ser agregado al mezclador, esto con el fin de eliminar los posibles coágulos, posteriormente debe ser agregado el cemento y por último el agua necesaria para el mezclado. Según Valls y Vázquez (2000), es recomendable agregar el 50% de lodos a la mezcla de cemento.

Técnicos

Disponibilidad de recursos

La alternativa tiene disponibilidad de recursos

Zona disponible

La laguna de estabilización cuenta con el área disponible para la implementación de la alternativa ya que requería de un área máxima de aproximadamente 700 m².

Rendimiento de la alternativa

La estabilización de lodos con el cemento Portland permite retener los metales pesados un 98%, reduciendo la lixiviación de los compuestos contaminantes del lodo.

Presupuesto

\$184.209.948

Servicios industriales

La alternativa de estabilización con cemento requiere de servicios industriales como electricidad, agua y gasolina.

Económicos

Aceptación de la alternativa

La estabilización/solidificación con cemento Portland ayuda a inmovilizar metales pesados presentes en lodos. No obstante, es importante tener en cuenta el contenido de agua en los lodos, lo cual puede alterar el tiempo y la velocidad de fraguado del cemento.

Sociales

Mano de obra de la alternativa

La estabilización de lodos con dicha alternativa tiene una fácil operación, con pocos requerimientos de personal. Dentro de los requerimientos de materiales sólo requeriría una mezcladora de cemento (Romero y Vargas, 2009). Aunque es necesario realizar estudios previos de la estabilización a desarrollar.

Análisis ambiental de la alternativa

Impactos ambientales generados durante la etapa de construcción, operación y cierre y abandono

- *Remoción de vegetación
- *Generación de residuos sólidos
- *Generación de material particulado
- *Consumo de combustible
- *Generación de empleo
- *Consumo de materia prima
- *Generación de emisiones atmosféricas
- *Consumo de agua
- *Consumo de energía
- *Generación de ruido

Ambientales

Estabilización con oxidación de agua supercrítica (OASC)

Criterios

Especificaciones técnicas

La OASC es una alternativa prometedora en la estabilización de los lodos, en donde la

Técnicos

presión y la temperatura son más altas que el punto crítico termodinámico del agua (374 °C y 22,1 MPa). Sin embargo, la OASC puede verse limitada por problemas de corrosión y taponamientos de sal (Hodes et al., 2004).

Disponibilidad de recursos

La poca implementación a escala industrial de la alternativa, puede limitar la disponibilidad de recursos para su implementación en municipios pequeños como Ábrego, Norte de Santander.

Zona disponible

El área requerida para la implementación de la alternativa de oxidación de agua supercrítica depende de la cantidad de lodo a tratar y el reactor a usar, sin embargo, la laguna cuenta con 21.043 m² disponibles para implementar alternativas.

Rendimiento de la alternativa

La OASC es una alternativa de estabilización eficiente y ambientalmente benigna, la cual estabiliza metales pesados, elimina olores desagradables, degrada compuestos orgánicos y destruye los patógenos (Zhang et al., 2017).

Presupuesto

La OASC se ha caracterizado por sus altos costos económicos debido a que el proceso requiere condiciones técnicas como elevadas presiones y temperaturas (Portela et al., 2010). Además, la OASC tiene elevados costos de inmovilización y operación (Casal, 2007).

Económicos

Servicios industriales básicos

La alternativa de estabilización de oxidación de agua supercrítica requiere de servicios industriales como agua, electricidad y gasolina.

Aceptación de la alternativa

La OASC permite obtener productos finales reutilizables como dióxido de carbono, agua y minerales. Al mismo tiempo, el calor generado durante el proceso de estabilización puede usarse como producción de energía. Dicha alternativa además puede aumentar su aceptabilidad al ser un sistema cerrado, el cual no produce emisiones atmosféricas

Sociales

Mano de obra de la alternativa

La operación de la alternativa requiere ser operada por personal altamente capacitado, el cual posea conocimiento sobre los requerimientos técnicos.

Análisis ambiental de la alternativa

Impactos ambientales generados durante la etapa de construcción, operación y cierre y abandono

- *Remoción de la vegetación
- *Generación de residuos sólidos
- *Generación de material particulado
- *Consumo de combustible
- *Generación de empleo
- *Consumo de agua
- *Consumo de energía
- *Consumo de materia prima
- *Generación de residuos líquidos

Ambientales

Anexo

D

Fuente. Autores

Análisis de alternativas de aprovechamiento de lodos residuales

Tabla 18.

Alternativas de aprovechamiento de los lodos

Alternativas de aprovechamiento de lodos		
Aprovechamiento: Vermicompost		Criterios
Especificaciones técnicas		
El vermicompostaje de lodos permite obtener un producto aprovechable denominado vermicompost. A pesar de que se esperaría que después de estabilizar los lodos se disminuyan los metales pesados presentes en el vermicompost, es importante que antes de su aplicación se comprueben las concentraciones de metales pesados.		
Disponibilidad de recursos		
La alternativa tiene disponibilidad de recursos		Técnicos
Rendimiento de la alternativa		
Según Indrani, Adil y Ori (2019), el vermicompost obtenido a partir del vermicompostaje de lodos con <i>Eisenia foetida</i> contiene una gran cantidad de nutrientes esenciales para las plantas como hierro, zinc, cobre, manganeso, magnesio, calcio, potasio, nitrógeno y fósforo.		
	\$68.145.500	Económico
Aceptación de la alternativa		
El vermicompostaje permite no sólo comercializar el vermicompost, sino la venta de la biomasa de las lombrices, lo cual aumenta los ingresos económicos. Aplicar lodos en la agricultura puede ser controversial, puesto que provienen del tratamiento de aguas residuales. Además, lodos de categoría B, como es este el caso, según el Decreto 1287 de 2014 presentan ciertas restricciones		Sociales
Análisis ambiental de la alternativa		
Impactos ambientales generados durante la etapa de planeación del aprovechamiento, operación y cierre y abandono		
<ul style="list-style-type: none"> *Generación de empleo *Incremento en la oferta de aprovechamiento de los lodos <ul style="list-style-type: none"> *Generación de residuos sólidos *Consumo de materia prima *Consumo de combustible *Generación de olores ofensivos *Cambio en las características fisicoquímicas del suelo <ul style="list-style-type: none"> *Incremento de fósforo y nitrógeno en el suelo *Incremento de materia orgánica Incremento del potencial de producción *Incremento en los ingresos municipales *Disminución de la colmatación de lodos *Disminución de la disposición inadecuada de residuos <ul style="list-style-type: none"> *Incremento en la vida útil de los rellenos sanitarios *Cambio en el uso de los lodos *Incremento en la demanda de recolección y disposición final de lodos <ul style="list-style-type: none"> *Incremento en los costos de gestión de lodos *Cambio en la disponibilidad de aprovechamiento de los lodos 		Ambientales
Aprovechamiento: Fertilizantes a base de lodos con cal		Criterios
Especificaciones técnicas		
Los fertilizantes se han caracterizado por sus altos costos económicos, incentivando el uso de fertilizantes a partir de residuos orgánicos biodegradables (Amador, 2017).		Técnicos
Disponibilidad de recursos		
La alternativa tiene disponibilidad de recursos		

Rendimiento de la alternativa	
Los lodos con cal, son de gran interés en la aplicación para suelos ácidos, ya que proporcionan alta alcalinidad. Al mismo tiempo, nutrientes como el potasio pueden estar disponibles para las plantas por el aporte de los lodos. El aumento de pH en los suelos disminuye la presencia de aluminio, cuyo elemento químico es perjudicial en la productividad y crecimiento de los cultivos (Rivera, Moreno, Herrera y Romero, 2016).	
\$117.883.500	Económicos
La fertilización con lodos es una alternativa que permite reducir los costos asociados en la compra de fertilizantes químicos, destacándose como una alternativa económicamente sostenible. Al mismo tiempo, fertilizar suelos con lodos estabilizados con cal, facilita el crecimiento de cultivos como el maíz (Jamali et al., 2008).	Sociales
Análisis ambiental de la alternativa	
Impactos ambientales generados durante la etapa de planeación del aprovechamiento, operación y cierre y abandono	
<ul style="list-style-type: none"> *Generación de empleo *Incremento en la oferta de aprovechamiento de los lodos <ul style="list-style-type: none"> *Generación de residuos sólidos *Consumo de materia prima *Consumo de combustible *Cambio en las características fisicoquímicas del suelo <ul style="list-style-type: none"> *Incremento de fósforo y nitrógeno en el suelo *Incremento de magnesio en el suelo *Disminución de aluminio en el suelo *Incremento de materia orgánica <ul style="list-style-type: none"> *Aumento del pH *Incremento del potencial de producción del suelo <ul style="list-style-type: none"> *Incremento en los ingresos municipales *Disminución de la colmatación de lodos *Disminución de la disposición inadecuada de residuos <ul style="list-style-type: none"> *Incremento en la vida útil de los rellenos sanitarios <ul style="list-style-type: none"> *Cambio en el uso de los lodos *Incremento en la demanda de recolección y disposición final de lodos <ul style="list-style-type: none"> *Incremento en los costos de gestión de lodos *Cambio en la disponibilidad de aprovechamiento de los lodos 	Ambientales
Aprovechamiento: Fertilizantes a base de lodo con paja	
Especificaciones técnicas	
Los lodos estabilizados con paja de trigo permiten reducir microorganismos patógenos y metales pesados. Dicha estabilización permite que los lodos tengan una humedad recomendada para el uso de los mismos como fertilizantes.	
Disponibilidad de recursos	
La alternativa tiene disponibilidad de recursos	
Rendimiento de la alternativa	
Según Pilatti et al., (2014), los lodos aplicados como fertilizantes, permiten que las características fisicoquímicas de los suelos mejoren. Según Kebibeche et al., (2019), la adición de paja de trigo en el lodo permite alcanzar un pH de 6,73, cuyo valor está dentro del límite recomendado para fertilizantes (Guerra, Vázquez y Díaz, 2003). Al mismo tiempo, la conductividad eléctrica de dichos lodos no sobrepasa los valores límites máximos recomendados de 3 mS/cm (Soumaré, Demeyer, Tack y Verloo,	Técnicos

Aceptación de la alternativa	
La elaboración de ladrillos a partir de lodos residuales es un método que permite disminuir el consumo de materias primas, permitiendo obtener ahorros de recursos económicos. Elaborar ladrillos a partir de biosólidos, permite reducir el consumo de energía, además, construir edificios con dichos ladrillos reduce la transferencia de calor por la reducción de la conductividad térmica (Mohajerani, 2019).	Sociales
Análisis ambiental de la alternativa	
Impactos ambientales generados durante la etapa de elaboración de ladrillos, operación, cierre y abandono	
<ul style="list-style-type: none"> *Generación de empleo *Consumo de combustible *Consumo de agua *Consumo de materia prima * Generación de residuos orgánicos *Consumo de energía eléctrica *Consumo de recursos naturales no renovables (Carbón) *Generación de emisiones * Generación de material particulado *Generación de residuos sólidos (Escoria) *Incremento en la oferta de aprovechamiento de los lodos <ul style="list-style-type: none"> *Incremento en los ingresos municipales *Disminución de la colmatación de lodos *Disminución de la disposición inadecuada de residuos <ul style="list-style-type: none"> *Incremento en la vida útil de los rellenos sanitarios *Cambio en el uso de los lodos *Incremento en la demanda de recolección y disposición final de lodos <ul style="list-style-type: none"> *Incremento en los costos de gestión de lodos *Cambio en la disponibilidad de aprovechamiento de los lodos 	Ambientales
Aprovechamiento. Operación de rellenos sanitarios	Criterios
Especificaciones técnicas	
Los biosólidos pueden ser usados como cobertura diaria de los rellenos sanitarios, la cual es necesaria para cubrir los residuos sólidos dispuestos, evitando que queden expuestos al culminar la jornada diaria de descarga y emitan malos olores y vectores (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2017).	
Disponibilidad de recursos	
La alternativa tiene disponibilidad de recursos	Técnicos
Rendimiento de la alternativa	
Aprovechar los lodos en los rellenos sanitarios puede ser una alternativa viable al tener en cuenta la gran capacidad de tratamiento de dichos rellenos y la simple disposición de los residuos (Yang et al., 2017). Sin embargo, aprovechar lodos en rellenos sanitarios como cobertura diaria, puede generar desestabilización ya que tienen altos contenidos de humedad, además de concentrar contaminantes y poseer baja resistencia y alta compresibilidad	
\$16.788.500	Económicos
Aceptación de la alternativa	
El relleno sanitario además de permitir el aprovechamiento de los lodos como cobertura, permite tratarlos mediante procesos de degradación bioquímica, siendo una técnica de bajo costo y fácil operación (Guangyin y Youcai, 2017). Sin embargo, aprovechar los biosólidos en los rellenos sanitarios, puede aumentar la generación de	Sociales

olores ofensivos y presencia de vectores en la zona, disminuyendo el grado de aceptación de dicha alternativa.

Análisis ambiental de la alternativa

Impactos ambientales generados durante la etapa de operación, cierre y abandono

- *Generación de empleo
- *Generación de material particulado
 - *Consumo de combustible
 - *Generación de ruido
- *Generación de material particulado
 - *Generación de vectores
 - *Generación de olores ofensivos
- *Agotamiento de la capacidad del relleno sanitario
- *Disminución de la vida útil del relleno sanitario
 - *Incremento en los ingresos municipales
- *Incremento en la oferta de aprovechamiento de los lodos
 - *Incremento en los ingresos municipales
- *Disminución de la colmatación de lodos en la laguna
- *Incremento en la demanda de recolección y disposición final de lodos
 - *Incremento en los costos de gestión de lodos
- *Cambio en la disponibilidad de aprovechamiento de los lodos
 - *Incremento en la vida útil del relleno sanitario
 - *Generación de residuos sólidos

Ambientales

Aprovechamiento: Cemento

Criterios

Especificaciones técnicas

Usar biosólidos como reemplazo de cemento permite disminuir los problemas ambientales generados por la inadecuada disposición de los residuos sólidos. Al mismo tiempo, dicho aprovechamiento permite reducir los costos económicos al disminuir el uso de cemento.

Disponibilidad de recursos

La alternativa tiene disponibilidad de recursos

Rendimiento de la alternativa

Usar biosólidos como reemplazo de cemento, permite aumentar la porosidad de los compuestos, en donde dicho aumento es benéfico al reducir la densidad del hormigón, mejorar la resistencia a la congelación-descongelación, resistencia al fuego, aislamiento térmico y propiedades acústicas. No obstante, con dicha alternativa se puede disminuir la resistencia a la compresión y se emite una gran cantidad de CO₂ al reaccionar la portlandita alcalina con el material orgánico de los biosólidos (Roychand et al., 2021).

Técnicos

\$29.723.500

Económicos

Aceptación de la alternativa

El aprovechamiento de los lodos como material de construcción permite la eliminación eficaz de materiales peligrosos, donde los contaminantes presentes son estabilizados e inmovilizados. Además, dicho aprovechamiento disminuye la explotación incontrolada de los recursos naturales necesarios para la producción de materiales de construcción (Goyal et al., 2019).

Sociales

Análisis ambiental de la alternativa

Impactos ambientales generados durante la etapa de planeación del aprovechamiento, operación y cierre y abandono

Ambientales

<ul style="list-style-type: none"> *Generación de empleo *Incremento en la oferta de aprovechamiento de los lodos <ul style="list-style-type: none"> *Generación de residuos sólidos *Consumo de materia prima *Consumo de combustible *Incremento en los ingresos municipales *Disminución de la colmatación de lodos *Disminución de la disposición inadecuada de residuos <ul style="list-style-type: none"> *Incremento en la vida útil de los rellenos sanitarios *Cambio en el uso de los lodos *Consumo de combustible *Incremento en la demanda de recolección y disposición final de lodos <ul style="list-style-type: none"> *Incremento en los costos de gestión de lodos *Cambio en la disponibilidad de aprovechamiento de los lodos 	E
Anexo	

Fuente. Autores

**Análisis de las alternativas de tratamiento (deshidratación y estabilización) con base en el AHP
(proceso analítico jerárquico)**

Tabla 19.

Convenciones de los criterios del AHP

Numeración de criterios
Criterios técnicos
1.Especificaciones técnicas
2.Disponibilidad de recursos
3.Zona disponible
4.Rendimiento
Criterios económicos
5.Presupuesto
6.Servicios industriales básicos
Criterios sociales
7.Aceptación de la alternativa
8.Mano de obra
Criterios ambientales
9. Emisiones
10. Residuos líquidos
11.Residuos sólidos
12. Material vegetal
13. Vectores
14. Consumo de energía

Fuente. Autores

Alternativas de deshidratación de lodos

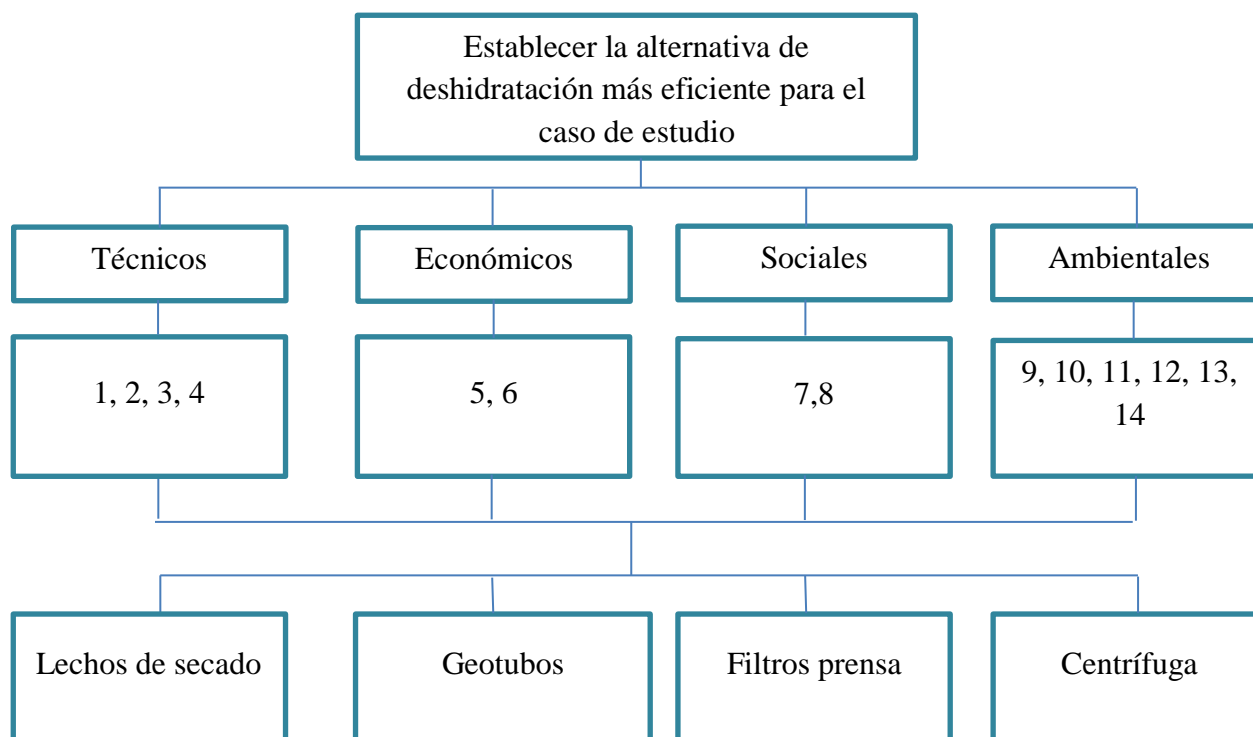


Figura 26. Esquema del AHP de las alternativas de deshidratación

Tabla 20.

Vectores de prioridad total para las alternativas de deshidratación

Alternativas de deshidratación	Vector de prioridad total
Lechos de secado	0,244
Geotubo	0,270
Filtro prensa	0,225
Centrífuga	0,260
Anexo	F

Fuente. Autores

Alternativas de estabilización de los lodos

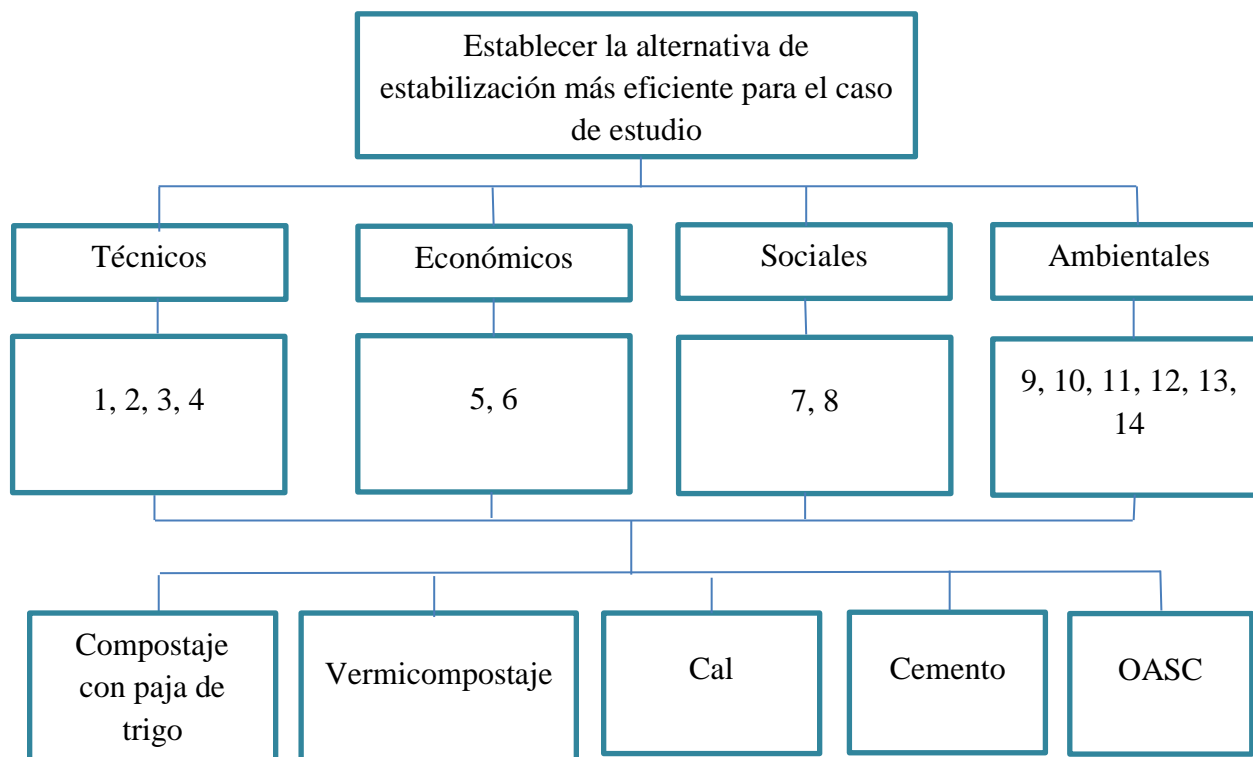


Figura 27. Esquema del AHP de las alternativas de estabilización

Tabla 21.

Vectores de prioridad total para las alternativas de estabilización

Alternativas de estabilización	Vector de prioridad total
Compostaje	0,265
Vermicompostaje	0,239
Cal	0,206
Cemento	0,141
OASC	0,149
Anexo	F

Fuente. Autores

Alternativas eficientes para la gestión de los lodos de la laguna de estabilización de Ábrego, Norte de Santander

- **Alternativa de extracción**

Teniendo en cuenta el análisis de las alternativas de extracción con base a criterios técnicos, económicos, sociales y ambientales (ver tabla 15), se estableció la extracción por vía húmeda como la alternativa más eficiente para la extracción periódica de los lodos. Dicha extracción a pesar de ser económicamente más costosa y requerir mayor mano de obra para la operación, permite extraer los lodos de la laguna sin necesidad de desviar el afluente al río algodonal, lo cual mitiga la generación de impactos ambientales en el recurso hídrico, permitiendo que la laguna funcione normalmente mientras se realiza el mantenimiento periódico de la misma. Al mismo tiempo, la aceptación de la extracción por vía húmeda es mayor al prevenir la contaminación de la fuente hídrica antes mencionada y no estar influenciada por las condiciones meteorológicas de la zona.

- **Alternativa de deshidratación**

Con base en el análisis de las alternativas de deshidratación teniendo en cuenta criterios técnicos, económicos, sociales y ambientales y el proceso analítico jerárquico (ver figura 26, tabla 16 y 20 y anexo F), el geotubo es la alternativa de deshidratación más eficiente. La alternativa con geotubos incluye el uso de la draga para realizar la extracción por vía húmeda, unificando el proceso de extracción y deshidratación de los lodos.

- **Alternativa de estabilización**

Con base en el análisis de las alternativas de estabilización teniendo en cuenta criterios técnicos, económicos, sociales y ambientales y el proceso analítico jerárquico (ver figura 27, tabla 17 y 21 y anexo F), el compostaje con paja de trigo es la alternativa de estabilización más eficiente.

- **Alternativa de aprovechamiento**

La alternativa de estabilización más eficiente fue el compostaje con paja de trigo, por lo tanto, el compost generado durante dicha estabilización puede ser aprovechado en el municipio de Ábrego como fertilizante. Dicho aprovechamiento permite aportarle nutrientes al suelo, mejorando las características fisicoquímicas del mismo. Además, aprovechar los lodos con paja de trigo como fertilizantes, permite aportarle valor a un residuo muchas veces desechado. Al mismo tiempo, Ábrego, es un municipio cuya actividad económica predominante es la agricultura, la cual se basa fundamentalmente en agregar plaguicidas y fertilizantes con el fin de mejorar los cultivos, por lo cual, brindar fertilizantes a partir de residuos orgánicos, puede ser una alternativa con gran viabilidad.



Figura 28. Esquema de las alternativas establecidas para la gestión de los lodos

Fuente. Autores

Por otro lado, el mantenimiento de la laguna de estabilización implica no sólo gestionar los lodos, sino que es importante tener presente las siguientes recomendaciones con el fin mantener la eficiencia del sistema de tratamiento:

- **Corte de vegetación:** Con el fin de prevenir daños en las estructuras y membranas de la laguna, se requiere el corte de la vegetación, evitando el crecimiento de arbustos o árboles en la zona. Además, con la vegetación se corre el riesgo de que esta obstruya completamente el tratamiento de las aguas residuales, ocasionando graves problemas ambientales.
- **Prevención de la corrosión:** Las lluvias presentes en la zona, pueden provocar que las estructuras de hierro como rejillas o compuertas sufran procesos de oxidación, afectando la movilidad de

estas y su normal funcionamiento. Es por ello que es recomendable aplicar pinturas anticorrosivas.

- Rejillas: Es recomendable limpiar las rejillas dos veces al día
- Desarenador: Limpieza una vez al mes
- Trampa de grasa: Limpieza una vez a la semana

6. Conclusiones

Con la presente investigación se evaluó el estado actual del sistema de tratamiento y se estimó un volumen de lodos remantes de 9.877 m³. De igual forma, se pudo determinar que la laguna de estabilización de Ábrego, carece de pretratamientos que permitan mejorar el tratamiento de las aguas residuales. Al mismo tiempo, se observó que en la laguna de estabilización no se llevan a cabo mantenimientos periódicos como extracción de lodos que evite la colmatación de los mismos.

Ahora bien, con base en la caracterización fisicoquímica y microbiológica de los lodos, los parámetros que sobrepasaron los valores máximos permisibles de la categoría A según el Decreto 1287 de 2014 son *Salmonella sp* y coliformes fecales. Por lo cual, con base en lo anterior, los lodos de la laguna se clasificaron como categoría B. La categoría B, aunque presenta mayores restricciones para el aprovechamiento de los lodos a diferencia de la categoría A, ofrece opciones de uso en la restauración de suelos, plantaciones forestales e insumo para fabricar materiales de construcción. No obstante, con base en las características fisicoquímicas y microbiológicas de los lodos, se evidenció la necesidad de analizar no sólo tratamientos con el fin de reducir la humedad presente, sino alternativas de estabilización que disminuyan la presencia de patógenos como *salmonella sp*, coliformes fecales y los demás contaminantes encontrados, minimizando los impactos ambientales al usar los lodos y la posible generación de olores ofensivos. Al mismo tiempo, establecer alternativas eficientes de gestión de lodos, permite ampliar las opciones de aprovechamiento de los mismos al cumplir con los valores máximos permisibles del Decreto 1287 de 2014, posibilitando el uso de los biosólidos en la agricultura, la cual es la actividad económica predominante en la zona de estudio.

Por lo cual, en la presente investigación se analizaron alternativas de extracción, deshidratación, estabilización y aprovechamiento de los lodos con base en diversos criterios y subcriterios, definiendo como alternativas eficientes de gestión de los lodos del caso de estudio, la extracción por vía húmeda, la deshidratación de los lodos con geotubos, la estabilización con compostaje con paja de trigo y el aprovechamiento de los lodos como fertilizantes.

Establecer alternativas de gestión de lodos permite cambiar la visión sobre ellos, ya que a pesar de que estos son considerados en su mayoría como residuos contaminantes inaprovechables, los biosólidos de las lagunas de estabilización de Ábrego pueden aumentar la fertilidad en los suelos, aportando gran cantidad de nutrientes, convirtiéndolos en un recurso sostenible con potencial económico.

ANEXOS

Anexo A

Percepción de los actores directamente impactados por la problemática de la laguna y los encargados de su operación. Información detallada.

- **Percepción del director de la unidad de servicios públicos**

Según el director de la unidad de servicios públicos, el sistema de tratamiento de aguas residuales recibe mantenimientos periódicos, los cuales están programados para realizarse cada ocho días. En dichos mantenimientos se llevan a cabo actividades de poda de árboles y arbustos, corte de vegetación y arrastre de lodos, pero no se previene la corrosión de las estructuras.

Los mantenimientos realizados en el mes de Julio del 2020, permitieron la extracción de algunos lodos de la laguna. Dicha extracción se llevó a cabo mediante una excavadora, mientras el material de los canales de entrada y salida se limpió manualmente. Ahora bien, los lodos extraídos no reciben ningún tratamiento para ser aprovechados, estos se disponen al lado de la laguna de estabilización y en el relleno sanitario. Según el funcionario, la laguna estuvo fuera de funcionamiento alrededor de tres años por la ruptura del tubo de entrada del agua residual y los lodos acumulados. Él consideraba que, aunque dicho sistema está a cargo de la alcaldía de Ábrego, Norte de Santander, cada proyecto necesita el apoyo de la autoridad ambiental competente.

Ahora bien, en algunas ocasiones se han presentado quejas por parte de la comunidad debido a la generación de malos olores, sin embargo, el funcionario consideraba que no ha sido nada grave. Para él, la laguna está funcionando bien, sin embargo, podría realizarse el tratamiento de los lodos y disponer de zonas adecuadas para el almacenamiento de ellos. Además, él cree necesario tratar los lodos, porque cuando son removidos se dificulta mucho su transporte por la gran cantidad de humedad que estos presentan (Torrado, 2020).

- **Percepción de la Corporación autónoma regional de la Frontera Nororiental (CORPONOR) y la alcaldía de Ábrego**

Según CORPONOR, dicha laguna de estabilización lleva operando alrededor de 36 años. En el año 2020 se realizó la inspección y vigilancia de la laguna junto con el alcalde de Ábrego y se observó la ruptura del tubo de entrada de las aguas residuales, con lo cual se le solicitó al alcalde la intervención urgente de dicha falla, con el objetivo de tratar las aguas residuales oportunamente. Por su parte, el alcalde manifestó que se realizó la contratación oportuna del personal para la extracción de algunos lodos y el material vegetal, lo cual permitió la reactivación del funcionamiento de la laguna de estabilización. Ahora bien, en cuanto al material removido como hojarasca, este es dispuesto en terrenos cercanos a la laguna y los lodos son transportados al relleno sanitario (CORPONOR, 2020) (Jácome, 2020).

- **Percepción del operario de la laguna de estabilización**

Según Vergel (2020), trabajador de la laguna de estabilización, dicho sistema fue construido en 1985, es decir que tiene 36 años. Las funciones que desarrolla dicho trabajador están enmarcadas en realizar el mantenimiento de la laguna, por lo cual él asiste cada ocho días al área donde se encuentra el sistema de tratamiento con el fin de realizar la remoción del material flotante y corte de vegetación, aunque no se limpia el canal de entrada. En cuanto a las estructuras en el sistema, según Vergel (2020), anteriormente se contaba con una rejilla en el canal de entrada, pero hoy en día ésta no está. Por otra parte, con el mantenimiento llevado a cabo en el 2020, se reemplazaron algunas estructuras del sistema de tratamiento, esto debido a que presentaban corrosión. Además, en ese mismo año, se realizó la reparación del tubo de entrada del agua residual porque estaba fracturado, de igual forma, se removieron algunos lodos. Sin embargo, el trabajador manifestó que no se tiene una fecha programada para la remoción de los lodos, puesto que prácticamente se espera a que falle el sistema y luego se programa la extracción. Ahora bien, los lodos removidos son dispuestos en el relleno sanitario o en los lotes vecinos de la laguna.

Por otra parte, la alcaldía, según él, ha considerado tratar los lodos, pero hasta el momento no se ha visto reflejado dicho tratamiento, es por ello que tampoco los lodos son aprovechados. Además, él manifestaba que aproximadamente hace cuatro años, fue tan grande la acumulación de lodos en la laguna, que incluso algunos animales bovinos como las vacas podían ingresar a la misma, viendo con gran importancia la implementación de alternativas que eviten que los lodos colmaten nuevamente el sistema de tratamiento.

El trabajador de la laguna expresaba que se podría tener en cuenta las siguientes opciones para mejorar el sistema de tratamiento:

- Mantenimientos periódicos en el sistema de tratamiento, incluyendo la extracción de los lodos, de modo que se evite la generación de malos olores y la presencia de vectores en el sistema

- Apoyo y compromiso de los entes encargados del funcionamiento de laguna de estabilización
- Tratamiento oportuno de los lodos

- **Percepción de la comunidad aledaña de la laguna**

Para la comunidad aledaña a la laguna de estabilización, dicho sistema actualmente está funcionando, aunque este no recibe la atención y compromiso requerido por parte de las autoridades competentes. En cuanto a los impactos generados por la laguna, ellos manifestaban que aunque en varias ocasiones se quejaron por la generación de olores ofensivos y la presencia de vectores, no se recibió ninguna solución. Para la comunidad, se construyó un depósito de materia orgánica y no una laguna para tratar las aguas residuales, puesto que la compuerta de desagüe la mayoría del tiempo permanece abierta, ocasionando que las aguas residuales lleguen al río Algodonal prácticamente en las mismas condiciones en que entraron a la laguna. Incluso aseguran que casi nunca ven al operario encargado del sistema de tratamiento, puesto que sólo se reciben visitas de los entes encargados cuando se presentan quejas de la comunidad después de mucho tiempo (Torrado y Álvarez, 2021).

Anexo B

Análisis de alternativas de extracción de lodos residuales

1. Extracción de lodos por vía seca

1.1 Criterios técnicos

Especificaciones técnicas

Tabla 22.

Especificaciones técnicas de la extracción de lodos por vía seca

Proceso	Descripción
Interrupción y desviación del afluente de la laguna	Suspensión de los flujos de agua que entran en dicho sistema. El desvío del agua podría realizarse a otra laguna existente. No obstante, en dicho sistema no se cuenta con otra laguna, por lo cual se tendría que desviar el afluente al cuerpo hídrico Algodonal.
Reducción del volumen de agua mediante bombeo	Extracción del agua residual del sistema de tratamiento mediante bombeo
Reducción del volumen de agua mediante evaporación	Evaporación del agua residual restante en el sistema de tratamiento por medios naturales
Secado de los lodos a la intemperie	Disminución de la humedad de los lodos presentes en la laguna de estabilización por medio del secado natural
Retiro de lodos con maquinaria	Remoción de los lodos con maquinaria pesada como excavadoras, teniendo presente que la extracción de los lodos por medio de dichos equipos no altere la capa superficial de la laguna de estabilización.
Retiro de los lodos	Remoción manual de la capa fina de los lodos que la maquinaria pesada

utilizando mano de obra	no puede retirar
Almacenamiento	Almacenamiento de los lodos extraídos en terrenos que permitan continuar el proceso de secado hasta su aprovechamiento o disposición final.
Rellenado de la laguna limpiada y la puesta en marcha	Reactivación del sistema de tratamiento

Fuente. Adaptado de Chunga (2014)

Tabla 23.

Especificaciones técnicas de la electrobomba

Parámetro	Característica
Material	Hierro
Diámetro Descarga	2 pulgadas
Potencia	10 HP
Voltaje	220 V
Diámetro de succión	2 pulgadas
Consumo de energía	7.152 kW

Fuente. Adaptado de Homecenter (s.f)

- Planta eléctrica

Alimentación: Diesel

Voltaje: 110/220V

Disponibilidad de recursos

Tabla 24.

Disponibilidad de recursos en Colombia de la extracción por vía seca

Materiales	SI	NO
Personal	X	
Excavadora	X	
Electrobomba de 10 hp	X	
Manguera de 2" x 20 m	X	
Abrazaderas	X	
Palas	X	
Carretillas	X	
Guantes	X	
Tapabocas	X	
Traje anti fluido	X	
Gafas	X	
Energía	X	
Planta eléctrica	X	

Fuente. Autores

Zona disponible para implementar la alternativa

La extracción de lodos por vía seca requiere de una zona para desviar el afluente del sistema de tratamiento con el fin de permitir la evaporación natural del agua residual.

Rendimiento de la alternativa

El rendimiento de la alternativa de extracción de los lodos por vía seca, depende en gran medida de que la operación de secado se lleve a cabo en meses con alta radiación solar con el fin de permitir la correcta evaporación del agua en la laguna, lo cual conllevaría una gran cantidad de tiempo. De igual forma, el uso de la electrobomba para bombear el agua residual de la laguna, requiere un voltaje de 220 Voltios, lo cual podría disminuir el rendimiento de la extracción por vía seca al no contar con dichos requerimientos. Por otra parte, el uso de maquinaria pesada para la remoción de los lodos en la laguna, implicaría la alteración de las estructuras superficiales del sistema de tratamiento, adicionando costo para la reparación de la misma (Oakley, 2005). No obstante, la poca profundidad de la laguna facultativa permite que la remoción de los lodos sea más fácil a comparación de otros sistemas de tratamiento. El tiempo requerido puede ser de seis meses.

1.2 Criterios económicos

Tabla 25.

Presupuesto de la extracción por vía seca

Ítem	Materiales	Unidades	Cantidad	Valor unitario \$	Valor total \$
Administrativos	Técnico	Días	10	35.000	350.000
	Operario 1	Días	102	30.000	3.060.000
	Operario 2	Días	102	30.000	3.060.000
	Capacitaciones	Días	10	60.000	600.000
Materiales e insumos	Alquiler de Excavadora	Hora (8 horas al día por 10 días)	80 horas	95.000	7.600.000
	Electrobomba de 10 hp	Un	1	2.765.900	2.765.900
	Manguera de 2" x 20 m	Un	2	120.000	240.000
	Abrazaderas de 105 mm a 127 mm	Un	10	3.255	32.550
	Palas	Un	2	30.000	60.000
	Carretillas	Un	2	120.000	240.000

Par de guantes	Pares	214	449	96.086
Tapabocas	Días	214	458	98.012
Traje anti fluido	Un	4	60.000	240.000
Consumo de energía	kW	7.152	576	4.119.552
Planta eléctrica	Un	1	3.000.000	3.000.000
Gafas	Un	2	8.000	16.000
Total \$				25.578.100

Fuente. Autores

Servicios industriales

La alternativa de extracción por vía seca requiere de servicios industriales como electricidad, diesel y gasolina.

1.3 Criterios sociales

Aceptación de la alternativa

La extracción de los lodos por vía seca mejora la eficiencia del sistema de tratamiento al aumentar el volumen útil de almacenamiento en el mismo. Al mismo tiempo, evita que la laguna de estabilización se colmate nuevamente. No obstante, la aceptación de la alternativa puede reducir, ya que dicha extracción requiere que el agua se desvíe, contaminando el cuerpo hídrico que abastece de agua potable al municipio de Ocaña y sus alrededores al no contar con otra laguna.

Mano de obra de la alternativa

La extracción de los lodos mediante vía seca requiere que los encargados del bombeo y extracción de los lodos, estén capacitados, esto con el fin de impedir que se alteren las estructuras superficiales de la laguna. Actividades como la interrupción y desviación del afluente de la laguna conlleva un día, pero la reducción del volumen de agua mediante bombeo puede requerir aproximadamente 15 días, el secado de los lodos a la intemperie tres meses o más y el retiro de los lodos manualmente y con maquinaria alrededor de 25 días con el fin de poner en marcha nuevamente el sistema de tratamiento.

1.4 Criterios ambientales

Tabla 26.

Análisis ambiental de la extracción por vía seca

Proceso	Subproceso	Actividad	Aspectos ambientales	Medio
---------	------------	-----------	----------------------	-------

Operación	Extracción de lodos	Interrupción y desviación del afluente de la laguna al cuerpo hídrico	*Generación de residuos líquidos	Abiótico
		Reducción del volumen de agua mediante bombeo	*Consumo de energía *Generación de residuos líquidos *Consumo de combustible	
		Reducción del volumen de agua mediante evaporación	*Generación de residuos sólidos *Generación de gases y olores	
		Secado de los lodos a la intemperie	*Generación de gases y olores *Proliferación de vectores	
		Retiro de lodos con maquinaria	*Consumo de combustible *Generación de residuos sólidos	
		Retiro de lodos manualmente	*Generación de residuos sólidos	
		Transporte de lodos removidos	*Generación de residuos sólidos *Consumo de combustible	
		Almacenamiento de lodos	*Generación de olores ofensivos *Proliferación de vectores	
		Reactivación del sistema de tratamiento	*Generación de residuos líquidos	
Cierre y abandono	Retiro de la infraestructura	*Generación de residuos sólidos *Consumo de combustible *Generación de residuos líquidos		

Fuente. Autores

2. Extracción de lodos por vía húmeda

2.1 Criterios técnicos

Especificaciones técnicas

La alternativa consiste en el bombeo de los lodos de la laguna por vía húmeda sin necesidad de desviar el afluente, posteriormente el lodo bombeado es dispuesto en un contenedor para su almacenamiento y reducción de la humedad por sedimentación. Disponer los lodos bombeados en un contenedor, concede la posibilidad que estos lodos estén disponibles para recibir procesos de

deshidratación y estabilización que permitan disminuir el exceso de humedad presente y la posible presencia de contaminantes. De igual manera, los contenedores pueden tener una larga vida útil y son de fácil limpieza (Oakley, 2005).

Ahora bien, según Evans Colombia (s.f), la bomba de lodos tiene las siguientes características

- Bomba para lodos

Tipo: Sumergible

Potencia: 10 HP

Voltaje: 220 V

Paso de sólidos: 2,56 pulg

Diámetro de descarga: 4 pulg

Consumo Energético para 960 horas: 7.152 Kw

- Planta eléctrica
Alimentación: Diesel
Voltaje: 110/220V

- Características del contenedor del lodo

Contenedor con capacidad de almacenar y deshidratar los lodos

Contenedor totalmente cerrado con el fin de evitar olores desagradables

Disponibilidad de recursos

Tabla 27.

Disponibilidad de recursos en Colombia de la extracción por vía húmeda

Materiales	SI	NO
Personal	X	
Bomba de lodos	X	
Cemento	X	
Arena	X	
Manguera de 3"	X	
Manguera de 4"	X	
Contenedor	X	
Abrazaderas	X	
Energía	X	
Planta eléctrica	X	

Fuente. Autores

Zona disponible para implementar la alternativa

La laguna de estabilización cuenta con área disponible para implementar alternativas de 21.043 m². Ahora bien, la alternativa de extracción de lodos por vía húmeda, requiere que una vez los lodos se

bombeen, estos se almacenen en contenedores con el fin de permitir su sedimentación, requiriendo un área máxima de 300 m², lo cual permitiría la implementación de dicha alternativa en la laguna de estabilización.

Rendimiento de la alternativa

El rendimiento de la extracción por vía húmeda no está influenciado por las condiciones meteorológicas de la zona, ya que la extracción de los lodos mediante dicha alternativa se puede realizar cuando la laguna esté en funcionamiento, sin necesidad de desviar el afluente sin previo tratamiento al cuerpo hídrico receptor. Al mismo tiempo, el uso del contenedor evita que los lodos bombeados sean dispuestos en terrenos al aire libre, los cuales generarían problemas de olores ofensivos y proliferación de vectores en la zona. Sin embargo, el bombeo de lodos por vía húmeda, extrae mucha agua de la laguna, disminuyendo un poco el rendimiento de la alternativa, por tal motivo, el contenedor además de almacenar los lodos, debe reducir la humedad. Así mismo, se debe tener en cuenta que el confinamiento de los lodos previamente bombeados de la laguna hacia el contenedor, genera lixiviados, los cuales requieren de una gestión integral para evitar contaminación ambiental. El tiempo requerido puede ser de cinco meses.

2.2 Criterios económicos

Tabla 28.

Presupuesto de la extracción por vía húmeda

Ítem	Materiales	Unidades	Cantidad	Valor unitario \$	Valor total \$
Administrativos	Operario 1	Días	120	30.000	3.600.000
	Operario 2	Días	120	30.000	3.600.000
	Operario 3	Días	120	30.000	3.600.000
	Operario 4	Días	120	30.000	3.600.000
Materiales e insumos	Bomba de lodo	Un	2	13.170.895	26.341.790
	Cemento	Bultos(50 Kg)	200	25.500	5.100.000
	Manguera de 3" de 10 m	Un	2	82.000	164.000
	Arena	Kg	30.000	187,5	5.625.000
	Manguera de 4" de 6 m	Un	2	396.900	793.800
	Contenedor	Un	2	135.000.000	270.000.000
	Abrazaderas de 105 mm a 127 mm	Un	20	3.255	65.100
	Consumo de energía	kW	14.304	576	8.239.104

Planta eléctrica	Un	1	3.000.000	3.000.000
Total \$				333.728.794

Fuente. Autores

Servicios industriales

La alternativa de extracción por vía húmeda requiere de servicios industriales como electricidad, diesel y gasolina.

2.3 Criterios sociales

Aceptación de la alternativa

La alternativa puede ser aceptada ya que la extracción por vía húmeda permite bombear los lodos de la laguna de estabilización sin necesidad de detener la operación del sistema o desviar el afluente, evitando que dicho afluente sea dispuesto en el cuerpo hídrico abastecedor de agua potable sin ningún tratamiento, previniendo afectaciones en la salud de las personas del municipio de Ocaña y sus alrededores. Por otra parte, el contenedor debe permanecer cerrado con el fin de evitar olores desagradables.

Mano de obra de la alternativa

La extracción de los lodos por vía húmeda requiere ser desarrollada por personal debidamente capacitado en el tema, el cual conozca del tipo de bomba o draga y contenedor a usar. Igualmente, durante la operación del contenedor, se generan lixiviados, los cuales pueden contaminar el suelo y cuerpos hídricos con altas trazas de contaminantes como microorganismos patógenos o metales pesados, haciendo necesario que el personal realice una gestión integral de los mismos. De igual forma, la extracción de lodos por vía húmeda requiere que el personal tenga conocimiento sobre la capacidad de almacenamiento del contenedor, esto con el fin de evitar derrames del lodo bombeado.

2.4 Criterios ambientales

Análisis ambiental de las alternativas

Tabla 29.

Análisis ambiental de la extracción por vía húmeda

Proceso	Subproceso	Actividad	Aspectos ambientales	Medio
Construcción y montaje de	Preparación del sitio	Contratación de personal	*Generación de empleo	Socioeconómico

equipos		Limpieza del terreno	*Generación de residuos sólidos *Generación de material particulado	Abiótico
		Nivelación del terreno	*Remoción de la vegetación	Biótico
		Transporte de material	*Consumo de combustible *Generación de material particulado	
		Instalación de contenedores	*Consumo de materia prima	
Operación	Extracción de lodos	Bombeo de lodos	*Consumo de energía *Generación de residuos líquidos *Generación de residuos sólidos *Consumo de combustible	Abiótico
	Confinamiento de lodos en contenedores	Sedimentación y deshidratación de lodos en el contenedor	*Generación de residuos líquidos	
Cierre y abandono	Desmantelamiento de la alternativa	Retiro de la infraestructura	*Generación de residuos sólidos *Consumo de combustible *Generación de residuos líquidos	

Fuente. Autores

Anexo C

Análisis de alternativas de deshidratación de lodos residuales

1. Deshidratación por lechos de secado

1.1 Criterios técnicos

Especificaciones técnicas de la alternativa de lechos de secado

Geometría

Es recomendable implementar lechos de secado de forma rectangular para permitir la limpieza del lodo residual (Water Environment Federation (WEF), 2008). Para dicho estudio se analizó la alternativa de lecho de secado con cubierta, ya que con ello se evita que la precipitación altere el tiempo de secado

del lodo (Alcaldía de Ituango, 2008). Según el Ministerio de Desarrollo Económico (2000), el área requerida según la fuente del lodo sería entre 0,05-0,09 m² por habitante.

Ahora bien, con base en dicho dato, el área requerida para la construcción de los lechos de secado en la laguna de estabilización de Ábrego se determinó con base en la población del año 2019 de 16.290, (DANE, s.f) (Alcaldía de Ábrego, 2001).

$$\text{Área (A)} = (\text{Área / h abitante}) (h \text{ habitantes}) = (0,05 \text{ m}^2/\text{hab}) (16.290 \text{ hab}) = 814 \text{ m}^2$$

- Cálculo del área de cada cama del lecho de lodos (A1)

$$A1 = A/10 = 814 \text{ m}^2 / 10 = 81 \text{ m}^2$$

Con base en lo anterior se puede construir un total de diez camas, cada una de ellas con un área aproximada de 81 m², con 10 m de largo y 8 m de ancho. El lecho de secado se podría construir con una profundidad de 1,2 m, de los cuales 0,5 m son de borde libre, 0,15 m de lodo, 0,3 m de arena, 0,2 m de grava.

En cuanto a las paredes del lecho de secado, se puede construir dos paredes de 10 m de largo por 1 metro de alto y 0,25 m de espesor cada una, y dos paredes de 8 m de largo por 1 metro de alto y 0,25 m de espesor (Ministerio de Desarrollo Económico , 2000) (Moscoso, 2011). Por otro lado, es importante que se construya una placa en el lecho de secado, de modo que se eviten salpicaduras con el ingreso de los lodos en el sistema.

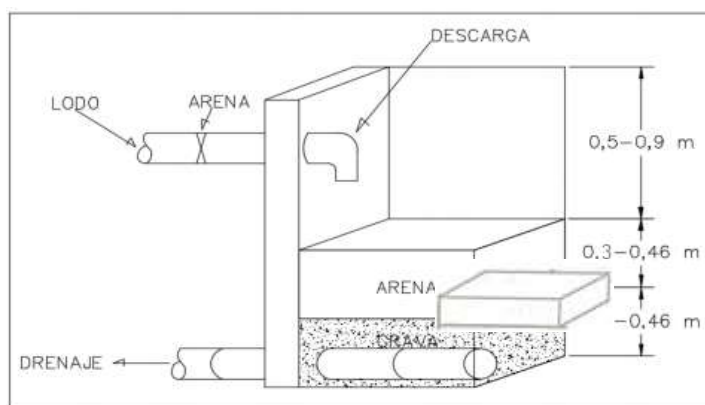


Figura 29. Esquema del lecho de secado

Fuente. Adaptado de Vargas (2016)

Además, según el Ministerio de Desarrollo Económico (2000), se recomienda las siguientes especificaciones:

- Medios de drenaje

Se recomienda usar como medios de drenaje la arena y grava

- Espesores

Espesor de la capa de grava entre 0,2 y 0,46 m y la capa de arena entre 0,3 y 0,46 m

- Granulometría

Las partículas de arena a usar en los lechos de secado deben estar limpias, además, deben estar libres de materiales extraños como polvo, con tamaños del grano entre 0,003 y 0,075 m. Mientras la grava debería tener un diámetro entre 0,003 y 0,025 m.

- Recolección de lixiviados

La recolección de lixiviados se debe efectuar a partir de tuberías, bien sea de plástico o teja de arcilla vitrificada. Dichas tuberías tendrían un diámetro no menor de 0,1 m, con una pendiente del 1%. Las tuberías deben ir por debajo de la capa de grava y con el fin de evitar procesos de infiltración y el fondo del lecho de secado se sellaría con una membrana impermeable.

- Cubierta del lecho de secado

En los lechos de secado descubiertos puede ser más rápido el proceso de evaporación del agua residual de los lodos. No obstante, es importante que el lecho de secado esté cubierto con el fin de evitar que las precipitaciones de la zona alteren el tiempo de secado de los lodos.

- Especificaciones técnicas de la bomba para lodos según Evans Colombia (s.f)

Tipo: Sumergible

Potencia: 10 HP

Voltaje: 220 V

Paso de sólidos: 2,56 pulg

Diámetro de descarga: 4,00 pulg

Consumo Energético para 960 horas: 7.152 kW

- Planta eléctrica

Alimentación: Diesel

Voltaje: 110/220V

Disponibilidad de recursos

Tabla 30.

Disponibilidad de recursos en Colombia para la deshidratación por lechos

Materiales	SI	NO
Personal	X	
Membrana impermeable	X	

Ladrillos para muro	X
Cemento	X
Tubos para techo	X
Láminas de zinc para techo	X
Arena para pared	X
Grava para lecho	X
Arena para lecho	X
Tubería de entrada de lodo 4" x 1m	X
Tubería de salida de lixiviados 4" x 1m	X
Electrobomba de 10 HP	X
Manguera de 3" de 10 m	X
Manguera de 4" de 6 m	X
Abrazaderas de 105 mm a 127 mm	X
Codos	X
Válvula	X
Tubos para el techo	X
Energía	X
Planta eléctrica	X

Fuente. Autores

Zona disponible

La laguna de estabilización cuenta con 21.043 m² disponibles para implementar alternativas. Los lechos de secado requerirían con base en la población y el tipo de lodo, de un área aproximadamente de 814 m², por lo tanto, si sería posible la implementación de dicha alternativa.

Rendimiento de la alternativa

Los lechos de secado pueden mantener las concentraciones de fósforo y nitrógeno en los lodos, elementos con gran valor nutricional. Al mismo tiempo, los metales pesados presentes en los lodos pueden permanecer por debajo del límite permisible fijado por el Decreto 1287 de 2014. Igualmente, teniendo en cuenta la investigación realizada por Castellanos et al., (2018), dicha alternativa permite reducir la humedad presente en los lodos, pasando del 97% al 6%, luego de tratar dichos lodos en los lechos por cinco meses. La reducción de humedad permite disminuir los microorganismos patógenos presentes en los lodos (Alfayate et al., 2004). Según Sperling y Chernicharo (2005), deshidratar los lodos por medio de lechos de secado, permite obtener un nivel de sólidos secos del 30 y 40%.

1.2 Criterios económicos

Tabla 31.

Presupuesto de la deshidratación por lecho de secado

Materiales	Ítem	Unidades	Cantidad	Valor unitario\$	Valor total \$
Administrativos	Operario 1	Día	45	30.000	1.350.000
	Operario 2	Día	45	30.000	1.350.000
Materiales e insumos	Membrana impermeable	m	4960	5.000	24.800.000
	Ladrillos para muro	Ladrillo	17.280	500	8.640.000
	Cemento	Bultos(50 Kg)	120	25.500	3.060.000
	Tubos para techo	Tubos	80	120.000	9.600.000
	Láminas de zinc para techo	Lámina	500	30.000	15.000.000
	Arena para la pared	kg	4000	187,5	750.000
	Grava para lecho	M ³	240	21.000	5.040.000
	Arena para lecho	M ³	120	23.000	2.760.000
	Tubería de entrada de lodo 4" x 1m	m	252	18.000	4.536.000
	Tubería de salida de lixiviados 4" x 1m	m	105	18.000	1.890.000
	Electrobomba de 10 HP	Un	1	13.170.895	13.170.895
	Manguera de 3" de 10 m	Un	1	82.000	82.000
	Manguera de 4" de 6 m	Un	1	396.900	396.900
	Abrazaderas de 105 mm a 127 mm	Un	10	3.255	32.550
	Codos	Un	20	2.150	43.000
	Válvula	Un	20	18.300	366.000
	Consumo de energía	kW	7.152	576	4.119.552
	Planta eléctrica	Un	1	3.000.000	3.000.000
	Tubos para el techo	Un	100	120.000	12.000.000
	Total \$				

Fuente. Autores

Servicios industriales básicos

La alternativa de extracción por lechos de secado requiere de servicios industriales como electricidad, diesel, gasolina y agua.

1.3 Criterios sociales

Aceptación de la alternativa

Los lechos de secado pueden manejar altas cargas de lodos y no requerir consumo de energía, aunque para su implementación se necesitan zonas grandes y alta mano de obra para la remoción de los lodos, lo cual podría disminuir la aceptación de su implementación. De igual manera, la operación de los

lechos de secado puede generar olor, presencia de vectores como moscas y requerir el manejo de lixiviados. Al mismo tiempo, las precipitaciones de la zona pueden alterar la eficiencia de los lechos de secado al retardar el tiempo de deshidratación.

Mano de obra de la alternativa

La operación del lecho de secado, comienza con el bombeo de los lodos desde los contenedores hasta los lechos de secado. Estos lechos de secado están constituidos por capas de grava y arena, lo cual permite la filtración en dicho sistema y la deshidratación de los lodos por procesos de evaporación, aunque dicha evaporación depende de las propiedades del lodo, el tiempo de exposición y las condiciones climatológicas de la zona y a medida que el lodo se va deshidratando, se empiezan a observar grietas.

El correcto funcionamiento de los lechos de secado se logra con personal capacitado. Dentro de las funciones del personal, se encuentra la remoción de los lodos de manera manual. Dicha remoción se puede realizar después de 10 a 15 días según las condiciones meteorológicas (Tilley et al., 2018). En los lechos de secado es importante el control de plantas e insectos, el control de olores, la remoción del lodo antiguo, junto con escarificar la capa de arena con el fin de reducir la compactación de la misma, mejorando su capacidad de filtración. Así mismo, la capa de arena requiere reponerse en ciertas ocasiones debido a que durante el proceso de filtrado se pierde cierta cantidad (Builes, 2010).

De igual manera, es importante tener en cuenta para una correcta operación de los lechos de secado, que el personal controle el drenaje, el cual se debe verificar visualmente, observando si el proceso de escurrimiento se está desarrollando o no. En caso de que no se esté presentando un buen drenaje, sería importante revisar que las capas de arena y grava no estén colmatadas. De la misma forma, con el fin de conocer el tiempo que tarda en deshidratarse los lodos, se podría registrar diariamente el nivel de descenso del lodo. Mientras tanto, el retiro de los lodos dependerá en gran medida de la necesidad de introducir un nuevo lote de lodos en el lecho de secado y de la deshidratación alcanzada por el lodo. El lodo deshidratado podría ser removido mediante el uso de palas o rastrillos con base en la humedad de los mismos (Organización Panamericana de Salud, 2005).

1.4 Criterios ambientales

Tabla 32.

Análisis ambiental de la deshidratación por lecho de secado

Proceso	Subproceso	Actividad	Aspectos ambientales	Medio
Construcción	Preparación del sitio	Limpieza del terreno	*Remoción de la vegetación	Biótico
			*Generación de residuos sólidos	Abiótico

		Nivelación del terreno	*Generación de material particulado *Generación de residuos sólidos	
		Transporte de materiales	*Consumo de combustible *Generación de material particulado	
		Contratación de personal	*Generación de empleo	Socioeconómico
		Construcción de zona de implementación	*Consumo de materia prima *Generación de residuos sólidos *Consumo de agua	
Operación	Disposición de lodos en el lecho de secado	Deshidratación de lodos	*Generación de residuos líquidos *Generación de olores *Generación de residuos sólidos *Consumo de combustible	Abiótico
Cierre y abandono	Desmantelamiento	Retiro de la infraestructura	*Generación de residuos sólidos *Consumo de combustible	

Fuente. Autores

2. Deshidratación de lodos con geotubos

2.1 Criterios técnicos

El uso de geotubos parte de bombear los lodos del fondo sin abatir previamente el nivel del agua con una draga o bomba, luego, se disponen los lodos en el geotubo, dejando sedimentar y deshidratar los subproductos, de modo que el agua residual proveniente de la deshidratación de los lodos se retorne al sistema de tratamiento.

El volumen de lodos a remover del sistema de tratamiento es de aproximadamente 7.901 m^3 , para ello se supone una densidad aparente del lodo de $1,2 \text{ g/cm}^3$ y un porcentaje de sólidos suspendidos totales del 2%. Con dicha extracción por vía húmeda se espera contener alrededor de 5.845 m^3 de lodo.

Ahora bien, el tiempo estimado para dicha alternativa, incluyendo movilización, configuración inicial, operación y desmovilización es de 130 días de 8 horas de operación. En donde esos 130 días se podrían distribuir de la siguiente manera: 30 días para localización de equipos, personas y configuración

inicial, 90 días para la operación de bombeo y confinamiento en el geotubo y 10 días para procesos de desmovilización.



Figura 30. Extracción y confinamiento de lodos

Fuente. Autores

Equipos e insumos

- Planta eléctrica

Alimentación: Diesel

Voltaje: 110/220V

- Sistema de Bombeo



Figura 31. Dragas eléctrica

Fuente. MUD CAT Liquid Waste Technology (2018)

Por otra parte, según Mud Cad (2018), la draga presenta las siguientes especificaciones técnicas:

- ❖ Ancho: 2,5 m
- ❖ Alto: 2,1 m
- ❖ Peso: 2.630 Kg
- ❖ Potencia: 20HP
- ❖ Voltaje de alimentación: 220V
- ❖ Consumo energético en 720 horas: 10.728 kW

Por otra parte, con el fin de mejorar el proceso de deshidratación de los lodos se deben añadir polímeros eficientes. Es por ello que a continuación se define el sistema de dosificación del polímero a tener en cuenta, con base en las características de los lodos.

- Sistema Dosificación de Polímero
 - a. Tanques y Agitadores para el polímero
 - b. Bomba de equipo dosificador de polímero
 - c. Tablero eléctrico para la dosificación del polímero
 - d. Mangueras, tuberías y mezclador
 - e. Suministro del polímero

Como se mencionó anteriormente, la operación de bombeo y confinamiento de los lodos conlleva 90 días, requiriendo la presencia del siguiente personal:

1. Un director de proyecto
 2. Dos operarios para descapote, nivelación del terreno, retiro y transporte de material sobrante
 3. Un operador de draga
 4. Un técnico para manejo de dosificación de polímero
 5. Dos técnicos para deshidratación
 6. Un técnico de bomba
- En cuanto al geotubo, se requiere las siguientes unidades:
Unidades geotubo de 120ft (18,29 m) x 100 ft (30,48m): (6 unidades)
Las bolsas de deshidratación tienen una circunferencia de 9,1 m a 25 m, dependiendo de la cantidad de lodos (Worley, Bass y Vendrell, 2008), es por ello que para un volumen de lodos de aproximadamente 7.877 m^3 , se requieren 6 unidades de geotubo, cada una con las siguientes características:

- a. Circunferencia 120 ft (18,29m)
 - b. Ancho 60 ft (18,29m)
 - c. Largo 100 ft (30,48m)
 - d. Altura 7.5 ft (2,29m) Altura Diseño
- Celdas de Deshidratación
Se requiere un área de 40 m de ancho x 240 m de largo para las celdas de deshidratación. Cabe resaltar que el área a usar puede disminuir, pero se requeriría la extracción de los primeros geotubos instalados. Por otra parte, el efluente proveniente del geotubo retornaría nuevamente a la laguna. Ahora bien, dentro del presupuesto se incluye el suministro del sistema de drenaje y de Geomembrana HDPE 30 mils (milésima de pulgada) o equivalente.

Cabe resaltar, que, con el fin de lograr acotar la información antes mencionada, es necesario que la empresa prestadora del servicio de bombeo y confinamiento del lodo, analice tanto el agua como el lodo a confinar, con el fin de conocer la eficiencia de la alternativa y el polímero a usar.

Disponibilidad de recursos

Tabla 33.

Disponibilidad de recursos en Colombia para la deshidratación con geotubos

Materiales	SI	NO
Personal	X	
Draga	X	
Geotubos	X	
Polímeros	X	
Mangueras	X	
Geomembrana	X	
Planta eléctrica	X	

Fuente. Autores

Zona disponible

La laguna de estabilización cuenta con área disponible para implementar alternativas de 21.043 m² y la instalación de los geotubos requiere la instalación temporal de una celda de deshidratación de 40 m de ancho x 240 m de largo, observando la disponibilidad para implementar dicha alternativa. Además, cabe resaltar, que el área de instalación disminuiría al retirar los primeros geotubos instalados.

Rendimiento de la alternativa

Según Pablo et al., (2019), el uso de geotubos no suele ser una alternativa eficiente en la deshidratación de los lodos debido a que según su investigación realizada en el año 2019, la humedad de los lodos en la laguna de estabilización estudiada estaba en un rango de 89,87 % y 86,49%, mientras que la humedad de los lodos en los geotubos registró valores de 89,79% y 86,04%, no observando grandes diferencias entre los valores, posiblemente porque el proceso de deshidratación en los geotubos puede ser lento, pues existen descargas de nuevos lodos por bombeo al geotubo, en donde también la membrana del geotubo puede no permitir la liberación del agua debido a que los microporos de la misma pueden presentar suciedad (Malacatus, Chuquitarco y Bastidas, 2019). No obstante, según la revista TENCATE (2007), se han estudiado los geotubos en procesos de deshidratación de lodos en lagunas, permitiendo estimar que más del 93% de los lodos se logran extraer, con reducciones de humedad hasta un 25%. Además, según Geo Soluciones (2019), en un proyecto realizado en Santander, se logró una humedad final de -56%, confinando 848,03 ton de lodo.

Por otro lado, en dicha alternativa es viable el uso de polímeros biodegradables con el fin de mejorar el rendimiento del proceso de deshidratación al permitir la floculación de los sólidos suspendidos, lo cual no altera los posibles aprovechamientos de los lodos deshidratados.

2.2 Criterios económicos

Tabla 34.

Presupuesto de la deshidratación con geotubos

Ítem	Valor \$
Operario 1 (Descapote, nivelación del terreno)	450.000
Costos directos de instalación	810.666.666
Administrativos	90.750.000
Consumo energético	3.179.328
Imprevistos	20.000.000
Total \$	925.045.994

Fuente. Autores

Servicios industriales

La alternativa de deshidratación con geotubos requiere servicios industriales como electricidad, diesel y gasolina.

2.3 Criterios sociales

Aceptación de la alternativa de deshidratación con geotubos

Los geotubos tienen una gran reducción del volumen de los lodos, no obstante, requieren un gran espacio para su implementación, lo cual genera un gran impacto visual en la zona en que se instalan debido a su gran tamaño. Igualmente, dichos geotubos pueden ser muy pesados cuando están llenos, por lo que es muy complicado desplazarlos (Rivera V. , 2016). Sin embargo, el área requerida para su implementación puede ser temporal, además son de fácil operación y bajo costo de mantenimiento, permitiendo que los lodos dragados del sistema de tratamiento, sean confinados para su deshidratación. Dicha alternativa se puede utilizar sin añadir productos, aunque para mejorar el proceso se recomienda el uso de polímeros y floculantes. Esta alternativa consume muy poca energía, además de lograr una clarificación del agua, lo cual aumentaría la posibilidad de ser aceptada por la comunidad en general y las partes interesadas (Rodríguez y Vizcardo, 2019).

Mano de obra de la alternativa

La correcta operación de la alternativa de deshidratación requiere de personal capacitado ya que las bolsas de deshidratación requieren una limpieza periódica con el fin de evitar que crezca vegetación a su alrededor, lo cual impida su correcto funcionamiento (Bastidas y Chuquitarco, 2019). De igual forma, los geotubos deben manipularse adecuadamente, de modo que se evite el desgarramiento de los mismos durante el mantenimiento (Steffenino, 2019).

De igual manera, la deshidratación de lodos con geotubos, requiere ser operada por personal que conozca el tipo de draga a usar, la cantidad de geotubos a instalar y la cantidad y tipo de polímeros a usar en el proceso de deshidratación que mejore la eficiencia de la alternativa. Por otra parte, en Colombia, existen empresas que prestan el servicio de bombeo y confinamiento de lodos, disminuyendo el grado de dificultad a la hora de implementar dicha alternativa.

Según G & G Soluciones con tecnología de punta (2014), los geotubos requieren de mano de obra calificada para supervisar los siguientes funcionamientos de la alternativa (ver figura 32).

Confinamiento: El lodo se bombea desde la laguna de estabilización hasta los geotubos, en donde además es agregado el polímero con el fin de lograr que los lodos se aglomeren y el agua se separe.

Drenaje: El agua drena fuera del geotubo, permitiendo la reducción del volumen del material contenido, donde el efluente del geotubo retorna nuevamente a la laguna de estabilización.

Consolidación: Luego de culminado el ciclo de llenado y drenaje de los lodos, el geotubo puede ser dispuesto en el relleno sanitario y los lodos extraídos pueden ser aprovechados según sus características fisicoquímicas y microbiológicas.



Figura 32. *Funcionamiento de los geotubos*

Fuente. (G & G Soluciones con tecnología de punta, 2014)

El uso de geotubos para deshidratación de lodos no requiere de una operación compleja. Ofrece ventajas como la disminución del volumen del material que ingresa, puesto que el lodo pierde mucha humedad. Además, los geotubos pueden reducir los contaminantes del efluente al retener los sedimentos, los cuales en la superficie concentran contaminantes como metales pesados. Igualmente, la adición de polímeros puede ayudar a retener otro tipo de contaminantes. Por otro lado, el material dragado, como se mencionó anteriormente, puede ser aprovechado, mientras que los geotubos usados en la deshidratación, pueden permanecer definitivamente en el lugar del proyecto o ser dispuestos en el relleno sanitario acorde con sus características. Según Pedocchi et al., (2011), los geotubos usados en la deshidratación de los

sedimentos del Canal do Fundao, en Río de Janeiro, fueron revitalizados, cubriéndolos con el fin de crear un parque arbolado sobre los geotubos.

2.4 Criterios ambientales

Tabla 35.

Análisis ambiental de la deshidratación con geotubos

Proceso	Subproceso	Actividad	Aspectos ambientales	Medio
Construcción y montaje de equipos	Preparación del sitio	Contratación de personal	*Generación de empleo	Socioeconómico
		Limpieza del terreno	*Generación de residuos sólidos *Generación de material particulado *Generación de residuos sólidos	Abiótico
		Nivelación del terreno	*Remoción de vegetación	Biótico
		Transporte de material	*Consumo de combustible *Generación de material particulado	
Operación	Extracción de lodos	Dragado de lodos	*Consumo de energía *Generación de residuos líquidos *Generación de residuos sólidos	Abiótico
			Adición del polímero y disposición de lodos en el geotubo	
	Confinamiento de lodos en geotubo	Deshidratación de lodos en el geotubo	*Generación de residuos líquidos	
		Retorno del efluente del geotubo a la laguna	*Generación de residuos líquidos	
		Retiro de lodos deshidratados	*Generación de residuos sólidos *Consumo de combustible	
Cierre y abandono	Desmantelamiento de la alternativa	Retiro de la infraestructura	*Generación de residuos sólidos	

*Consumo de combustible
*Generación de residuos líquidos

Fuente. Autores

3. Deshidratación de lodos con filtros prensa

3.1 Criterios técnicos

Especificaciones técnicas de la alternativa de filtro de prensa

Con el fin de estimar el filtro prensa requerido para tratar los lodos de la laguna de estabilización de Ábrego, es necesario realizar previamente la prueba del lodo en filtros prensa escala, esto con el fin de determinar los tiempos de las carreras de filtración y los químicos que deben agregarse al lodo para mejorar el proceso.

La realización de las pruebas en los filtros escala requiere el envío de una muestra de 20 a 50 Kg con el fin de determinar la eficiencia del proceso, ejecutando diversos ensayos, entre los cuales está la determinación del tipo de lona más adecuado para filtrar la muestra. Además, mediante la prueba, se podría evaluar el uso de sustancias químicas para mejorar la eficiencia del filtrado.

El filtro prensa consiste en la deshidratación de los lodos previamente extraídos. Ahora bien, los filtros prensa pueden tratar diversos volúmenes de lodos dependiendo de su capacidad. Es por ello que, para el caso de estudio, se tuvo en cuenta un filtro prensa con las siguientes especificaciones:

Especificaciones técnicas del filtro prensa según AGUATEC S.A.S (s.f):

Dimensiones: 1,84 x 1,02 x 1,3 (Largo, Alto, Ancho)

Volumen total de la cámara de filtración: 50 Litros (lodos deshidratados)

Material placas: Polipropileno

Número placas móviles: 9

Número de placas fijas: 2

Dimensiones Placa: 500 mm X 500 mm X 50 mm

Espesor de Torta: 25 mm.

Costo del filtro prensa incluye: Bomba neumática y bandeja de recolección de lodos

Consumo de energía: Entre 40 y 60 kWh/t (Zhang, y otros, 2017)

Ahora bien, según Evans Colombia (s.f), la bomba de lodos tiene las siguientes características:

- Bomba para lodos

Tipo: Sumergible

Potencia: 10 HP

Voltaje: 220 V

Paso de sólidos: 2,56 pulg

Diámetro de descarga: 4,00 pulg

Consumo Energético para 960 horas: 7.152 kW

- Planta eléctrica
Alimentación: diesel
Voltaje: 110/220V

- Acondicionamiento

Por otra parte, deshidratar directamente los lodos mediante un filtro de prensa sin tratamiento previo, logra una sequedad del 30% aproximadamente (Estruagua, 2019). No obstante, el uso de acondicionadores permite mejorar dicha deshidratación. Es por ello que, según Zhang et al., (2017), se podría acondicionar con Na_2SiO_3 (silicato de sodio), FeCl_3 (cloruro férrico) y cenizas volantes. Para 300 g de lodo, las dosis óptimas de acondicionadores de lodo son: 10 g de FeCl_3 con una proporción de 0,25 M, 5 g de cenizas volantes y 4 g de Na_2SiO_3 .

- Cubierta

Con el fin de evitar el deterioro del filtro prensa y un mal funcionamiento, se requiere que estos sistemas posean una cubierta que evite el ingreso de precipitaciones al sistema de deshidratación de lodos.

Disponibilidad de recursos

Tabla 36.

Disponibilidad de recursos en Colombia para la deshidratación con filtro prensa

Materiales	SI	NO
Personal	X	
Filtro prensa	X	
Zinc	X	
Tuberías	X	
Cemento	X	
Arena	X	
Mangueras	X	
Abrazaderas	X	
Isotanque	X	
Bomba de lodos	X	
Energía	X	
Planta eléctrica	X	

Fuente. Autores

Zona disponible

La laguna de estabilización cuenta con 21.043 m² disponibles para implementar alternativas. El filtro prensa con base en las dimensiones del mismo y la cubierta, requeriría un área de aproximadamente 9m², contando con disponibilidad suficiente para la implementación de dicha alternativa.

Rendimiento de la alternativa

El uso del filtro prensa permite obtener una sequedad del 30% aproximadamente (Estruagua, 2019). Sin embargo, acondicionar previamente el lodo, permite reducir la humedad hasta un 45%, aunque se debe tener presente los acondicionadores a usar, los cuales pueden limitar el aprovechamiento de los lodos. Como se mencionó anteriormente, Zhang et al., (2017), acondicionó previamente los lodos usando Na_2SiO_3 (silicato de sodio), FeCl_3 (cloruro férrico) y cenizas volantes. La adición de cloruro férrico no generaría problemas para el aprovechamiento de los lodos en el suelo, esto debido a que dicho producto químico es esencial para el desarrollo vegetal, no clasificándose como peligroso. Además, agregar la cantidad adecuada, permite lograr mejoras en los suelos (Chaves, 2018). Por su parte, las cenizas volantes pueden aprovecharse como materias primas para la generación de fertilizantes junto con los lodos o como materiales de construcción. Además, dichas cenizas pueden tener la capacidad de usarse como adsorbente de metales, manteniendo su potencial de aprovechamiento como materiales de construcción (Carmona et al., 2017). Ahora bien, el silicato de sodio ha sido usado en diversos campos de la industria (Galindo y Avellaneda, 2016) y puede ser usado en la estabilización de suelos al estar presente sales de calcio diluidas en agua, generando agentes cementantes, los cuales proporcionan mayor resistencia, rigidez en los suelos (Perret, 2015).

3.2 Criterios económicos

Tabla 37.

Presupuesto de la deshidratación por filtro prensa

Ítem	Materiales	Unidades	Cantidad	Valor unitario \$	Valor total \$
Administrativos	Operario 1	Días	90	30.000	2.700.000
	Operario 2	Días	90	30.000	2.700.000
	Técnico	Días	60	80.000	4.800.000
Materiales e insumos	Filtro de prensa(50L)(bomba neumática – bandeja de recolección de torta)	Un	1	37.390.000	37.390.000
	Prueba de filtro prensa	Un	1	400.000	400.000
	Instalación del equipo	Días	15	80.000	1.200.000
	Zinc (Lámina de 2,40 m x 0,9 m)	Un	2	30.000	60.000
	Tubería de techo y soporte(6m cada uno)	m	18	20.000	360.000
	Cemento (Bulto de 50 Kg)	Bultos	2	25.500	51.000
	Arena	Kg	300	187,5	56.250
	Tubería para transportar el lodo 4" x 1m	m	100	18.000	1.800.000

Manguera de 3" de 10 m	Un	1	82.000	82.000
Manguera de 4" de 6 m	Un	1	396.900	396.900
Abrazaderas de 105 mm a 127 mm	Un	10	3.255	32.550
Isotanque (1000 ml)	Un	1	2.615.000	2.615.000
Bomba de lodos	Un	1	13.170.895	13.170.895
Consumo de energía	kW	64.752	576	37.297.152
Planta eléctrica	Un	1	3.000.000	3.000.000
Total \$				108.111.747

Fuente. Autores

Servicios industriales

La alternativa de deshidratación con filtros prensa requiere servicios industriales como electricidad, diesel, gasolina y agua.

3.3 Criterios sociales

Aceptación de la alternativa

Los filtros de prensa según Haro (2016), permiten obtener los filtrados más limpios a comparación con otros sistemas de filtrado. Los filtros prensa pueden tener un uso versátil al permitir tratar lodos de diferentes calidades, además, tienen un bajo costo en comparación con otros sistemas (Brito, 2019). No obstante, se requiere detener el filtro para retirar el lodo, trabajando de manera discontinua. De igual forma, la tela filtrante requiere una limpieza apropiada o su regeneración continua (Morsch et al., 2020). Los filtros prensa necesitan equipos mecánicos para ejercer la compresión de los lodos, lo cual podría generar ruido y la operación de dicha alternativa generaría olores, disminuyendo un poco la aceptación de la alternativa (Alarcón, 2016).

Mano de obra de la alternativa

El filtro de prensa requiere ser operado por personal capacitado en el área, es por tal que se podría capacitar al encargado de los mantenimientos de la laguna de estabilización de Ábrego (Rodríguez, 2013).

El filtro prensa requiere de personal calificado que comprenda las estructuras y funcionamiento de la alternativa para su correcta operación (ver figura 33) (Brito, 2019).

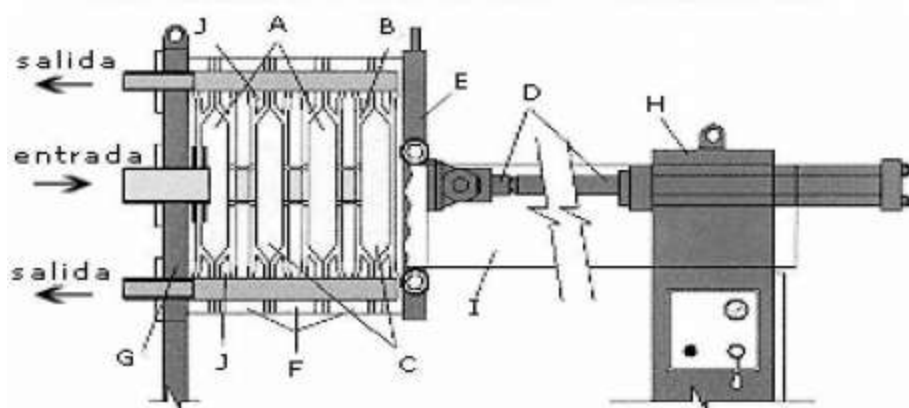


Figura 33. Esquema del filtro prensa

Fuente. (Brito, 2019)

Según Sparks (2012), el filtro prensa puede presentar las siguientes dificultades durante su operación lo cual exige de mano de obra calificada para la operación y mantenimiento:

- La cantidad de placas que constituyen los filtros prensa podría complicar los procesos de limpieza, por lo cual, los fabricantes del equipo desarrollaron un sistema de lavado, sin embargo, este sólo permite remover la suciedad en un solo lado.
- El lodo deshidratado en los filtros prensa podría requerir su retiro de manera manual al tener muy poco peso o quedarse pegados en las telas filtrantes.
- En algunas ocasiones el acondicionamiento de los lodos no es automático, por lo cual el sistema puede llegar a enlentecer. Al mismo tiempo, la remoción de los lodos conlleva a que el filtro opere intermitentemente, aumentando con ello el tiempo de deshidratación de los lodos. De igual forma, la tela del filtro prensa pueden tener una limitada vida útil

3.4 Criterios ambientales

Tabla 38.

Análisis ambiental de la deshidratación con filtro prensa

Proceso	Subproceso	Actividad	Aspectos ambientales	Medio
Construcción	Preparación del sitio	Limpieza del terreno	*Remoción de la vegetación	Biótico
		Nivelación del terreno	*Generación de residuos sólidos *Generación de material particulado	Abiótico

			*Generación de residuos sólidos	
		Transporte	*Consumo de combustible *Generación de material particulado	
		Contratación de personal	*Generación de empleo	Socioeconómico
		Construcción de zona de implementación	*Consumo de materia prima *Generación de residuos sólidos *Consumo de agua	
Operación	Disposición de lodos en el filtro prensa	Deshidratación de lodos	*Generación de residuos líquidos *Generación de olores *Generación de residuos sólidos *Generación de ruido *Consumo de energía *Consumo de combustible	Abiótico
Cierre y abandono	Desmantelamiento	Retiro de la infraestructura	*Generación de residuos sólidos *Consumo de combustible	

Fuente. Autores

4. Deshidratación con centrífugas

4.1 Criterios técnicos

Especificaciones técnicas de la alternativa de centrifugación

La centrífuga es una alternativa de tratamiento que permite tanto la deshidratación como el espesamiento de los lodos. Sin embargo, en el caso del lodo primario, como es este el caso, no es muy recomendable el uso de las centrífugas debido a la alta capacidad de sedimentación de los lodos y los altos contenidos de sustancias abrasivas que pueden alterar el normal funcionamiento de la alternativa. De igual manera, la centrífuga suele requerir altos voltajes para su funcionamiento, requiriendo de plantas eléctricas, aumentando el costo de la alternativa, la cual además requiere extremados cuidados durante el mantenimiento (Universidade da Coruña, Inditex, 2015). La deshidratación por centrífuga puede tener un consumo de energía entre 60-80 kWh/t (Universidade da Coruña, Inditex, 2015).

Según Evans Colombia (s.f), se definen las especificaciones de la bomba de lodos para bombear los lodos desde la tolva de almacenamiento de los lodos extraídos hasta la centrífuga:

- Bomba para lodos
Tipo: Sumergible
Potencia: 10 HP
Fase: 3
Voltaje: 220 V
Paso de sólidos: 2,56 pulg
Diámetro de descarga: 4,00 pulg
Revoluciones por minuto (RPM): 1750
Consumo Energético para 960 horas: 7.152 kW

- Planta eléctrica
Alimentación: Diesel
Voltaje: 110/220V

A pesar de que existen diversos tipos de centrífugas, se decidió evaluar el decantador centrífugo ya que puede alcanzar altos niveles en la clarificación del líquido proveniente de la deshidratación de los lodos (Universidade da Coruña, Inditex, 2015).

Disponibilidad de recursos

Tabla 39.

Disponibilidad de recursos en Colombia de la deshidratación con centrifuga

Materiales	SI	NO
Personal	X	
Centrífuga	X	
Zinc	X	
Tubería	X	
Cemento	X	
Arena	X	
Mangueras	X	
Abrazaderas	X	
Bomba de lodos	X	
Planta eléctrica	X	
Energía	X	

Fuente. Autores

Zona disponible

La laguna cuenta con área de 21.043m² para la implementación de alternativas y la deshidratación por centrífuga es recomendable en plantas medianas y grandes sobre todo, pero no requieren grandes espacios para su implementación (Universidade da Coruña, Inditex, 2015).

Rendimiento de la alternativa

Según Gualoto (2016), la deshidratación por centrífuga puede ser un proceso fiable, cuya operación no requiere de mano de obra de manera continua. Al mismo tiempo, al no operar mediante tela filtrantes, se evita que los lodos se retengan en ellas, no haciendo necesaria la limpieza constante de las telas filtrantes. Igualmente, la deshidratación por centrifugación al ser un sistema cerrado, disminuye la generación de olores ofensivos (Semiyaga et al., 2017). No obstante, la operación de dicha deshidratación puede generar ruido y vibraciones, al mismo tiempo que puede tener un consumo energético alto, alrededor de 60 y 80 kWh/t (kilovatios hora por tonelada de lodo) y su eficiencia se puede ver limitada por la presencia de arenas en el sistema (Universidade da Coruña, Inditex, 2015). La centrifugación puede reducir hasta el 56% la humedad en el lodo (Semiyaga et al., 2017).

La centrifugación, aunque logra deshidratar los lodos, puede requerir velocidades de rotación muy altas. Por lo cual el uso de acondicionadores es estudiado con el fin de mejorar dicha deshidratación. Acondicionadores como aserrín logran reducciones de humedad del 89%, teniendo la ventaja de ser un producto biodegradable (Gold et al., 2016).

4.2 Criterios económicos

Presupuesto

Tabla 40.

Presupuesto de la deshidratación con centrífuga

Materiales	Ítem	Unidades	Cantidad	Valor unitario \$	Valor total \$
Administrativos	Técnico	Días	120	30.000	3.600.000
	Operario	Mensual	120	30.000	3.600.000
	Técnico	Días	10	80.000	800.000
Materiales e insumos	Centrífuga	Set	1	63.301.030	63.301.030
	Zinc (Lámina de 2,40 m x 0,9 m)	Un	2	30.000	60.000
	Tubería de techo y soporte(6m cada uno)	m	18	20.000	360.000
	Cemento (Bulto de 50 Kg)	Bultos	2	25.500	51.000
	Arena	Kg	300	187,5	56.250
	Tubería para transportar el lodo 4" x 1m	m	100	18.000	1.800.000
	Manguera de 3" de 10 m	Un	1	82.000	82.000
	Manguera de 4" de 6 m	Un	1	396.900	396.900
	Abrazaderas de	Un	10	3.255	32.550

105 mm a 127 mm				
Bomba de lodos	Un	1	13.170.895	13.170.895
Planta eléctrica	Un	1	3.000.000	3.000.000
Consumo de energía	kW	64.752	576	37.297.152
Total \$				127.607.777

Fuente. Autores

Servicios industriales

La alternativa de deshidratación con centrífuga requiere servicios industriales como electricidad, diesel, agua y gasolina.

4.3 Criterios sociales

Aceptación de la alternativa

Según Lee et al., (2002, como se citó en Semiyaga et al., 2017), la alternativa de espesamiento por centrifugación no genera olores desagradables ya que cuenta con una carcasa que los encierra, además tiene un costo de operación bajo. Sin embargo, la centrifugación puede generar molestias en la comunidad por la generación de ruido.

Con la centrifugación sin acondicionamiento se logra una sequedad entre el 20-25%, mientras con acondicionamiento se logra una reducción de 89% de humedad (Alfayate et al., 2004).

Mano de obra de la alternativa

La deshidratación por centrifugación a comparación con otros sistemas de tratamiento, no requiere mucho espacio para su implementación, además su operación puede ser automática dependiendo de la calidad y cantidad del lodo de entrada, garantizando su fácil operación, lo cual reduce la necesidad de personal y su manejo es continuo (Rivera, 2016).

Una correcta operación de la centrifugación demanda que el personal esté debidamente capacitado para controlar parámetros como:

- Velocidad del tambor
- Velocidad diferencial entre el tambor y el tornillo.
- Factores de alimentación de fango.
- Empleo de acondicionador

4.4 Criterios ambientales

Análisis ambiental

Tabla 41.

Análisis ambiental de la deshidratación con centrifuga

Proceso	Subproceso	Actividad	Aspectos ambientales	Medio
Construcción	Preparación del sitio	Contratación de personal	*Generación de empleo	Socioeconómico
		Limpieza del terreno	* Remoción de la vegetación	Biótico
		Nivelación del terreno	*Generación de residuos sólidos	
		Instalación de la alternativa	*Generación de material particulado *Generación de residuos sólidos *Consumo de combustible *Consumo de materia prima *Consumo de agua *Generación de residuos sólidos	
Operación		Operación de la centrifugadora	*Consumo de energía *Generación de residuos líquidos *Generación de residuos sólidos *Generación de ruido *Consumo de combustible	Abiótico
Cierre y abandono		Retiro de la infraestructura	*Generación de residuos sólidos *Consumo de combustible	

Fuente. Autores

Anexo D

Análisis de alternativas de estabilización de los lodos residuales

1. Estabilización compostaje con paja de trigo

1.1 Criterios técnicos

Especificaciones técnicas

El compostaje permite la biodegradación de la materia orgánica por medio de la actividad microbiológica (Medina, 2017). Dicha alternativa permite reducir contaminantes orgánicos y patógenos

de los lodos residuales (Lü et al., 2021). Ahora bien, en dicho trabajo se estudió el uso de agentes de cargas con el fin de obtener productos finales con una mejor calidad. Para ello se decidió estudiar la paja de trigo añadida al compostaje.

La paja de trigo es un recurso muy común, constituyendo la segunda materia prima de biomasa más abundante en el mundo, con gran potencial para usarse como agentes de carga en el compostaje (Talebniya, Karakashe y Angelidaki, 2010). De igual forma, se estudió el compostaje en pila o hilera con volteo periódico, puesto que dicho compostaje es una alternativa simple y económica, la cual se adecua a diversas cantidades de residuos sólidos (Vicencio et al., 2011).

Características a tener en cuenta del compostaje

*Por cada 335 kg de lodo se recomienda adicionar 16 kg de paja de trigo (Kebibeche, Khelil, Kacem y Harche, 2019).

*Humedad: Dicho parámetro es esencial para la supervivencia de los microorganismos presentes en el proceso de compostaje, manteniendo rangos de humedad entre el 50% - 60% (Donado, 2013). Es por ello que se recomienda cubrir las pilas de compostaje con películas plásticas. El proceso de compostaje suele durar alrededor de tres meses.

*Aireación: El oxígeno ayuda a la descomposición aerobia de la materia orgánica, permitiendo la supervivencia de los microorganismos. Además, evita la generación de olores ofensivos en el proceso de compostaje al reducir la probabilidad de presentarse digestión anaerobia (Donado, 2013). Con base en lo anterior, se recomienda voltear las pilas de compostaje cada 4 días, lo cual permite además la homogeneización de las mezclas (Kebibeche et al., 2019).

*Diseño de las pilas de compostaje: Se recomienda pilas con altos volúmenes, ya que los pequeños volúmenes pueden presentar variaciones de temperatura muy violentas. Igualmente, la altura de la pila debe ser entre 1,5 y 1,8 m, esto con el fin de lograr el intercambio de aire entre el interior de la pila y el exterior (Suárez et al., 2017). Para el presente trabajo se tuvo en cuenta las siguientes dimensiones (ver figura 34):

Volumen de compostaje = 40 m³

Base de la pila= 3 m

Altura de la pila= 1,5 m

Largo de la pila= 8,89 m

Número de pilas= $236 \text{ m}^3 / 40 \text{ m}^3 = 6$ pilas de compostaje

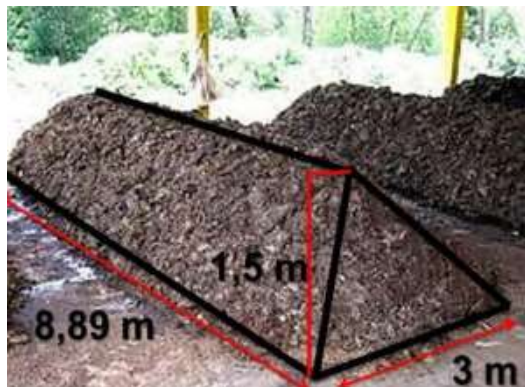


Figura 34. Dimensiones de la pila de compostaje

Fuente. (Suárez et al., 2017)

*Relación C/N: En el compostaje se recomienda una relación de C/N entre 25-35% con el fin de mantener en óptimas condiciones a los microorganismos, proporcionándoles nitrógeno para sintetizar proteínas y carbono para conseguir energía. Ahora bien, las partículas del material de soporte a agregar, en este caso la paja de trigo, deben tener un tamaño de aproximadamente 2 cm con el fin de permitir la circulación dentro de la pila de lodos (Donado, 2013).

*pH: Dicho parámetro tiende a definir el avance del proceso de compostaje, con acción directa sobre los procesos de los microorganismos. Al iniciar el proceso de compostaje se puede presentar un pH de 6,5, pero un pH entre 7 y 8 permite la maduración del compostaje, con una buena aireación (Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos(UAESP), 2018).

*Olor y color: El compost maduro se debe caracterizar por tener un olor agradable, el cual debe ser diferente al olor inicial, así mismo se debe caracterizar por un color marrón oscuro o negro (Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos(UAESP), 2018).

*Lixiviados: El líquido proveniente de la descomposición de la materia orgánica puede ser recolectado y reciclado entre las demás pilas. Para ello, es recomendable que las pilas de compostaje se

ubiquen en zonas con piso sólido o geotextiles, con cierta pendiente, lo cual permita la fácil recolección de lixiviados, evitando impactos en el medio ambiente (Ramírez y Gallego, 2016).

Por otro lado, según Córdova (2016), el compostaje comprende las siguientes fases:

La fase mesofílica, la cual comienza con la descomposición de compuestos degradables, generando reducciones del pH. La Fase termofílica, la cual se caracteriza por el aumento de la temperatura a más de 40° C, produciendo la muerte de ciertos microorganismos patógenos y dando lugar a la aparición de microorganismos termofílicos. La fase mesofílica II, en la cual la temperatura disminuye, apareciendo algunos organismos mesófilos, los cuales continúan con la degradación de polímeros como la lignina. Estas tres primeras fases son las más exigentes, las cuales pueden generar la aparición de olores desagradables. Finalmente, en la fase de maduración, el pH se estabiliza, con valores entre 7 y 8, mientras que la temperatura disminuye hasta alcanzar una temperatura ambiente (Soliva y Huerta, 2005).

Disponibilidad de recursos

Tabla 42.

Disponibilidad de recursos en Colombia de la estabilización de compostaje

Materiales	SI	NO
Personal	X	
Película plástica	X	
Paja de trigo	X	
Zinc	X	
Tubería	X	
pH metro	X	
Termómetro	X	
Rastrillo	X	
Pala	X	
Pico	X	
Carretilla	X	
Trituradora	X	
Balanza	X	
Guantes de pvc	X	
Tapabocas	X	
Botas de pvc	X	
Gafas	X	
Casco de seguridad	X	
Geomembrana	X	

Fuente. Autores

Zona disponible

La laguna de estabilización cuenta con 21.043 m² disponibles para implementar alternativas. Y la alternativa de compostaje requeriría de un área aproximada de 200 m² para estabilizar los lodos de la laguna.

Rendimiento de la alternativa

El compostaje permite estabilizar los lodos generados en el tratamiento de las aguas residuales, logrando reducciones de microorganismos patógenos y metales pesados por lixiviación (Yáñez, Alonso y Díaz, 2009). Según Kebibeche et al., (2019), el compostaje con el agente de carga paja de trigo, permitió reducciones de metales pesados como Pb, Zn, Cr, Ni, Cu y Cd, registrando reducciones de 18%, 21%, 42,44%, 44%, 48%, 87,5%, respectivamente. Al mismo tiempo, mantener la temperatura por encima de 50-55°C, permitió la destrucción de microorganismos patógenos presentes en los lodos residuales.

1.2 Criterios económicos

Presupuesto

Tabla 43.

Presupuesto de la estabilización de compostaje con paja de trigo

Materiales	Ítem	Unidades	Cantidad	Valor unitario \$	Valor total \$
Administrativos	Operario	Días	90	30.000	2.700.000
	Operario	Días	90	30.000	2.700.000
	Capacitaciones	Días	10	60.000	600.000
Materiales e insumos	Paja de trigo	Kg	11.722	5.000	58.610.000
	Películas plásticas	M	2.000	3.300	6.600.000
	Zinc (Lámina de 2,40 m x 0,9 m)	Un	200	30.000	6.000.000
	Tubería de techo y soporte (6m cada uno)	m	100	12.000	1.200.000
	pH metro	Un	1	108.000	108.000
	Termómetro	Un	1	154.000	154.000
	Rastrillo	Un	10	17.000	170.000
	Pala	Un	10	26.000	260.000
	Pico	Un	10	39.000	390.000
	Carretilla	Un	25	185.000	4.625.000
	Trituradora	Un	1	3.042.000	3.042.000
	Balanza	Un	1	190.000	190.000
	Guantes de pvc	Par	80	2.100	168.000
	Tapabocas	Días	250	458	114.500
	Botas pvc	Par	80	42.000	3.360.000
	Gafas	Un	2	8.000	16.000
Casco de seguridad	Un	80	25.000	2.000.000	
Geomembrana	m	200	5.000	1.000.000	

Total \$	94.007.500
----------	------------

Fuente. Autores

Servicios industriales

La alternativa de estabilización de compostaje con paja de trigo requiere de servicios industriales como agua, electricidad y gasolina.

1.3 Criterios sociales

Aceptación de la alternativa

Como se mencionó anteriormente, dentro de las fases del compostaje se puede producir olores desagradables. No obstante, dichos olores se pueden prevenir con una correcta aireación, evitando la descomposición anaerobia de los lodos. Al mismo tiempo, el proceso de compostaje podría generar la presencia de vectores como moscas, haciendo necesario el control de dicho parámetro (Cordova, 2016).

Mano de obra de la alternativa

La alternativa de estabilización debe evitar la falta de aireación, por lo cual se requiere de personal que realice un volteo periódico de las pilas y que además garantice que las partículas tengan el tamaño óptimo para permitir la oxigenación. Igualmente, el personal debe controlar varios factores en el compostaje como el pH, la humedad, la temperatura, la relación C/N, con el fin de permitir una adecuada operación de la alternativa (Ge et al., 2015).

1.4 Criterios ambientales

Análisis ambiental

Tabla 44.

Análisis ambiental de la estabilización de compostaje con paja de trigo

Proceso	Subproceso	Actividad	Aspectos ambientales	Medio
		Limpieza del terreno	*Remoción de la vegetación	Biótico
Construcción	Preparación del sitio	Nivelación del terreno	*Generación de residuos sólidos	Abiótico
			*Generación de material particulado	
			*Generación de residuos sólidos	
		Transporte de materia sobrante	*Consumo de combustible	

			*Generación de material particulado	
		Contratación de personal	*Generación de empleo	Socioeconómico
		Construcción de zona de compostaje	*Consumo de materia prima	
Operación	Conformación de pilas de compostaje	Estabilización de lodos	*Generación de olores *Generación de residuos sólidos *Consumo de agua *Consumo de materia prima *Generación de emisiones atmosféricas *Generación de residuos líquidos	Abiótico
Cierre y abandono	Desmantelamiento	Retiro de la infraestructura	*Generación de residuos sólidos *Consumo de combustible	

Fuente. Autores

2. Estabilización con vermicompostaje

2.1 Criterios técnicos

Especificaciones técnicas

El vermicompostaje se analizó con la lombriz roja (*Eisenia foetida*). A continuación, se describen las características ambientales y técnicas de la *Eisenia foetida* que inciden en la operatividad del vermicompostaje:

1. Clasificación taxonómica

Tabla 45.

Clasificación taxonómica de la lombriz Eisenia foetida

Clasificación taxonómica	
Reino	Animal
Subreino	Metazoa
Phylum	Protostomía
Grupo	Anélida
Orden	Oligochaeta
Familia	Lumbricidae
Especie	<i>Eisenia foetida</i>

Fuente. (Hurtado, 2015)

Según Restrepo et al., (2007), la lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*) requiere las siguientes condiciones ambientales para su desarrollo:

- **Humedad:** Mantener una humedad de aproximadamente el 70% permite que la lombriz se pueda deslizar en el lodo, facilitando además la ingesta de alimento. La reducción en la humedad puede provocar un déficit en la oxigenación, causando la muerte de las lombrices.
- **Riego:** Es importante evitar excesos de agua que produzcan encharcamientos, lo cual pueda conllevar a desarrollar procesos de fermentación anaerobia.
- **Aireación:** La aireación permite la correcta respiración de las lombrices, permitiendo a la vez una buena reproducción de las mismas.
- **Temperatura:** Es recomendable mantener las lombrices en temperaturas que oscilen entre 12 -25 °C, lo cual permita el crecimiento de las mismas durante el vermicompostaje de lodos.
- **pH:** El pH óptimo es de 7, sin embargo, puede soportar ambientes ácidos y alcalinos, aunque se arriesga la productividad de las lombrices.

Tipo de vermicompostaje

Existen diferentes tipos de vermicompostaje, no obstante, según Ramírez (2020) y Marquina y Martínez (2016), el tipo de vermicompostaje en camas pueden resultar eficientes para los lodos residuales.

Especificaciones técnicas del vermicompostaje

El vermicompostaje mediante el uso de camas puede tener una dimensión de 1,0 m de ancho por 3,0 m de largo con una altura de 0,6 m que permita la aireación del sistema, dejando espacios entre cada cama de aproximadamente 0,5 m (Hurtado, 2015). El material de construcción del vermicompostaje puede ser madera reciclada o estibas, además, cada una de las camas deben estar cubiertas con plástico de polietileno negro con el fin de gestionar los lixiviados generados durante el vermicompostaje. Por otro lado, con el fin de evitar impactos en las lombrices que alteren su normal funcionamiento, se recomienda que las camas de vermicompostaje cuenten con cubiertas o techos. Además, con el fin de mantener la oscuridad dentro del sistema se pueden instalar cortinas de poli sombra, ya que las lombrices son fotofóbicas (Equipo Técnico de Educación Ambiental (ETEA), Unidad de Montevideo Rural, Departamento de Sistemas Ambientales, 2018). Según Restrepo (2017), por cada metro cuadrado de cama se puede adicionar 1 Kg de lombriz californiana.

Disponibilidad de recursos

Tabla 46.

Disponibilidad de recursos en Colombia de la estabilización de vermicompostaje

Materiales	SI	NO
Personal	X	
Madera	X	
<i>Eisenia foetida</i>	X	
Polisombra	X	
Plástico de polietileno	X	
Zinc	X	
Tubería	X	
pH- metro	X	
Termómetro	X	
Rastrillo	X	
Pala	X	
Pico	X	
Carretilla	X	
Guantes de pvc	X	
Tapabocas	X	
Botas de pvc	X	
Gafas	X	
Casco de seguridad	X	

Fuente. Autores

Zona disponible

La laguna de estabilización cuenta con 21.043 m² disponibles para implementar alternativas. Y la alternativa de vermicompostaje requeriría de un área de aproximadamente 600 m² para estabilizar los lodos de la laguna.

Rendimiento de la alternativa

El vermicompostaje es una alternativa de tratamiento de lodos la cual involucra la acción conjunta tanto de las lombrices como de microorganismos. Diversos estudios han evidenciado el rendimiento de dicha alternativa. Según Srivastava (2005), el vermicompostaje con *Eisenia foetida*, permite reducir la toxicidad de los lodos, disminuyendo además la concentración de metales pesados como Plomo, Níquel, Cobre y Cromo en lixiviados de lodos. Al mismo tiempo, el vermicompostaje con dicha especie de lombriz, permite aumentar el porcentaje de nutrientes como fósforo, potasio y nitrógeno, elementos de gran utilidad en la agricultura, evidenciando el gran beneficio del vermicompostaje en la conversión de lodos residuales (Garg et al., 2006). Al mismo tiempo, según Contreras (como se citó en Gupt y Garg, 2008), dicho vermicompostaje permite reducir microorganismos patógenos como Huevos de helmintos, *Salmonella sp* y coliformes fecales en los lodos.

No obstante, a pesar de que las lombrices permiten reducir microorganismos patógenos y metales pesados en los lodos, las lombrices acumulan metales pesados en los tejidos corporales, siendo un riesgo

ambiental al incorporar sustancias peligrosas en la cadena trófica (Suleiman et al., 2017). Al mismo tiempo, el vermicompostaje puede generar olores desagradables producto de materiales descompuestos que no fueron ingeridos por las lombrices. Así mismo, el lodo seco puede ocasionar la presencia de hormigas en las camas, disminuyendo la población de lombrices (Hurtado, 2015). El vermicompostaje tiene como desventaja el requerimiento de temperatura por debajo de los 35°C, ya que superar dicha temperatura puede afectar la lombriz, afectando el manejo de volúmenes grandes de lodos. De igual manera, durante el vermicompostaje se pueden emitir amoníaco entre el 8% y 15% provocando óxido nitroso y la pérdida de nitrógeno (Velasco, Ferrera, Almaraz y Parkinson, 2016).

2.2 Criterios económicos

Presupuesto

Tabla 47.

Presupuesto de la estabilización con vermicompostaje

Materiales	Ítem	Unidades	Cantidad	Valor unitario \$	Valor total \$
Administrativos	Operario	Días	90	30.000	2.700.000
	Operario	Días	90	30.000	2.700.000
	Capacitaciones	Días	10	60.000	600.000
	Madera	m ²	400	10.000	4.000.000
	<i>Eisenia foetida</i>	Kg	420	8.000	3.360.000
	<i>Polisombra</i>	m ²	40	2.250	90.000
	<i>Plástico de polietileno(2m de ancho)</i>	m ²	400	1150	460.000
Materiales e insumos	Zinc (Lámina de 2,40 m x 0,9 m)	Un	314	30.000	9.420.000
	Tubería de techo y soporte (6m cada uno)	m	300	12.000	3.600.000
	pH-metro	Un	1	108.000	108.000
	Termómetro	Un	1	154.000	154.000
	Rastrillo	Un	10	17.000	170.000
	Pala	Un	10	26.000	260.000
	Pico	Un	10	39.000	390.000
	Carretilla	Un	25	185.000	4.625.000
	Guantes de pvc	Par	80	2.100	168.000
	Tapabocas	Días	250	458	114.500
	Botas pvc	Par	80	42.000	3.360.000
	Gafas	Un	2	8.000	16.000
	Casco de seguridad	Un	80	25.000	2.000.000
	Total \$				

Fuente. Autores

Servicios industriales

La alternativa de estabilización de vermicompostaje requiere de servicios industriales como agua y gasolina.

2.3 Criterios sociales

Aceptación de la alternativa

La alternativa de vermicompostaje permite estabilizar los lodos residuales, obteniendo un producto aplicable en la agricultura, siendo una alternativa sencilla y económicamente viable. Aunque durante dicho proceso, el vermicompostaje genera lixiviados y malos olores por la degradación anaerobia de los lodos, lo cual podría disminuir la aceptación de dicha alternativa.

Mano de obra de la alternativa

La alternativa de estabilización con vermicompostaje requiere de personal capacitado que garantice las especificaciones técnicas tanto de la lombriz *Eisenia foetida* como del vermicompostaje, controlando factores como pH, humedad, temperatura, riego, aireación y manejo de lixiviados.

2.4 Criterios ambientales

Análisis ambiental

Tabla 48.

Análisis ambiental de la estabilización con vermicompostaje

Proceso	Subproceso	Actividad	Aspectos ambientales	Medio
Construcción	Preparación del sitio	Limpieza del terreno	*Remoción de la vegetación	Biótico
		Nivelación del terreno	*Generación de residuos sólidos	Abiótico
		Transporte de materia sobrante	*Generación de material particulado *Generación de residuos sólidos	
		Contratación de personal	*Consumo de combustible *Generación de material particulado	
		Construcción de zona de vermicompostaje	*Generación de empleo	Abiótico

Operación	Conformación de camas de vermicompostaje	Estabilización de lodos	*Generación de olores *Generación de residuos sólidos *Consumo de agua *Generación de emisiones atmosféricas *Generación de residuos líquidos *Consumo de recursos naturales
Cierre y abandono	Desmantelamiento	Retiro de la infraestructura	*Generación de residuos sólidos *Consumo de combustible

Fuente. Autores

3. Estabilización con cal

3.1 Criterios técnicos

Especificaciones técnicas

La estabilización con cal permite reducir la concentración de microorganismos patógenos. Según la EPA (2003), dicha reducción de patógenos se puede obtener al aumentar el pH a más de 12, manteniendo en ese valor durante más de 72 horas. Al mismo tiempo, es importante conservar la temperatura por encima de 52°C por un tiempo de 12 horas. Elevar el pH crea un entorno que no es adecuado para que los microorganismos sobrevivan. En el caso de los microorganismos *E.coli*, soportan un pH máximo de 10,5 (Boost y Poon, 1998).

Según la Comisión Nacional del Agua (2015), establece que el material alcalino a usar, bien sea cal hidratada o viva, requiere analizar previamente el aporte de calcio. Al mismo tiempo, es importante tener conocimiento que la cal a usar no contenga impurezas que puedan afectar la efectividad de la estabilización. Se recomienda para el lodo primario una dosis de 0,10-0,15 kg Ca (OH)₂ /kg SS.

Disponibilidad de recursos

Tabla 49.

Disponibilidad de recursos en Colombia de la estabilización con cal

Materiales	SI	NO
Personal	X	
Cal hidratada	X	
Zinc	X	
Tubería	X	
pH metro	X	

Termómetro	X
Rastrillo	X
Pala	X
Pico	X
Carretilla	X
Balanza	X
Guantes de pvc	X
Tapabocas	X
Botas de pvc	X
Gafas	X
Casco de seguridad	X

Fuente. Autores

Zona disponible

La laguna de estabilización cuenta con 21.043 m² disponibles para implementar alternativas. Y la alternativa de estabilización con cal requeriría de un área de aproximadamente 400 m².

Rendimiento de la alternativa

Según Torres et al., (2009), la estabilización alcalina mediante cal viva o hidratada con rangos de 8 al 15% de dosis, permite eliminar microorganismos patógenos como coliformes fecales, *Salmonella sp* y huevos de helmintos. De igual manera, permite contenidos de humedad inferiores al 10-15% y reducciones del contenido de amoniaco (Valderrama et al., 2013). Según Liu et al., (2012), la estabilización alcalina permite reducir e inmovilizar metales pesados presentes en lodos residuales.

Además, la estabilización con cal permite que los metales pesados presentes en el lodo se precipiten por el aumento en el pH, favoreciendo la reducción de movilidad y solubilidad de los metales (Martínez y Feria, 2014).

3.2 Criterios económicos

Presupuesto

Tabla 50.

Presupuesto de la estabilización con cal

Materiales	Ítem	Unidades	Cantidad	Valor unitario \$	Valor total \$
Administrativos	Operario	Días	90	30.000	2.700.000
	Operario	Días	90	30.000	2.700.000
	Capacitaciones	Días	10	60.000	600.000
Materiales e insumos	Cal hidratada	Kg	24.544	825	20.248.800
	Zinc (Lámina de 2,40 m x 0,9 m)	Un	30	30.000	900.000
	Tubería de techo	m	85	12.000	1.020.000

y soporte (6m cada uno)				
pH-metro	Un	1	108.000	108.000
Termómetro	Un	1	154.000	154.000
Rastrillo	Un	10	17.000	170.000
Pala	Un	10	26.000	260.000
Pico	Un	10	39.000	390.000
Carretilla	Un	25	185.000	4.625.000
Guantes de pvc	Par	80	2.100	168.000
Tapabocas	Días	250	458	114.500
Balanza	Un	1	190.000	190.000
Botas pvc	Par	80	42.000	3.360.000
Gafas	Un	2	8.000	16.000
Casco de seguridad	Un	80	25.000	2.000.000
Total \$				39.724.300

Fuente. Autores

Servicios industriales

La alternativa de estabilización con cal requiere de servicios industriales como gasolina.

3.3 Criterios sociales

Aceptación de la alternativa

La estabilización alcalina a pesar de que permite reducir microorganismos patógenos y se ha informado de su capacidad para inmovilizar metales pesados, puede emitir olores desagradables generados por las emisiones de amoníaco (NH_3) según (Méndez et al., 2002). La estabilización con cal presenta la desventaja de producir subproductos aplicables primariamente a suelos ácidos. Además, dicha estabilización incrementa el volumen de los biosólidos, dificultando con ello el transporte final de los mismos (Madera, Torres y Silva, 2009). Al mismo tiempo, luego de la estabilización, la alcalinidad del lodo puede aumentarse, en donde además disminuyen los niveles de nutrientes como nitrógeno y fósforo (Williford, Chen, Shamas y Wang, 2007). No obstante, la estabilización alcalina es un proceso muy aplicado por su simplicidad en la operación y bajos costos (Lilivichuzca, 2016).

Mano de obra de la alternativa

La estabilización alcalina se caracteriza por ser fácil de operar. Es importante capacitar el personal encargado de la estabilización de los lodos con el fin de evitar que el pH caiga por debajo de 11, lo cual podría disminuir la eficiencia de la estabilización y producir la descomposición biológica generadora de olores ofensivos. Además, el personal debe monitorear constantemente el pH y la temperatura del lodo con el fin de lograr la eficiencia del proceso (Comisión Nacional del Agua, 2015).

La estabilización con cal no requiere materiales sofisticados ni controlar los lixiviados ya que estos no se generan, disminuyendo el riesgo ambiental (Valderrama, 2013).

3.4 Criterios ambientales

Análisis ambiental

Tabla 51.

Análisis ambiental de la estabilización con cal

Proceso	Subproceso	Actividad	Aspectos ambientales	Medio
Construcción	Preparación del sitio	Limpieza del terreno	*Remoción de la vegetación	Biótico
		Nivelación del terreno	*Generación de residuos sólidos	Abiótico
			*Generación de material particulado	
		Transporte de materia sobrante	*Generación de residuos sólidos	
		Contratación de personal	*Consumo de combustible	
Construcción de zona de estabilización	*Generación de material particulado			
Operación	Mezcla de lodos con cal	Estabilización de lodos	*Generación de olores *Generación de residuos sólidos *Generación de emisiones atmosféricas *Consumo de materia prima	Abiótico
Cierre y abandono	Desmantelamiento	Retiro de la infraestructura	*Generación de residuos sólidos *Consumo de combustible	

Fuente. Autores

4. Estabilización/Solidificación de lodos con cemento

4.1 Criterios técnicos

Especificaciones técnicas

La estabilización de lodos permite convertir residuos peligrosos en formas más estables. La estabilización/solidificación es un tratamiento usado para inmovilizar contaminantes presentes en lodos, disminuyendo la lixiviación de los mismos. Es por ello que, con base en los resultados obtenidos de la caracterización fisicoquímica y microbiológica de los lodos, se decidió analizar dicha alternativa de tratamiento (Malliou, Katsioti, Georgiadis y Katsiri, 2007). Esta alternativa incluye el uso de cemento Portland para dicha estabilización de lodos. El cemento Portland es una de las enmiendas más usadas por su bajo costo, alta disponibilidad y resistente a la biodegradación (Cheilas, y otros, 2007).

Durante la mezcla del lodo con el cemento, se puede inducir un comportamiento plástico, es por ello que es necesario dejar reposar el lodo unos 4 minutos después de ser agregado al mezclador, esto con el fin de eliminar los posibles coágulos, posteriormente debe ser agregado el cemento y por último el agua necesaria para el mezclado. Según Valls y Vázquez (2000), es recomendable agregar el 50% de lodos a la mezcla de cemento.

Especificaciones técnicas de la mezcladora

Capacidad de mezcladora: 1300 Kg

Volumen de la tolva: 600 L

Potencia: 5 HP

Consumo energético 6 h/día x 10 días = 223,5 kW

Disponibilidad de recursos

Tabla 52.

Disponibilidad de recursos en Colombia de la estabilización/solidificación

Materiales	SI	NO
Personal	X	
Cemento portland	X	
Mezcladora	X	
Energía	X	
pH metro	X	
Pala	X	
Carretilla	X	
Balanza	X	
Guantes de pvc	X	
Tapabocas	X	
Botas de pvc	X	
Gafas	X	
Casco de seguridad	X	

Fuente. Autores

Zona disponible

La laguna de estabilización cuenta con el área disponible para la implementación de la alternativa ya que requería de un área máxima de aproximadamente 700 m².

Rendimiento de la alternativa

El cemento Portland es una tecnología que permite inmovilizar metales pesados. Según una investigación realizada por Méndez (2019), la estabilización de lodos con el cemento Portland permite retener los metales pesados un 98%, reduciendo la lixiviación de los compuestos contaminantes del lodo.

El proceso de estabilización con cemento permite disminuir la movilidad de los contaminantes presentes en el lodo y otorgarle una forma sólida a los mismos para mejorar su manejo, lo cual disminuye la posibilidad de dispersión de los contaminantes (Méndez, 2019). Según Franchi et al., (2018), estabilizar los lodos con cemento Portland permitió controlar los lixiviados del arsénico, obteniendo altas eficiencias en el tratamiento. No obstante, la cantidad de residuos aumenta por la adición del cemento y el rendimiento del cemento Portland se puede ver influenciado por compuestos en el lodo que aceleran o retardan la hidratación óptima, alterando con ello el endurecimiento del residuo y el fraguado (Hidalgo, s.f).

En la estabilización con Portland los compuestos orgánicos tienden a desaparecer y la alcalinidad en el tratamiento neutraliza el contenido de microorganismos patógenos (Valls y Vázquez, 2000).

4.2 Criterios económicos

Presupuesto

Tabla 53.

Presupuesto de la estabilización/solidificación con cemento

Materiales	Ítem	Unidades	Cantidad	Valor unitario \$	Valor total \$
Administrativos	Operario	Días	90	30.000	2.700.000
	Operario	Días	90	30.000	2.700.000
	Capacitaciones	Días	10	60.000	600.000
Materiales e insumos	Cemento Portland	Kg	245.440	596	146.282.240
	Mezcladora	Un	3	6.900.000	20.700.000
	Energía	kW	670,5	576	386.208
	pH metro	Un	1	108.000	108.000
	Pala	Un	10	26.000	260.000
	Carretilla	Un	25	185.000	4.625.000
	Guantes de pvc	Par	80	2.100	168.000
	Tapabocas	Días	250	458	114.500
	Botas pvc	Par	80	42.000	3.360.000

Gafas	Un	2	8.000	16.000
Casco de seguridad	Un	80	25.000	2.000.000
Balanza	Un	1	190.000	190.000
Total \$				184.209.948

Fuente. Autores

Servicios industriales

La alternativa de estabilización con cemento requiere de servicios industriales como electricidad, agua y gasolina.

4.3 Criterios sociales

Aceptación de la alternativa

La estabilización/solidificación con cemento Portland ayuda a inmovilizar metales pesados presentes en lodos, permitiendo que los lodos puedan ser dispuestos en rellenos sanitarios sin riesgos de contaminación ambiental por procesos de lixiviación. No obstante, es importante tener en cuenta el contenido de agua en los lodos, lo cual puede alterar el tiempo y la velocidad de fraguado del cemento. Al mismo tiempo, el costo para el transporte del lodo estabilizado puede limitar un poco su aceptación (Espillico, 2019).

Mano de obra de la alternativa

La estabilización de lodos con dicha alternativa tiene una fácil operación, con pocos requerimientos de personal. Dentro de los requerimientos de materiales sólo requeriría una mezcladora de cemento (Romero y Vargas, 2009). Aunque es necesario realizar estudios previos de la estabilización a desarrollar con el fin de estimar la dosificación del cemento en los lodos. (Hidalgo, s.f). Además, dicha estabilización requiere conocer las impurezas del cemento a aplicar, evitando la aplicación de materiales contaminados que puedan reducir la eficiencia del tratamiento (Comisión Nacional del Agua, 2015).

4.4 Criterios ambientales

Análisis ambiental

Tabla 54.

Análisis ambiental de la estabilización/solidificación con cemento

Proceso	Subproceso	Actividad	Aspectos ambientales	Medio
Construcción	Preparación del sitio	Limpieza del terreno	*Remoción de la vegetación	Biótico

			*Generación de residuos sólidos	
		Nivelación del terreno	*Generación de material particulado *Generación de residuos sólidos	Abiótico
		Transporte de materia sobrante	*Consumo de combustible *Generación de material particulado	
		Contratación de personal	*Generación de empleo	Socioeconómico
Operación	Mezcla de lodos con cemento Portland	Estabilización de lodos	*Generación de residuos sólidos *Consumo de agua *Generación de emisiones atmosféricas *Consumo de energía *Consumo de materia prima *Generación de ruido *Generación de material particulado	Abiótico
Cierre y abandono	Desmantelamiento	Retiro de la infraestructura	*Generación de residuos sólidos *Consumo de combustible	

Fuente. Autores

5. Estabilización con oxidación de agua supercrítica (OASC)

5.1 Criterios técnicos

Especificaciones técnicas

La OASC es una alternativa prometedora en la estabilización de los lodos, en donde la presión y la temperatura son más altas que el punto crítico termodinámico del agua (374 °C y 22,1 MPa). Sin embargo, la OASC puede verse limitada por problemas de corrosión y taponamientos de sal (Hodes et al., 2004). Dicha alternativa de estabilización es eficaz en el tratamiento de los lodos orgánicos, disolviendo compuestos y gases, formando reacciones homogéneas. Además, la OASC a diferencia de otros sistemas de tratamiento como la incineración, ofrece altos porcentajes de destrucción de patógenos de alrededor del 99% y productos no contaminantes (Zhao et al., 2020).

Disponibilidad de recursos

La oxidación de agua supercrítica es una tecnología nueva, estudiada principalmente a escala de laboratorio y pilotos. Países como España han buscado implementar dicha alternativa para la estabilización de los lodos a escala piloto. Es por ello que, con base en lo anterior, la disponibilidad de los

recursos para la implementación de la alternativa puede estar limitada para el municipio de Ábrego, Norte de Santander.

Zona disponible

El área requerida para la implementación de la alternativa de oxidación de agua supercrítica depende de la cantidad de lodo a tratar y el reactor a usar, sin embargo, la laguna cuenta con 21.043 m² disponibles para implementar alternativas.

Rendimiento de la alternativa

La OASC es una alternativa de estabilización eficiente y ambientalmente benigna, la cual estabiliza metales pesados, elimina olores desagradables, degrada compuestos orgánicos y destruye los patógenos (Zhang et al., 2017). Además, en dicha alternativa de estabilización, los lodos son tratados en un sistema cerrado, por lo cual no se presentan emisiones atmosféricas. Al mismo tiempo, las sales sólidas pueden ser recicladas y el agua presente en el lodo puede ser recuperada (Portela et al., 2010). Según Griffith y Raymond (2002), la OASC puede ser una alternativa válida para ser aplicada a escala municipal en el tratamiento de lodos. La OASC permite eliminar hasta un 98% el contaminante p-terc-butilcatecol, un compuesto recalcitrante.

5.2 Criterios económicos

Presupuesto

La OASC se ha caracterizado por sus altos costos económicos debido a que el proceso requiere condiciones técnicas como elevadas presiones y temperaturas (Portela et al., 2010). Además, la OASC tiene elevados costos de inmovilización y operación (Casal, 2007).

Servicios industriales básicos

La alternativa de estabilización de oxidación de agua supercrítica requiere de servicios industriales como agua, electricidad y gasolina.

5.3 Criterios sociales

Aceptación de la alternativa

La OASC permite obtener productos finales reutilizables como dióxido de carbono, agua y minerales. Al mismo tiempo, el calor generado durante el proceso de estabilización puede usarse como producción de energía. Y aunque la OASC es estudiada a escala de laboratorio y su implementación a escala industrial es limitada, según Xu et al., (2012), la OASC tiene viabilidad comercial para ser usada en el tratamiento y eliminación de lodos residuales. Sin embargo, la OASC puede verse limitada por lo anteriormente dicho y por las complejas configuraciones del reactor y consumo de energía de 550 kWh/t (Zhang, y otros, 2017).

Mano de obra de la alternativa

La operación de la alternativa requiere ser operada por personal altamente capacitado, el cual posea conocimiento sobre los requerimientos técnicos.

5.4 Criterios ambientales

Análisis ambiental

Tabla 55.

Análisis ambiental de la estabilización con oxidación de agua supercrítica (OASC)

Proceso	Subproceso	Actividad	Aspectos ambientales	Componente
Construcción	Preparación del sitio	Limpieza del terreno	*Remoción de la vegetación	Biótico
		Nivelación del terreno	*Generación de residuos sólidos	Abiótico
			*Generación de material particulado	
		Transporte	*Generación de residuos sólidos	
			*Consumo de combustible	
		Contratación de personal	*Generación de empleo	Socioeconómico
Operación	Elevación de la temperatura y presión por encima del punto crítico	Estabilización de lodos	*Consumo de materia prima	Abiótico
			*Generación de residuos sólidos	
			*Consumo de agua	
			*Consumo de energía	
			*Consumo de materia prima	
			*Generación de	

			residuos líquidos
Cierre y abandono	Desmantelamiento	Retiro de la infraestructura	*Generación de residuos sólidos *Consumo de combustible

Anexo E

Análisis de alternativas de aprovechamiento de los biosólidos

Los aprovechamientos de los lodos se analizaron con base en las alternativas de estabilización.

1. Vermicompost

1.1 Criterios técnicos

Especificaciones técnicas

El vermicompostaje de lodos permite obtener un producto aprovechable denominado vermicompost. A pesar de que se esperaba que después de estabilizar los lodos se disminuyan los metales pesados presentes en el vermicompost, es importante que antes de su aplicación se comprueben las concentraciones de metales pesados.

Disponibilidad de recursos

Tabla 56.

Disponibilidad de recursos en Colombia del aprovechamiento de vermicompost

Materiales	SI	NO
Personal	X	
Sacos de empaque	X	
pH metro	X	
Termómetro	X	
Rastrillo	X	
Pala	X	
Pico	X	
Carretilla	X	
Cosedora	X	
Báscula	X	
Guantes de pvc	X	
Tapabocas	X	
Botas de pvc	X	
Gafas	X	
Casco de seguridad	X	

Rendimiento de la alternativa

El vermicompost se caracteriza por la alta población de microorganismos precursores del crecimiento de las plantas. Además, contiene enzimas que disminuyen las enfermedades presentes en las

plantas (Hussain, Abbasi y Abbasi, 2017). Al mismo tiempo, nutrientes importantes en la agricultura se encuentran en el vermicompost, el cual al mismo tiempo puede usarse como acondicionador del suelo (Garg, Gupta y Satya, 2006). Según Indrani, Adil y Ori (2019), el vermicompost obtenido a partir del vermicompostaje de lodos con *Eisenia foetida* contiene una gran cantidad de nutrientes esenciales para las plantas como hierro, zinc, cobre, manganeso, magnesio, calcio, potasio, nitrógeno y fósforo.

El vermicompostaje con *Eisenia foetida* permite obtener vermicompost, el cual no tiene efectos adversos al usarse en la agricultura ya que permite estabilizar lodos con contaminantes, siendo el vermicompost un producto de gran valor que reemplaza acondicionadores de suelo a un costo muy bajo.

1.2 Criterios económicos

Presupuesto

Tabla 57.

Presupuesto del aprovechamiento de vermicompost

Materiales	Ítem	Unidades	Cantidad	Valor unitario \$	Valor total \$
Administrativos	Operario	Días	90	30.000	2.700.000
	Operario	Días	90	30.000	2.700.000
Materiales e insumos	Sacos de empaque	Un	100.000	500	50.000.000
	pH metro	Un	1	108.000	108.000
	Termómetro	Un	1	154.000	154.000
	Rastrillo	Un	10	17.000	170.000
	Pala	Un	10	26.000	260.000
	Pico	Un	10	39.000	390.000
	Carretilla	Un	25	185.000	4.625.000
	Guantes de pvc	Par	80	2.100	168.000
	Tapabocas	Días	250	458	114.500
	Botas pvc	Par	80	42.000	3.360.000
	Gafas	Un	2	8.000	16.000
	Casco de seguridad	Un	80	25.000	2.000.000
	Báscula	Un	2	190.000	380.000
	Cosedora	Un	2	500.000	1.000.000
Total \$					68.145.500

1.3 Criterios sociales

Aceptación del aprovechamiento

Según Hu et al., (2021), el vermicompost tiene mayor precio de venta que el compost. El vermicompostaje permite no sólo comercializar el vermicompost, sino la venta de la biomasa de las

lombrices, lo cual aumenta los ingresos económicos. Sin embargo, es importante considerar que las lombrices usadas en el vermicompostaje acumulan metales pesados en sus tejidos, en donde dicha comercialización podría ser precursora de contaminación ambiental. Al mismo tiempo, la producción del vermicompost puede generar malos olores, disminuyendo la aceptación de dicha alternativa.

Aplicar lodos en la agricultura puede ser controversial, puesto que provienen del tratamiento de aguas residuales. Además, lodos de categoría B, como es este el caso, según el Decreto 1287 de 2014 presentan ciertas restricciones como, por ejemplo: “No aplicar biosólidos durante un período de un (1) año antes de la cosecha y durante la cosecha misma de cultivos hortícolas o frutícolas que estén en contacto directo con el suelo y que se consuman en estado crudos”. Además, según Donado (2013), se recomienda que los biosólidos no sean aplicables en suelos con cultivos de consumo directo, lo cual restringe un poco la aceptación de dicha alternativa a pesar del contexto de la zona.

1.4 Criterios ambientales

Análisis ambiental

Tabla 58.

Análisis ambiental del aprovechamiento de vermicompost

Proceso	Subproceso	Actividad	Aspectos ambientales	Medio
Planeación del aprovechamiento	Comercialización del lodo y lombriz	Contratación	*Generación de empleo	Socioeconómico
		Empacado y sellado	*Incremento en la oferta de aprovechamiento de los lodos *Generación de residuos sólidos *Consumo de materia prima	
		Transporte del producto	*Consumo de combustible	
Operación	Aplicación del lodo	Aprovechamiento	*Generación de olores ofensivos *Cambio en las características fisicoquímicas del suelo *Incremento de fósforo y nitrógeno en el suelo *Incremento de materia orgánica	Abiótico
			*Incremento del potencial de producción *Incremento en los ingresos municipales	Socioeconómico

			*Disminución de la colmatación de lodos *Disminución de la disposición inadecuada de residuos *Incremento en la vida útil de los rellenos sanitarios *Cambio en el uso de los lodos
Cierre y abandono	Desmantelamiento	Finalización del aprovechamiento	*Incremento en la demanda de recolección y disposición final de lodos *Incremento en los costos de gestión de lodos *Cambio en la disponibilidad de aprovechamiento de los lodos

2. Fertilizantes a base de lodos con cal

2.1 Criterios técnicos

Especificaciones técnicas

La estabilización de lodos con cal permite reducir microorganismos patógenos e inmovilizar metales pesados presentes en lodos residuales, otorgando la posibilidad de que dichos lodos puedan ser usados en la agricultura como fertilizantes. Los fertilizantes se han caracterizado por sus altos costos económicos, incentivando el uso de fertilizantes a partir de residuos orgánicos biodegradables (Amador, 2017).

La fertilización orgánica varía de la inorgánica, ya que la disponibilidad de nutrientes en la orgánica puede ser menor. La poca disponibilidad de nutrientes se debe a que los fertilizantes orgánicos deben mineralizarse. Por lo cual aprovechar lodos como fertilizantes, requiere conocer el ciclo de nutrientes de los lodos, la mineralización y las necesidades del suelo al cual se le aplicará el fertilizante (Morán, 2009).

Disponibilidad de recursos

Tabla 59.

Disponibilidad de recursos en Colombia del aprovechamiento de fertilizantes

Materiales	SI	NO
Personal	X	
Sacos de empaque	X	
Pala	X	

Pico	X
Carretilla	X
Cosedora	X
Báscula	X
Guantes de pvc	X
Tapabocas	X
Botas de pvc	X
Gafas	X
Casco de seguridad	X

Fuente. Autores

Rendimiento

Los lodos con cal, son de gran interés en la aplicación para suelos ácidos, ya que proporcionan alta alcalinidad. Al mismo tiempo, nutrientes como el potasio pueden estar disponibles para las plantas por el aporte de los lodos. El aumento de pH en los suelos disminuye la presencia de aluminio, cuyo elemento químico es perjudicial en la productividad y crecimiento de los cultivos (Rivera, Moreno, Herrera y Romero, 2016). Al mismo tiempo, el aumento del pH aumenta la disponibilidad de Magnesio. El uso de lodos como fertilizantes permite aportar altos niveles de materia orgánica y mejorar las estructuras del suelo (Marmolejo, Botina y Torres, 2005). Según Ignacio (2005), lodos con cal se usaron como fertilizantes en una plantación de *Pinus radiata*, observando mejoras en dichas plantaciones asociado al incremento de pH en el suelo, aumento de nutrientes y mejoría de las características químicas del suelo. Al mismo tiempo, según Rodríguez et al., (2010), aplicar lodos estabilizados con cal en suelos arenosos, tuvo una eficiencia semejante al usar fertilizantes inorgánicos.

2.2. Criterios económicos

Presupuesto

Tabla 60.

Presupuesto del aprovechamiento de fertilizantes de lodos con cal

Materiales	Ítem	Unidades	Cantidad	Valor unitario \$	Valor total \$
Administrativos	Operario	Días	90	30.000	2.700.000
	Operario	Días	90	30.000	2.700.000
Materiales e insumos	Sacos de empaque	Un	200.000	500	100.000.000
	Rastrillo	Un	10	17.000	170.000
	Pala	Un	10	26.000	260.000
	Pico	Un	10	39.000	390.000
	Carretilla	Un	25	185.000	4.625.000
	Guantes de pvc	Par	80	2.100	168.000
	Tapabocas	Días	250	458	114.500
	Botas pvc	Par	80	42.000	3.360.000

Gafas	Un	2	8.000	16.000
Casco de seguridad	Un	80	25.000	2.000.000
Báscula	Un	2	190.000	380.000
Cosedora	Un	2	500.000	1.000.000
Total \$				117.883.500

Fuente. Autores

2.3 Criterios sociales

Aceptación de la alternativa

La fertilización con lodos es una alternativa que permite reducir los costos asociados en la compra de fertilizantes químicos, destacándose como una alternativa económicamente sostenible. Al mismo tiempo, fertilizar suelos con lodos estabilizados con cal, facilita el crecimiento de cultivos como el maíz (Jamali et al., 2008).

2.4 Criterios ambientales

Análisis ambiental

Tabla 61.

Análisis ambiental del aprovechamiento de fertilizantes de lodos con cal

Proceso	Subproceso	Actividad	Aspectos ambientales	Medio
Planeación del aprovechamiento	Comercialización del lodo	Contratación	*Generación de empleo	Socioeconómico
		Empacado y sellado	*Incremento en la oferta de aprovechamiento de los lodos	
		Transporte del producto	*Generación de residuos sólidos *Consumo de materia prima	
Operación	Aplicación del lodo	Aprovechamiento	*Consumo de combustible	Abiótico
			*Cambio en las características fisicoquímicas del suelo *Incremento de fósforo y nitrógeno en el suelo *Incremento de magnesio en el suelo *Disminución de	

			aluminio en el suelo *Incremento de materia orgánica *Aumento del pH	
			*Incremento del potencial de producción del suelo *Incremento en los ingresos municipales *Disminución de la colmatación de lodos *Disminución de la disposición inadecuada de residuos *Incremento en la vida útil de los rellenos sanitarios *Cambio en el uso de los lodos	Socioeconómico
Cierre y abandono	Desmantelamiento	Finalización del aprovechamiento	*Incremento en la demanda de recolección y disposición final de lodos *Incremento en los costos de gestión de lodos *Cambio en la disponibilidad de aprovechamiento de los lodos	

Fuente. Autores

3. Fertilizantes a base de lodo con paja

3.1 Criterios técnicos

Especificaciones técnicas

Los lodos estabilizados con paja de trigo permiten reducir microorganismos patógenos y metales pesados. Dicha estabilización logra que los lodos tengan una humedad recomendada para el uso de los mismos como fertilizantes.

Disponibilidad de recursos

Tabla 62.

Disponibilidad de recursos en Colombia del aprovechamiento de fertilizantes

Materiales	SI	NO
Personal	X	
Sacos de empaque	X	
Pala	X	
Pico	X	
Carretilla	X	
Cosedora	X	
Báscula	X	
Guantes de pvc	X	
Tapabocas	X	
Botas de pvc	X	
Gafas	X	
Casco de seguridad	X	

Fuente. Autores

Rendimiento de la alternativa

Los lodos con paja de trigo no requieren productos químicos para estabilizar el pH antes de su aplicación como fertilizantes orgánicos. Según Kebibeche et al., (2019), la adición de paja de trigo en el lodo permite alcanzar un pH de 6,73, cuyo valor está dentro del límite recomendado para fertilizantes (Guerra, Vázquez y Díaz, 2003). Al mismo tiempo, la conductividad eléctrica de dichos lodos no sobrepasa los valores límites máximos recomendados de 3 mS/cm (Soumaré, Demeyer, Tack y Verloo, 2002), registrando valores de aproximadamente 1,81 mS/cm. Según Pilatti et al., (2014), los lodos aplicados como fertilizantes, permiten que las características fisicoquímicas de los suelos mejoren. Además, Ververis et al., (2016), concluyeron que los fertilizantes convencionales pueden reemplazarse por fertilizantes a base de lodos estabilizados, no causando alteraciones en cultivos como el kenaf. No obstante, los fertilizantes a base de lodos pueden representar riesgos en los cuerpos hídricos por procesos de lixiviación con altos contenidos de nitrógeno.

3.2 Criterios económicos

Presupuesto

Tabla 63.

Presupuesto del aprovechamiento de fertilizantes con lodos con paja

Materiales	Ítem	Unidades	Cantidad	Valor unitario \$	Valor total \$
Administrativos	Operario	Días	120	30.000	3.600.000
	Operario	Días	120	30.000	3.600.000
Materiales e insumos	Sacos de empaque	Un	200.000	500	100.000.000
	Rastrillo	Un	10	17.000	170.000

Pala	Un	10	26.000	260.000
Pico	Un	10	39.000	390.000
Carretilla	Un	25	185.000	4.625.000
Guantes de pvc	Par	80	2.100	168.000
Tapabocas	Días	250	458	114.500
Botas pvc	Par	80	42.000	3.360.000
Gafas	Un	2	8.000	16.000
Casco de seguridad	Un	80	25.000	2.000.000
Báscula	Un	2	190.000	380.000
Cosedora	Un	2	500.000	1.000.000
Total \$				119.683.500

Fuente. Autores

3.3 Criterios sociales

Aceptación de la alternativa

La fertilización orgánica obtenida a partir de la estabilización de lodos con paja de trigo, permite reducir el uso de fertilizantes químicos. Al mismo tiempo, dicha fertilización permite aportarle al suelo un recurso natural, el cual muchas veces es desechado. La paja de trigo se ha considerado como una de las fuentes de biomasa más abundantes, caracterizándose por ser de fácil almacenamiento, sin problemas de fermentación y descomposición, al mismo tiempo, la contaminación por microorganismos como bacterias es poco frecuente. De allí la importancia de aplicar lodos con paja de trigo, siendo una alternativa ecológicamente sustentable, con altos contenidos de nutrientes esenciales para los suelos (Coca, 2021).

3.4 Criterios ambientales

Análisis ambiental

Tabla 64.

Análisis ambiental del aprovechamiento de fertilizantes de lodos con paja

Proceso	Subproceso	Actividad	Aspectos ambientales	Medio
Planeación del aprovechamiento	Comercialización del lodo	Contratación	*Generación de empleo	Socioeconómico
		Empacado y sellado	*Incremento en la oferta de aprovechamiento de los lodos	
			Transporte del producto	*Generación de residuos sólidos
		*Consumo de materia prima		
			*Consumo de combustible	

			*Cambio en las características fisicoquímicas del suelo *Incremento de fósforo y nitrógeno en el suelo *Incremento de materia orgánica	
Operación	Aplicación del lodo	Aprovechamiento	*Incremento del potencial de producción del suelo *Incremento en los ingresos municipales *Disminución de la colmatación de lodos *Disminución de la disposición inadecuada de residuos *Incremento en la vida útil de los rellenos sanitarios *Cambio en el uso de los lodos	Socioeconómico
Cierre y abandono	Desmantelamiento	Finalización del aprovechamiento	*Incremento en la demanda de recolección y disposición final de lodos *Incremento en los costos de gestión de lodos *Cambio en la disponibilidad de aprovechamiento de los lodos	
			*Generación de residuos sólidos	Abiótico

Fuente. Autores

4. Materiales para la construcción (Ladrillos)

4.1 Criterios técnicos

Especificaciones técnicas

Los lodos residuales se han venido usando como materiales de construcción. En el caso de los ladrillos, se ha buscado reemplazar los porcentajes de arcilla usados durante la producción de los mismos. La elaboración de ladrillos contempla las siguientes etapas:

***Preparación de la mezcla:** La arcilla y el lodo a usar en la construcción de ladrillos deben someterse a pretratamientos como trituración y homogeneización mediante molinos, lo cual permita contar con una uniformidad de las características de los materiales (Espillico, 2019). Además, es importante analizar las características fisicoquímicas, mineralógicas y ambientales del lodo antes de su aprovechamiento (Ettoumi et al., 2021). El agua a usar durante la mezcla puede ser de aproximadamente del 25% del total.

***Moldeado:** Este proceso consiste en disponer la mezcla en moldes, compactándola bien sea mediante el uso de maquinaria o manualmente, retirando el exceso de mezcla con un rasero.

***Secado:** El secado consiste en retirar el exceso de humedad presente en los ladrillos. Dicho secado puede ser natural o artificial. En el secado natural es importante tener en cuenta las precipitaciones de la zona, lo cual puede afectar la elaboración de ladrillos. El tiempo de secado al aire puede ser de 24 horas (Ettoumi et al., 2021). El secado es una etapa primordial dentro de la elaboración de los ladrillos, puesto que dichos ladrillos se pueden rajarse si se presenta un secado muy rápido y el poco tiempo de secado puede imposibilitar el buen cocimiento.

***Cocción:** La cocción consiste en someter los ladrillos secos a altas temperaturas en hornos, permitiendo que los materiales mejoren las propiedades físicas y mecánicas. La cocción considera cuatro fases, la primera es el precalentamiento, donde se alcanza una temperatura de 200°C, la segunda es el calentamiento, con una temperatura de hasta 700 °C, la tercera es la maduración de los ladrillos con temperaturas entre 900 y 1000 °C y la última fase permite la firmeza del ladrillo, con enfriamiento hasta los 500 °C.

Una vez los ladrillos están cocidos, es valioso realizar nuevamente una caracterización mecánica, física, mineralógica y ambiental, con el fin de verificar si cumplen con los requisitos para su aprovechamiento como materiales de construcción. La caracterización mecánica se basa en determinar la resistencia del ladrillo, la caracterización ambiental se basa en el análisis de lixiviación y la caracterización física consiste en determinar la densidad aparente, la porosidad y la absorción del agua (Ettoumi et al., 2021).

Disponibilidad de recursos

Tabla 65.

Disponibilidad de recursos en Colombia del aprovechamiento con ladrillos

Materiales	SI	NO
Personal	X	
Arcilla	X	
Transporte	X	
Agua	X	
Ladrillera	X	
Rastrillo	X	
Pala	X	
Pico	X	
Carretilla	X	
Guantes de pvc	X	
Tapabocas	X	
Botas de pvc	X	
Gafas	X	
Casco de seguridad	X	

Fuente. Autores

Rendimiento de la alternativa

Según García et al., (2013), la elaboración de ladrillos a partir de proporciones de lodos del 5 y 10%, permite obtener ladrillos con buenas propiedades. La resistencia mecánica aumenta cuando el lodo asciende hasta el 10%, por encima de dicho porcentaje empieza a descender la resistencia. Además, los ladrillos elaborados a partir de dichas mezclas, han permitido obtener bajos niveles de lixiviación. La elaboración de ladrillos a partir de lodos residuales permite gestionar residuos contaminantes. Muñoz (2016), elaboró ladrillos a partir de lodos residuales y arcilla.

La etapa de preparación de la mezcla para la fabricación de ladrillos, es la única que podría realizarse en lotes cercanos al sistema de tratamiento, puesto que, al requerir hornos especializados disponibles en ladrilleras para el proceso de cocción, se requeriría el traslado de los ladrillos secados naturalmente, causando probablemente la ruptura de los mismos. Es por ello que lo recomendable para optar por dicha alternativa, sería bien sea el traslado de los lodos hasta una ladrillera cercana o el traslado de la mezcla (lodo, agua y arcilla) hasta dicha ladrillera. Por lo cual, fabricar ladrillos a partir de lodos requiere de la adaptación de infraestructuras para la recepción de los lodos (Rámila y Rojas, 2008).

4.2 Criterios económicos

Presupuesto

Tabla 66.

Presupuesto del aprovechamiento con ladrillos

Materiales	Ítem	Unidades	Cantidad	Valor	Valor total \$
-------------------	-------------	-----------------	-----------------	--------------	-----------------------

			unitario \$		
Administrativos	Operario	Días	120	30.000	3.600.000
	Operario	Días	120	30.000	3.600.000
Materiales e insumos	Arcilla	m ³	2.124	42.875	91.066.500
	Transporte de lodos a la ladrillera	Volquetadas	5	15.000	75.000
	Agua	m ³	1.000	4.000	4.000.000
	Alquiler de ladrillera(trituradora, horno)	Días	120	40.000	4.800.000
	Rastrillo	Un	10	17.000	170.000
	Pala	Un	10	26.000	260.000
	Pico	Un	10	39.000	390.000
	Carretilla	Un	25	185.000	4.625.000
	Guantes de pvc	Par	80	2.100	168.000
	Tapabocas	Días	250	458	114.500
Botas pvc	Par	80	42.000	3.360.000	
Gafas	Un	2	8.000	16.000	
Casco de seguridad	Un	80	25.000	2.000.000	
Total \$					118.245.000

Fuente. Autores

4.3 Criterios sociales

Aceptación de la alternativa

La elaboración de ladrillos a partir de lodos residuales es un método que permite disminuir el consumo de materias primas, permitiendo obtener ahorros de recursos económicos. En China, la escasez de arcilla y el gran consumo de la misma, ha conllevado a la prohibición en el uso de ladrillos de arcilla (Lingling, Wei, Tao y Nanru, 2005). Al mismo tiempo, el consumo energético en la elaboración de ladrillos suele ser muy alto, elevando los costos productivos (De la Casa y Castro, 2018). Así mismo, el uso de hornos para llevar a cabo la cocción de los ladrillos puede generar emisiones contaminantes como CO₂, NO_x, material particulado y CO por el uso de carbón como combustible, emisiones causantes del agotamiento de la capa de ozono y la generación de lluvia ácida (Skinde, Pandit, Sheikh y Ganai, 2014). Sin embargo, elaborar ladrillos a partir de biosólidos, permite reducir el consumo de energía, además, construir edificios con dichos ladrillos reduce la transferencia de calor por la reducción de la conductividad térmica (Mohajerani, 2019). A pesar de las ventajas de los ladrillos a base de biosólidos, la aceptación social de los mismos es compleja, ya que se tiene una imagen negativa de los mismos.

4.4 Criterios ambientales

Análisis ambiental

Tabla 67.

Análisis ambiental del aprovechamiento con ladrillos

Proceso	Subproceso	Actividad	Aspectos ambientales	Medio	
Elaboración de ladrillos	Preparación de ladrillos	Contratación	*Generación de empleo	Socioeconómico	
		Transporte de materia prima	*Consumo de combustible		
		Mezcla del lodo con arcilla	*Consumo de agua *Consumo de materia prima *Generación de residuos orgánicos *Consumo de energía eléctrica		
	Moldeado	Disposición de mezcla en los moldes	*Generación de residuos sólidos	Abiótico	
	Secado	Secado natural del ladrillo	*Generación de residuos sólidos		
	Cocción	Proceso de secado térmico del ladrillo	*Consumo de recursos naturales no renovables (Carbón)	Socioeconómico	
			*Generación de emisiones *Generación de material particulado *Generación de residuos sólidos (Escoria)		
	Operación	Aprovechamiento	Uso de los ladrillos	*Incremento en la oferta de aprovechamiento de los lodos	Socioeconómico
				*Incremento en los ingresos municipales *Disminución de la colmatación de lodos *Disminución de la disposición inadecuada de residuos *Incremento en la vida útil de los rellenos sanitarios *Cambio en el uso de los lodos	
	Cierre y abandono	Desmantelamiento	Finalización del aprovechamiento	*Generación de residuos sólidos *Incremento en la demanda de recolección y disposición final de lodos *Incremento en los costos de gestión de lodos *Cambio en la	

disponibilidad de
aprovechamiento de los
lodos

Fuente. Autores

5. Operación de rellenos sanitarios

5.1 Criterios técnicos

Especificaciones técnicas

Los lodos previamente deshidratados pueden ser aprovechados como cobertura diaria en los rellenos sanitarios. Según Jaramillo (2002), se puede permitir la disposición de biosólidos con residuos en relleno sanitario en proporción inferior al 6% con el fin de evitar procesos de desestabilización. Por otro lado, según el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (2015), se prohíbe el ingreso de lodos contaminados, por lo cual es necesario estabilizarlos previamente. Es recomendable que los biosólidos a disponer en los rellenos sanitarios no sobrepasen una humedad del 70%. Según el Ministerio Secretaría General de la Presidencia (2009), es posible aprovechar biosólidos de clase A y B en rellenos sanitarios, pero el relleno sanitario requeriría la autorización sanitaria para dicho aprovechamiento.

Los biosólidos pueden ser usados como cobertura diaria, la cual es necesaria para cubrir los residuos sólidos dispuestos, evitando que queden expuestos al culminar la jornada diaria de descarga y emitan malos olores y vectores (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2017). No obstante, es importante que los rellenos sanitarios donde se aprovecharán los biosólidos estén bien impermeabilizados con el fin de evitar que los lixiviados de los residuos sólidos contaminen cuerpos hídricos y el suelo (Díaz y Vallejo, 2017).

Disponibilidad de recursos

Tabla 68.

Disponibilidad de recursos en Colombia del aprovechamiento en rellenos

Materiales	SI	NO
Personal	X	
Transporte	X	
Pala	X	
Pico	X	
Carretilla	X	
Guantes de pvc	X	
Tapabocas	X	
Botas de pvc	X	
Gafas	X	
Casco de seguridad	X	
Báscula	X	

Fuente. Autores

Rendimiento de la alternativa

Según Chen et al., (2013), los lodos deshidratados pueden usarse como cobertura de rellenos. Aprovechar los lodos en los rellenos sanitarios puede ser una alternativa viable al tener en cuenta la gran capacidad de tratamiento de dichos rellenos y la simple disposición de los residuos (Yang et al., 2017). Además, los lodos permiten disminuir la escasez de materiales de cobertura de los rellenos sanitarios.

Sin embargo, aprovechar lodos en rellenos sanitarios como cobertura diaria, puede generar desestabilización ya que tienen altos contenidos de humedad, además de concentrar contaminantes y poseer baja resistencia y alta compresibilidad (He, Feng, Zhou y Zhang, 2021).

Usar los biosólidos de la laguna de estabilización de Ábrego como cobertura diaria, requiere el transporte de dichos residuos hasta el relleno sanitario más cercano y viable. Ábrego, es un municipio que se ha caracterizado por la ausencia de relleno sanitario, por lo cual dispone sus residuos sólidos en el relleno sanitario ubicado en Ocaña, Norte de Santander. Con base en lo antes mencionado, los biosólidos generados en Ábrego, podrían ser aprovechados en el municipio de Ocaña. Al mismo tiempo, es necesario gestionar los lixiviados generados durante la operación del relleno sanitario, cuya composición puede ser difícil de establecer ya que depende de las características de los residuos sólidos dispuestos (Martínez et al., 2014).

5.2 Criterios técnicos

Presupuesto

Tabla 69.

Presupuesto del aprovechamiento en operación de rellenos sanitarios

Materiales	Ítem	Unidades	Cantidad	Valor unitario \$	Valor total \$
Administrativos	Operario	Días	90	30.000	2.700.000
	Operario	Días	90	30.000	2.700.000
Materiales e insumos	Transporte de lodos al relleno sanitario	Volquetadas	5	15.000	75.000
	Pala	Un	10	26.000	260.000
	Pico	Un	10	39.000	390.000
	Carretilla	Un	25	185.000	4.625.000
	Guantes de pvc	Par	80	2.100	168.000
	Tapabocas	Días	250	458	114.500
	Botas pvc	Par	80	42.000	3.360.000
	Gafas	Un	2	8.000	16.000
	Casco de seguridad	Un	80	25.000	2.000.000
	Báscula	Un	2	190.000	380.000
Total					16.788.500

Fuente. Autores

5.3 Criterios sociales

Aceptación de la alternativa

Resulta viable aprovechar biosólidos en la operación de los rellenos sanitarios, ya que dichos rellenos son un medio de disposición de residuos respetuoso con el ambiente, los cuales incluyen sistemas de recolección de lixiviados, revestimientos para el fondo y talud del relleno sanitario, coberturas, tratamiento de gases, entre otras estructuras (Youcai y Ziyang, 2017).

El relleno sanitario además de permitir el aprovechamiento de los lodos como cobertura, permite tratarlos mediante procesos de degradación bioquímica, siendo una técnica de bajo costo y fácil operación (Guangyin y Youcai, 2017). No obstante, la operación de rellenos sanitarios puede producir gases y lixiviados con altas concentraciones de amonio y carbono orgánico disuelto. Al mismo tiempo, aprovechar los biosólidos en los rellenos sanitarios, puede aumentar la generación de olores ofensivos y presencia de vectores en la zona, disminuyendo el grado de aceptación de dicha alternativa.

5.4 Criterios ambientales

Análisis ambiental

Tabla 70.

Análisis ambiental del aprovechamiento en operación de rellenos sanitarios

Proceso	Subproceso	Actividad	Aspectos ambientales	Medio
Operación	Traslado de biosólidos	Contratación	*Generación de empleo	Socioeconómico
		Recolección de biosólidos	*Generación de material particulado	
		Transporte de biosólidos	*Consumo de combustible	
	Aprovechamiento de los biosólidos	Descarga y compactación de biosólidos	*Generación de ruido *Generación de material particulado *Generación de vectores *Generación de olores ofensivos	Abiótico

			*Agotamiento de la capacidad del relleno sanitario *Disminución de la vida útil del relleno sanitario *Incremento en los ingresos municipales *Incremento en la oferta de aprovechamiento de los lodos *Incremento en los ingresos municipales *Disminución de la colmatación de lodos en la laguna	Socioeconómico
Cierre y abandono	Desmantelamiento	Finalización del aprovechamiento	*Incremento en la demanda de recolección y disposición final de lodos *Incremento en los costos de gestión de lodos *Cambio en la disponibilidad de aprovechamiento de los lodos *Incremento en la vida útil del relleno sanitario *Generación de residuos sólidos	Abiótico

Fuente. Autores

6. Aprovechamiento del lodo como cemento

6.1 Criterios técnicos

Especificaciones técnicas

Usar biosólidos como reemplazo de cemento permite disminuir los problemas ambientales generados por la inadecuada disposición de los residuos sólidos. Al mismo tiempo, dicho aprovechamiento permite reducir los costos económicos al disminuir el uso de cemento. Según Gomes (2020), es recomendable realizar un reemplazo con biosólidos $\leq 2\%$, pero según Franchi et al., (2018), agregar 50% de lodos a la mezcla de cemento también muestra buenos resultados. De igual forma, es importante realizar un análisis químico de los biosólidos antes de su aprovechamiento en los cementos (Pavlík et al., 2016).

Disponibilidad de recursos

Tabla 71.

Disponibilidad de recursos en Colombia del aprovechamiento como cemento

Materiales	SI	NO
Personal	X	
Pala	X	
Cosedora	X	
Carretilla	X	
Guantes de pvc	X	
Tapabocas	X	
Botas de pvc	X	
Gafas	X	
Casco de seguridad	X	
Báscula	X	
Bolsas de papel	X	

Fuente. Autores

Rendimiento de la alternativa

Usar biosólidos como reemplazo de cemento, permite aumentar la porosidad de los compuestos, en donde dicho aumento es benéfico al reducir la densidad del hormigón, mejorar la resistencia a la congelación-descongelación, resistencia al fuego, aislamiento térmico y propiedades acústicas. No obstante, con dicha alternativa se puede disminuir la resistencia a la compresión y se emite una gran cantidad de CO₂ al reaccionar la portlandita alcalina con el material orgánico de los biosólidos (Roychand et al., 2021). Según Gomes (2020), al estudiar el lodo adicionado en cemento, se observó una reducción de la resistencia a la compresión del 32% con la adición del lodo del 5 y 10%, mientras que con la adición del menos del 2% del lodo hubo una buena resistencia a la compresión. Al mismo tiempo, según Rahman (2017), luego de estudiar la resistencia a la compresión y otros datos del cemento y el mortero a base de lodos, se concluyó la eficiencia de dichos residuos como reemplazo parcial de cemento.

6.2 Criterios económicos

Presupuesto

Tabla 72.

Presupuesto del aprovechamiento como cemento

Materiales	Ítem	Unidades	Cantidad	Valor unitario \$	Valor total \$
Administrativos	Operario	Días	120	30.000	3.600.000
	Operario	Días	120	30.000	3.600.000
	Capacitaciones	Días	10	60.000	600.000
Materiales e insumos	Pala	Un	10	26.000	260.000
	Carretilla	Un	25	185.000	4.625.000
	Guantes de pvc	Par	80	2.100	168.000
	Tapabocas	Días	250	458	114.500
	Botas pvc	Par	80	42.000	3.360.000
	Gafas	Un	2	8.000	16.000

Casco de seguridad	Un	80	25.000	2.000.000
Bolsas de papel	Un	10.000	1000	10.000.000
Báscula	Un	2	190.000	380.000
Cosedora	Un	2	500.000	1.000.000
Total				29.723.500

Fuente. Autores

6.3 Criterios sociales

Aceptación de la alternativa

El cemento es un material muy usado, cuya producción genera aproximadamente el 5% de las emisiones de SO₂ y el 7% de las emisiones de CO₂. Es por ello que el reemplazo de cierto porcentaje de cemento es una alternativa muy benéfica. No obstante, es importante evaluar el impacto ambiental y el ciclo de vida del aprovechamiento de los lodos como cementos (He et al., 2021).

El aprovechamiento de los lodos como material de construcción permite la eliminación eficaz de materiales peligrosos, donde los contaminantes presentes son estabilizados e inmovilizados. Además, dicho aprovechamiento disminuye la explotación incontrolada de los recursos naturales necesarios para la producción de materiales de construcción (Goyal et al., 2019).

6.4 Criterios ambientales

Análisis ambiental

Tabla 73.

Análisis ambiental del aprovechamiento como cemento

Proceso	Subproceso	Actividad	Aspectos ambientales	Medio
Planeación del aprovechamiento	Comercialización del lodo	Contratación	*Generación de empleo	Socioeconómico
		Empacado y sellado	*Incremento en la oferta de aprovechamiento de los lodos	
			Transporte del producto	*Consumo de materia prima
Operación	Aprovechamiento	Uso del cemento con lodos	*Consumo de combustible	Socioeconómico
			*Incremento en los ingresos municipales	
Cierre y	Desmantelamiento	Retiro de la	*Disminución de la colmatación de lodos	Abiótico
			*Disminución de la disposición inadecuada de residuos	
			*Incremento en la vida útil de los rellenos sanitarios	
			*Cambio en el uso de los lodos	
			*Generación de residuos sólidos	

abandono	infraestructur a	*Consumo de combustible *Incremento en la demanda de recolección y disposición final de lodos *Incremento en los costos de gestión de lodos *Cambio en la disponibilidad de aprovechamiento de los lodos	Socioeco nómico
----------	---------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------

Fuente. Autores

Anexo F

Análisis de las alternativas de tratamiento (deshidratación y estabilización) con base en el AHP (proceso analítico jerárquico)

Con base en la tabla 74, el criterio con mayor ponderación fue el técnico, seguido del ambiental y el económico. El de menor ponderación fue el social (ver tabla 74).

Tabla 74.

Ponderación de los criterios

	Matriz normalizada			Vector promedio	Criterio
0,503	0,409	0,375	0,563	0,462	Técnico
0,166	0,136	0,375	0,062	0,185	Económico
0,166	0,045	0,125	0,188	0,131	Social
0,166	0,409	0,125	0,188	0,222	Ambiental

Fuente. Autores

AHP de alternativas de deshidratación

MATRIZ ALTERNATIVAS-SUBCRITERIOS**Técnicos**

	Especificaciones técnicas	Disponibilidad de recursos	Zona disponible	Rendimiento
Lechos de secado	0,062	0,474	0,159	0,097
Geotubo	0,501	0,283	0,077	0,555
Filtro prensa	0,219	0,122	0,263	0,097
Centrífuga	0,219	0,122	0,502	0,251

Económico

	Presupuesto	Servicios industriales básicos
Lechos de secado	0,253	0,166
Geotubo	0,043	0,501
Filtro prensa	0,527	0,166
Centrífuga	0,177	0,166

Sociales

	Aceptación de la alternativa	Mano de obra
Lechos de secado	0,123	0,464
Geotubo	0,562	0,168
Filtro prensa	0,072	0,095
Centrífuga	0,242	0,272

Ambientales

	Emisiones	Residuos líquidos	Residuos sólidos	Materia prima	Vectores	Consumo de energía
Lechos de secado	0,076	0,122	0,168	0,095	0,077	0,464
Geotubo	0,544	0,122	0,095	0,464	0,502	0,272
Filtro prensa	0,136	0,474	0,272	0,168	0,159	0,168
Centrífuga	0,244	0,283	0,464	0,272	0,263	0,095

	A				X
Lechos de secado	0,062	0,474	0,159	0,097	0,062
Geotubo	0,501	0,283	0,077	0,555	0,397
Filtro prensa	0,219	0,122	0,263	0,097	0,335
Centrífuga	0,219	0,122	0,502	0,251	0,206



Vector de prioridad técnico	
	0,265
	0,283
	0,170
	0,282

	A		X
Lechos de secado	0,253	0,166	0,75094
Geotubo	0,043	0,501	0,24906
Filtro prensa	0,527	0,166	
Centrífuga	0,177	0,166	



Vector de prioridad económico	
	0,232
	0,157
	0,438
	0,174

	A		X
Lechos de secado	0,123	0,464	0,24906
Geotubo	0,562	0,168	0,75094
Filtro prensa	0,072	0,095	
Centrífuga	0,242	0,272	



Vector de prioridad social	
	0,379
	0,266
	0,090
	0,265

	A						X
Lechos de secado	0,076	0,122	0,168	0,095	0,077	0,464	0,337
Geotubo	0,544	0,122	0,095	0,464	0,502	0,272	0,232
Filtro prensa	0,136	0,474	0,272	0,168	0,159	0,168	0,169
Centrífuga	0,244	0,283	0,464	0,272	0,263	0,095	0,102
							0,091
							0,069



Vector de prioridad ambiental	
	0,131
	0,339
	0,245
	0,285



	Técnico	Económico	Social	Ambiental	X
Lechos de secado	0,265	0,232	0,379	0,131	0,462
Geotubo	0,283	0,157	0,266	0,339	0,185
Filtro prensa	0,170	0,438	0,090	0,245	0,131
Centrífuga	0,282	0,174	0,265	0,285	0,222



Vector de prioridad total	
	0,244
	0,270
	0,225
	0,260

Según los resultados de la ponderación establecida por el método AHP, el geotubo es la mejor alternativa, seguida la centrífuga, posteriormente el lecho de secado. El filtro prensa resulta ser la alternativa de deshidratación con menor prioridad

AHP de alternativas de estabilización

MATRIZ ALTERNATIVAS-SUBCRITERIOS
Técnicos

	Especificaciones técnicas	Disponibilidad de recursos	Zona disponible	Rendimiento
Compostaje	0,392	0,209	0,402	0,471
Vermicompostaje	0,254	0,415	0,185	0,139
Cal	0,175	0,209	0,240	0,053
Cemento	0,118	0,121	0,105	0,093
OASC	0,062	0,046	0,068	0,245

Económico

	Presupuesto	Servicios industriales básicos
Compostaje	0,172	0,108
Vermicompostaje	0,389	0,269
Cal	0,251	0,406
Cemento	0,116	0,108
OASC	0,072	0,108

Social

	Aceptación de la alternativa	Mano de obra
Compostaje	0,203	0,172
Vermicompostaje	0,203	0,116
Cal	0,074	0,251
Cemento	0,117	0,389
OASC	0,402	0,072

Ambiental

	Emisiones	Residuos líquidos	Residuos sólidos	Materia prima	Vectores	Consumo de energía
Compostaje	0,259	0,136	0,389	0,389	0,087	0,297
Vermicompostaje	0,073	0,136	0,172	0,172	0,087	0,297
Cal	0,136	0,259	0,072	0,251	0,177	0,297
Cemento	0,136	0,073	0,116	0,116	0,256	0,072
OASC	0,397	0,397	0,251	0,072	0,394	0,037

	A					X	
Compostaje	0,392	0,209	0,402	0,471	0,062		Vector de prioridad técnico
Vermicompostaje	0,254	0,415	0,185	0,139	0,397		0,339
Cal	0,175	0,209	0,240	0,053	0,335		0,271
Cemento	0,118	0,121	0,105	0,093	0,206		0,185
OASC	0,062	0,046	0,068	0,245			0,110
							0,096

	A		X	
Compostaje	0,172	0,108	0,751	Vector de prioridad económico
Vermicompostaje	0,389	0,269	0,249	0,156
Cal	0,251	0,406		0,359
Cemento	0,116	0,108		0,290
OASC	0,072	0,108		0,114
				0,081

	A		x	
Compostaje	0,203	0,172	0,249	Vector de prioridad social
Vermicompostaje	0,203	0,116	0,751	0,180
Cal	0,074	0,251		0,138
Cemento	0,117	0,389		0,207
OASC	0,402	0,072		0,321
				0,154

	A						X	
Compostaje	0,259	0,136	0,389	0,389	0,087	0,297	0,337	Vector de prioridad ambiental
Vermicompostaje	0,073	0,136	0,172	0,172	0,087	0,297	0,232	0,253
Cal	0,136	0,259	0,072	0,251	0,177	0,297	0,169	0,131
Cemento	0,136	0,073	0,116	0,116	0,256	0,072	0,102	0,180
OASC	0,397	0,397	0,251	0,072	0,394	0,037	0,091	0,122
							0,069	0,314

	Técnico	Económico	Social	Ambiental	X	
Compostaje	0,339	0,156	0,180	0,253	0,462	Vector de prioridad total
Vermicompostaje	0,271	0,359	0,138	0,131	0,185	0,265
Cal	0,185	0,290	0,207	0,180	0,131	0,239
Cemento	0,110	0,114	0,321	0,122	0,222	0,206
OASC	0,096	0,081	0,154	0,314		0,141
						0,149

Según los resultados de la ponderación establecida por el método AHP, el compostaje con paja de trigo es la mejor alternativa, seguida del vermicompostaje, posteriormente la estabilización alcalina y la estabilización con OASC. La estabilización con cemento resulta ser la alternativa con menor prioridad

REFERENCIAS

- Alarcón, V. (2016). Al rescate de los suelos. *Revista de descontaminación industrial, recursos energéticos y sustentabilidad*(141), 108-110.
- Alcaldía de Ábrego, N. d. (2001). *Ábrego PBOT 2001-2009*. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/365650728/Abrego-Pbot-2001-2009>
- Alcaldía de Ábrego, N.S. (2016). *Plan de Desarrollo 2016-2019*. Obtenido de <https://cpd.blob.core.windows.net/test1/54003planDesarrollo.pdf>
- Alcaldía de Ábrego, N.S. (18 de Febrero de 2020). *Plan de desarrollo 2020-2023*. Obtenido de https://abregonortedesantander.micolombiadigital.gov.co/sites/abregonortedesantander/content/files/000495/24724_8-acuerdo-municipal--decreto-de-adocion-de-aprobacion-del-plan-de-desarrollo-municipal-20202023.pdf
- Alcaldía de Ábrego, Norte de Santander. (2016). *Plan de Desarrollo 2016-2019*. Recuperado el 28 de Septiembre de 2020, de https://abregonortedesantander.micolombiadigital.gov.co/sites/abregonortedesantander/content/files/000055/2729_plandedesarrollo20162019.pdf
- Alcaldía de Ábrego, Norte de Santander. (2018). *Plan de saneamiento y manejo de vertimientos, municipio de Ábrego, Norte de Santander*. Recuperado el 19 de Abril de 2020, de <http://www.abrego-nortedesantander.gov.co/contrataciones/cdsgps01692018-904148>
- Alcaldía de Ituango. (2008). *Plan Maestro de Acueducto y Alcantarillado*. Plan Maestro, Ituango, Colombia.
- Aldana, A., & Pérez, R. (2017). *Propuesta para el tratamiento y aprovechamiento de lodos en una PTAP convencional. Caso de estudio: Planta de tratamiento de agua potable del Espinal - Tolima*. Trabajo de pregrado, Universidad de la Salle, Bogotá. Obtenido de https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/702/
- Alomá, I., Blázquez, G., Calero, M., Martín, Á., Rodríguez, I., & Ronda, A. (2013). Panorama general en torno a la contaminación del agua por níquel. La biosorción como. *Revista Cubana de Química*, 25(3), 266-280.
- Amador, A. (2017). *Valorización de lodos de depuradora como fertilizante en el marco de la economía circular: de residuo a recurso*. Trabajo de posgrado, Lugo, España.
- Araque, D., & Monsalve, L. (2018). *Evaluación de alternativas para el manejo y disposición final de los lodos generados en la planta de potabilización del municipio de Melgar-Tolima*. Trabajo de pregrado, Universidad de la Salle, Melgar, Colombia. Obtenido de https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/817/
- Araujo, L., Molina, S., & Noguera, L. (2018). Aprovechamiento de los lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales como materia prima en la industria de la construcción: revisión bibliográfica. *Revista Agunkuyâa*, 8(1), 1-11.
- Arceivala, S. J. (1978). *Wastewater treatment and disposal. Engineering and ecology*. New York: Marcel Dekker.
- Ardjmand, M., & Amin, M. (2020). Selecting a suitable model for collecting, transferring, and recycling drilling wastes produced in the operational areas of the Iranian offshore oil company (IOOC) using analytical hierarchy process (AHP). *Journal of Environmental Management*, 259, 1-12.
- Barrios, J., & Jiménez, B. (2000). *Destrucción de coliformes fecales y huevos de helmintos en lodos fisicoquímicos por vía ácida*. XII Congreso Nacional 2000 Ciencia y Conciencia

- Federacion Mexicana de Ingenieria Sanitaria y ciencias Ambientales, Instituto de Ingeniería UNAM, México.
- Bastidas, P., & Chuquitarco, P. (2019). *Estudio de lodos en la laguna de oxidación N° 4 y geotubo del sistema de tratamiento*. Trabajo de pregrado, Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador.
- Benavent, I. (2016). *El mal funcionamiento de las lagunas de estabilización se relaciona con la falta de mantenimiento*. Recuperado el 1 de Junio de 2020, de <http://udep.edu.pe/hoy/2016/el-mal-funcionamiento-de-las-lagunas-de-estabilizacion-se-relaciona-con-la-falta-de-mantenimiento/#:~:text=%E2%80%9CEl%20mal%20funcionamiento%20de%20las%20lagunas%20de%20estabilizaci%C3%B3n%20se,con%20la%20falta%20de%20mantenim>
- Brito, I. (2019). *Diseño y optimización de un filtro de placas verticales*. Trabajo de pregrado, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile.
- Builes, S. (2010). *Tratamiento y adecuada disposición de lodos domésticos e industriales*. Monografía, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia.
- Busto, Y., Cabrera, X., & Peralta, L. (2010). Tratamiento térmico: posible alternativa de recuperación de mercurio presente en lodos generados en la producción de cloro-sosa. *Tecnología Química*, 30(2), 67-73.
- Caján, J. (2019). *Higienización de lodos residuales con cal viva para la elaboración de compostaje en las lagunas de oxidación del Distrito de San José*. Trabajo de pregrado, Universidad César Vallejo, Chiclayo, Perú.
- Casal, J. (2007). *Dimensionamiento de la capacidad de tratamiento óptima de una planta para la oxidación de residuos en agua supercrítica*. Trabajo de pregrado, Universidad de Cádiz, Cádiz, España.
- Castañeda, D. (2018). *Viabilidad del aprovechamiento de biosólido proveniente de la PTAR El Salitre como enmienda para producción de un fertilizante orgánico – mineral*. Trabajo de pregrado, Universidad Santo Tomás, Bogotá, Colombia.
- Castellanos, J., Merchán, N., Galvis, J., & Manjarres, E. (2018). Deshidratación de los lodos en lecho de secado y su influencia sobre la actividad biológica de los microorganismos. *Gestión y Ambiente*, 242-251.
- Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia-CTA. (2017). *Misión crecimiento verde*. Obtenido de https://www.dnp.gov.co/Crecimiento-Verde/Documents/ejes-tematicos/Agua/INFORME_DIAGNOSTICO_28_sep_2017.pdf
- Chaves, V. (2018). *Caracterización y propuesta para el tratamiento y disposición de lodos generados en el modelo físico de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de El Roble de Puntarenas*. Trabajo de pregrado, Universidad de Costa Rica, Costa Rica.
- Cheilas, A., Katsioti, M., Georgiades, A., Malliou, O., Teas, C., & Haniotakis, E. (2007). Impact of hardening conditions on to stabilized/solidified products of cement–sewage sludge–jarosite/alunite. *Cement and Concrete Composites*, 29(4), 263-269.
- Chunga, E. (Marzo de 2014). *Propuesta de compostaje de los lodos removidos de las lagunas de estabilización de la universidad de Piura*. Trabajo de pregrado, Universidad de Piura, Piura, Perú.
- Coca, M. (2021). *Diseño de una instalación de compostaje de residuos orgánicos para obtener fertilizantes de uso agrícola*. Trabajo de pregrado, Universidad de Valladolid, Valladolid, España.

- Comisión Nacional del Agua. (2015). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento Operación y Mantenimiento de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Lagunas de Estabilización*. Recuperado el 3 de Enero de 2020, de <http://aneas.com.mx/wp-content/uploads/2016/04/SGAPDS-1-15-Libro47.pdf>
- Congreso de Colombia. (1993). *Ley 99 de 1993*. Recuperado el 4 de Febrero de 2021, de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=297>
- Contraloría del departamento de Norte de Santander. (2013). *Informe anual del estado de los recursos naturales y del ambiente del departamento Norte de Santander*. Recuperado el 12 de Junio de 2020, de <http://www.contraloriands.gov.co/ControlAmbientals/ControlAmbiental>
- Cordova, L. (2016). *Propuesta de mejora del proceso de compostaje de los residuos orgánicos, generados en la actividad minera, empleando microorganismos eficientes Unidad Minera del Sur*. Trabajo de pregrado, Universidad Nacional de San Agustín Arequipa, Arequipa, Perú.
- CORPONOR. (2010). *Plan de ordenación y manejo ambiental de la cuenca hidrográfica Río Algodonal*. Obtenido de https://www.academia.edu/6631279/Documento_Ejecutivo_Plan_del_POMCH_del_Rio_Algodonal
- CORPONOR. (2018). *PSMV del municipio de Ábrego para el periodo 2008-2018*. Ábrego.
- CORPONOR. (17 de Noviembre de 2020). Laguna de estabilización de Ábrego, N.S. (G. Cárdenas, Entrevistador)
- Cross, D. (2014). *Estabilización de lodos en lagunas*. Recuperado el 3 de Julio de 2021, de <https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/123456789/7772/NR40076.pdf?sequence=1>
- DANE. (s.f). *Estimaciones de población 1985 - 2005 y proyecciones de población 2005 - 2020 total municipal por área*. Obtenido de https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/poblacion/proyepobla06_20/Municipal_ar ea_1985-2020.xls
- De la Casa, J., & Castro, E. (2018). Fuel savings and carbon dioxide emission reduction in a fired clay bricks production plant using olive oil wastes: A simulation study. *Journal of Cleaner Production*, 185, 230-238.
- Díaz, A., Veliz, A., Eliet, L., & Venta, M. (2015). Tratamiento de lodos, generalidades y aplicaciones. *Revista CENIC*, 46, 1-10.
- Díaz, L., & Vallejo, A. (2017). *Propuesta para el diseño del nuevo relleno sanitario para el municipio de Aguachica - Cesar*. Trabajo de pregrado, Universidad Católica de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Donado, R. (Agosto de 2013). *Plan de gestión para lodos generados en las PTAR de los municipios de Cumaral y San Martín de los llanos en el departamento del Meta*. Recuperado el 8 de Agosto de 2019, de <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/13496/DonadoHoyosRoger2013.pdf?sequence=1>
- Doria, G. (2006). *Evaluación ambiental de los niveles de níquel, cadmio y mercurio en la cuenca del río San Jorge en el departamento de Córdoba Universidad de Córdoba*. Trabajo de pregrado, Universidad de Córdoba , Córdoba, Colombia.
- El tiempo. (2013). *Emergencia en Ocaña por rara epidemia*. Obtenido de <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-274964>

- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. (1993). *Title 40 Protection of Environmental: Part 503 Standards for the Use or Disposal of Sewage Sludge*. Obtenido de <https://www.govinfo.gov/content/pkg/CFR-2018-title40-vol32/xml/CFR-2018-title40-vol32-part503.xml>
- Equipo Técnico de Educación Ambiental (ETEA), Unidad de Montevideo Rural, Departamento de Sistemas Ambientales. (2018). *Manual de vermicompostaje. Cómo reciclar nuestros residuos orgánicos*. Manual de vermicompostaje, Montevideo, Uruguay.
- Erdogmus, E., Harja, M., Gencel, O., Sutcu, M., & Yaras, A. (2021). New construction materials synthesized from water treatment sludge and fired clay brick wastes. *Journal of Building Engineering*, 42, 1-9.
- Escobar, S., Sánchez, L., Nájera, H., Gutierrez, J., & Rojas, M. (2014). Destrucción de huevos de helminto mediante procesos no convencionales. *Ciencia y desarrollo*, 40(272), 60-66.
- Espillico, E. (2019). *Elaboración de ladrillos a partir de lodos generados por plantas de tratamiento de agua potable y el uso en la construcción*. Trabajo de pregrado, Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú.
- Estruagua. (2019). *Filtro de prensa hidráulico*. Recuperado el 5 de Noviembre de 2020, de <https://estruagua.com/productos/filtro-prensa-hidraulico-murano/>
- Ettoumi, M., Jouini, M., Neculita, C. M., Bouhlel, S., Coudert, L., Taha, Y., & Benzaazoua, M. (2021). Characterization of phosphate processing sludge from Tunisian mining basin and its potential valorization in fired bricks making. *Journal of Cleaner Production*, 284, 1-12.
- Franchi, I., Fleitas, V., Rodríguez, R., López, L., Ramírez, C., Rezzano, N., . . . Rodríguez, I. (2018). *Gestión de lodos con Arsénico*. 1 Congreso Nacional de Gestión Sostenible de residuos, Montevideo, Uruguay.
- Fu, Z., Guo, W., Dang, Z., Hu, Q., Wu, F., Feng, C., . . . Giesy, J. (2017). Refocusing on Nonpriority Toxic Metals in the Aquatic Environment in China. *Environmental Science and Technology*, 51(6), 3117-3118.
- G & G Soluciones con tecnología de punta. (2014). *Geotubos® (DW): Confinamiento y Secado de Lodos*. Recuperado el 19 de Abril de 2021, de <http://geoygeo.com/geotubos2.html#tab-3-content-2-tab-tab>
- Gaete, H., Hidalgo, M., Neaman, A., & Ávila, G. (2010). Evaluación de la toxicidad de cobre en suelos a través de biomarcadores de estrés oxidativo en eisenia foetida. *Química Nova*, 33(3), 566-570.
- Galindo, J., & Avellaneda, E. (2016). *Análisis técnico del uso de silicato de sodio para estabilización química de suelos*. Trabajo de pregrado, Bogotá, Colombia.
- Gama, E. (2017). *Rediseño a las lagunas de estabilización existentes en la empresa BIOH20 S.A.S*. Trabajo de pregrado, Universidad de Cundinamarca, Cundinamarca, Colombia.
- Garg, P., Gupta, A., & Satya, S. (2006). Vermicomposting of different types of waste using Eisenia foetida: A comparative study. *Bioresource Technology*, 97(3), 391-395.
- Geo Soluciones. (13 de Abril de 2021). Cotización del bombeo y confinamientos de lodos. Cundinamarca, Colombia .
- Gloyna, E. (1971). *Waste Stabilization Ponds*. Ginebra: H.M.S.O.
- Gobernación de Norte de Santander. (2014). *Contratación de una consultoría especializada para la actualización de los indicadores y la generación de un diagnóstico técnico de la línea base de la infraestructura en la prestación de servicios públicos, para el departamento*

- Norte de Santander*. Informe diagnóstico-Municipio de Ábrego, Ábrego, Norte de Santander.
- González, I. (2015). *Generación, caracterización y tratamiento de lodos de EDAR*. Tesis doctoral, Universidad de Córdoba, Montería, Colombia.
- Griffith, J. W., & Raymond, D. H. (2002). The first commercial supercritical water oxidation sludge processing plant. *Waste Management*, 22(4), 453-459.
- Gualoto, J. (2016). *Propuesta de gestión de lodos residuales municipales. Caso de estudio: Planta de tratamiento de agua residual de la parroquia rural de Nono*. Trabajo de pregrado, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador. Recuperado el 8 de Marzo de 2020, de Propuesta de gestión de lodos residuales municipales. Caso de estudio: Planta de tratamiento de agua residual de la parroquia rural de Nono.
- Gualoto, J. (2016). *Propuesta de Gestión de lodos residuales municipales. Caso de estudio: Planta de tratamiento de agua residual de la parroquia rural de nono*. Trabajo de pregrado, Escuela Politécnica Nacional, Quito. Recuperado el 6 de Octubre de 2019
- Guangyin, Z., & Youcai, Z. (2017). *Chapter Six - Pollution Control and Recycling of Sludge in Sanitary Landfill*. Butterworth-Heinemann.
- Guerra, E., Vázquez, M., & Díaz, M. (2003). Dynamics of the co-composting of barley waste with liquid poultry manure. *Journal of the science of food and agriculture*, 83(3), 166-172.
- He, J., Feng, X., Zhou, L., & Zhang, L. (2021). The effect of leachate seepage on the mechanical properties and microstructure of solidified sludge when used as a landfill temporary cover material. *Waste Management*, 130, 127-135.
- He, Z., Yang, Y., Yuan, Q., Shi, J., Liu, B., Liang, C., & iDu, S. (2021). Recycling hazardous water treatment sludge in cement-based construction materials: Mechanical properties, drying shrinkage, and nano-scale characteristics. *Journal of Cleaner Production*, 290, 1-11.
- Henry, B., Oakley, S., Salguero, L., Saravia, P., & Monge, J. (s.f). *Guía de referencia de Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales utilizados en Centro América*. Guía, Estados Unidos.
- Hernández, K., & Ramírez, R. (2016). *Evaluación y valoración de la calidad del agua para consumo humano del río Algodonal entre los municipios de Ábrego y Ocaña*. Trabajo de pregrado, Universidad Francisco de Paula Santander, Ocaña, Colombia .
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, M. (2014). *Metodología de la investigación*. México: McGRAW-Hill.
- Hidalgo, A. (s.f). *Análisis de diferentes técnicas de inertización de residuos peligrosos*. Congreso Nacional del Medio Ambiente, Universidad de Murcia.
- Hincapié, A., & Puerto, N. (2019). *Evaluación de la reducción del cromo total en muestras de suelos aledaños al Río Cauca por medio de un proceso químico y biológico*. Trabajo de pregrado, Universidad El Bosque, Bogotá, Colombia.
- Hodes, M., Marrone, P., Hong, G., Smith, K., & Tester, J. (2004). Salt precipitation and scale control in supercritical water oxidation - Part A: Fundamentals and research. *The Journal of Supercritical Fluids*, 29(3), 265-288.
- Homecenter. (s.f). *Electrobomba Centrífuga 10 HP*. Recuperado el 8 de Febrero de 2021, de <https://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/412245/Electrobomba-Centrifuga-10-HP/412245>

- Hurtado, A. (2015). *Proceso de transformación de biosólidos de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) con vermicompostaje y su aplicación en germinación, caso países europeos: España, Reino Unido, Francia, Portugal, Italia*. Trabajo de pregrado, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia.
- Hussain, N., Abbasi, T., & Abbasi, S. (2017). Enhancement in the productivity of ladies finger (*Abelmoschus esculentus*) with concomitant pest control by the vermicompost of the weed salvinia (*Salvinia molesta*, Mitchell). *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 6, 335–343.
- IDEAM. (2007). *Resolución 0062 de 2007*. Recuperado el 29 de Marzo de 2020, de http://www.ideam.gov.co/documents/51310/56882/Parte_1_Resolucion_0062_de_2007.pdf/6cd3555a-2bfc-403a-83ae-5f4fde24e5dc
- Indrani, Y., Adil, A., & Ori, L. (2019). Vermicomposting of different organic materials using the epigeic earthworm *Eisenia foetida*. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 8, 23–36.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación - ICONTEC. (23 de Marzo de 2011). *NTC 5167 de 2011. Productos para la industria agrícola. Productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores del suelo*. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/451121592/NTC-5167>
- Jácome, J. (10 de Octubre de 2020). Laguna de estabilización de Ábrego, N.S. (G. Cárdenas, Entrevistador)
- Jamali, M., Kazi, T., Arain, M., Afridi, H., Memon, A., Jalbani, N., & Shah, A. (2008). Use of Sewage Sludge After Liming as Fertilizer for Maize Growth. *Pedosphere*, 18(2), 203-213.
- Kebibeche, H., Khelil, O., Kacem, M., & Harche, M. (2019). Addition of wood sawdust during the co-composting of sewage sludge and wheat straw influences seeds germination. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 168, 423-430.
- Leyva, B. (2017). *Implementación de un equipo deshidratador de lodos para reducir costos en la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas, minera Coimolache s.a. 2017*. Universidad Privada del Norte, Cajamarca, Perú.
- Lilivichuzca, M. (2016). *Tratamiento de lodos residuales procedentes de plantas de tratamiento de aguas residuales mediante procesos electroquímicos para la disminución de la concentración de huevos de helmintos*. Cuenca, Ecuador.
- Lingling, X., Wei, G., Tao, W., & Nanru, Y. (2005). Study on fired bricks with replacing clay by fly ash high volume ratio. *Construction and Building Materials*, 19(3), 243-247.
- Lü, H., Chen, X., Mo, C., Huang, Y., He, M., Li, Y., . . . Cai, Q. (2021). Occurrence and dissipation mechanism of organic pollutants during the composting of sewage sludge: A critical review. *Bioresource Technology*, 238, 1-12.
- Malacatus, P., Chuquitarco, P., & Bastidas, P. (2019). Análisis químico y de peligrosidad de lodos del sistema de tratamiento de aguas residuales en la industria de palma. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 1(2), 30-38.
- Malliou, O., Katsioti, M., Georgiadis, A., & Katsiri, A. (2007). Properties of stabilized/solidified admixtures of cement and sewage sludge. *Cement and Concrete Composites*, 29(1), 55-61.
- Mamani, Y. (2017). *Evaluación de la operatividad y rediseño de la laguna de estabilización del distrito de Ilave, provincia de el Collao*. Trabajo de pregrado, Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú.

- Marmolejo, L., Botina, A., & Torres, P. (2005). Mejoramiento del potencial agrícola de lodos digeridos anaeróbicamente con el uso de cal. *Agronomía Colombiana*, 23(2), 310-316.
- Martin, J. (2018). *Evaluación de la calidad del biosólido obtenido mediante el proceso de digestión anaerobia termofílica, de los lodos residuales de la laguna de estabilización de la ciudad de Juliaca*. Trabajo de pregrado, Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú.
- Martínez, A., Padron, W., Rodríguez, O., Escarola, M., Hernández, J., Elvira, E., . . . Chiquito, O. (2014). Alternativas actuales del manejo de lixiviados. *Avances en Química*, 9(1), 37-47.
- Medina, A. (2017). *Propuesta para la producción de un abono orgánico partiendo de los lodos residuales de la planta de tratamiento de aguas residuales del colegio Rochester*. Trabajo de pregrado, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia.
- Méndez, K. (Junio de 2019). *Estudio preliminar de la estabilización/solidificación de lodos galvánicos de la Empresa Industrial de Instalaciones Fijas en matrices de cemento portland*. Recuperado el 27 de Mayo de 2021, de <https://dspace.uclv.edu.cu/bitstream/handle/123456789/11880/Amado%20M%c3%a9ndez%2c%20%20Keydis.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Mercado, A. (2014). *Sustentación de título por Suficiencia Profesional - Centrifugación*. Trabajo de pregrado, Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, Perú.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). *Decreto 1076 de 2015*. Obtenido de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=78153>
- Ministerio de Desarrollo Económico . (Noviembre de 2000). *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS* . Obtenido de https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/documentos/010710_ras_titulo_e_.pdf
- Ministerio de Medio Ambiente y Agua. (2019). *Operación y Mantenimiento para el tratamiento de aguas residuales mediante Lagunas de Estabilización*. Recuperado el 20 de Abril de 2020, de https://www.bivica.org/files/5527_aguas-residuales-lagunas-estabilizacion.pdf
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2014). *Decreto 1287 de 2014*. Recuperado el 4 de Febrero de 2021, de <http://parquearvi.org/wp-content/uploads/2016/11/Decreto-1287-de-2014.pdf>
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2014). *Decreto 1287 del 2014*. Recuperado el 29 de Septiembre de 2019, de <http://www.minvivienda.gov.co/Decretos%20Vivienda/1287%20-%202014.pdf>
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2017). *Decreto 1784 de 2017*. Recuperado el 7 de Junio de 2021, de <http://www.regiones.gov.co/prensa/2017/Documents/DECRETO%201784%20DEL%202020DE%20NOVIEMBRE%20DE%202017.pdf>
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2018). *Resolución ministerial 93 de 2018*. Recuperado el 7 de Marzo de 2020, de <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/21130/RM-093-2018-VIVIENDA.pdf>
- Miranda, R., Ramírez, R., & Angarita, W. (2016). Análisis microbiológico de la calidad del agua del Río Algodonal en el tramo comprendido entre los municipios de Ábrego y Ocaña, Norte de Santander. *Ingenio*, 11(1), 189-200.
- Mohajerani, A. (2019). *Infobae*. Obtenido de <https://www.infobae.com/america/the-new-york-times/2019/02/14/investigadores-fabricaron-ladrillos-con-desperdicios-humanos/>

- Morán, D. (2009). *Efecto del encalado y la fertilización con lodos de depuradora urbana sobre la evolución edáfica, productiva y biodiversidad de un sistema silvopastoral desarrollado bajo Populus x canadensis en el noroeste de España*. Trabajo de posgrado, Universidad de Santiago de Compostela, Santiago de Compostela, España.
- Morsch, P., Kühn, J., Werner, R., Anlauf, H., Geier, D., Becker, T., & Nirschl, H. (Nov de 2020). Influence of the filter cloth and nozzles type on the in-situ cleaning procedure of filter press. *Chemical Engineering Science*, 226, 1-12.
- Moscoso, D. (2011). *Tratamineto de los lodos generados en la planta potabilizadora de Mahuarca mediante el uso de un lecho de secado*. Trabajo de posgrado, Azogues, Ecuador.
- MUD CAT Liquid Waste Technology. (2018). Dragas eléctricas. Bogotá, Colombia.
- Nadal, I., Gondim, C., Platero, L., & Navarro, F. (2015). Uso de lodos de depuradora en agricultura: Patógenos y resistencias a antibióticos. *Revista de salud ambiental*, 15(2), 113-120.
- Nelson, K., Cisneros, B., Tchobanoglous, G., & Darby, J. (Jan de 2004). Sludge accumulation, characteristics, and pathogen inactivation in four primary waste stabilization ponds in central Mexico. *Water Research*, 38(1), 111-127.
- Oakley, S. (2005). *Manual de diseño, construcción, operación y mantenimiento, monitoreo y sostenibilidad*. Recuperado el 20 de Abril de 2020, de <http://www.desastres.hn/docum/Honduras/laguna-de-estabilizacion-en-honduras.pdf>
- Organización Panamericana de Salud. (2005). *Guía para la Operación y Mantenimiento de Tanques Sépticos, Tanques Imhoff y Lagunas de Estabilización*. Recuperado el 17 de Abril de 2021, de <https://es.slideshare.net/EdwinMamaniVilcapaza/gua-para-la-operacion-y-mantenimiento-de-tanques-spticos-tanques-imhoff-y-lagunas-de-estabilizacion>
- Ortiz, C. (2010). *Prevalencia de huevos de helmintos en lodos, agua residual cruda y tratada, provenientes de un sistema de tratamiento de aguas residuales del municipio el Rosal, Cundinamarca*. Trabajo de posgrado, Bogotá, Colombia.
- Patiño, J. (2012). *Costos de inversión inicial, operación y mantenimiento de tratamientos naturales de aguas residuales para pequeñas comunidades en Colombia*. Trabajo de pregrado, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.
- Pavlík, Z., JanFořt, Záleská, M., Pavlíková, M., Trník, A., Medved, I., . . . Černý, R. (2016). Energy-efficient thermal treatment of sewage sludge for its application in blended cements. *Journal of Cleaner Production*, 112, 409-419.
- Peláez, M., Bustamante, J., & Gómez, E. (2016). Presencia de cadmio y plomo en suelos y su bioacumulación en tejidos vegetales en especies de brachiaria en el magdalena medio colombiano. *Revista Luna Azu*(43), 82-101.
- Pérez, M. (2016). *Estabilización/Solidificación de metales peligrosos en matrices geopoliméricas que contienen zeolitas*. Trabajo de pregrado, Universidad de Sevilla, Sevilla, España.
- Perret, H. (2015). *Estabilización de loess con silicato para uso vial*. Trabajo de grado, Universidad Católica de Córdoba, Córdoba, Argentina.
- Pinzón, L., & Sotelo, H. (2016). *Comportamiento de metales pesados entre los lodos bentónicos y la corriente de agua del río Bogotá*. Congreso, CONAMA, Madrid, España. Recuperado el 12 de Marzo de 2020

- Portela, J. R., García, M. B., Vadillo, V., Abelleira, J., Sánchez, J., Nebot, E., & Martínez, E. (2010). Oxidación en agua supercrítica: una tecnología prometedora más cerca de ser implantada. *Gestión de residuos industriales*, 1-3.
- Prieto, J., González, C., Román, A., & Prieto, F. (2009). Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 10(1), 29-44.
- Rámila, J., & Rojas, S. (2008). *Alternativas de uso y disposición de biosólidos y su impacto en las tarifas de agua*. Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Ramírez, B. (2020). *Eficiencia de Eisenia Foetida en el tratamiento de lodos derivados de una planta de tratamiento de aguas residuales, mediante el vermicompostaje a escala piloto*. Trabajo de pregrado, Universidad Peruana Unión, Lima, Perú.
- Ramírez, J., & Gallego, D. (2016). *Análisis e implementación de un proceso de compostaje para la valorización de lodos provenientes de plantas de tratamiento de agua residual industrial*. Trabajo de pregrado, Universidad Católica de Manizales, Manizales, Colombia.
- Ramírez, J., & Gallego, D. (2016). *Análisis e implementación de un proceso de compostaje para la valorización de lodos provenientes de plantas de tratamiento de agua residual industrial*. Trabajo de pregrado, Universidad Católica de Manizales, Manizales, Colombia.
- Reutelschöfer, T. (2015). *Guía de Operación y Mantenimiento de Lagunas de Oxidación en Plantas de Tratamiento de Aguas*. Recuperado el 6 de Octubre de 2019, de https://periagua.weebly.com/uploads/8/9/3/5/89354334/guia_o_y_m_ptar.pdf
- Rincón, L. (2019). *Aprovechamiento de los lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales en la empresa láctea, municipio de Cogua*. Trabajo de posgrado, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia.
- Rivera, V. (2016). *Valoración de los procesos de deshidratación de lodos de depuradora*. Trabajo de pregrado, Escuela Universitaria Politécnica La Almunia, La Aluminia, España.
- Rivera, Y., Moreno, L., Herrera, M., & Romero, H. (2016). La toxicidad por aluminio (Al³⁺) como limitante del crecimiento y la productividad agrícola: el caso de la palma de aceite. *PALMAS*, 37(1), 11-23.
- Rodríguez, J. (2013). *Propuesta metodológica para tratamiento de lodos provenientes de plantas de potabilización en la sabana de Bogotá (estudio de caso Madrid, Cundinamarca)*. Trabajo de pregrado, Universidad Libre, Bogotá, Colombia.
- Rojas, M., & Herrera, J. (2019). *Aplicación del proceso de análisis jerárquico (AHP) para la selección de medios de transporte con energía renovable basados en los factores socioeconómicos, legales y ambientales en la ciudad de Bogotá*. Trabajo de posgrado, Universidad Jorge Tadeo Lozano, Bogotá, Colombia .
- Rolim, S. (2003). *La operación y mantenimiento de las lagunas de oxidación – garantía de la calidad del tratamiento*. Obtenido de http://minos.vivienda.gob.pe:8081/Documentos_Sica/Modulos/FTA/SECCION%20IV/4.14/867398941_MANUAL%20LAGUNAS%20DE%20OXIDACION%20C3%93N.pdf
- Roychand, R., Patel, S., Halder, P., Kundu, S., Hampton, J., Bergmann, D., . . . Kumar, B. (2021). Recycling biosolids as cement composites in raw, pyrolyzed and ashed forms: A waste utilisation approach to support circular economy. *Journal of Building Engineering*, 38, 1-13.

- Rumky, J., Visigalli, S., Turolla, A., Gelmi, E., Necibi, C., Gronchi, P., . . . Canzianib, R. (2020). Electro-dewatering treatment of sludge: Assessment of the influence on relevant indicators for disposal in agriculture. *Journal of Environmental Management*, 268, 1-10.
- Saaty, T. (1980). *The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resource allocation*. Estados Unidos: Mcgraw-Hill.
- Sánchez, G. (2016). *Ecotoxicología del cadmio. Riesgo para la salud de la utilización de suelos ricos en cadmio*. Trabajo final, Universidad Complutense, Madrid, España.
- Semiyaga, S., Okure, M., Niwagaba, C., Nyenje, P., & Kansime, F. (2017). Optimisation of centrifuge operating conditions for dewatering physically conditioned faecal sludge from urban slums. *Environmental Technology & Innovation*, 8, 28-39.
- Skinde, B., Pandit, A., Sheikh, A., & Ganai, B. (2014). Brick kilns: cause of atmospheric pollution. *Journal of Pollution Effects & Control*, 2(2), 1-7.
- Soliva, M., & Huerta, O. (2005). *Compostaje de lodos resultantes de la depuración de aguas residuales urbanas*. Escola Superior d'Agricultura de Barcelona, Barcelona, España.
- Song, Z., Yu, M., Yang, G., & Sun, Q. (2009). *Removal of microbiological contaminants in a sewage treatment system with constructed wetlands as tertiary treatment*. III Congreso Internacional de Bioinformática e Ingeniería Biomédica, Qingdao Technological University, China.
- Soumaré, M., Demeyer, A., Tack, F. M., & Verloo, M. G. (2002). Chemical characteristics of Malian and Belgian solid waste composts. *Bioresource Technology*, 81(2), 97-101.
- Sperling, M., & Chernicharo, C. (2005). *Biological Wastewater Treatment in Warm Climate Regions*. Londres, Reino Unido: IWA Publishing.
- Steffenino, F. (2019). *Aplicación de geotubos en estabilización de dunas costeras*. X Congreso Nacional de AIDIS, Maldonado, Uruguay.
- Suleiman, H., Rorat, A., Grobelak, A., Grosser, A., Milczarek, M., Płytycz, B., . . . Vandembulcke, F. (2017). Determination of the performance of vermicomposting process applied to sewage sludge by monitoring of the compost quality and immune responses in three earthworm species: *Eisenia fetida*, *Eisenia andrei* and *Dendrobaena veneta*. *Bioresource Technology*, 241, 103-112.
- Sun, F., Lu, D., Shin, J., Haur, T., & Zhou, Y. (2019). Mitigation of membrane fouling in a seawater-driven forward osmosis system for waste activated sludge thickening. *Journal of Cleaner Production*, 241, 1-8.
- Talebniá, F., Karakashe, D., & Angelidaki, v. I. (2010). Production of bioethanol from wheat straw: an overview on pretreatment, hydrolysis and fermentation. *Bioresource Technology*, 101(13), 4744-4753.
- Teoh, S., & Li, L. (2020). Feasibility of alternative sewage sludge treatment methods from a lifecycle assessment (LCA) perspective. *Journal of Cleaner Production*, 1-20.
- Torrado, D. (31 de Marzo de 2020). Laguna de estabilización de Ábrego. (G. Cárdenas, Entrevistador)
- Torrado, M., & Álvarez, E. (11 de Enero de 2021). Laguna de estabilización de Ábrego, N.S. (G. Cárdenas, Entrevistador)
- Torres, M. (2017). *Propuesta para el aprovechamiento de los lodos generados en la PTAR de la empresa regional Aguas del Tequendama*. Trabajo de pregrado, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia. Recuperado el 25 de Marzo de 2020, de Propuesta para el aprovechamiento de los lodos generados en la PTAR de la empresa regional Aguas del Tequendama: <https://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/6593>

- Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos(UAESP). (2018). *Guía técnica para el aprovechamiento de residuos orgánicos a través de metodologías de compostaje y lombricultura*. Recuperado el 29 de Junio de 2020, de http://www.uaesp.gov.co/images/Guia-UAESP_SR.pdf
- Unidad de Servicios Públicos de Ábrego USPA. (29 de Julio de 2020). *Mantenimiento de la laguna de estabilización de Ábrego*. Obtenido de <https://www.facebook.com/AlcaldiadeAbregoNs/posts/706287026874172/>
- Universidade da Coruña, Inditex. (Septiembre de 2015). Obtenido de Tecnologías de deshidratación de fangos: <https://www.wateractionplan.com/documents/177327/558161/Tecnolog%C3%ADas+de+deshidrataci%C3%B3n+de+fangos.pdf/50ea3d5e-f094-7bff-97af-5573fef89055>
- Valderrama, M. (2013). *Factibilidad de aprovechamiento de los lodos de la PTAR del municipio de Chinavita (Boyacá)*. Trabajo de posgrado, Universidad de Manizales , Manizales, Colombia.
- Vanegas, C., & Reyes, R. (2017). Carga superficial máxima en lagunas de estabilización facultativas de Nicaragua. *Nexo*, 30(1), 1-18.
- Velasco, J., Ferrera, R., Almaraz, J., & Parkinson, R. (2016). Emisión de amoníaco durante los procesos de compostaje y vermicompostaje: Aspectos prácticos y aplicados. *Agro productividad* , 9(8), 45-51.
- Vergel, C. (3 de Noviembre de 2020). Laguna de estabilización de Ábrego, N.S. (G. Cárdenas, Entrevistador)
- Vilardi, G., Bavasso, I., Scarsella, M., Verdone, N., & Luca, D. (2020). Fenton oxidation of primary municipal wastewater treatment plant sludge: process modelling and reactor scale-up. *Process Safety and Environmental Protection*, 140, 46-59.
- Water Environment Federation (WEF). (2008). *Operation of Municipal Wastewater Treatment Plants* (Sixth Edition ed.). Alejandria .
- Worley, J., Bass, T., & Vendrell, P. (2008). Use of geotextile tubes with chemical amendments to dewater dairy lagoon solids. *Bioresource Technology*, 4451-4459.
- Wu, Y., S, Zhang, P., Zhang, H., Zeng, G., Liu, J., . . . Gou, X. (2016). Possibility of sludge conditioning and dewatering with rice husk biochar modified by ferric chloride. *Bioresource Technology*, 205, 258-263.
- Xu, D., Wang, S., Tang, X., Gong, Y., Wang, Y., & Zhang, J. (2012). Design of the first pilot scale plant of China for supercritical water oxidation of sewage sludge. *Chemical Engineering Research and Design*, 90(2), 288-297.
- Yajure, C. (2015). Comparación de los métodos multicriterio AHP y AHP Difuso en la selección de la mejor tecnología para la producción de energía eléctrica a partir de carbón mineral. *Scientia et Technica*, 20(3), 255-260.
- Yan, Z., Örmeci, B., Han, Y., & Zhang, J. (2020). Supercritical water oxidation for treatment of wastewater sludge and recalcitrant organic contaminants. *Environmental Technology & Innovation*, 18, 1-11.
- Yáñez, R., Alonso, J., & Díaz, M. (2009). Influence of bulking agent on sewage sludge composting process. *Bioresource Technology*, 100(23), 5827-5833.
- Youcai, Z., & Ziyang, L. (2017). *Chapter One - General Structure of Sanitary Landfill*. Butterworth-Heinemann.

- Zhang, F., Shen, B., Su, C., Xu, C., Ma, J., Xiong, Y., & Ma, C. (Aug de 2017). Energy consumption and exergy analyses of a supercritical water oxidation system with a transpiring wall reactor. *Energy Conv. Manag*, 145, 82-92.
- Zhang, J., Yue, Q., Xia, C., Yang, K., Zhao, P., Gao, B., & Yu, H. (2017). The study of Na₂SiO₃ as conditioner used to deep dewater the urban sewage dewatered sludge by filter press. *Separation and Purification Technology*, 174, 331-337.
- Zhang, S., Zhang, Z., Zhao, R., Gu, J., Liu, J., Örmeci, B., & Zhang, J. (2017). A review of challenges and recent progress in supercritical water oxidation of wastewater. *Chemical Engineering Communications*, 204(2), 265-282.
- Zhao, G., Li, N., Li, B., Li, W., Liu, Y., & Chai, T. (2020). ANN model for predicting acrylonitrile wastewater degradation in supercritical water oxidation. *Science of the Total Environment*, 704, 1-8.
- Zhou, S., & Yang, P. (2020). Risk management in distributed wind energy implementing Analytic Hierarchy Process. *Renewable Energy*, 150, 616-623.