

**ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD DE LA VALORIZACIÓN DE LOS BIOSÓLIDOS
PROVENIENTES DE UNA PTAR URBANA, EN LA FABRICACIÓN DE
MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN.**

AUTORAS

DANIELA CEBALLOS RUIZ

MARÍA CAMILA PINEDA MONTOYA

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE MANIZALES
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
MANIZALES**

2021

**ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD DE LA VALORIZACIÓN DE LOS BIOSÓLIDOS
PROVENIENTES DE UNA PTAR URBANA, EN LA FABRICACIÓN DE
MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN.**

AUTORAS

DANIELA CEBALLOS RUIZ

MARÍA CAMILA PINEDA MONTOYA

ACESOR EXTERNO

JAVIER MAURICIO NARANJO VASCO

ACESOR EXTERNO

M.Sc. JUAN DAVID SALAZAR ESPITIA

MODALIDAD DE TRABAJO DE GRADO

ASISTENTES DE INVESTIGACIÓN

PARA OPTAR ALTÍTULO DE INGENIERAS AMBIENTALES

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE MANIZALES

INGENIERÍA AMBIENTAL

MANIZALES

2021

TABLA DE CONTENIDO

Tabla de tablas.....	5
Tabla de figuras.....	6
RESUMEN	7
ABSTRACT	8
1. Introducción	9
2. Planteamiento del problema	10
3. Justificación	11
4. Objetivos	13
4.1 Objetivo general:	13
4.2 Objetivo específicos:	13
5. ANTECEDENTES	14
5.1 Antecedentes	14
5.1.1 SALITRE	14
5.1.2 PTAR San Fernando y PTAR Bello	15
5.1.3 Proyecto de investigación SENA.	16
5.2 Normativa del manejo y uso de lodos residuales	22
5.2.1 Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS 2000. Título E. Tratamiento de aguas residuales.	22
5.2.2 Decreto 1287 de 2014	23
5.2.3 Uso de biosólidos en la producción de materiales de construcción	24
5.3 Contextualización	25
5.3.1 PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES LOS CÁMBULOS. (Aguas de Manizales S.A. E.S.P, 2018)	25
5.3.2 CASAGRES. (Casagres, 2020)	26
6. Marco teórico	27
6.1 Aguas Residuales	27
6.1.1 Tratamiento de aguas residuales	27
6.2 Lodo Residual	28
6.3 Biosólido	30
6.3.1 Disposición de biosólidos en rellenos sanitarios	30
6.3.2 CLASIFICACIÓN DE LOS LODOS	33
6.3.3 Tratamiento de lodos residuales	34
7. METODOLOGÍA	36

8. RESULTADOS	37
8.1 TECNOLOGÍAS PARA EL TRATAMIENTO DE LODOS	37
8.1.1 TREN DE TRATAMIENTO PROPUESTO	44
8.2. RESULTADOS DE ANÁLISIS DEL COSTO DE DESHIDRATACIÓN DE LODOS 48	
8.2.1 Alternativas logísticas	50
8.3. MATRIZ EIA	56
9. CONCLUSIONES	59
10. Recomendaciones	60
11. Bibliografía	61

Tabla de tablas

Tabla 1 Proyección de caudal de agua residual a tratar en la PTAR Los Cámbulos	11
Tabla 2. Caracterización granulométrica del biosólido, arcilla y chamote.....	17
Tabla 3. Caracterización fisicoquímica y microbiológica del biosólido generado en la PTAR de Victoria, Caldas.	18
Tabla 4 características físicas y químicas de los lodos residuales.	32
Tabla 5 ventajas y desventajas del tanque gravitacional.	38
Tabla 6. ventajas y desventajas de tipos de filtro prensa.....	38
Tabla 7. ventajas y desventajas de la hidrólisis térmica.....	40
Tabla 8. ventajas y desventajas de la estabilización con cal.	41
Tabla 9 ventajas y desventajas de la centrífuga.	43
Tabla 10. Ventajas y desventajas de reactor de flujo continuo.	44
Tabla 11 escenarios propuestos para el secado del lodo.	45
Tabla 12 resumen costos de inversión. Caso PTAR Canoas	48
Tabla 13 resumen costos de inversión. Caso Coyoacán.....	49
Tabla 14. Costo de inversión aproximado adicionales para la propuesta del tren de secado en la PTAR Los Cámbulos.....	50
Tabla 15. Toneladas a transportar.....	51
Tabla 16. Número de viajes según porcentaje de humedad.....	52
Tabla 17. Costo de transporte por hora.	52
Tabla 18. Costo transporte mensual.	52
Tabla 19 Costos de transporte desde la PTAR hasta la ladrillera	55
Tabla 20 Costos de disposición final en el relleno sanitario.....	55
Tabla 21. Matriz de aspectos e impactos ambientales.	57
Tabla 22 Costos de transporte desde la PTAR hasta la ladrillera	60

Tabla de figuras.

Figura 1. Resultado de implementación de biosólidos al 0%, 10% y 15%.....	20
Figura 2. Infografía de propuesta de instalación de la PTAR en el sector Los Cambulos.....	26
Figura 3. Esquema de una depuradora de aguas residuales.....	28
Figura 4. Esquema tren de tratamiento Biosólidos.	46
Figura 5. Mapa recorrido PTAR los Cambulos- Casagres.	51
Figura 6. logística.	54
Figura 7. Importancia del impacto según matriz de interacciones de Leopold.	56
Figura 8. Analisis de alternativas.	58

RESUMEN

En el presente trabajo se evaluó la posibilidad técnica y logística de la deshidratación de los lodos residuales que serán generados en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales PTAR que será instalada en la ciudad de Manizales, con el objetivo de incorporar el biosólido obtenido en la producción de ladrillos de construcción en la empresa ladrillera Casagres. Para ello se realizó una búsqueda de tecnologías para el secado de lodos y, a partir del análisis de las ventajas y desventajas de estas, se elaboró una propuesta para el diseño de un tren de tratamiento, con el cual se busca disminuir el porcentaje de humedad del lodo a partir de tres (3) escenarios que se esperaba obtener a lo largo del tren propuesto y a partir de ello, se hizo una aproximación de costos de inversión basado en dos experiencias similares, para la implementación del tren, también se reportó el costo aproximado del transporte del lodo, de acuerdo con cada uno de los escenarios propuestos.

Posteriormente, se eligió la estrategia más conveniente para el transporte del lodo desde la PTAR hasta Casagres, esto con el objetivo de identificar la alternativa logística adecuada. A partir de la definición de la propuesta, se elaboró una matriz en la que se reporta el impacto ambiental de cada una de las tecnologías propuestas para el tren de tratamiento, el transporte del biosólido y su disposición en el relleno sanitario, con la que identificaron los aspectos e impactos significativos que definieron la viabilidad ambiental de implementar la alternativa propuesta para la obtención de biosólidos y su valorización en la producción de unidades de mampostería.

Palabras clave (biosólido, materiales de construcción, PTAR, Valorización de residuos)

ABSTRACT

In the present work, the technical and logistical possibility of the dehydration of the residual sludge that will be generated in the WWTP Wastewater Treatment Plant that will be installed in the city of Manizales was evaluated, with the objective of incorporating the biosolid obtained in the production of building bricks at the Casagres brick company. For this, a search for technologies for drying sludge was carried out and, based on the analysis of the advantages and disadvantages of these, a proposal was developed for the design of a treatment train, with which the aim is to reduce the percentage of humidity. of the mud from three (3) scenarios that would be expected to be obtained along the proposed train and from this, an investment cost approximation was made based on two similar experiences, for the implementation of the train, the cost was also reported approximate transport of the sludge, according to each of the proposed scenarios.

Subsequently, the most convenient strategy for the transport of the sludge from the WWTP to Casagres was chosen, this with the aim of identifying the appropriate logistical alternative. Based on the definition of the proposal, a matrix was developed in which the environmental impact of each of the technologies proposed for the treatment train, the transport of the biosolid and its disposal in the sanitary landfill is reported.

Keywords (biosolid, construction materials, WWTP, Waste recovery)

1. Introducción

El agua residual generada en la ciudad de Manizales junto con el agua lluvia recolectada tendrá disposición final en una PTAR (Planta de Tratamiento de Aguas Residuales) donde sufre unos procesos de desinfección, y de los cuales resulta gran cantidad de lodos con alto contenido de materia orgánica y metales pesados. Dichos lodos son posteriormente sometidos a un proceso de biodigestión anaerobia generando como subproductos gas Metano (CH_4) que es utilizado para el propio funcionamiento de la PTAR y lodos estabilizados que pueden tener uso posterior en la agricultura y en la producción de algunos materiales de construcción.

A partir del trabajo investigativo desarrollado por el SENA Regional Caldas y en alianza con Aguas de Manizales S.A. E.S.P. Tejares Terracota de Colombia S.A. / Casa Gres, la Universidad Nacional de Colombia y la Universidad Católica de Manizales, se evaluó la posibilidad de valorizar el biosólido en la producción de ladrillos, concluyendo afirmativamente sobre su pregunta problema, con una incorporación del 12% de biosólido en la mezcla de materia prima y que, con la posible optimización del secado del biosólido, este se podría agregar hasta en un 25% de mezcla para la obtención de las unidades de mampostería (Espitia, J, 2019).

Si bien el tren de tratamiento se plantea con la finalidad de deshidratar el lodo, el Título E de la Resolución 1096 del 2000 indica que en el diseño de una PTAR, se debe incluir una serie de tratamientos a los lodos que reduzcan la carga orgánica y de metales pesados o compuestos que puedan afectar la calidad del medio ambiente y la salud humana, razón por la cual resulta indispensable hacer la adecuada gestión de este subproducto.

Según (Espitia, J, 2019) los biosólidos han tenido usos tales como abono, remediador de suelos, recuperador en zonas verdes, taludes, áreas privadas, entre otras hacen referencia a la aplicación del biosólido en el suelo, teniendo en cuenta que cada una de estas alternativas presenta diferentes necesidades. Según esto, en la presente sección se observarán diferentes experiencias que evidencian el aprovechamiento del biosólido en el suelo, como recuperador de suelos y como abono, enmienda, en suelos agrícolas y forestales.

2. Planteamiento del problema.

Con la proyección de la construcción de una PTAR en la ciudad de Manizales, se proyecta la necesidad de dar una adecuada gestión a los lodos que son subproductos obtenidos de tratamiento de agua residual, y que a partir del proceso de tratamiento y estabilización, son transformados en biosólidos. Dado que una de las estrategias de valorización de residuos orgánicos es su uso en la fabricación de ecomateriales, se ha identificado la posibilidad de incorporar dichos biosólidos en el proceso de manufactura de materiales cerámicos a partir de áridos de construcción. La posible fabricación de materiales cerámicos tipo ladrillo que incorporen biosólidos de PTAR urbana contribuiría por un lado a una más apropiada gestión de dichos residuos incorporándolos al ciclo productivo y por otro lado contribuiría a mejorar los indicadores ambientales de la industria ladrillera local.

Tras identificar que si posible incorporar el biosólido en este proceso productivo, surge el interrogante que se aborda en el presente trabajo, dirigido a analizar la influencia del porcentaje de humedad del biosólido en el transporte y valorización. Por lo anterior, la situación problemática, consistirá en identificar las tecnologías adecuadas para transformar el lodo residual en biosólido, optimizando su porcentaje de humedad y tras identificar el escenario pertinente para este tratamiento, evaluar las posibilidades logísticas y de transporte del lodo desde la PTAR hasta la fábrica de ladrillos, para determinar la viabilidad técnica, económica y ambiental de la incorporación del biosólido en la fabricación de ladrillos de construcción.

3. Justificación

La próxima construcción de la Planta de Tratamiento de Agua Residual PTAR Los Cábulos en el municipio de Manizales, indica en su diseño que después de ser instalada, la planta operará en 3 etapas, esto en relación con el caudal de agua residual así:

Tabla 1 Proyección de caudal de agua residual a tratar en la PTAR Los Cábulos

Etapas de operación de la PTAR	Caudal (Q) proyectado a tratar (m³/s)
Arranque	0,53
Horizonte 1	0,64
Horizonte 2	Sin información

Fuente. (Espitia, J, 2019)

A partir de la operación de una PTAR, se generan subproductos, entre ellos los lodos en los que se concentra el material contaminante removido del efluente de agua residual. Frente a esto, el Título E del Reglamento Técnico del Sector Agua Potable RAS 2000, enfocado al tratamiento de agua residual, precisa que todos los niveles de complejidad deben contemplar el manejo de lodos en su sistema de tratamiento de aguas residuales, además de que no se deben descargar dichos efluentes a cuerpos de agua superficiales o subterráneos. (Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS-2000, 2000).

Generalmente la disposición y desecho de los lodos generados en las PTAR es en los rellenos sanitarios; esta no es una práctica muy conveniente debido a que puede generar problemas de contaminación tanto de los suelos como de las aguas, por su alto contenido de materia orgánica y metales pesados, notándose la presencia de olores desagradables y problemas de salud pública. Debido a las dificultades para deshacerse de este producto se buscan alternativas en las que se pueda implementar el producto en sistemas económicos, generando así sostenibilidad en los procesos.

Según fuentes (Ascencio, 2019) la industria cerámica en la búsqueda de alternativas compatibles con las necesidades de tratamiento de estos residuos, plantea su incorporación mediante el aprovechamiento del poder calorífico en sus procesos de combustión, la incorporación de residuos en la estructura de los materiales como parte de su propia matriz (L & Carda, 2002), entre otros que buscan motivar el interés de los investigadores para

convertirlo en una práctica común (Kadir, 2014); (Eliche-Quesada, 2011); (Manoharan, 2011).

A partir de la identificación de la posibilidad de incorporar el biosólido en la producción de cerámicos, específicamente ladrillos de construcción, se hace necesario reconocer las condiciones técnicas, logísticas y económicas necesarias para la implementación de la estrategia y así, generar conclusiones frente a la viabilidad de esta.

4. Objetivos

4.1 Objetivo general:

Analizar la viabilidad de la valorización de los biosólidos provenientes de una PTAR urbana, en la fabricación de materiales de construcción.

4.2 Objetivo específicos:

- Hacer análisis trenes de tratamiento de lodos para la obtención de biosólidos.
- Analizar la viabilidad logística y técnica teniendo en cuenta los costos de transporte y de deshidratación de biosólidos en la PTAR.
- Hacer un análisis ambiental de las alternativas planteadas.

5. ANTECEDENTES

El tratamiento de lodos residuales de PTAR, ha sido tema de discusión en la operación de otras Plantas de Tratamiento, esto ante la necesidad de cumplir con los requerimientos normativos y así también, darle la adecuada gestión al residuo para mitigar la materialización de posibles impactos ambientales negativos y dificultades técnicas y logísticas que el inadecuado manejo de estos pueda provocar. Las siguientes son experiencias de investigación similares a la que se plantea en el presente trabajo.

5.1 Antecedentes

5.1.1 SALITRE (Acueducto, 2019)

La planta de tratamientos de agua residual El Salitre se encuentra ubicada en la localidad de suba al norte de la ciudad de Bogotá, en esta PTAR se tratan 10'849.440 m³ de agua residual cruda obteniendo unos porcentajes de remoción al mes de 63,99% de SST y 36,29% de DBO₅. De los procedimientos realizados en la planta para lograr la descontaminación de las aguas se generan como subproductos 641.049 m³ de biogás normalizado y un promedio de 3.870,25 toneladas de biosólido a un porcentaje de sequedad de 23,93% por mes para el 2019.

Según el informe mensual de actividades de enero del 2019 a cargo de la empresa de acueducto, agua y alcantarillado de Bogotá en cuanto a la gestión, operación y manejo de los biosólidos resultantes en el pretratamiento en la PTAR El Salitre se desarrollan cuatro actividades, las cuales son: Deshidratación, cargue y transporte de Biosólido, procesamiento y aprovechamiento del Biosólido y por último la disposición de residuos de pretratamiento en el relleno sanitario doña Juana.

Con relación a la deshidratación se realiza utilizando cinco filtros banda y adicionando una solución de un polímero con una dosis de 40 Kg/ Ton para mejorar la eficiencia en la floculación y liberación del agua en el proceso. En cuanto al cargue y transporte del biosólido entre la PTAR y el predio el Corzo se realiza por medio de vehículos doble troque con capacidad para transportar 15 ton operando las 24 horas del día, 7 días a las semana; en compañía con el operador técnico del área de deshidratación se realiza el registro del cargue de los vehículos verificando el volumen

En el procesamiento y aprovechamiento del Biosólido la valorización de este material se enfoca en la restauración de suelos; una de sus aplicaciones es empleada en el predio el Corzo ubicado en la localidad de bosa, en este se pretende establecer una cobertura vegetal con pasto kikuyo el cual se siembra sobre mezcla de biosólido a una proporción 1:1. Por último se realiza la disposición de Residuos de pretratamiento en el relleno sanitario doña Juana al que se transportan 41,96 toneladas de los residuos de pretratamiento correspondientes a los obtenidos en las fases de rejillas finas y gruesas.

5.1.2 PTAR San Fernando y PTAR Bello (Aburrá, 2014)

El Consorcio Hidra-estación Torre del Aburrá realizó un diseño preliminar de secado térmico de los lodos provenientes de la PTAR San Fernando y PTAR Bello. Este diseño se fundamentó en las consideraciones de uno de los 4 escenarios propuestos, en los cuales se varió el porcentaje de sequedad inicial después de centrifugas.

Para el caso específico, se consideró que “secado térmico de lodos combinando PTAR Bello produciendo biosólidos al 26% y PTAR San Fernando al 30% de sequedad inicial después de centrifugas (caso cuando se incumplan los parámetros de sequedad en ambas plantas de tratamiento).” (Aburrá, 2014)

Dicha alternativa, implicó el transporte de lodo deshidratado de PTAR San Fernando a PTAR Bello y un proceso de secado térmico con cogeneración mediante turbina de gas, siendo la mejor opción en términos económicos y técnicos al cumplir con los requerimientos de proceso, su costo de inversión (35,000 Mio. COP) y costo de operación anual (3,900 Mio. COP) que fue menor a las demás alternativas analizadas en el informe de factibilidad en mención. Para este diseño, se tuvo como premisa que el dimensionamiento no produjera energía superior a la requerida por la PTAR Bello.

Los análisis fueron realizados para 3 caudales de influente: 3,4 y 5 m³/s y se estimó que para el inicio de operaciones de la PTAR Bello en 2016, el caudal influente corresponda aproximadamente a 4 m³/s y en 2021 a 5 m³/s.

De este estudio se concluyó que para el proceso de secado térmico y cogeneración, se debían tener 2 turbinas del orden de 4,1MW eléctricos trabajando continuamente durante las 24 horas del día y apoyadas con unos quemadores auxiliares de hasta 5 MW en total.

5.1.3 Proyecto de investigación SENA.

Para evaluar la viabilidad técnica de la implementación de biosólidos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales urbanas como materia prima para la elaboración de materiales alternativos de construcción se tomó de referencia principal el informe “Diseño de prototipo de material cerámico, para el sector construcción, a partir de biosólidos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales urbanas” (Espitia, J, 2019), elaborado en 2019 por Juan David Salazar Espitia líder de investigación SENNOVA y su equipo de trabajo; se tuvo la oportunidad de observar la fase practica del proyecto de cerca debido a que la UCM participo como una institución de apoyo al proyecto.

El objetivo del proyecto mencionado es diseñar prototipo de material cerámico para el sector construcción a partir biosólidos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales urbanas; el informe se desarrolla en el marco de los tres objetivos específicos los cuales son la caracterización física, química, termodinámica y microbiológicamente los biosólidos, teniendo en cuenta procedimientos estandarizados, El establecimiento de las mezclas de biosólido y material arcilloso para la elaboración de cerámicas y por último el análisis de las propiedades físicas, químicas y nanotecnológicas de cerámicos producidos, teniendo en cuenta normas técnicas vigentes.

Caracterización física, química, termodinámica y microbiológica

La caracterización física, química, termodinámica y microbiológica de los lodos se realizó en laboratorios de plantas, laboratorio de aguas y laboratorio de fluorescencia de rayos X de la Universidad Nacional de Colombia (UN-Manizales, UN-Manizales y UN-Bogotá¹, respectivamente), laboratorio de ciencias del Centro para la Formación Cafetera del SENA regional Caldas y en el laboratorio de Tecnoparque de la misma institución. Los parámetros

de importancia para la identificación del material son la granulometría que permite relacionar el tamaño de las partículas de la materia prima con el tipo de material predominante según los siguientes rangos: grava ($>2,36$ mm), arenas ($0,075 - 2,36$ mm), limos ($0,002 - 0,075$ mm) y arcilla ($<0,002$ mm); de acuerdo con esto los resultados obtenidos de las técnicas de tamizado en seco e hidrometría los cuales se realizaron en UN-Manizales y CASAGRES de acuerdo a la ASTM D422-63 fue posible determinar que las mezclas óptimas se deben realizar entre la pasta arcillosa y los biosólidos para cumplir con los requisitos de los tamaños de partículas necesarios para desarrollar la pasta cerámica.

Tabla 2. Caracterización granulométrica del biosólido, arcilla y chamote.

Parámetro	Tamizaje en seco	Hidrometría			Biosólido molido
		Biosólidos	Arcilla	Chamote	
Gravas (> 2 mm)	50,0%	0,0%	0%	0%	0%
Arenas (> 75 μ m)	38,6%	65,0%	21,95%	47,47%	53,97%
Limos (> 2 μ m)	11,5%	2,5%	18,03%	11,51%	10,00%
Arcillas (< 2 μ m)		32,5%	60,02%	41,02%	36,03%

Fuente: (Espitia, J, 2019)

Otro de los factores importantes es la identificación de la composición fisicoquímica en este ensayo se aplicó la técnica de fluorescencia de rayos X en UN-Bogotá (a través de la Universidad Católica de Manizales - UCM) fue posible identificar cualquier material (en su composición elemental); para finalizar se hizo el análisis microbiológico realizado en el SENA regional Caldas se realizó *Coliformes fecales* y *Salmonella sp.* Por la técnica de siembra en fondo en Agar Brillante y *Salmonella Shigella*

Tabla 3. Caracterización fisicoquímica y microbiológica del biosólido generado en la PTAR de Victoria, Caldas.

Parámetro	SENA		UN-Manizales	
	Base seca	Base húmeda	Base seca	Base húmeda
ST (%)	100,00%	20,97%	100,00%	20,00%
Humedad (%)	0,00%	79,03%	0,00%	80,00%
SV (%)	47,30%	9,92%	47,50%	9,50%
SF (%)	52,70%	11,05%	52,50%	10,50%
Cenizas (%)	48,91%	10,54%	50,12%	10,02%
Materia volátil (%)	50,26%	10,54%	47,92%	9,58%
Carbono fijo (%)	0,83%	0,17%	1,96%	0,39%
PCS experimental (MJ/kg)	N.R.	N.R.	9,85	N.R.
PCS teórico (MJ/kg)	8,44	N.R.	8,18	N.R.
COT oxidable (%)	14,60%	3,06%	13,80%	2,76%
Grasas (%)	5,29%	1,11%	N.R.	N.R.
Coliformes fecales (UFC/g)	N.A.	1,32E+03	N.R.	N.R.
Salmonella (UFC/ 25 g)	N.A.	7,56E+02	N.R.	N.R.

Fuente: (Espitia, J, 2019)

Rango de mezclas de biosólidos y materiales arcillosos para la elaboración de cerámicas.

En este proyecto las principales materias primas para la elaboración de los ensayos fueron facilitados por la empresa CASAGRES quien suministro la arcilla de su mina de Irra y el Chamote o material cerámico reciclado para la realización de las mezclas; cabe resaltar que al material entregado por CASAGRES se le realizó el análisis granulométrico. Los biosólidos utilizados fueron obtenidos de la PTAR de Victoria, Caldas. Los materiales

mencionados anteriormente pasaron por una fase de pretratamiento con la finalidad de cumplir los requisitos teóricos para la elaboración de ladrillos.

El pretratamiento para las materias primas se fundamentó en la necesidad de obtener un producto compuesto por partículas de un tamaño pequeño para garantizar la calidad del material cerámico; tanto para la arcilla como para el Chamote se contó con un proceso de molienda, el cual se desarrolló en un molino tradicional de cocina en donde se garantizaba que el material pasara la malla 30, la cual hace referencia a un tamaño de partícula menor a 0,6 mm. En cuanto a los biosólidos se realizó un secado a temperatura ambiente y en un horno a 105°C con la finalidad de que alcanzar un contenido de agua menor al 15%, también fue molido y tamizado a través de la malla 30.

Se realizaron mezclas de 0%, 10% y 15% de biosólido con la materia prima, inicialmente se homogenizó manualmente la pasta seca, posteriormente se procedió a agregar agua de acuerdo a la humedad óptima de moldeo, la cual fue de 18,5%. Al obtener la pasta húmeda se procede a elaborar los ladrillos o ladrillos verdes por medio de los moldes que se elaboraron con base en la NTC 296, la cual indica ladrillos modulares con 10 cm de largo y 5 cm de ancho; antes de adicionar la pasta húmeda se agregó Diésel el cual en pequeñas cantidades funciona como lubricante que permite mejorar el moldeo y la extracción del producto.

Los ladrillos verdes extraídos fueron secados a 105°C hasta en un horno hasta peso constante, posterior se pasó al secado de los ladrillos donde se calcinó el producto por medio de la rampa compartida por CASAGRES, la cual fue establecida de 2,8°C/min por 6 horas hasta llegar a 1050°C y luego el sostenimiento a esta temperatura por 2 horas. Los resultados de la calcinación, lo que se denomina como ladrillo calcinado o gris.



Figura 1. Resultado de implementación de biosólidos al 0%, 10% y 15%.

Fuente: (Espitia, J, 2019)

Pruebas de las propiedades físicas, químicas y nanotecnológicas de cerámicos producidos

Las pruebas realizadas para el análisis de la calidad de los prototipos elaborados

Resistencia a la compresión: se realizó de acuerdo a lo indicado en la NTC 4017 (ICONTEC, 2018), numeral 7, en una prensa universal marca Tinius Olsen de la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales. Se aplicó una carga conocida y esta se dividió sobre el área de cada ladrillo con el fin de obtener la propiedad estructural de los ladrillos. Los resultados permitieron concluir que es la pasta arcillosa presenta una alta resistencia a la compresión, cumpliendo la NTC 4205 para mampostería estructural (Mp.E) y mampostería no estructural (Mp.NE), esto facilita y permite las mezclas con los biosólidos en las proporciones del 5% (Cumple Mp.E y Mp.NE) y del 10% (cumple Mp.NE).

Absorción de agua: se realizó de acuerdo a lo indicado en la NTC 4017 (ICONTEC, 2018), numeral 10, el cual consiste en sumergir cada ladrillo por un periodo de 24 horas y cuantificar la cantidad de agua que cada ladrillo absorbe con base en el peso inicial se evidencia que la absorción aumenta con respecto a la proporción de biosólidos, debido a

que, los ladrillos con biosólidos son más porosos que los ladrillos de control, Es posible notar el mismo cumplimiento hacia la resistencia a la compresión.

Tasa inicial de absorción de agua: se realizó de acuerdo a lo indicado en la NTC 4017 (ICONTEC, 2018), numeral 11, el cual consiste en sumergir cada ladrillo por un periodo de 60 segundos y cuantificar la cantidad de agua que cada ladrillo absorbe con base en el peso inicial; Se sumergieron 3 mm del ladrillo por 1 minuto en una bañera de agua. Los ladrillos que cumplieron esta propiedad fueron los que contenía un 5% de biosólidos

Densidad: se realizó de acuerdo a la medición de la masa y volumen de cada ladrillo. Su volumen fue determinado por medio de la multiplicación del largo, alto y ancho; fue posible evidenciar que a medida que se agregan biosólidos los ladrillos son más ligeros, debido a la porosidad remanente generada por la volatilización de la materia orgánica en los biosólidos.

Conductividad térmica: la conductividad térmica de los ladrillos es importante debido a que es una propiedad que permite identificar y cuantificar la capacidad de aislamiento térmico y posteriormente, el ahorro energético de una vivienda. En los resultados del ensayo se evidenció que los ladrillos verdes tienen la capacidad de transferir el calor de acuerdo a los valores de conductividad térmica obtenidos.

De acuerdo a la metodología implementada para diseñar el prototipo de la elaboración los biosólidos presentan un alto potencial en el sector de la construcción, como lo demuestra su caracterización, ya que su granulometría, contenido de metales y patógenos, contenido de óxidos y de materia orgánica lo hacen viable para ser mezclado con otros materiales como arcilla y chamote. Según el estudio realizado por el SENA el contenido máximo de biosólidos a adicionar es de 5% para mampostería estructural y 10% para mampostería no estructural; aun así la empresa aliada CASAGRES, indico que los porcentajes pueden aumentar en el proceso industrial, debido a la implementación y uso de equipos automáticos que estandarizan todos los procesos y minimizan los errores que a nivel de laboratorio se presentaron.

5.2 Normativa del manejo y uso de lodos residuales

5.2.1 Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS 2000.

Título E. Tratamiento de aguas residuales.

Este reglamento contempla el diseño del tren de tratamiento de agua residual y en su apartado de manejo de lodos da indicaciones sobre su generación y las tecnologías recomendadas para su tratamiento (operaciones preliminares, espesamiento, estabilización, acondicionamiento, desinfección).

En este reglamento se establece que todos los niveles de complejidad deben incluir en su diseño. El manejo de lodos, presentando balances de masa de los procesos con los trenes de tratamiento de agua y lodos. También indica que se deben tener las siguientes consideraciones:

- No deben descargarse dichos efluentes a cuerpos de agua superficiales o subterráneos.
- Los lodos primarios deben estabilizarse.
- Se debe establecer un programa de control de olores.
- Se debe establecer un programa de control de vectores.

Además, el documento indica que se debe realizar una caracterización para determinar los siguientes parámetros en el lodo:

- Sólidos suspendidos.
- Sólidos totales.
- Nitrógeno total Kjeldahl.
- Fósforo.
- Metales (para el nivel alto de complejidad, Cromo, Plomo, Mercurio, Cadmio, Níquel, Cobre y Zinc)

5.2.2 Decreto 1287 de 2014

Según el decreto 1287 de 2014 en cual se establecen criterios para el uso de los biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales los biosólidos deben cumplir con valores máximos permisibles en su caracterización fisicoquímica y microbiológica para ser clasificados en las categorías A y B, tal como se muestra en el artículo 5, tabla 2 del decreto.

De acuerdo con la categoría y clasificación del biosólido pueden ser implementados en los siguientes usos.

Categoría A:

- En zonas verdes como cementerios, separadores viales, campos de golf y lotes vacíos.
- Como producto para uso en áreas privadas tales como jardines, antejardines, patios, plantas ornamentales y arborización.
- En agricultura.
- Los mismos usos de la categoría B.

Categoría B:

- En agricultura, se aplicará al suelo.
- En plantaciones forestales.
- En la recuperación, restauración o mejoramiento de suelos degradados
- Como insumo en procesos de elaboración de abonos o fertilizantes orgánicos o productos acondicionadores para suelos a través de tratamientos físicos químicos y biológicos; su uso queda sujeto a la regulación establecida por el ICA.
- Para remediación de suelos contaminados, lechos biológicos para el tratamiento de emisiones y vertimientos.
- Como insumo en la fabricación de materiales de construcción.
- Estabilización de taludes en redes viales.

- En la operación de rellenos sanitarios como cobertura diaria, final y actividades de revegetación.
- Actividades de revegetación y paisajismo de escombreras.
- En el proceso de valorización energética.

Los biosólidos que no cumplan con los valores máximos permisibles establecidos para su clasificación en las Categorías A y B, podrán usarse en:

- a. En la operación de rellenos sanitarios como cobertura diaria.
- b. En la disposición conjunta con residuos sólidos municipales en rellenos sanitarios y de manera independiente en sitios autorizados.
- c. En procesos de valorización energética.

5.2.3 Uso de biosólidos en la producción de materiales de construcción

Norma Técnica Colombiana NTC 4205. Ingeniería Civil y Arquitectura. Unidades de mampostería de arcilla cocida. Ladrillos y bloques cerámicos

Esta norma tiene como objeto establecer los requisitos que deben cumplir los ladrillos y bloques cerámicos utilizados como unidades de mampostería y fija los parámetros con que se determinan diferentes tipos de unidades.

En esta normativa se especifican los requisitos con los que deben cumplir las piezas cerámicas en cuestión de sus propiedades físicas tales como absorción de agua, resistencia mecánica a la compresión y tasa inicial de absorción:

- **Absorción de agua**

Generalmente la pieza no puede tener absorciones inferiores al 5% en promedio, ni superficies vidriadas o esmaltadas en las caras que se asientan o en las que se vayan a pañetear (ICONTEC - Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificaciones, 2009)

5.3 Contextualización

5.3.1 PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES LOS CÁMBULOS.

(Aguas de Manizales S.A. E.S.P, 2018)

La cuenca del río Chichina, que pasa por una parte del casco urbano, la zona rural de la ciudad Manizales y por los principales municipios de Caldas, es la séptima cuenca más contaminada del país debido a que recibe aguas negras con desechos provenientes de los hogares y las empresas. Estas aguas residuales pueden ser tratadas, saneadas y aprovechadas a través de la puesta en marcha de la PTAR los Cámbulos. Este proyecto está establecido dentro del Programa de Protección Ambiental Municipal en el área de Saneamiento en el marco del Programa SAVER –Saneamiento para Vertimientos del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, con el “objetivo de aumentar el cumplimiento de las normativas vigentes en el tema de saneamiento, tratamiento y vertimiento de las aguas residuales de los municipios, como también incrementar el uso sostenible de los servicios de alcantarillado”; El proceso de tratamiento de la PTAR los Cámbulos consta de tres líneas de proceso: línea de agua, línea de sólidos y línea de gas.

La línea de Agua está constituida por un pre-tratamiento, un tratamiento secundario y la desinfección del agua que permitiría que el agua regresada al río Chinchiná para su disposición este en las condiciones óptimas para mejorar la calidad del cauce. En la línea de Sólidos la cual se fundamenta en la adecuación del lodo generado para su aprovechamiento para la generación de biogás por medio de un espesamiento mecánico del lodo secundario generado, para luego ser enviado a un proceso de estabilización. Posteriormente para su disposición final se implementara un proceso deshidratación del material retenido en el pre-tratamiento y será compactado para su traslado al relleno sanitario la esmeralda. Línea de biogás resulta del proceso de estabilización de lodos; el gas generado será recolectado para ser utilizado como combustible en el sistema de calentamiento del mismo proceso (el biogás sobrante será incinerado).

¿Cómo funcionará la PTAR?



Figura 2. Infografía de propuesta de instalación de la PTAR en el sector Los Cábulos.

Fuente: <https://www.lapatria.com/economia/segundo-intento-para-licitar-la-ptar-los-cambulos-459780>

5.3.2 CASAGRES. (Casagres, 2020)

Casagres es la marca comercial que agrupa el portafolio de productos de las plantas minerales de caldas, tecnigres y tejares terracota dedicadas a la fabricación y comercialización de productos en gres (arcillas) para los sectores de construcción, remodelación y la decoración del mercado nacional e internacional; la materia prima que es utilizada actualmente es la arcilla natural cocida, con variedad de colores, texturas y tamaños; se cuenta con un equipo innovador con el cual se plantean nuevas estrategias para el trabajo con materiales amigables con el medio ambiente.

6. Marco teórico

6.1 Aguas Residuales

Son aquellas aguas que resultan de actividades realizadas en comunidades o industrias y que por sus características físicas, químicas y microbiológicas resultan nocivas para la salud del ser humano.

6.1.1 Tratamiento de aguas residuales

El tratamiento de aguas residuales es el conjunto de operaciones físico, químico y biológico con los que se logra la reducción parcial o total los componentes nocivos del efluente de agua residual. Este se divide en las siguientes etapas:

- ✓ Pretratamiento

También denominado como tratamiento preliminar, está ubicado al inicio del tren de tratamiento, allí se remueven sólidos de tamaño considerable como ramas de árboles, bolsas plásticas, entre otros mediante el uso de rejillas u otras tecnologías que permitan su remoción en el efluente y así aumentar la eficiencia de los tratamientos posteriores.

- ✓ Tratamiento Primario

En este se remueven parte de los sólidos suspendidos, materia orgánica contenida en el efluente (DBO) y algunas grasas. Esta remoción es realizada generalmente por sedimentación de partículas densas, producto de la acción de productos químicos.

- ✓ Tratamiento secundario

En el tratamiento secundario o biológico se convierten la materia orgánica fina coloidal contenida en el efluente en floc biológico sedimentable y sólidos inorgánicos que pueden ser separados en tanques de sedimentación mediante procesos fisicoquímicos.

- ✓ Tratamiento anaerobio

Es un proceso de degradación de materia orgánica a partir de la acción de microorganismos sin la presencia de oxígeno u otros oxidantes (SO_4^- , NO_3^- , etc.). De este proceso se genera

biogás compuesto de metano CH_4 y dióxido de carbono CO_2 en un 95%, pero con la presencia adicional de nitrógeno, hidrógeno, amoníaco y sulfuro de hidrógeno, usualmente en proporciones inferiores al 1%. (Ministerio de Desarrollo Económico, 2000)

✓ Desinfección

La desinfección del efluente se realiza con el fin de eliminar microorganismos que impliquen peligro en la salud de las comunidades ubicadas aguas debajo de la descarga. La cloración y la irradiación ultravioleta son los métodos más comunes (Ministerio de Desarrollo Económico, 2000)



Figura 3. Esquema de una depuradora de aguas residuales.

Fuente: (Jiménez, 2014)

6.2 Lodo Residual

El lodo residual es uno de los residuos del tratamiento primario, secundario y terciario dentro del tren de tratamiento de una PTAR, De consistencia sólida, semisólida o líquida y del que su composición, depende de las características de la corriente de agua residual

tratada y del tratamiento y compuestos que intervengan en el proceso (Donaldo, 2013). Una de las facultades para su manejo y disposición es la concentración de patógenos que debe ser estabilizada o reducida (Moeller, 2000).

Según (Pérez, 2016) los lodos residuales generados en una PTAR se pueden identificar así:

- **Lodo crudo**

Es aquel lodo que no ha sido tratado ni estabilizado y que ha sido extraído de PTAR. Generalmente acidifican la digestión y el olor.

- **Lodo primario**

Es el lodo resultante de la sedimentación primaria y está compuesto principalmente de arena y sólidos orgánicos (verduras, frutas, etc.) e inorgánicos (papel, cartón, basura, etc.). Este lodo contiene entre 93 – 97% de humedad, es de color marrón o gris y pueden llegar a generar mal olor

- **Lodo secundario**

Este lodo es el resultante del tratamiento biológico de aguas residuales en el que accionan diferentes microorganismos. Está contenido en forma de flóculos compuestos por biomasa y minerales absorbidos, no suelen generar malos olores aunque en algunos casos puede presentar olores tan fuertes como en los lodos primarios

- **Lodo digerido**

Son producto de la digestión aeróbica, de color negro, al estar digeridos no producen olor desagradable. Estos lodos están compuestos por un 45 – 60% de materia orgánica (Valderrama, 2013)

6.3 Biosólido

Los biosólidos son sólidos resultantes de la estabilización de los lodos residuales y que contienen concentración de nutrientes, bajo contenido de microorganismos patógenos, metales pesados y que por ello es posible su utilización en remediación de suelos o fertilizante de acuerdo a su composición específica y que esta se acople a la normativa del país (EPA, 1994)

6.3.1 Disposición de biosólidos en rellenos sanitarios

La disposición de biosólidos en rellenos sanitarios ha sido una estrategia ampliamente utilizada en diferentes zonas por ser un método económico por las pocas restricciones a las que se debe acoplar, además de que es considerado como un residuo ya que por su composición se le atribuye la capacidad de contaminar el suelo, aire y agua. Recientemente, los rellenos sanitarios modernos han evidenciado el incremento en sus costos, ya que con la intención de disminuir el impacto ambiental negativo, se han impuesto mayores requerimientos para su disposición.

Entre los requerimientos se consideran obtener humedades entre un 60 – 85% al igual que mantener unos parámetros específicos en cuanto a la presencia y control de sustancias peligrosas que puedan aumentar la producción de lixiviados (Espitia, J, 2019).

Si bien esta estrategia resultó ser la más viable hace un tiempo, en la actualidad se reconocen múltiples dificultades, por las que ha sido necesario repensar la disposición del biosólido, ya que ahora existen iniciativas que a nivel mundial propenden mejorar las condiciones ambientales y prevenir o mitigar posibles impactos a partir de la implementación de nuevas prácticas, tal como se pretende con la implementación de los Objetivos de Desarrollo Sostenible ODS.

En algunos países se están adoptando medidas para la disposición de estos residuos, entre ellas reducir la humedad de lodo (biosólido) y emplearlo para el cierre de rellenos sanitarios y así mejorar la estabilización del suelo y la remediación de los lixiviados ya que se ha demostrado su funcionalidad como acondicionador de suelos siendo una técnica de viabilidad económica, logística, social y ambiental con riesgos mínimos (Espitia, J, 2019)

En su trabajo (Donaldo, 2013) indica que los lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales se disponen generalmente en:

- Terrenos de uso agrícola.
- Terrenos de uso forestal.
- Terrenos deforestados (recuperación de canteras).
- Terrenos especialmente preparados para la evacuación de lodos.

Estos lodos son dispuestos en los terrenos anteriormente mencionados con la finalidad darle continuidad al tratamiento de lodos, ya que con la acción de la luz solar, los microorganismos presentes en el suelo y los diferentes procesos biológicos que en él ocurren, es posible la destrucción de patógenos y la degradación de componentes tóxicos presentes en el lodo.

Posteriormente, el lodo se convierte en un acondicionador del suelo que mejora el flujo de nutrientes, la capacidad de retención de agua y las condiciones del suelo para ser cultivado, cumpliendo con las funciones de fertilizantes químicos que pueden ser costosos, encontrando allí el beneficio económico que esta técnica incluye.

Cabe mencionar que si el lodo no recibe el tratamiento previo, resulta peligrosa su aplicación en el suelo, ya que puede contener altos niveles de:

- Contenido orgánico y de patógenos tales como materia orgánica desagradable, virus y bacterias causantes de malos olores, atracción de vectores y por ende, propagadores de enfermedades
- Nutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio que si bien no son eliminados en el tratamiento, son de utilidad para el suelo, por lo que convierten al lodo en un acondicionador y restaurador con la condición de que se mantengan las relaciones adecuadas entre estos y se empleen las cantidades recomendadas (Donaldo, 2013)

- Metales y materia orgánica que son característicos en la composición de aguas residuales y que pueden llegar a ser tóxicos para la salud humana, la fauna y la flora si al estar en altas concentraciones, entran en contacto con el suelo

La Tabla 4 indica las características físicas y químicas comunes de los lodos residuales

Tabla 4 características físicas y químicas de los lodos residuales.

PARÁMETRO	UNIDADES	LODO PRIMARIO	LODO PRIMARIO DIGERIDO	LODO SECUNDARIO
Concentración de sólidos	%	5 - 9	2 - 5	0.8 - 1.2
Sólidos volátiles	% ST	60 - 80	30 - 60	59 - 88
Proteína	% ST	20 - 30	15 - 20	32 - 41
Nitrógeno	% ST	1.5 - 4	1.6 - 3	2.4 - 5
Fosforo	% ST	0.8 - 2.8	1.5 - 4	2.8 - 11
Oxido de Potasio	% ST	0 - 1	0 - 3	0.5 - 0.7
Celulosa	% ST	8 - 15	8 - 15	-
Hierro	% ST	2 - 4	3 - 8	-
Oxido de Silicio	% ST	15 - 20	10 - 20	-
pH	u. pH	5 - 8	6,5 - 7.5	6.5 - 8
Alcalinidad	Mg CaCO ₂ /l	500 - 1500	2500 - 3500	580 - 1100
Ácidos Orgánicos	Mg HAc/l	200 - 200	100 - 600	1100 - 1700
Contenido Energético	KJ ST/Kg	23000 - 29000	9000 - 14000	19000 - 23000

Fuente. (Metcalf & Eddy, 2003)

6.3.2 CLASIFICACIÓN DE LOS LODOS

Clasificación de lodos residuales de acuerdo a su aprovechamiento

Los lodos residuales se clasifican en las siguientes categorías: aprovechables, no aprovechables y peligrosos (Oropeza, N, 2006)

- **Lodos aprovechables**

Son lodos procedentes de procesos aeróbicos y/o anaeróbicos que al ser estabilizados se pueden reutilizar en compostaje, remediación de suelo, generación de energía, etc. (Donaldo, 2013)

- **Lodos no aprovechables**

Son aquellos lodos que por su composición química y microbiológica, especialmente por su deficiencia de carga orgánica o poder calorífico no pueden ser incorporados en el suelo o en otra aplicación y que generalmente son desechados en rellenos municipales o mono rellenos. Esta categoría incluye los sólidos retenidos en el pre tratamiento (sistema de rejillas y cribado) (Donaldo, 2013)

- **Lodos peligrosos**

Son lodos con características tóxicas o nocivas para la salud humana o del medio ambiente y por ello, requieren medidas especiales de seguridad al momento de su manejo y disposición. (Donaldo, 2013)

En concordancia con lo anterior, los lodos generados en una PTAR pueden tener diferentes aplicaciones de acuerdo a la normativa vigente en cada país o contexto, por lo que su tratamiento resulta conveniente para obtener biosólidos que puedan ser incorporados en recuperación de suelos o procesos productivos

6.3.3 Tratamiento de lodos residuales

Los lodos residuales son tratados con la finalidad de remover parcial o totalmente, aquellos compuestos que pueden afectar la salud humana, la calidad del medio ambiente y que dificultan su manejo, aprovechamiento y/o disposición.

Las siguientes son las etapas comunes en las cuales el lodo es tratado

- **Pretratamiento**

Es el acondicionamiento del lodo con el que se busca disminuir el contenido de humedad y así, aumentar el contenido de sólidos o materia seca (MS) con el fin de reducir la necesidad de instalación de equipos para su tratamiento y asegurar la eficiencia de las etapas posteriores del tratamiento

- **Espesamiento**

El espesamiento tiene como objetivo aumentar la eficiencia además de reducir el tiempo del proceso en los digestores a fin de reducir costos en los tanques de digestión anaerobia para asegurar que las unidades de espesamiento tengan los parámetros de diseño aceptables y así asegurar su óptimo desempeño en diversas condiciones. Se recomienda realizarse tanto para los lodos primarios como para los lodos de desecho para reducir costos globales de digestión

Con el espesamiento se consigue reducir la humedad, presentando características de estado líquido. La literatura refiere que un lodo llega a una concentración de sólidos totales alrededor del 10% en peso; en el caso de la centrifuga las concentraciones superan el 20%

- **Estabilización**

Con la finalidad de reducir la carga de microorganismos patógenos, metales pesados y demás componentes nocivos contenidos en el lodo ya deshidratado, este es sometido a procesos químicos, físicos o biológicos que estabilizan los parámetros ya mencionados, posibilitando su manejo, almacenamiento y disposición o valorización con un menor riesgo de afectación a la salud humana y a la calidad del medio ambiente. Según (Brahim, 2017) la digestión y anaerobia resulta conveniente en el tratamiento de agua residual,

específicamente en que a diferencia de la digestión aerobia, genera menores cantidades de lodo residual.

- **Digestión anaerobia**

La digestión anaerobia es un proceso biológico complejo a través del cual, en ausencia de oxígeno, la materia orgánica es transformada en biogás o gas biológico, formado principalmente por metano y anhídrido carbónico.

- ❖ **Bioquímica de la digestión anaerobia**

La digestión anaerobia está caracterizada por la existencia de tres fases diferenciadas en el proceso de degradación del sustrato (término genérico para designar, en general, el alimento de los microorganismos), interviniendo diversas poblaciones de bacterias. La figura 3 describe cada una de las fases.

Se identifican cinco grandes poblaciones bacterianas, las cuales actúan catalizando tres procesos consecutivos: hidrólisis, acidogénesis (formación de ácidos) y metanogénesis (formación de metano), constituyendo 4 etapas, las cuales se describen a continuación:

Hidrólisis

Los compuestos orgánicos complejos, como los lípidos, proteínas e hidratos de carbono, son despolimerizados, por acción de enzimas hidrolíticas, en moléculas solubles y fácilmente degradables, como azúcares, ácidos grasos de cadena larga, aminoácidos, alcoholes, etc. Se trata de un proceso enzimático extracelular, y las bacterias responsables de su generación son las bacterias hidrolítico-acidogénicas

Acidogénesis

Los compuestos solubles obtenidos de la etapa anterior se transforman en ácidos grasos de cadena corta (ácidos grasos volátiles), esto es, ácidos acéticos, propiónico, butírico y valérico, principalmente.

Acetogénesis

Los compuestos intermedios son transformados por las bacterias acetogénicas.

Como principales productos se obtiene ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono. El metabolismo acetogénico es muy dependiente de las concentraciones de estos productos

Metanogénesis

Constituye la etapa final del proceso, en el que compuestos como el ácido acético hidrógeno y dióxido de carbono son transformados a CH₄ y CO₂. Se distinguen dos tipos principales de microorganismos, los que degradan el ácido acético (bacterias metanogénicas acetoclásicas) y los que consumen hidrógeno (metanogénicas hidrogenófilas).

7. METODOLOGÍA.

Tipo de investigación

La investigación desarrollada en el presente documento, tiene un enfoque cuantitativo, en el que a partir de la investigación, se propone un esquema para la reducción del porcentaje de humedad en tres escenarios propuestos que posteriormente serían analizados logísticamente y de los que reconocieron las actividades, aspectos e impactos ambientales tanto para el caso de implementar la estrategia propuesta, como para el caso de que el biosólido sea dispuesto en un relleno sanitario.

Para el desarrollo del proyecto, se plantearon cuatro fases: en la fase preliminar, se realizaron una serie de ensayos preliminares para la producción de ladrillos con la incorporación del biosólido; esto en razón del primer direccionamiento que la investigación tenía; la fase I, ya enfocada a los objetivos actualmente propuestos, se indagó sobre las tecnologías reportadas en la literatura para la deshidratación y secado de los lodos y a partir de ello, se propuso el esquema de un tren de tratamiento para la obtención del biosólido. En la fase II, se hizo un análisis logístico de cada uno de los tres escenarios de secado propuestos, considerando el transporte del biosólido desde la PTAR hasta la fábrica de ladrillos

8. RESULTADOS

A partir del desarrollo de la metodología planteada anteriormente, se presentan los resultados obtenidos así:

8.1 TECNOLOGÍAS PARA EL TRATAMIENTO DE LODOS

Tecnologías de espesamiento

✓ Tanque gravitacional

El objetivo es reducir el volumen de fango mediante la concentración del mismo por la eliminación del agua contenida. Este tipo de espesamiento los lodos se concentran por gravedad, teniendo como fundamento la teoría de la sedimentación por zonas. En la parte superior se encuentra la zona de la fracción líquida que contiene una baja concentración de sólidos, la cual sale con el líquido sobrenadante por el vertedero; la siguiente zona se denomina zona de separación y se caracteriza por tener una concentración de sólidos uniforme. Por último se encuentra la zona de lodos asentados o de captación donde se genera el aumento en la concentración de sólidos hasta el punto de purga de los mismos.

Los espesadores por gravedad se emplean principalmente para el espesamiento de los lodos primarios, lodos físico-químicos y lodos mixtos. Por medio del tanque gravitacional se puede llegar a concentrar el lodo hasta un promedio de 6- 10% de sólidos para lodos primarios sin la necesidad de adicionar un producto químico. La relación de lodos secundarios a primarios para ser espesados conjuntamente en un espesador de gravedad, puede variar entre el 25 y el 50% sin que afecte a la eficacia del proceso. La altura del manto de lodo, es uno de los principales parámetros de control de este proceso. Si se incrementa el caudal de alimentación en la zona de la separación, disminuirá la altura del manto de lodo, lo que conlleva un bajo tiempo de residencia de sólidos, una mayor cantidad de SS que escapan con el sobrenadante y menor concentración, en el caso de presentarse el escenario contrario, un manto de lodos con demasiada altura significaría un mayor tiempo de retención y una concentración más alta. Aun así, esto podría dar lugar a que se produzcan condiciones anaerobias que derivan en la producción de gas, el cual podría hacer flotar el lodo y generar un sobrenadante cargado (Dodane, 2014)

El espesamiento por gravedad se ve afectado por los cambios en la temperatura, la carga de alimentación del tanque debe reducirse cuando la temperatura supera los 20°C variando la proporción de los lodos primarios y secundarios; en cuanto a la altura del manto de lodos sometido a altas temperaturas se trabaja eficientemente con alturas pequeñas. El tiempo de retención de sólidos en el tanque gravitacional para lodos primarios se encuentra en un rango entre 1 y 2 días. Para evitar la generación de olores por lo general se utilizan cubiertas desmontables que facilitan el mantenimiento del tanque.

Tabla 5.ventajas y desventajas del tanque gravitacional.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> · Mínimos requerimientos de personal. · Reduce el porcentaje de humedad, facilitando su manejo y transporte 	<ul style="list-style-type: none"> · La presencia de arenas en el lodo aumenta el desgaste de la centrífuga · Alto costo de inversión, mantenimiento y consumo energético, por su alta automatización. · Ruido elevado.

Fuente. Adaptado de (Dodane, 2014)

Filtro prensa

Tabla 6.ventajas y desventajas de tipos de filtro prensa.

Filtros Prensa de Placas	Filtros Prensa Rotativos por Ventilación	Filtros Prensa Rotativos por Tornillos
Alto requerimiento de área operativa por unidad de masa procesada, cuando se compara con los filtros prensa de bandas y centrífugas de alto rendimiento.	Alto requerimiento operativo de área por unidad de masa procesada, cuando se compara con los filtros prensa de bandas y centrífugas de alto rendimiento.	Alto requerimiento operativo de área por unidad de masa procesada, cuando se compara con los filtros prensa de bandas y centrífugas de alto rendimiento.

<p>Altos costos de capital por unidad de masa transferida cuando se compara a los filtros prensas de bandas y las centrífugas de alto rendimiento.</p> <p>Limitada capacidad de procesamiento de sólidos para grandes dimensionamientos de unidades disponibles comercialmente, aproximadamente 680 a 910 kg en base seca por hora por unidad (1.500 a 2.000 libras en base seca por hora por unidad), cuando se compara con las centrífugas de alto rendimiento.</p>	<p>Altos costos de capital por unidad de masa procesada cuando se compara con los filtros prensas de bandas y las centrífugas de alto rendimiento.</p> <p>Limitada capacidad de procesamiento de sólidos para grandes dimensionamientos de unidades disponibles comercialmente, aproximadamente 275 a 400 kg en base seca por hora por unidad (600 a 900 libras en base seca por hora por unidad), cuando se compara con los filtros prensa de bandas y las centrífugas de alto rendimiento.</p>	<p>Altos costos de capital por unidad de masa procesada cuando se compara con los filtros prensas de bandas y las centrífugas de alto rendimiento.</p> <p>Limitada capacidad de procesamiento de sólidos para grandes dimensionamientos de unidades disponibles comercialmente, aproximadamente 275 a 400 kg en base seca por hora por unidad (600 a 900 libras en base seca por hora por unidad), cuando se compara con los filtros prensa de bandas y las centrífugas de alto rendimiento.</p>
---	--	--

Fuente.

Tecnologías de digestión anaerobia

✓ Hidrólisis térmica

La hidrólisis térmica es un pre tratamiento para mejorar la digestión de los lodos residuales que consiste en aplicar altas temperaturas y presiones en determinados periodos de tiempo,

entre 140-200°C y la presión entre 6-20b bar durante 30 minutos aproximadamente, condiciones que implican altos consumos de energía (Martín, 2015)

En este proceso las células sufren lisis y desintegración que dan paso a la liberación de la materia contenida, facilitando su acceso por parte de los microorganismos anaerobios presentes (Gurieff et al. 2010).

La Tabla 6 muestra las ventajas y desventajas de la hidrólisis térmica:

Tabla 7.ventajas y desventajas de la hidrólisis térmica.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> · Con la hidrólisis se disminuye la viscosidad del lodo y no se generan espumas, lo cual posibilita la reducción del volumen del digestor a cerca de la mitad del de uno convencional. · Debido a la temperatura a la que se da la hidrólisis, los lodos obtenidos están exentos de patógenos. · Disminuye el volumen de los lodos digeridos que posteriormente son llevados a la digestión anaerobia. · Facilita la deshidratación de los lodos, aproximadamente entre un 50-100% lo que significa que obtener un 40% de MS · Es un proceso con el que se obtiene energética ya que el calor residual puede ser empleado en la cogeneración de biogás, aumentando su producción entre 30-50% 	<ul style="list-style-type: none"> · Alta inversión inicial, por lo que se recomienda que sea implementada en PTAR con producción superior a 3000 ton/día. · El lodo debe contener MS > 12% · Se debe hacer el balance energético global para determinar la relación entre la energía requerida y obtenida.

Fuente. Adaptado de (Martín Arroyo, 2015)

Tecnologías físico químicas

✓ **Estabilización con cal**

La estabilización con cal es una técnica que funciona como bactericida, bloqueando temporalmente la acción de fermentaciones ácidas. El uso de cal es efectivo para estabilizar materiales finos de media o alta elasticidad, generando beneficios como: aumento de las propiedades térmicas de resistencia, reducción de plasticidad, aumento de trabajabilidad entre otros (Elizondo, 2010)

Tabla 8.ventajas y desventajas de la estabilización con cal.

Ventajas	Desventajas
<p>Requiere poco tiempo para cumplir su efecto.</p> <p>Resulta ser una técnica económica</p> <p>Puede utilizarse como sistema complementario cuando otros sistemas están fuera de servicio</p>	<p>Es un técnica efectiva para PTAR de capacidad baja</p> <p>Para el tratamiento de lodos activados se requiere gran cantidad de cal</p>

Fuente. Adaptado de (Elizondo, 2010)

Tecnologías de deshidratación

✓ **Centrífuga** (Amador - Díaz, 2015)

El proceso se basa en la rotación de un tambor cilíndrico-cónico sobre un eje horizontal a una alta velocidad; el material se introduce y en el interior del tambor y por la fuerza producida en el giro del mismo las partes más pesadas de la mezcla de lodos y agua, siendo arrastrada a la salida de sólidos por un tornillo helicoidal que gira a una velocidad diferente a la del tambor. La función de la sección cilíndrica del tambor es la sedimentación de partículas sólidas, mientras que la de la parte cónica es generar un escurrido progresivo de las mismas; todo esto hasta llegar a la salida sin líquido libre. El agua, al tener un peso específico distinto al de los sólidos, forma un anillo interior al formado por los sólidos. El

líquido que sale de la centrífuga se devuelve a los decantadores primarios, y la torta de lodo pasa a un pozo de recogida o a una cinta transportadora para su evacuación.

El caudal de alimentación, la profundidad del depósito de lodo, la velocidad de giro de la centrífuga y otros factores determinan el estado de la torta descargada y la calidad del centrifugado. Hay dos tipos de centrifugación en la deshidratación de lodos. Una de ellas es la centrifugación contra corriente, donde los sólidos y el líquido circulan en sentido contrario dentro del cilindro. El otro tipo de centrifugación es la co-corriente donde la fracción sólida y la líquida discurren en el mismo sentido.

Los elementos más importantes en este proceso son la velocidad del tambor que cuando mayor sea la fuerza de la centrifuga y será mejor la separación, la velocidad diferencial entre el tambor y el tornillo interno. Las centrífugas requieren que el lodo sea acondicionado previamente y tienen tres fases fundamentales:

a) Lugar de inyección de la solución de polielectrolito y del lodo. Es muy importante la floculación del lodo para facilitar la separación líquido-sólido por el efecto de la centrifugación. Es imprescindible que la formación de los flóculos sea muy rápida y que la zona de floculación sea amplia y que evite la rotura de estos. El lodo se inyecta en el inicio de la parte cilíndrica del tambor.

b) Parte cilíndrica, longitud y diámetro (zona de clarificación) Esta es la zona de separación entre el sólido y el líquido. La longitud cilíndrica del tambor nos dará la calidad del escurrido, cuanto mayor sea, más claro será éste. El diámetro del tambor tiene dos relaciones directas: - A mayor diámetro, mayor consumo energético. - A mayor diámetro, mayor velocidad radial y mayor fuerza centrífuga, para una misma velocidad lineal. Es claro que debe optimizarse, para cada caso, el diámetro ideal. También es muy importante la ubicación de los huecos de salida del agua.

c) Parte cónica (zona de prensado) En esta zona se produce el prensado final del lodo, es decir su secado, comprimiéndose entre sí antes de su salida. Cuanto mayor sea el ángulo formado entre el cilindro y el cono, mayor es la fuerza de reflujos que se produce, llegando incluso a romper la cohesión del lodo y las partículas más finas se pondrán nuevamente en suspensión, siendo evacuadas con el líquido.

Tabla 9 ventajas y desventajas de la centrífuga.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> · Mínimos requerimientos de personal. · Reducir el líquido libre. El fluido en el fango ocasiona múltiples problemas en el transporte y manejo. 	<ul style="list-style-type: none"> · La presencia de arenas en el lodo aumenta el desgaste de la centrífuga · Alto coste de inversión, mantenimiento y consumo energético, por su alta automatización. · Ruido elevado.

Fuente. Adaptado de (Amador - Díaz, 2015)

De acuerdo con el rastreo realizado para la identificación de las tecnologías de secado de lodos, el proceso resulta ser viable, ya que a partir de la reducción del porcentaje de humedad, se facilita el manejo in situ del lodo, además de su almacenamiento sin generar olores, atracción de vectores y la reducción del espacio necesario que se debe adecuar en el predio de la PTAR. Sin embargo, en el rastreo se identificaron situaciones comunes entre algunas tecnologías como los requerimientos de espacios grandes para su ubicación y la preparación que se le debe realizar al lodo para asegurar la efectividad del tratamiento, lo que podría implicar altos costos de inversión. No obstante y considerando lo anterior junto con los requerimientos en cuanto al porcentaje de materia seca del biosólido, se propuso un tren de tratamiento con el uso de tecnologías que si bien tienen sus ventajas y desventajas, permitiría la obtención de los escenarios planteados con referencia al secado del lodo a diferentes porcentajes de humedad (3 escenarios).

Reactor de flujo continuo

Los dos principales parámetros para clasificar los digestores continuos son el número de etapas y la concentración total de sólidos (% ST) en el interior del digestor, ya que estos parámetros influyen de forma importante sobre el coste, el comportamiento y la seguridad del proceso de digestión.

Para tratar los residuos orgánicos se han aplicado diferentes tipos de sistemas anaeróbicos continuos en una y en dos etapas, con diferentes clases de metanizadores que

Incluyen: el digestor tanque agitado continuo (en inglés, Continuously Stirred Tank Digester, CSTR), digestor tubular de flujo pistón, digestor de manta de lodos de flujo ascendente (en inglés, Upflow Anaerobic Sludge Blanket, UASB) y digestor de filtros anaeróbicos (en inglés, Fixed Film Reator, FFR) (Brahim, 2017)

Tabla 10. Ventajas y desventajas de reactor de flujo continuo.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • El biodigestor se puede diseñar de acuerdo con el % de MS • No hay generación de olores 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere consumo energético • Cuando se manejan caudales grandes se debe diseñar en más de una etapa

Fuente. Adaptado de

8.1.1 TREN DE TRATAMIENTO PROPUESTO

Como se mencionó en el apartado anterior, las tecnologías consultadas presentan ventajas y desventajas que permiten dimensionar las condiciones necesarias para mantener la eficiencia de las tecnologías que fue reportada en la literatura y así llegar a reducir el porcentaje de humedad del lodo y transformarlo en biosólido.

Al considerar los requerimientos, es importante señalar la diferencia entre el espesamiento y la deshidratación debido a que ambos procesos tienen como resultado un aumento de la concentración del lodo y una reducción del volumen, la diferencia radica en el nivel de concentración alcanzado por cada uno de ellos.

De acuerdo con lo anterior y con consideraciones referentes a las condiciones del lodo a lo largo del tratamiento, las siguientes fueron las que se priorizaron al momento de diseñar el tren de tratamiento del lodo:

- El porcentaje de humedad óptimo para ingresar a las diferentes tecnologías
- La presencia de arenas o material grueso que dificulte el alcance de materia seca esperado
- El porcentaje de materia seca esperado al tratar el lodo en las diferentes etapas

En aras de elaborar una propuesta amplia para analizar la viabilidad logística y de transporte, se propusieron 3 escenarios basados en el porcentaje de materia seca (%MS) así

Tabla 11 escenarios propuestos para el secado del lodo.

Escenario	% materia seca	% humedad
Escenario 1	23,5	76,5
Escenario 2	40	60
Escenario 3	90	10

Fuente. Elaboración propia

El esquema propuesto fue elaborado con base en las consideraciones relevantes y su orden radicó en la preparación o acondicionamiento con que el lodo sale y debe ingresar a cada tecnología con la finalidad de asegurar la obtención de las eficiencias esperadas.

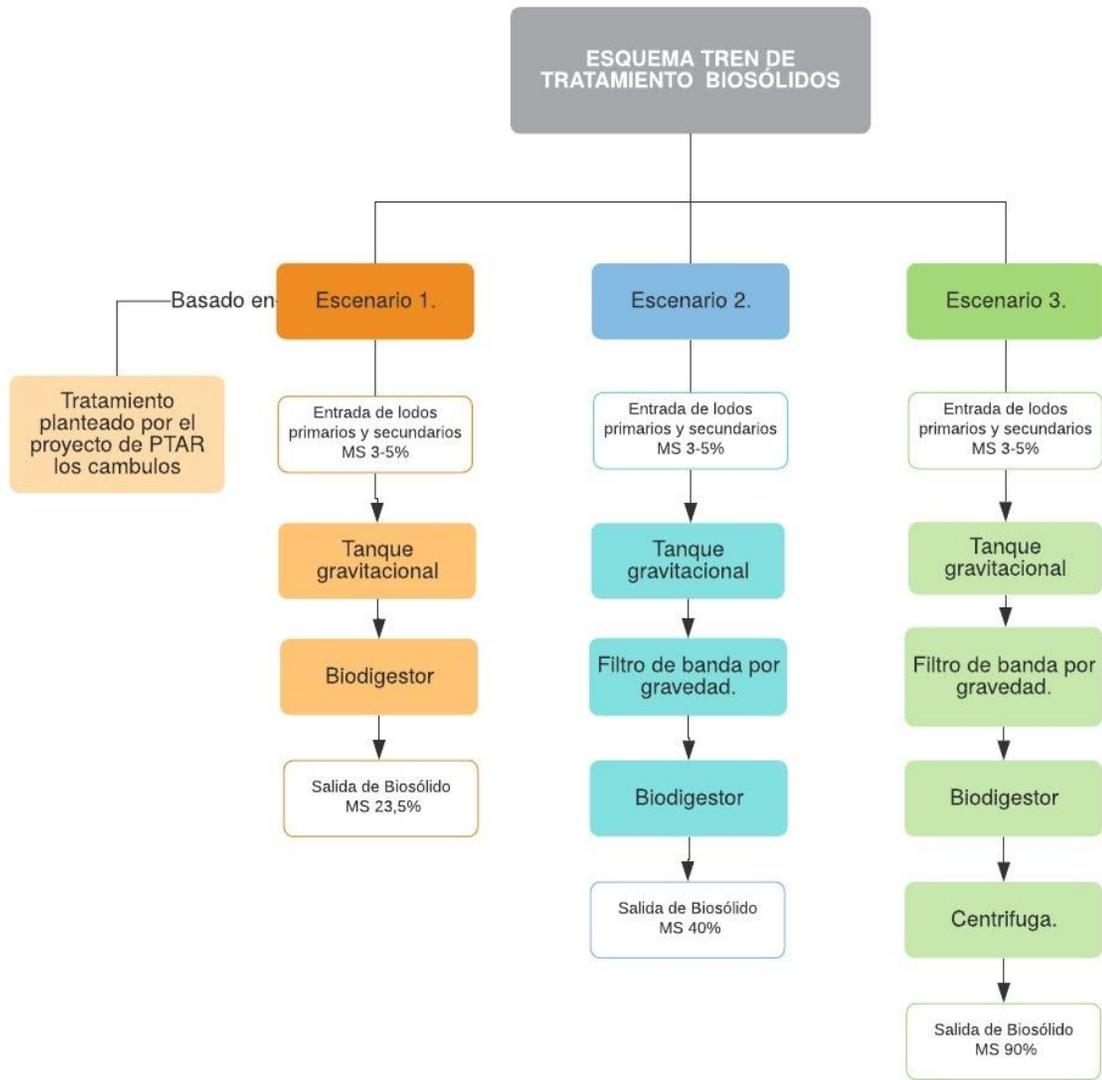


Figura 4. Esquema tren de tratamiento Biosólidos.

Fuente: Elaboración propia.

Los escenarios planteados anteriormente, son el resultado del reconocimiento de las ventajas y desventajas de cada una de las tecnologías consultadas, con las que surgieron los argumentos para identificar los equipos apropiados para optimizar la reducción del porcentaje de humedad de los biosólidos. A continuación se muestra la descripción de los escenarios propuestos.

- ❖ Escenario 1. Este es el escenario propuesto en el diseño actual de la PTAR Los Cábmulos, el cual consta de un tanque gravitacional y un biodigestor, con los cuales se proyecta obtener un biosólido con un 23,5% de Materia Seca.
- ❖ Escenario 2. A partir del escenario 1, se introdujo en el diagrama del tren, un filtro de banda por gravedad antes de llevar el lodo hacia el biodigestor, esto con la finalidad de obtener un 40% de Materia Seca.
- ❖ Escenario 3. Finalmente, se propuso configurar el tren propuesto en el escenario 2, añadiendo una centrifuga después del biodigestor para obtener un 90% de Materia Seca.

8.2. RESULTADOS DE ANÁLISIS DEL COSTO DE DESHIDRATACIÓN DE LODOS

Para identificar el costo aproximado de las tecnologías indicadas en el tren de tratamiento propuesto, se utilizaron como referentes los casos de la PTAR Canoas en Bogotá y del Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de la Comisión Nacional del Agua CONAGUA de Coyoacán, México.

Tabla 12 resumen costos de inversión. Caso PTAR Canoas

Informe Producto No.4 "Informe de costos de inversión y de operación y mantenimiento de alternativas" (PTAR CANOAS Bogotá) 30/10/2014	
Descripción- para caudal promedio de agua residual de 16 m ³ /s	COP
Espesadores circulares por gravedad ; Diámetro 25 m; Áreas 491 m ² ; Profundidad 4,3 m; Número de unidades 5 UND	\$20.400.000
Centrifugas para deshidratación Capacidad por unidad- carga hidráulica 57 m ³ /h; Capacidad por unidad- carga de sólidos 1,814 Kg/h; Numero de centrifugas totales 8 UND; Centrifugas en operación 5 UND.	\$16.700.000
Digestor anaerobio convencional ;Altura 22 m; Diámetro 27 m; Volumen 12,600 m ³ ; Número de unidades totales 16 UND; Unidades de almacenamiento 2 UND; Volumen de digestores en operación 138,600 m ³	\$104.000.000
Total	\$141.100.000

Fuente. Adaptado de (Acueducto, 2019)

Tabla 13 resumen costos de inversión. Caso Coyoacán

Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento (Comisión Nacional del Agua, México) 02/02/2019	
Descripción	COP
Sistema de espesamiento por gravedad para un caudal de 200 l/s Diámetro 6,1 m; Áreas 29,2 m ² ; Profundidad 2,74 m; Número de tanques 1 UND	\$168.892.000
Centrifugas para deshidratación para un caudal de 200 l/s Capacidad por unidad- carga hidráulica 306 m ³ /día; Capacidad por unidad- carga de sólidos 3640 Kg/día; Numero de centrifugas totales 2 UND.	\$120.711.000
Digestor anaerobio convencional para un caudal de 800 l/s Altura 7,44 m; Diámetro 15,2 m; Volumen 12,600 m ³ ; Número de unidades totales 4 UND; Unidades de almacenamiento 1 UND; Volumen de digestores en operación 5900 m ³	\$478.356.000
Total	\$767.959.000

Fuente. Adaptado de (Naturales S. d., 2019)

A partir del informe de Informe Producto No.4 “Informe de costos de inversión y de operación y mantenimiento de alternativas” (Acueducto, 2019) se tomaron las referencias para el coste de inversión para los tres escenarios resumidos en a tabla 12 y se realizó la proyección de costos de acuerdo a la tasa de inflación colombiana (IPC). Teniendo en cuenta que el informe presenta las cotizaciones del 2014 y el caudal de diseño de la PTAR los Cábmulos. La tasa de inflación promedio de Colombia entre los años 2014 y 2020 fue del 4.53% anual. En total, la moneda presentó un aumento del 30.47% entre estos años.

El cálculo de la proyección de costos de inversión se realizó según la ecuación #.

$$Valor\ 2020 = Valor\ 2014 * \frac{IPC\ 2020}{IPC\ 2014} \quad (Ec.\ #)$$

$$\text{Valor 2020} = \$4.673.937 * \frac{121.32}{92.988} = \$6.097.972$$

Tabla 14. Costo de inversión aproximado adicional para la propuesta del tren de secado en la PTAR Los Cámbulos

Caudal PTAR Manizales (0,53m3/s)		
COSTOS ADICIONALES AL ESCENARIO 1 PTARLOS CAMBULOS.		
ESCENARIOS	COP 2014	COP 2020
1. 76,5% h	Inversión PTAR los Cámbulos.	
2. 60 % h	\$224.733.250	\$293,204,013
3. 10% h	\$231.368.477	\$301,860,832

Fuente. Elaboración propia

8.2.1 Alternativas logísticas

A partir de la cantidad de materia seca que se espera obtener después del proceso de deshidratación del lodo, se analizaron las alternativas logísticas consideradas para su transporte, teniendo en cuenta que la proyección de generación de lodos es de 23 ton/día y los escenarios de porcentaje de materia seca especificados anteriormente.

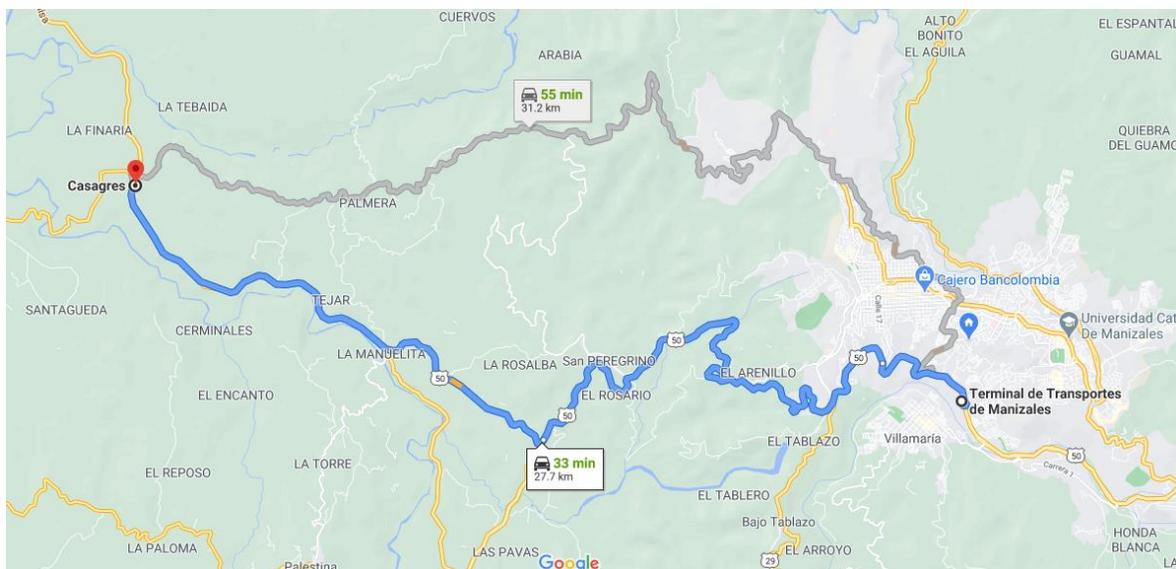


Figura 5. Mapa recorrido PTAR los Cámbulos- Casagres.

Fuente: (Google Maps, 2020)

Tabla 15. Toneladas a transportar.

Escenario	%-Materia seca	%-Humedad	Ton Transportada/ día
1	23,5	76,5	17,595
2	40	60	13,8
3	90	10	2,3

Fuente. Elaboración propia

De acuerdo con la cantidad de biosólido generado (Ton/día) se determinó el número de viajes que el vehículo transportador debe realizar desde la PTAR de Manizales y llevarlo al sitio de aprovechamiento en Casagres, según su capacidad de carga.

Tabla 16. Número de viajes según porcentaje de humedad.

Capacidad de Carga	Viajes		
	76,50%	60%	10%
Sencilla 6 m3	2,9	2,3	0,4
Doble 18 m3	1,0	0,8	0,1

Fuente. Elaboración propia

Tabla 17. Costo de transporte por hora.

Capacidad de Carga	Valor por hora	Costo de transporte por hora.		
		Escenario (%-Humedad)		
		1	2	3
		76,50%	60%	10%
Sencilla 6 m3	\$ 75.000	\$ 225.000	\$ 150.000	\$ 75.000
Doble 18 m3	\$ 225.000	\$ 225.000	\$ 225.000	\$ 225.000

Fuente. Elaboración propia

Tabla 18. Costo transporte mensual.

Capacidad de Carga		Coto de transporte mensual.		
		Escenario (%-Humedad)		
		1	2	3
		76,50%	60%	10%
Sencilla 6 m3	Costo mensual	\$ 6.750.000	\$ 4.500.000	\$ 2.250.000
Doble 18 m3		\$ 6.750.000	\$ 6.750.000	\$ 6.750.000

Fuente. Elaboración propia

Teniendo en cuenta el tiempo estimado del viaje entre la PTAR y el lugar de aprovechamiento y lo mencionado anteriormente se plantean las opciones A y B referentes a las frecuencias de recolección y transporte del biosólido.

Opción A

Basados en que la duración del viaje son 33 min y el alquiler se cotizo por hora se propone una frecuencia diaria de recolección para en los escenarios planteados para identificar el número de viajes que se deben realizar, específicamente los 76,50 %H y 60%H debido a que se requieren entre 1 a 3 viajes para realizar la recolección completa del material diario; de esta manera no se acumularía el material en la planta evitando la generación de malos olores.

Opción B

Para los casos del 10%H se encuentra que la volqueta no estaría a su máxima capacidad al momento de transportar el material; se plantea una recolección de tres veces por semana (lunes, miércoles y viernes) y la adecuación de un sitio para el almacenamiento temporal que cumpla con lo establecido en el artículo 7 del decreto 1228 del 2014 donde se establece que “Los biosólidos que cumplan con lo establecido en el presente decreto podrán ser almacenados hasta por un período máximo de seis (6) meses, en condiciones que garanticen el control de las emisiones de gases, manejo de lixiviados y el control a la proliferación de vectores. El sitio de almacenamiento deberá contar con un sistema de gestión de aguas residuales”.

De acuerdo con el planteamiento anterior, se definió que la opción B es la más conveniente para el transporte del biosólidos desde la PTAR Los Cábulo hasta Casagres siempre y cuando se tengan las consideraciones establecidas en el Decreto 122 de 2014.

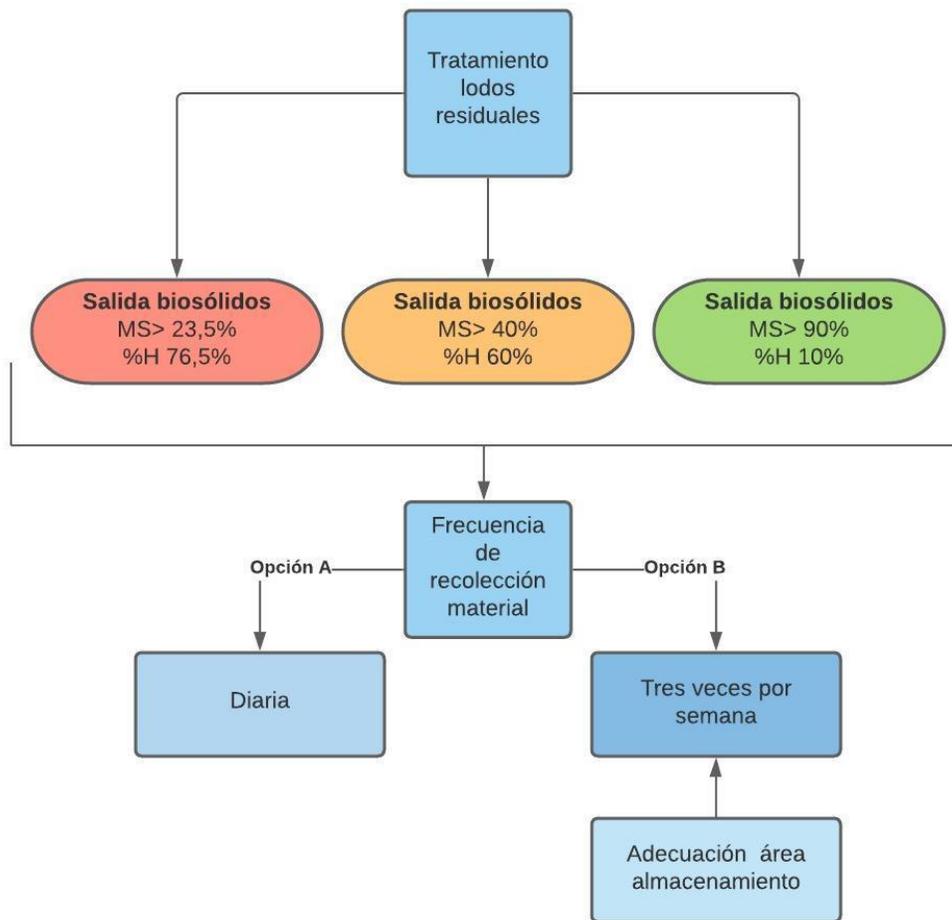


Figura 6. Logística.

Fuente. Elaboración propia

Comparación de costos de alternativas de valorización y disposición del biosólido.

Comparando los costos de inversión que tienen los nuevos equipos y transporte con los costos que conlleva la disposición final en el relleno sanitario la esmeralda, se identifica la posibilidad de amortiguar a mediano y largo plazo la inversión y operación del nuevo tren de tratamiento. En la tabla 20 se identifica que el costo mensual de disponer los biosólidos en el relleno sanitarios costaría más de 120 millones de pesos (Aguas de Manizales S.A. E.S.P, 2018), significando esto que el costo inicial de inversión de \$301.860.832 puede ser amortiguado en dos años.

Tabla 19 Costos de transporte desde la PTAR hasta la ladrillera

Costos de inversión.		Escenario
		3.%-H: 10
Inversión	Según tabla 3.	\$301.860.832
Transporte	Carga Doble	\$ 6.750.000
Total COP		\$ 308.610.832

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 20 Costos de disposición final en el relleno sanitario

Costos de disposición final del biosólido en relleno sanitario	Etapa 1	Etapa 2
Costo de disposición final de biosólidos (pesos COP/ton)	\$150.000	\$150.000
Costo diario	\$4.050.000	\$6.300.000
Costo mensual	\$125.550.000	\$195.300.000
Consto anual	\$1.506.600.000	\$2.343.600.000

Fuente. Elaboración propia

8.3. MATRIZ EIA

Matriz de interacciones de Leopold

Denominada “Matriz de Interacciones de Leopold”, ésta es una matriz de interacción simple para identificar los diferentes impactos ambientales potenciales de un proyecto determinado. Esta matriz de doble entrada tiene como filas los factores ambientales que pueden ser afectados y como columnas las acciones que tendrán lugar y que pueden causar impactos.

Los siguientes son los criterios bajo los cuales se cuantifica el impacto:

Naturaleza - Beneficioso + - Perjudicial -	Intensidad - Baja 1 - Muy alta 8 - Media 2 - Total 12 - Alta 4
Extensión - Puntual 1 - Total 8 - Parcial 2 - Crítico 12 - Extremo 4	Momento - Largo plazo 1 - Inmediato 4 - Medio plazo 2 - Crítico 8
Persistencia - Fugaz 1 - Temporal 2 - Permanente 4	Reversibilidad - Corto plazo 1 - Medio plazo 2 - Irreversible 4
Sinergia - Simple 1 - Sinérgico 2 - Muy sinérgico 4	Acumulación - Simple 1 - Acumulativo 4
Relación causa-efecto - Indirecto 1 - Directo 4	Periodicidad - Irregular 1 - Periódico 2 - Continuo 4
Recuperabilidad - Inmediata 1 - Mitigable 4 - Medio plazo 2 - Irrecuperable 8	IMPORTANCIA $I = +/- (3I + 2Ex + Mo + Pe + Rv + Si + Ac + CE + Pr + Re)$

Figura 7. Importancia del impacto según matriz de interacciones de Leopold.

Fuente. (Leopold, 1971)

A partir de la valoración de los aspectos e impactos ambientales que fueron identificados en la matriz de interacciones, se identificaron los más significativos en relación con la propuesta de valorización del biosólidos en la producción de ladrillos de construcción en contraste con su disposición final en un relleno sanitario

Valorización Biosólidos.

- Generación de biogás para el funcionamiento del tren de tratamiento de lodos.
- Disminución de la extracción de materia prima para la producción de ladrillos de construcción.



1. Ambiental: Producción suficiente de biogás en la digestión para el funcionamiento del tren propuesto en el escenario 3.
2. Económico: Disminución de costos de transporte por la frecuencia de recolección establecida.

Disposición final en relleno sanitario.

- Pérdida de biodiversidad.
- Degradación del suelo.
- Degradación de la calidad del aire.
- Afectación a cuerpos de agua (lixiviados).
- Generación de olores.
- Emisión de Gases de Efecto



1. Ambiental: Degradación de la calidad del ecosistema.
2. Económico: Se requiere de deshidratación y de transporte del material.

Figura 8. Análisis de alternativas.

Fuente. Elaboración propia

9. CONCLUSIONES

1. La estrategia planteada para el secado del lodo, se convierte en una alternativa que si bien tiene un alto costo de inversión de acuerdo con los referentes consultados, es importante reconocer que no solo reduciría el costo a largo plazo de la disposición final de lodo, ya que además significaría una actividad de impacto positivo para el medio ambiente considerando la vida útil con la que cuentan los rellenos sanitarios y sus repercusiones en el medio ambiente, como lo es la pérdida de permeabilidad de suelo, la deforestación para la adecuación del terreno, la emisión de gases a la atmósfera por la inadecuada disposición del biosólido y el no tener en consideración el tiempo que el lodo tardaría en vincularse al mismo suelo.
2. La deshidratación de lodos es una estrategia conveniente para la PTAR al facilitar su manejo y disposición, ya que de acuerdo con los 3 escenarios planteados en la propuesta, la humedad se reduciría hasta llegar a un 10% en la composición del biosólido, disminuyendo el espacio necesario para su almacenamiento, las posibilidades de generación de olores y atracción de vectores y también, se reflejaría la disminución en costos de transporte de biosólido hasta Casagres o en su defecto hasta el sitio donde ha de ser dispuesto.
3. De acuerdo con la valoración de los impactos ambientales evaluados en la matriz, se concluye que la implementación del tren de tratamiento para la obtención de biosólidos resulta ser la estrategia más conveniente en términos ambientales. Esto, ya que al compararla con la alternativa de disposición final del lodo en el relleno sanitario, se reconoció que los impactos negativos fueron en su mayoría previstos a partir de lo que implica construir y operar un relleno sanitario, los cuales no se materializarían si se opta por valorizar los biosólidos en la producción de materiales de construcción.

Tabla 22 Costos de transporte desde la PTAR hasta la ladrillera

Costos de inversión.		Escenario
		3.%-H: 10
Inversión	Según tabla 3.	\$301.860.832
Transporte	Carga Doble	\$ 6.750.000
Total COP		\$ 308.610.832

Fuente. Elaboración propia

10. Recomendaciones

- En relación con el desarrollo del segundo objetivo específico, se recomienda dar continuidad al análisis financiero del tren de tratamiento propuesto en el trabajo, ya que si bien se presentan los costos aproximados de inversión, la identificación de los aspectos financieros y su rentabilidad puede ser optimizada para así, hacer sostenible la propuesta en relación con los costos de inversión, operación y mantenimiento.
- Se recomienda identificar posibilidades de optimización de tren de tratamiento propuesto para la obtención de biosólidos, para que así la valorización de este subproducto sea sostenible.
- Analizar las otras posibilidades de valorizar el biosólido en otras alternativas en el marco del Decreto 1287 del 2014 :

*Recuperación de suelos

*Abono acondicionado de suelos.

*Plantaciones forestales.

*Revegetalización y paisajismo.

*Estabilización de taludes.

11. Bibliografía

- Aburrá, C. H. (2014). *Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Bello, Informe diseño preliminar secado térmico de biosólidos*. Valle de Aburrá .
- Acueducto, a. y. (2019). *Informe mensual de actividades enero*. Bogotá.
- Aguas de Manizales S.A. E.S.P. (2018). *Planta de tratamiento de aguas residuales los Cambulos*. Manizales.
- Amador - Díaz, A. y.-L.-V. (2015). Tratamiento de lodos, generalidades y aplicaciones. *Revista CENIC. Ciencias Químicas*.
- Ascencio, I. y. (2019). Addition of Residual Sludge In The Development Of Ceramic Matrices. *Revista EIA*.
- Brahim, A. (2017). *DIGESTIÓN Y CODIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS AGRÍCOLAS, GANADEROS Y LODOS DE DEPURADORA*. Málaga.
- Casagres. (2020). *casagres.com*. Obtenido de Somos Casagres: <http://casagres.com/somos-casagres>
- Dodane, P. B. (2014). *Manejo de lodos fecales. Capítulo 6. Tanques de Sedimentación y Espesamiento*. Londres: IWA Publishing.
- Donaldo, R. (2013). *Plan de gestión ara lodos generados en las PTAR-D de los municipios de Cumaral y San Martín de los Llanos en el departamento del Meta*. Bogotá : Pontificia Universidad Javeriana .
- Eliche-Quesada, D. M.-G.-C.-P.-V.-P.-I. (2011). The use of different forms of waste in the manufacture of ceramic bricks. *Applied Clay Science*.
- Elizondo, F. e. (2010). Efecto de la cal en la estabilización de subrasantes. 7.
- EPA. (1994). Title 40—Protection of Environment: part 503--Standards for the Use or Disposal of Sewage Sludge. *Federal Register*.
- Espitia, J. (2019). Guía metodológica para el manejo y aprovechamiento de biosólidos en Colombia. *Universidad Nacional de Colombia* .
- Espitia, J. D. (2019). *Diseño de prototipo de material cerámico para el sector construcción, a partir de biosólidos provenientes de plnatas de tratamiento de aguas residuales urbanas*. . Manizales: SENA.
- García, N. (2006). Lodos residuales: estabilización y manejo. *Universidad de Quintana Roo*, 8.
- ICONTEC - Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificaciones . (2009). UNIDADES DE MAMPOSTERIA DE ARCILLA COCIDA. LADRILLOS Y BLOQUES CERPAMICOS. NTC 4205. 4.
- ICONTEC. (2018). *NTC4017: MÉTODOS PARA MUESTREO Y ENSAYOS DE UNIDADES DE MANPOSTERIA Y OTROS PRODUCTOS DE ARCILLA*. Colombia.

- Jiménez, N. (2014). *Diseño de un reactor biológico de*. Almeria, España.
- Kadir, A. B. (2014). An overview of sludge utilization into fired clay brick. *International Journal of Environmental, Ecological, Geological and Marine Engineering*.
- L, S., & Carda, J. (2002). Materiales residuales, Materias primas y aditivos cerámicos .
- Leopold, L. (1971). *procedure for evaluating environmental impact*. Washington, D.C.: U.S. Geological Survey Circular 645.
- Manoharan, C. S. (2011). Analysis of temperature effect on ceramic brick production from alluvial deposits, Tamilnadu, India. *Applied clay science*.
- Martín Arroyo, P. (2015). Tecnologías comerciales de hidrólisis térmica de lodos de depuradora: revisión documental y comparativa.
- Metcalf & Eddy, B. F. (2003). *Wastewater engineering: treatment and reuse*.
- Ministerio de Desarrollo Económico. (2000). Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS-2000. Título E. 54-57-74.
- Moeller, G. F. (2000). Aplicación del procesamiento térmico y alcalino para la desinfección de lodos residuales primarios. un estudio comparativo. *In Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Porto Alegre. Brasil*.
- Naturales, S. d. (2019). *Manual de Agua Potable Alcantarillado y Saneamiento - Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Tratamiento y Disposición de Lodos*. Tlapan. Ciudad de México.
- Oropeza, N. (2006). Lodos residuales: estabilización y manejo. *Universidad de Quintana Roo*, 8.
- Oropeza, N. (2006). Lodos residuales: estabilización y manejo. *Universidad de Quintana Roo*, 6.
- Pérez, M. (2016). Tratamiento de lodos residuales procedentes de plantas de tratamiento de aguas residuales mediante procesos electroquímicos para la disminución de metales pesados . *Universidad Politécnica Salesiana* , 8-10.
- (2000). *Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS-2000*. Bogotá: Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo económico.
- Valderrama, M. (2013). Factibilidad de aprovechamiento de lodos de la PTAR del municipio de Chinavita (Boyacá). *Universidad de Manizales* .