

**EVALUACIÓN DE UNA ALTERNATIVA DE APROVECHAMIENTO PARA LOS  
BIOSÓLIDOS GENERADOS POR PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS  
RESIDUALES**

**JUAN SEBASTIÁN GÓMEZ MORALES**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BOGOTÁ D.C  
2020**

**EVALUACIÓN DE UNA ALTERNATIVA DE APROVECHAMIENTO PARA LOS  
BIOSÓLIDOS GENERADOS POR PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS  
RESIDUALES**

**JUAN SEBASTIÁN GÓMEZ MORALES**

**Proyecto Integral de Grado para optar el título de:  
INGENIERO QUÍMICO**

**Directora  
DIANA MILENA MORALES FONSECA  
Microbióloga Industrial**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BOGOTÁ D.C**

**2020**

**NOTA DE ACEPTACIÓN:**

---

---

---

---

---

---

---

Ing. Juan Andrés Sandoval Herrera  
Jurado 1

---

Ing. Dany José Cárdenas Romay  
Jurado 2

Bogotá D.C. Octubre de 2020

## **DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD**

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

**Dr. Mario Posada García-Peña**

Consejo Institucional

**Dr. Luis Jaime Posada García-Peña**

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

**Dr. María Claudia Aponte González**

Vicerrector Administrativo y Financiero

**Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro**

Secretaría General

**Dr. Alexandra Mejía Guzmán**

Decano Facultad de Ingenierías

**Ing. Julio Cesar Fuentes Arismendi**

Director Programa de Ingeniería Química

**Ing. Iván Ramírez Marín**

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables de los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente al autor.

## **DEDICATORIA**

*Este proyecto de grado lo dedico especialmente a mis padres, Luz Dary Morales y Javier Gómez porque gracias a ellos es que puedo cumplir el sueño de ser un ingeniero químico. El apoyo incondicional que me brindaron durante mi carrera fue excepcional e irremplazable, además de la confianza y el aprecio que siempre depositaron en mí. Cabe mencionar que no me alcanzará la vida para agradecerles por hacer de mí un buen hijo y sobre todo una gran persona.*

*A mi familia, por siempre estar conmigo, creyendo en mí e impulsándome para lograr los mejores resultados.*

*A todos los profesores que hicieron parte de mi proceso como estudiante, ofreciéndome las ayudas necesarias para progresar.*

*Por último y no menos importante, a mis amigos, colegas y compañeros que siempre estuvieron en este gran viaje de aventura donde adquirí conocimientos y muy bellas experiencias, sin dejar de lado toda la ayuda que me pudieron brindar.*

**Juan Sebastián Gómez Morales**

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad de América por formarme como ingeniero químico, brindándome conocimientos y orientándome con herramientas necesarias para el desarrollo teórico del proyecto.

A mi directora de tesis Diana Morales y a mi asesor Andrés Mílquez, que siempre mostraron una buena disposición para el desarrollo de la investigación, brindándome la mejor orientación posible, además de sus conocimientos.

A mi familia por todo su apoyo y colaboración.

*Solo me queda por decir, gracias y mil gracias a todos aquellos que creyeron siempre en mí.*

*¡Que viva la Ingeniería Química...!*

## CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	20
OBJETIVOS	22
1. GENERALIDADES	23
1.1 LODOS RESIDUALES	23
1.1.1 Lodos primarios.	23
1.1.2 Lodos secundarios.	23
1.2 LÍNEA DE LODOS	24
1.3 BIOSÓLIDOS	27
1.3.1 Disposición de biosólidos.	27
1.4 MARCO LEGAL	28
1.4.1 Normatividad para el manejo y disposición de biosólidos.	28
1.4.1.1 Características de biosólidos en países de América.	30
1.4.2 Criterios para la categorización de biosólidos.	30
1.4.2.1 Biosólido clase A.	30
1.4.2.2 Biosólido clase B.	31
1.4.2.3 Biosólido clase C.	31
1.4.3 Normatividad en Colombia.	31
1.4.4 Prohibiciones del uso de biosólidos.	33
2. CARACTERÍSTICAS DE BIOSÓLIDOS EN DIFERENTES PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	34
2.1 PTAR EL SALITRE	34
2.2 PTAR CAÑAVERALEJO	40
2.3 PTAR SAN FERNANDO	45
2.4 EDAR ATOTONILCO	49
3. SELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA DE APROVECHAMIENTO PARA BIOSÓLIDOS	52
3.1 USOS PARTICULARES DE LOS BIOSÓLIDOS	52
3.1.1 Antecedentes de los biosólidos.	54
3.2 MATRIZ DE DECISIÓN	58
3.2.1 Definición de la matriz.	58
3.2.2 Definición del objetivo para la matriz.	58
3.2.3 Opciones para la matriz.	58
3.2.4 Criterios de decisión.	59
3.2.5 Ponderación de los criterios y las opciones.	59
3.2.6 Selección de la mejor opción.	62
4. ESCALAMIENTO A NIVEL INDUSTRIAL	64

4.1 DESCRIPCIÓN DE LA ALTERNATIVA SELECCIONADA	64
4.1.1 Compostaje.	64
4.1.2 Fases del compostaje.	65
4.1.3 Monitoreo durante el compostaje.	67
4.2 REQUERIMIENTOS PARA EL ESCALADO DE COMPOSTAJE	70
4.2.1 Logística Involucrada.	70
4.2.2 Etapas del proceso.	71
4.2.3 Maquinaria.	72
4.3 DIMENSIONAMIENTO DEL PROCESO DE COMPOSTAJE	74
4.3.1 Cantidad de biosólidos para operar en una planta de compostaje.	74
4.3.2 Recepción y almacenamiento de los biosólidos.	74
4.3.3 Pre tratamiento.	75
4.3.4 Etapa de descomposición.	76
4.3.5 Etapa de maduración.	78
4.3.6 Post tratamiento.	79
4.3.7 Almacenamiento del compost.	79
5. CONCLUSIONES	83
6. RECOMENDACIONES	84
BIBLIOGRAFÍA	85

## LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Biosólido tipo A	31
Cuadro 2. Biosólido tipo B	31
Cuadro 3. Biosólido tipo C	31
Cuadro 4. Antecedentes de biosólidos en procesos bioquímicos	55
Cuadro 5. Antecedente de biosólidos en procesos termoquímicos	56
Cuadro 6. Antecedentes de biosólidos como aplicación en suelos	57
Cuadro 7. Criterios de calificación para el aprovechamiento de biosólidos	60
Cuadro 8. Peso porcentual de criterios para el aprovechamiento de biosólidos	60
Cuadro 9. Valores correspondientes a criterios de decisión para biosólidos	61
Cuadro 10. Matriz de priorización para el aprovechamiento de biosólidos	62
Cuadro 11. Diferencias del biosólido en el compostaje	69
Cuadro 12. Maquinaria Implicada en un proceso de compostaje	73
Cuadro 13. Dimensiones para el sistema de compostaje o descomposición	78

## LISTA DE DIAGRAMAS

	<b>pág.</b>
Diagrama 1. Clasificación de biosólidos según su uso	53
Diagrama 2. Etapas en una planta de compostaje	72
Diagrama 3. PFD de compostaje con biosólidos	80

## LISTA DE FIGURAS

	<b>pág.</b>
Figura 1. Fases del biosólido	27
Figura 2. Esquema Fase I de la PTAR El Salitre	35
Figura 3. Línea de agua en la PTAR Cañaveralejo	41
Figura 4. Línea de lodos en la PTAR Cañaveralejo	42
Figura 5. Esquema PTAR San Fernando	46
Figura 6. Fases del compostaje	66
Figura 7. Descripción superficial de las corrientes involucrada en el compostaje	76
Figura 8. Balance de masa del compost con biosólidos y nomenclatura	81

## LISTAS DE IMÁGENES

	<b>pág.</b>
Imagen 1. Planta de tratamiento de aguas residuales el Salitre	24
Imagen 2. Tanques de espesamiento de lodo	25
Imagen 3. Tanques de digestión anaerobia	26
Imagen 4. Lodos deshidratados	26
Imagen 5. Planta de tratamiento de aguas residuales Cañaveralejo	40
Imagen 6. Planta de tratamiento de aguas residuales San Fernando	45
Imagen 7. Estación depuradora de aguas residuales Atotonilco	49

## LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Parámetros de metales pesados en biosólidos	29
Tabla 2. Parámetros microbiológicos en biosólidos	29
Tabla 3. Criterios microbiológicos en países del continente de América	30
Tabla 4. Normativa aplicable de biosólidos en Colombia	32
Tabla 5. Tasa máxima anual de aplicación de biosólidos	33
Tabla 6. SST y DBO reportados en enero del 2020 para la PTAR El Salitre	36
Tabla 7. Características generales del lodo producido en la PTAR El Salitre	37
Tabla 8. Generación de lodos por la PTAR El Salitre en enero del 2020	37
Tabla 9. Generalidades de los biosólidos de la PTAR El Salitre	38
Tabla 10. Macro nutrientes/Mezcla compuesta de biosólido en la PTAR El salitre	38
Tabla 11. Macro nutrientes / Mezcla puntual de biosólido en la PTAR El Salitre	39
Tabla 12. Metales pesados en biosólidos de la PTAR El Salitre	39
Tabla 13. Concentraciones microbiológicas en biosólidos de la PTAR El Salitre	40
Tabla 14. Reporte mensual de los biosólidos de la PTAR Cañaveralejo	42
Tabla 15. Generalidades / Biosólidos de la PTAR Cañaveralejo para el 2018	43
Tabla 16. Operaciones desde el año 2007 al 2014 en la PTAR Cañaveralejo	43
Tabla 17. Macro nutrientes en los biosólidos de la PTAR Cañaveralejo	44
Tabla 18. Criterios microbiológicos en biosólidos de la PTAR Cañaveralejo	45
Tabla 19. Generalidades en los biosólidos de la PTAR San Fernando	46
Tabla 20. Macronutrientes / Biosólidos de la PTAR San Fernando	47
Tabla 21. Características del año 2013 – Biosólidos de la PTAR San Fernando	47
Tabla 22. Metales pesados de los biosólidos de la PTAR San Fernando	48
Tabla 23. Criterios microbiológicos en biosólidos de la PTAR San Fernando	48
Tabla 24. Parámetros de SST Y DBO para la EDAR Atotonilco	50
Tabla 25. Características de los lodos de depuradora en México	50
Tabla 26. Parámetros iniciales del compostaje	64
Tabla 27. Temperatura en la eliminación de patógenos	68
Tabla 28. Resumen de los parámetros de compostaje	69
Tabla 29. Producción de biosólidos en Colombia	74

## **ABREVIATURAS**

**DBO:** Demanda biológica de oxígeno

**H-H:** Huevos de helminto

**NMP:** Número más probable

**NTK:** Nitrógeno total Kjendhal

**PTAR:** Planta de tratamiento de aguas residuales

**SST:** Sólidos suspendidos totales

**STV:** Sólidos totales volátiles

**UFC:** Unidades formadoras de colonias

**UFP:** Partículas ultra finas

## GLOSARIO

**COLIFORMES FECALES:** bacterias características por ser las heces de los seres humanos y animales, forman parte del tracto gastrointestinal, que pertenecen a la familia de Enterobacteriaceae<sup>1</sup>.

**DEMANDA BIOLÓGICA DE OXIGENO:** según el IDEAM, es la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar la materia orgánica de una muestra de agua<sup>2</sup>.

**FAGOS SOMÁTICOS:** indicadores de la contaminación en formal viral o de virus, se expresa por gramo de peso con el valor de las unidades logarítmicas en el biosólido, generalmente se encuentran en condiciones mesofílicas en un sistema anaerobio<sup>3</sup>.

**HUEVOS DE HELMINTO:** indicadores de la contaminación fecal presentes en la formación de biosólidos descendientes de las depuradoras, puede producir agentes patógenos si es consumido. Son resistentes a las diferentes condiciones ambientales<sup>4</sup>.

**NITRÓGENO TOTAL KJENDHAL:** según IDEAM, se calcula el Nitrógeno en estado tri negativo, sumando el Nitrógeno Orgánico y Nitrógeno Amoniacal<sup>5</sup>.

**NITRÓGENO AMONICAL:** se origina de la descomposición del nitrógeno orgánico y al mismo tiempo la acción bacteriana pasa por un proceso de oxidación convirtiendo los nitritos a nitratos<sup>6</sup>.

**RELACIÓN C/N:** la calidad del sustrato orgánico del suelo determinando el nitrógeno disponible para las plantas<sup>7</sup>.

---

<sup>1</sup> ADINA et al. Bacterias indicadoras de contaminación fecal en la evaluación de la calidad de las aguas: Revisión de la literatura. [en línea]. 2013, 44(3). p.24-34. [Consultado 27, agosto, 2020]. ISSN: 0253-5688. <Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181229302004>>.

<sup>2</sup> IDEAM. Demanda química de oxígeno por reflujo cerrado y volumétrica. En línea [Consultado, 27, agosto, 2020] Disponible en: <<http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Demanda+Qu%C3%ADmica+de+Ox%C3%ADgeno..pdf/20030922-4f81-4e8f-841c-c124b9ab5adb>>.

<sup>3</sup> GUZMÁN, Carolina. CAMPOS, Claudia. Indicadores de contaminación fecal en biosólidos aplicados en agricultura. Universitas Scientiarum [en línea]. 2004, 9(1). p.59-67. [Consultado 27, agosto, 2020]. ISSN: 0122-7483. Disponible en: <<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49990107>>.

<sup>4</sup> CAMPOS et al. Huevos de helmintos como indicadores de contaminación fecal en agua de riego agrícola, biosólidos, suelos y pastos. [En línea]. [Consultado 27, agosto, 2020] p.43. Disponible en: <ISSN 1727-9933>.

<sup>5</sup> IDEAM. Nitrógeno total en el agua por el método de Kjendhal-electrodo de amoniaco. Op. Cit. p.1.

<sup>6</sup> GONZALEZ Lourdes. Nitrógeno amoniacal, importancia de su determinación. [En línea]. [Consultado 27, agosto, 2020] p.43. Disponible en: <<https://core.ac.uk/download/pdf/234020135.pdf>>.

**SALMONELLA SP:** es una bacteria Gram negativa, vive en aparato gastrointestinal de los seres humanos y animales, es un agente patógeno que puede generar enfermedades gastrointestinales<sup>8</sup>.

**SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES:** corresponden a la suma de lo sólidos o materia orgánica suspendida en el agua cruda y/o residual<sup>9</sup>.

**SÓLIDOS TOTALES VOLÁTILES:** desechos restantes después de secar una muestra con materia orgánica, pero se deshacen una vez se calcine el residuo<sup>10</sup>.

**TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL:** el tratamiento de agua contaminada por heces, desechos químicos, materia orgánica e inorgánica, emplea tres tratamientos. El primario consiste en la eliminación de los sólidos suspendidos a través de la sedimentación empleando coagulantes, el secundario consiste en eliminar la los componentes en materia orgánica que se encuentra en estado coloidal y la degradación mediante procesos de aeróbicos y anaeróbicos y finalmente el tercer tratamiento consiste en la eliminación de agentes patógenos<sup>11</sup>.

---

<sup>7</sup> GAMARRA et al. Relación Carbono-nitrógeno en suelos de sistemas silvopastoriles del chaco. [En línea]. [Consultado, 27, agosto, 2020] p.47. Disponible en: <<https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i46.134>>.

<sup>8</sup> FIGUEROA OIM, VERDUGO RA. Mecanismos moleculares de patogenicidad de Salmonella sp. Microbiología. 2005;47(1-2): p.25-42. <[https://www.medigraphic.com/pdfs/lamicro/mi-2005/mi05-1\\_2e.pdf](https://www.medigraphic.com/pdfs/lamicro/mi-2005/mi05-1_2e.pdf) mucha hp>.

<sup>9</sup> DANE. Sistemas de información del medio Ambiente. Pastos. [En línea]. [consultado 27, agosto, 2020]. p.1-3. Disponible en: <[https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/pib/ambientales/Sima/solidos\\_suspension.pdf](https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/pib/ambientales/Sima/solidos_suspension.pdf)>

<sup>10</sup> MICROLAB INDUSTRIA. Parámetros - Sólidos totales volátiles. [Sitio Web]. La entidad. [Consultado 28, agosto, 2020]. Disponible en: <<http://www.microlabindustrial.com/>>.

<sup>11</sup> TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUALES. [Sitio Web]. [Consultado, 27, agosto]. La entidad. Disponible en: <<https://tratamientodeaguasresiduales.net/etapas-del-tratamiento-de-aguas-residuales/>>.

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo la evaluación técnica de una alternativa de aprovechamiento para biosólidos que se generan en plantas de tratamiento de aguas residuales, debido a que los biosólidos son un subproducto con características importantes y que presentan variedad de aplicaciones y propiedades para ser aprovechados en diferentes ámbitos.

Este proyecto se dividió en tres partes, comenzando con una investigación detallada de las características fisicoquímicas y microbiológicas que contienen biosólidos que son generados especialmente en plantas de tratamiento de aguas residuales de carácter doméstico, seleccionando plantas de tratamiento bastante reconocidas que se localizan en el territorio y que han tenido gran experiencia y antecedentes respecto a los biosólidos que producen.

Para la segunda parte del proyecto se analizó con mejor criterio y una búsqueda literaria todas aquellas alternativas disponibles para emplear biosólidos y que presentan beneficios tanto ambientales, sociales y económicos en su aprovechamiento. Una vez entendida la temática se procedió a seleccionar una de esas alternativas empleando una matriz de decisión la cual evaluó varios criterios de las opciones de aprovechamiento con biosólidos planteadas para posteriormente seleccionar e identificar la mejor opción.

Finalmente, la tercera parte del proyecto consistió en describir con más detalle la alternativa seleccionada anteriormente y en realizar un escalamiento teórico de la misma, en donde se propusieron los criterios a tener en cuenta para ejecutar una planta de compostaje, proponiendo un diseño industrial para disponer de un apropiado procesamiento del biosólido como compost. Allí se determinó que el área requerida para el proceso de descomposición es de 4.800 m<sup>2</sup> ya que se calculó que  $465 \text{ m}^3 / (3 \times 2 \times 20) \text{ m}^3 = 3,88$ , siendo este valor el número de pilas por día, aproximando a 4 pilas/día. Además, se estimaron 20 días de operación en la planta y por ende 80 pilas al mes para operar. Una vez desarrollado el dimensionamiento se propuso un diagrama de proceso con su respectivo balance de masa para una mejor comprensión del escalamiento industrial.

**PALABRAS CLAVE:** Biosólidos, tratamiento de aguas residuales, lodo residual, microorganismos, parámetros fisicoquímicos, parámetros microbiológicos, alternativas de aprovechamiento.

## ABSTRACT

The present research work aims at the technical evaluation of an alternative use for biosolids generated in wastewater treatment plants, because biosolids are a byproduct with important characteristics has a many applications and properties to be used in different areas.

This project was divided into three parts; the first one is a detailed investigation of the physicochemical and microbiological characteristics of biosolids generated especially in domestic wastewater treatment plants, selecting treatment plants that are well known in the territory to be used. They locate and have had great experience and background regarding the biosolids they produce.

For the second part of the project, all those alternatives available to use biosolids and that present environmental, social and economic benefits in their use were analyzed with the best criteria and a literary search. Once the subject was understood, one of these alternatives was selected using a decision matrix which evaluated various criteria of the proposed biosolids exploitation options and after that, the best option was selected and identified.

Finally, the third part of the project consisted in describing the previously selected alternative in more detail and in carrying out a theoretical scaling of it, where the criteria to be taken into account to execute a composting plant were proposed, proposing dimensioning designs to have an appropriate processing of the biosolids as compost. There it was determined that the area required for the decomposition process is 4,800 m<sup>2</sup>, because it was calculated;  $465 \text{ m}^3 / (3 \times 2 \times 20) \text{ m}^3 = 3.88$ , this value being the number of piles per day, approximately 4 piles / day. In addition, 20 days of operation were estimated at the plant and therefore 80 batteries per month to operate. Once the sizing was developed, a process diagram with its respective mass balance was proposed for a better understanding of industrial scaling.

**KEYWORDS:** Biosolids, sewage treatment, residual sludge, microorganisms, physicochemical parameters, microbiological parameters, exploitation alternatives.

## INTRODUCCIÓN

La necesidad de preservar los principales ríos de las ciudades, exige que se haga un tratamiento químicamente asistido de las aguas que son generadas por la población y posteriormente conducidas a estos afluentes. El tratamiento de las aguas residuales conlleva a que se produzcan diariamente lodos residuales que perjudican el ambiente y a la sociedad, por lo que es necesario implementar inmediatamente una solución<sup>12</sup>.

Actualmente el lodo de las plantas de tratamiento de aguas residuales y los biosólidos que se obtienen como subproducto, representan complicaciones en su gestión debido a las grandes cargas que se producen.

La gestión de biosólidos implica transportarlos en camiones a las zonas rurales y aplicarlos en los campos, lo cual aumenta preocupaciones ambientales y de salud. Otros métodos de eliminación pueden incluir la incineración, la adición de productos químicos o la eliminación en vertederos, que son opciones de impacto ambiental considerable. La disposición de los biosólidos demanda un manejo muy cuidadoso por las grandes cantidades que alcanzan y por los riesgos que, en algunos casos involucran ante la posibilidad de contener sustancias contaminantes provenientes de las aguas tratadas<sup>13</sup>.

El presente proyecto desarrolló la identificación de las características de los biosólidos que se generan en diferentes plantas de tratamiento de aguas residuales, con el fin de adaptar criterios importantes.

Posteriormente se realizó un estudio de las alternativas de aprovechamiento existentes de biosólidos para que por medio de un mecanismo de selección se abaricara una de las alternativas de aprovechamiento, llevándola a gran escala para ser evaluada técnicamente.

Dentro de los aspectos más relevantes que abordó el proyecto se encuentra el hallazgo por diferentes fuentes literarias, acerca de las características fisicoquímicas y microbiológicas que permitieron afianzar las propiedades más destacadas del biosólido.

A su vez fue importante escoger una posible solución de aprovechar biosólidos con base en criterios de decisión que representaban la mayor importancia para seleccionar una aplicación de biosólidos.

---

<sup>12</sup> QUINCHÍA, Adriana María. CARMONA, Dora María. Factibilidad de disposición de los biosólidos generados en una planta de tratamiento de aguas residuales combinada. Revista de investigación. 2004, 62(3), p. ISSN 1794-1237 Número 2 p. 89-108.

<sup>13</sup> DÁGUER G, Gian Paolo. Gestión De Biosólidos en Colombia. [En línea]. Bogotá D.C. Disponible en: <<https://docplayer.es/21537313-Gestion-de-biosolidos-en-colombia.html>>.

Luego de desarrollar un escalamiento de la alternativa escogida, resultó bastante favorable para proponer criterios de diseño y requerimientos netamente necesarios a la hora de implementar la operación de una planta de compostaje con biosólidos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales.

Para enfatizar, en este documento se encontrará una sección teórica descriptiva de los biosólidos provenientes del tratamiento de aguas residuales, junto con la identificación de las características que lo competen basándose en diferentes plantas de tratamiento. A su vez la investigación mostrará una matriz de decisión que desarrolla una metodología para seleccionar una posible alternativa de aprovechamiento con más viabilidad respecto a otras para así concluir la investigación con una propuesta de escalamiento de la alternativa de aprovechamiento, en donde se dio una propuesta de dimensionamiento para la etapa de descomposición, el diagrama de proceso y balance de masa respectivo.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Realizar una evaluación técnica de una alternativa de aprovechamiento para los biosólidos que se generan en plantas de tratamiento de aguas residuales.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Identificar las características de los biosólidos generados en diferentes plantas de tratamiento de aguas residuales.
- Seleccionar una alternativa de aprovechamiento de biosólidos con base en una matriz de decisión.
- Desarrollar un escalamiento a nivel industrial de la alternativa seleccionada.

## 1. GENERALIDADES

Para comprender la utilidad que tienen los biosólidos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales, es necesario contextualizar los fundamentos teóricos relacionados, en donde se presenten aquellos aspectos relevantes referentes al origen, disposición actual, parámetros legales, categorización y las aplicaciones existentes, entre otros aspectos importantes del material de estudio. Por tal motivo en este capítulo se describirán todos los aspectos mencionados anteriormente que por ende ofrecen criterios necesarios para el proyecto.

### 1.1 LODOS RESIDUALES

En una planta de tratamiento de aguas residuales, particularmente carácter doméstico, se producen lodos en grandes proporciones debido a los altos caudales de agua residual que se tratan. Estos lodos se forman generalmente por la cantidad de materia orgánica que se encuentra inmersa en el agua y dependen del tipo de planta de tratamiento junto con la operación de esta. El procesamiento de lodos se da posteriormente a una serie de etapas como el cribado, desarenado y desengrasado, por lo que se requiere de un tratamiento adecuado para la eliminación de contaminantes u otros aspectos perjudiciales. En consecuencia, del proceso de lodos se tienen principalmente dos tipos, los cuales se conocen como lodos primarios y lodos secundarios haciendo referencia a sus etapas de tratamiento.

**1.1.1 Lodos primarios.** Son aquellos que se producen en la sedimentación primaria, donde son removidos los sólidos sedimentables y la cantidad depende de la carga superficial o tiempo hidráulico de retención<sup>14</sup>. Gracias a la sedimentación primaria con químicos se genera más lodo, siendo producto de una mayor remoción y de la precipitación química de la materia coloidal<sup>15</sup>.

**1.1.2 Lodos secundarios.** Obedecen a un tipo de lodo que se produce en procesos de tratamiento biológicos, donde se convierten residuos o sustratos solubles en biomasa. La cantidad producida depende de varios factores como: La eficiencia del tratamiento primario, cantidad de sustrato soluble, criterios de diseño del tratamiento y la remoción de nutrientes<sup>16</sup>. Para el proceso de lodos secundarios, se utilizan reactores biológicos y se les remueve el agua por medio de sedimentadores secundarios<sup>17</sup>.

---

<sup>14</sup> LIMÓN MACÍAS, Juan Gualberto. Los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales, ¿problema o recurso? [En línea] Monografía. Guadalajara Jalisco, 2013. p.10. [Consultado 7, febrero, 2020].

<sup>15</sup> Ibíd.

<sup>16</sup> Ibíd.

<sup>17</sup> Ibíd.

## 1.2 LÍNEA DE LODOS

Para explicar la procedencia del subproducto que se genera en las plantas de tratamiento y que se conoce usualmente como biosólido, es necesario describir la etapa de tratamiento en donde se sedimentan lodos residuales.

Por consiguiente, para la debida descripción se tomó como referencia la PTAR El Salitre ubicada en Bogotá Colombia. Sabiendo que, en la planta de tratamiento el agua que se trata es usualmente de carácter doméstico, sucede que en el agua se encuentre cantidades significantes de sólidos a su vez de materia orgánica de las personas residentes en Bogotá, la cual es el factor que ocupa gran porcentaje del agua contaminada y genera proporciones significantes de lodos, implicando que se requiera de una rigurosa distribución y un amplio diseño de equipos y maquinaria necesarios para el óptimo procesamiento del caudal de agua que ingresa a la planta el Salitre para ser tratada.

**Imagen 1.** Planta de tratamiento de aguas residuales el Salitre



**Fuente:** ACUEDUCTO DE BOGOTÁ. Ambiente: Saneamiento río Bogotá – PTAR El Salitre. [Sitio Web]. Bogotá D.C. La entidad. [Consultado 25, febrero, 2020]. Disponible en: <<https://www.acueducto.com.co/>>.

**1.2.1 Sedimentación primaria.** Los sólidos que se remueven en el tratamiento primario se concentran en el fondo de los tanques de clarificación, y estos reciben el nombre de lodo primario. La etapa de sedimentación consiste de ocho tanques sedimentadores con fondo cónico, organizados en dos baterías cada uno y en conjunto de una cámara de reparto para la distribución del volumen de agua a tratar y cuatro sedimentadores, estos sedimentadores son de 4 m de alto y 43 m de diámetro con un tiempo de retención aproximado de 3 horas<sup>18</sup>.

<sup>18</sup> ACUEDUCTO DE BOGOTÁ. Brochure: Línea de lodos. [Sitio Web]. Bogotá D.C. La entidad. [Consultado 28, febrero, 2020] Disponible en: <[https://www.acueducto.com.co/wps/html/resources/PTAR/Plegable\\_tecnico.pdf](https://www.acueducto.com.co/wps/html/resources/PTAR/Plegable_tecnico.pdf) >

**1.2.2 Espesamiento de lodos primarios.** Por medio de válvulas neumáticas, desde los tanques de sedimentación primaria y en ciclos de cadencia y duración, se direccionan los lodos para pasar a espesamiento<sup>19</sup>. Para reducir el volumen de agua en el lodo, aumentando así su concentración, el lodo generado en la planta debe ser espesado, por ende, se emplean dos tanques espesadores que están incorporados en conjunto, con un barredor y una forma cónica en el fondo.

Los tanques tienen una altura y un diámetro de 4,3 m y 29 m respectivamente<sup>20</sup>. El barredor gira con una velocidad constante en un tiempo determinado para poder cumplir con el ciclo de espesamiento lo que conlleva a la clarificación del agua de los lodos que a su vez es recirculada a la fase inicial del proceso para ser tratada<sup>21</sup>.

**Imagen 2.** Tanques de espesamiento de lodo



**Fuente:** ACUEDUCTO DE BOGOTÁ. Fotografías del ingeniero Alexander Galindo. Brochure: Línea de lodos. [Sitio Web]. [Consultado 6, marzo, 2020]. Disponible en: <[https://www.acueducto.com.co/wps/html/resources/PTAR/Plegable\\_tecnico.pdf](https://www.acueducto.com.co/wps/html/resources/PTAR/Plegable_tecnico.pdf)>.

**1.2.3 Digestión anaerobia.** Los lodos que terminan la etapa de espesamiento se estabilizan en un tratamiento microbiológico controlado y en ausencia de oxígeno en tres reactores llamados digestores. En esta etapa, un gran porcentaje de materia orgánica se transforma por medio de bacterias en biogás, compuesto principalmente por metano y dióxido de carbono<sup>22</sup>. Los tanques digestores tienen un volumen de 8.500 m<sup>3</sup> cada uno, a una temperatura de 35 °C y un tiempo de retención de 22 días aproximadamente. Para evitar el ingreso de oxígeno, los tanques son herméticos y cuentan con un diámetro y una altura de 26,8 m y 16 m respectivamente<sup>23</sup>.

---

<sup>19</sup> Ibíd.

<sup>20</sup> Ibíd.

<sup>21</sup> Ibíd.

<sup>22</sup> EAAB. Op.Cit. p. 27.

<sup>23</sup> ACUEDUCTO DE BOGOTÁ. Op.Cit.

**Imagen 3.** Tanques de digestión anaerobia



**Fuente:** ACUEDUCTO DE BOGOTÁ. Fotografías del ingeniero Alexander Galindo. Brochure: Línea de lodos. [Sitio Web]. [Consultado 6, marzo, 2020]. Disponible en: <[https://www.acueducto.com.co/wps/html/resources/PTAR/Plegable\\_tecnico.pdf](https://www.acueducto.com.co/wps/html/resources/PTAR/Plegable_tecnico.pdf)>.

**1.2.4 Deshidratación de lodos digeridos.** Después de que los lodos se han digerido en los reactores, el lodo estabilizado presenta un alto contenido de humedad, lo cual dificulta su manejo y transporte, por tal motivo se procede a deshidratarlos en un sistema de filtro banda con floculación de lodo empleando polímero catiónico. El agua que se obtiene después de la deshidratación es enviada a la fase inicial del proceso para ser tratada<sup>24</sup>.

El lodo deshidratado se conoce generalmente como biosólido, siendo este un subproducto de las plantas de tratamiento de aguas residuales.

**Imagen 4.** Lodos deshidratados



**Fuente:** ACUEDUCTO DE BOGOTÁ. Fotografías del ingeniero Alexander Galindo. Brochure: Línea de lodos. [Sitio Web]. [Consultado 6 marzo, 2020]. Disponible en: <[https://www.acueducto.com.co/wps/html/resources/PTAR/Plegable\\_tecnico.pdf](https://www.acueducto.com.co/wps/html/resources/PTAR/Plegable_tecnico.pdf)>.

---

<sup>24</sup> Ibíd.

### 1.3 BIOSÓLIDOS

Entendiendo con más claridad la procedencia de los biosólidos y gracias a los conceptos anteriormente vistos, ya se puede interiorizar la definición pertinente a los biosólidos, en donde según DÁGUER<sup>25</sup>: Los biosólidos son un producto originado después del proceso de estabilización de lodos orgánicos provenientes del tratamiento de las aguas residuales. La estabilización se realiza para reducir su nivel de patogenicidad, su poder de fermentación y su capacidad de atracción de vectores. Gracias a este proceso, el biosólido tiene aptitud para utilización agrícola y forestal, y para la recuperación de suelos degradados.

**Figura 1.** Fases del biosólido



**Fuente:** TORRES VALENCIA, Lina Paola. Desarrollo de una metodología para la identificación de alternativas de manejo de los biosólidos de la planta de tratamiento de agua residual de Cañaveralejo (PTAR – C) de Santiago de Cali. [En línea] Tesis. Universidad Autónoma de Occidente, Santiago de Cali, 2019. p.26. [Consultado 10, marzo, 2020].

**1.3.1 Disposición de biosólidos.** En el mundo, la producción de lodos es una problemática que requiere de atención, por lo que se han tenido que implementar alternativas de aprovechamiento. Normalmente en América Latina las plantas de tratamiento de aguas residuales disponen de los biosólidos como; Uso forestal, cobertura final o intermedia de rellenos sanitarios, materia prima en elaboración de enmiendas y abonos orgánicos, compostaje, uso agrícola y pecuario, inoculante en biorremediación de suelos, entre otros<sup>26</sup>.

Por ejemplo, para la PTAR San Fernando de Colombia se han realizado y se han venido realizando ensayos de laboratorio para las características de los biosólidos, arrojando resultados de que el biosólido es apto para ser utilizado en; Protección de taludes, proyectos forestales, recuperación de suelos de minería, explotación de canteras y usos agrícolas y pecuarios<sup>27</sup>.

<sup>25</sup> DÁGUER G, Gian Paolo. Gestión De Biosólidos en Colombia. [En línea]. Bogotá D.C. p.2. [Consultado 9, marzo, 2020]. Disponible en: <<https://docplayer.es/21537313-Gestion-de-biosolidos-en-colombia.html>>.

<sup>26</sup> VÉLEZ ZULUAGA, Juan Alberto. Los biosólidos: ¿una solución o un problema? *Revista de investigación*. p. 67. 2007, Vol. 2 No. 2.

<sup>27</sup> *Ibíd.* p.66.

## 1.4 MARCO LEGAL

Teniendo en cuenta que los biosólidos previamente han tenido una serie de procesos, estos poseen características físicas, químicas y microbiológicas que a su vez deben ser evaluadas para determinar una adecuada disposición final.

Debido a esta situación se han definido diferentes normativas que establecen criterios para el uso de biosólidos resultantes del tratamiento de aguas residuales. En esta parte del capítulo se muestran los parámetros y valores permisibles para disponer de biosólidos, mencionando las posibles clasificaciones que están establecidas de los biosólidos, una serie de aplicaciones que están dentro de los parámetros legales y las prohibiciones que existen para el uso de biosólidos.

**1.4.1 Normatividad para el manejo y disposición de biosólidos.** Prácticamente las regulaciones fueron establecidas como requisito fundamental debido a que en los biosólidos se presentan contaminantes perjudiciales tanto para la salud humana como para el medio ambiente, que a su vez conducen a que se fomente prácticas de gestión y estándares operativos.

Por tal motivo es necesario establecer límites y parámetros que ayuden a una buena práctica para la utilización y disposición de biosólidos. Principalmente, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, después de haber establecido diferentes normativas con respecto al tratamiento de aguas residuales, estableció estándares para los biosólidos con base en la parte 503 del Capítulo 40 del Código de Regulaciones Federales el 22 de marzo de 1993.

Esta normativa se encarga de establecer los límites máximos de contaminantes y microorganismos patógenos inmersos en lodos de depuradora o biosólidos, así como también establece los criterios que se deben cumplir antes de que se haga uso o se dispongan al ambiente, con el fin de disminuir el riesgo de afectación ambiental y la atracción de vectores<sup>28</sup>.

Para establecer parámetros de la viabilidad acerca del uso de biosólidos, las normativas se basan especialmente en la cantidad de metales pesados que se encuentran presentes en lodos de depuradora o biosólidos. Teniendo en cuenta lo anterior, la siguiente tabla especifica las cantidades de metales pesados en mg/kg de biosólido seco, expresando por una parte los valores óptimos para una muestra de biosólido y por otra, los valores límites que debe tener la muestra, esto basado en la norma EPA 503.

---

<sup>28</sup> COMMITTEE ON TOXICANTS AND PATHOGENS IN BIOSOLIDS APPLIED TO LAND BOARD ON ENVIRONMENTAL STUDIES AND TOXICOLOGY DIVISION ON EARTH AND LIFE STUDIES. Biosolids Applied to Land. Washington, D.C. National Research Council of the National Academies. 2002. p.35. International Standard Book Number 0-309-08486-5.

**Tabla 1.** Parámetros de metales pesados en biosólidos

Parámetro (mg/kg de Biosólido Seco)	Biosólido de Excepcional Calidad Según Norma EPA 503	Límites Máximos Permisibles Según Norma EPA 503-13
Arsénico (As)	41	75
Cadmio (Cd)	39	85
Cobre (Cu)	1.500	4.300
Cromo (Cr)	1.200	3.000
Mercurio (Hg)	17	57
Molibdeno (Mb)	18	75
Níquel (Ni)	420	420
Plomo (Pb)	300	840
Selenio (Se)	100	100
Zinc (Zn)	2.800	7.500

**Fuente:** BOGOTANA DE AGUAS Y SANEAMIENTO SUEZ LYONNAISE DES EAUX - DEGREMONT ESP S.A. Elementos para una reglamentación de biosólidos. p.7 [En línea]. [Consultado 18, marzo, 2020].

En otro contexto, las normativas para otros continentes presentan variaciones en los valores de la cantidad de metales pesados inmersos en una muestra de biosólido, debido a las características del agua residual tratada en las plantas y a los procesos de tratamiento que se establecen en diferentes países. En Europa, por ejemplo para el país francés normalmente el 60% de la producción de lodos se disponen para la parte agrícola, siendo la práctica apoyada por el gobierno y haciendo que ese país se vea en la obligación de establecer parámetros de regulación en la calidad de lodos y el manejo de riesgos sanitarios<sup>29</sup>. Los biosólidos también pueden ser controlados debido a sus características microbiológicas, por lo que la EPA también establece parámetros de regulación y valores de concentración máxima, como se puede observar en la siguiente tabla.

**Tabla 2.** Parámetros microbiológicos en biosólidos

Parámetro	Clase A	Clase B
Coliformes Fecales (NMP/g Base Seca)	<1,0E+03	<2,0E+06
Enterovirus (UFP/4g Base Seca)	<1,0	-
Huevos de Helminto (Huevos viables/4g Base Seca)	<1,0	-

**Fuente:** HAZEN AND SAWYER P.C, NIPPON KOEI. Producto Final – Anexo No. 20. Alternativas para el Manejo y Disposición de Biosólidos de la PTAR Salitre. [En línea]. Bogotá D.C, 2011. p. 20,4. [Consultado 26, marzo, 2020].

<sup>29</sup> BOGOTANA DE AGUAS Y SANEAMIENTO SUEZ LYONNAISE DES EAUX - DEGREMONT ESP S.A. Elementos para una reglamentación de biosólidos. p.8 [En línea]. [Consultado 23, marzo, 2020].

**1.4.1.1 Características de biosólidos en países de América.** Los biosólidos son clasificados en tres tipos según sus características y con ello se establece su respectiva aplicación, lo que se explicará después de mostrar los criterios de la tabla 3. Esta tabla muestra los límites permisibles para el uso de biosólido según parámetros microbiológicos y según el país en que se generan, a su vez evidenciando qué tipo de biosólido maneja cada país. Los valores que allí se presentan son para algunos países de Latino América, para México y EE. UU, siendo establecidos por la norma 40 CFR parte 503.

**Tabla 3.** Criterios microbiológicos en países del continente de América

Criterio	Unidad	Argentina	Chile	Brasil	México	EE.UU
Coliformes Fecales	NMP/g	Clase A: <1,0E+03 Clase B: <2,0E+06	Clase A: <1,0E+03	Clase A: <1,0E+03 Clase B: <2,0E+06	Clase A: <1,0E+03 Clase B: <2,0E+03 Clase C: <1,0E+04	Clase A: <1,0E+03 Clase B: <2,0E+05
Salmonella	NMP/g	Clase A: <0,75	Clase A: <0,75	Ausencia en 10 g	Clase A: <3,0 Clase B: <3,0 Clase C: <300	Clase A: <0,75
Huevos de Helmintos	HH/g	-	Clase A: <0,25	Clase A: <0,25 Clase B: <10,0	Clase A: <1,0 Clase B: <10,0 Clase C: <35,0	Clase A: <0,25
Virus	UFP/g	-	-	Clase A: <0,25	-	Clase A: <0,25

HAZEN AND SAWYER P.C, NIPPON KOEI. Producto Final – Anexo No. 20. Alternativas para el Manejo y Disposición de Biosólidos de la PTAR Salitre. [En línea]. Bogotá D.C, 2011. p. 20,3. [Consultado 26, marzo, 2020].

**1.4.2 Criterios para la categorización de biosólidos.** El tipo de microorganismo patógeno presente en una muestra de biosólidos hace que se presenten generalmente dos tipos de clase de biosólidos (A y B), lo que orienta su debido uso. Sin embargo, se establece otra clase más de biosólido (C) debido a que sus características permiten poderlo utilizar en otras alternativas, que en especial es brindar un espacio adecuado para su disposición. Cabe resaltar que la categorización de biosólidos también fue establecida por la EPA.

**1.4.2.1 Biosólido clase A.** Para esta clase de biosólido no hay restricciones de sitio al aplicarse en terrenos agrícolas<sup>30</sup>.

<sup>30</sup> HAZEN AND SAWYER P.C, NIPPON KOEI. Producto Final – Anexo No. 20. Alternativas para el Manejo y Disposición de Biosólidos de la PTAR Salitre. [En línea]. Bogotá D.C, 2011. p. 20,6. [Consultado 31, marzo, 2020].

**Cuadro 1.** Biosólido tipo A

<b>Alternativas de Aprovechamiento</b>
Agricultura
Áreas de uso urbano
Producto para uso domiciliario
Mismos usos del biosólido tipo B y C

**Fuente:** elaboración propia

**1.4.2.2 Biosólido clase B.** Los biosólidos tipo B sí presentan ciertas limitaciones en su aplicación<sup>31</sup>.

**Cuadro 2.** Biosólido tipo B

<b>Alternativas de Aprovechamiento</b>
Pastizales de ganadería
Restauración de suelos degradados
Elaboración de abonos o fertilizantes (Compostaje)
Remediación de suelos contaminados
Obtención de materiales de construcción
Estabilización de taludes
Mismos usos del biosólido tipo C

**Fuente:** elaboración propia

**1.4.2.3 Biosólido clase C.** Esta categoría está enfocada al uso de biosólidos en áreas de gran dimensionamiento u otras aplicaciones de gran valor, especialmente como opción de emergencia<sup>32</sup>.

**Cuadro 3.** Biosólido tipo C

<b>Alternativas de Aprovechamiento</b>
Cobertura de rellenos sanitarios
Procesos de valorización energética
Disposición conjunta con residuos sólidos municipales en rellenos sanitarios

**Fuente:** elaboración propia

**1.4.3 Normatividad en Colombia.** Después de que comenzaron a operar las plantas de tratamiento en Bogotá, Medellín y Cali que son las más importantes de Colombia, solo hasta mediados del año 2000 se comenzó a obtener biosólidos, por lo que se comenzaron a implementar protocolos y procedimientos para disponer de estos, pero fue hasta el año 2014 que se adjudicó el decreto número

---

<sup>31</sup> *Ibíd.*

<sup>32</sup> *Ibíd.* p. 20,6.

1287 en el cual se establece la normativa aplicable para la disposición de biosólidos en Colombia. Esta normativa está centrada en la concentración de metales pesados y parámetros microbiológicos para que un biosólido sea de buena calidad, a su vez de las restricciones en su aplicación y otros aspectos que están ligados a su uso.

A continuación, se presentará en la tabla 4 los valores permisibles de metales pesados y criterios microbiológicos para la disposición de biosólidos en Colombia.

**Tabla 4.** Normativa aplicable de biosólidos en Colombia

Criterio	Variable	Unidad de Medida	Categoría Biosólidos Valores Máximos Permisibles	
			A	B
Químicos - Metales Concentraciones Máximas	Arsénico (As)		20	40
	Cadmio (Cd)		8	40
	Cobre (Cu)		1.000	1.750
	Cromo (Cr)		1.000	1.500
	Mercurio (Hg)	mg/kg de biosólido	10	20
	Molibdeno (Mb)	(base seca)	18	75
	Níquel (Ni)		80	420
	Plomo (Pb)		300	400
	Selenio (Se)		36	100
	Zinc (Zn)		2.000	2.800
Microbiológicos	Coliformes Fecales	UFC/g de Biosólido (Base Seca)	< 1,0E+03	< 1,0E+06
	Huevos de Helminthos Viabiles	HHV/4 g de Biosólido (Base Seca)	< 1,0	< 10,0
	Salmonella sp	UFC/25 g de Biosólido (Base Seca)	Ausencia	< 1,0E+03
	Virus Entéricos	UFP/4 g de Biosólido (Base Seca)	< 1,0	-

**Fuente:** COLOMBIA. MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO. Decreto N° 1287. (10, julio, 2014). Por el cual se establecen criterios para el uso de los biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales. En: Presidencia de la república de Colombia. p.4.

“Cuando se utilice como parámetro alternativo al de Virus Entéricos el de Fagos Somáticos el valor del mismo para los biosólidos Categoría A deberá ser menor a 5,00E+04 UFC/ g (base seca)”<sup>33</sup>.

Por otra parte, la norma colombiana establece que los biosólidos que no cumplan con los valores máximos permisibles pasa su categorización tipo A y B podrán disponerse como biosólidos de clase C<sup>34</sup>. Además, los biosólidos presentan restricciones referentes a la Tasa Máxima Anual de Aplicación (TMAA), con base al contenido de metales pesados, por lo que en la siguiente tabla se muestran los valores establecidos.

**Tabla 5.**Tasa máxima anual de aplicación de biosólidos

Parámetro	TMAA (Kg/Ha-año)
Arsénico (As)	2,0
Cadmio (Cd)	1,9
Cobre (Cu)	75,0
Cromo (Cr)	150,0
Mercurio (Hg)	0,85
Níquel (Ni)	21,0
Plomo (Pb)	15,0
Selenio (Se)	5,0
Zinc (Zn)	140,0

**Fuente:** COLOMBIA. MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO. Decreto N° 1287. (10, julio, 2014). Por el cual se establecen criterios para el uso de los biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales. En: Presidencia de la república de Colombia. p.6.

**1.4.4 Prohibiciones del uso de biosólidos.** Asimilando todas aquellas normativas referentes a los biosólidos, también hay que mencionar aquellas prácticas que no están permitidas por ningún motivo referentes al uso de biosólidos.

La aplicación de biosólidos que está totalmente prohibida consiste en: suelos donde se encuentren especies de fauna y flora amenazados, suelo rural a menos de 100 m de viviendas que estén aisladas, aquellos suelos que presentan gran riesgo de inundación, zonas aledañas a fuentes superficiales y subterráneas de captación de agua para consumo humano o animal, playas, páramos, cuerpos de agua, suelos saturados como vegas, suelos cuyo nivel freático máximo se encuentre a menos de un 1 metro de profundidad con respecto a la superficie del terreno, entre algunos otros<sup>35</sup>.

<sup>33</sup> COLOMBIA. MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO. Decreto N° 1287. (10, julio, 2014). Por el cual se establecen criterios para el uso de los biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales. En: Presidencia de la república de Colombia. p.5.

<sup>34</sup> Ibíd. p.5.

<sup>35</sup> Ibíd. p.8.

## **2. CARACTERÍSTICAS DE BIOSÓLIDOS EN DIFERENTES PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES**

Este capítulo cumple la función de presentar las características fisicoquímicas y microbiológicas de los biosólidos que se producen en 4 plantas de tratamiento de aguas residuales, especialmente de tipo doméstico y que cubren en su entorno poblaciones que están entre los 600.000 y 3'000.000 de habitantes, para con ello observar las diferencias entre varios tipos de biosólidos y comprender criterios que permitan proceder más adelante a una buena selección de una alternativa de aprovechamiento. Esas plantas de tratamiento se seleccionaron gracias a la buena gestión con la que operan y su valor como entidad ya que son de las más importantes de los territorios que se escogieron, sabiendo también que ya han tenido experiencias con biosólidos y brindan buena información bibliográfica para una mejor investigación. Tres de esas plantas de tratamiento están ubicadas en Colombia y la otra en México.

Es importante también destacar el caudal de agua residual que puede tratar cada planta, teniendo en cuenta aspectos como la DBO, los SST, y cuánto biosólidos se produce. Cabe resaltar que la información que se presentará fue basada en informes de aquellas entidades que gestionan las plantas de tratamiento, artículos de investigación, tesis, entre otros, brindando la mayor información posible encontrada referente a las características de los biosólidos.

### **2.1 PTAR EL SALITRE**

La planta de tratamiento de aguas residuales el Salitre ubicada en la capital de Colombia, más específicamente en la localidad de Suba, es un complejo tecnológico fundamental para el saneamiento del Río Bogotá. En esta planta la cual es gestionada por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), se tratan aguas residuales del norte de la ciudad captadas en la cuenca del Río el Salitre, que son generadas por más de 2 millones de ciudadanos, principalmente de hogares, oficinas, colegios y universidades, entre otros. De esta manera se asegura que las aguas de la planta vertidas al río Bogotá tras el proceso de tratamiento ayuden al saneamiento del principal afluente de la ciudad<sup>36</sup>.

La PTAR El Salitre inició la construcción de la planta en septiembre de 1997, terminando la obra en el año 2000. La puesta en marcha de la planta fue en septiembre de 2000 y desde ese momento la planta siempre ha estado en funcionamiento las 24 horas del día, los 365 días del año.

---

<sup>36</sup> ACUEDUCTO DE BOGOTÁ. Ambiente: Saneamiento río Bogotá – PTAR El Salitre. [Sitio Web]. Bogotá D.C. La entidad. [Consultado 6, abril, 2020] Disponible en: <<https://www.acueducto.com.co/>>.

Además de disminuir la contaminación del río Bogotá, la planta también permite la descontaminación de las aguas residuales que se captan en la cuenca del río Salitre, humedal Torca y humedal La Conejera<sup>37</sup>.

Actualmente la planta destina un proceso aplicado llamado fase I, pero también se encuentra en la construcción de una segunda fase donde se aplicaría un tratamiento de tipo terciario, con el fin de progresar en los procesos e implementar nuevas operaciones que ayuden a mejorar la descontaminación de las aguas que se vierten al río Bogotá.

El proceso de la fase I consta de un tratamiento primario químicamente asistido, empleando una gestión de operación basada en diferentes etapas tales como: Cribado, desarenado, desengrasado y la parte de dosificación de productos químicos como lo es la floculación y coagulación. Por otra parte, se tiene una línea de lodos que se da posterior a la sedimentación primaria y consiste en: Extracción y espesamiento de lodos primarios, digestión anaerobia y deshidratación de lodos. Gracias a lo anterior se logran remociones aproximadas del 40 % de materia orgánica y un 60 % de sólidos suspendidos totales, a su vez permitiendo obtener subproductos como biosólidos y también biogás<sup>38</sup>.

**Figura 2.** Esquema Fase I de la PTAR El Salitre



**Fuente:** PTAR EL SALITRE. Planta actual el Salitre (Año 2020). [Sitio Web]. Bogotá D.C. La entidad. [Consultado 12, abril, 2020]. Disponible en: <<https://ptarsalitre.com.co/#ptarsalitre>>.

Es importante aclarar que las plantas de tratamiento de aguas residuales varían sus reportes referentes a las gestiones operativas y su producción, ya que las aguas que se tratan se ven afectadas por aspectos sociales y ambientales de su entorno. Uno de los aspectos más relevantes es la lluvia, donde se involucra el estado climático, tiempo, frecuencia u otros.

<sup>37</sup> *Ibíd.* Ambiente: Saneamiento río Bogotá – Historia de la PTAR El Salitre.

<sup>38</sup> EAAB. Producto 2. Plan de acción inmediato y alternativas futuras para el manejo de los biosólidos generados en el tratamiento de las aguas residuales de la ciudad de Bogotá D.C, noviembre, 2010. Versión 3.0. p. 24.

En esta parte del capítulo los datos suministrados por la PTAR El Salitre se basan en el mes de enero del año 2020, allí se estimaron cifras de los niveles alcanzados en promedio por el río Bogotá y el canal Salitre, donde los valores reportados se vieron afectados por lluvias fuertes, pero con frecuencias bajas. Los intervalos de cotas para el canal el Salitre estuvieron entre (2569,489 - 2572,011) m.s.n.m<sup>39</sup>. El valor promedio histórico de volumen de agua que trata la planta en el tiempo de un mes, es de 10'875.011,05 m<sup>3</sup>, siendo este valor referenciado desde el año 2004 por la PTAR El Salitre, para enero del 2020 la planta reportó un valor de volumen de agua tratado de 10'808.840 m<sup>3</sup>, por lo que se aproxima notablemente al valor histórico estimado<sup>40</sup>.

Con respecto al caudal de agua que ingresa, cabe resaltar que la planta cuenta con un pico máximo horario de 9,9 m<sup>3</sup>/s<sup>41</sup>, en la tabla 6 se evidencia que en promedio el caudal para la entrada es de 4 m<sup>3</sup>/s y para la salida de 3,91 m<sup>3</sup>/s, donde aproximadamente se involucra una carga de sólidos suspendidos totales de 250 g por cada metro cúbico que ingresa de agua residual, además la demanda biológica de oxígeno en 5 días de reacción se encuentra en un valor de 300 g por cada metro cúbico de agua residual que ingresa, estos valores son estimados en base a un promedio ya que las cifras son muy cambiantes para cada día del año sin obviar que hay periodos de tiempo en que los valores reportados se mantienen medianamente igual, es decir la variación es muy baja.

**Tabla 6.** SST y DBO reportados en enero del 2020 para la PTAR El Salitre

Caudal Afluente (m <sup>3</sup> /s)	Caudal Efluente (m <sup>3</sup> /s)	Parámetro	Concentración de Entrada (g/m <sup>3</sup> )	Concentración de Salida (g/m <sup>3</sup> )	Carga Removida (ton)	Remoción (%)
4,04	3,91	SST	254,94	91,83	1.337,96	64,22
		DBO	300,3	199,42	1.078,56	35,26

**Fuente:** EAAB. Informe mensual de actividades en enero de 2020. Bogotá D.C, febrero, 2020. p19. [Consultado 25, abril, 2020]. Disponible en: <<https://www.acueducto.com.co>> - Informes actividades PTAR El Salitre.

Gracias a la tabla anterior se puede notar que la planta logra remover más de 1000 toneladas al mes tanto de materia orgánica en términos de DBO como de SST, lo cual demuestra que se reduce notablemente el impacto de contaminación al río Bogotá, ya que en promedio se están removiendo diariamente un aproximado de 44 ton de SST en base seca y 35 ton de DBO en base seca, teniendo en cuenta que existen días en los que aumenta o disminuye considerablemente el valor de carga removida.

<sup>39</sup> EAAB. Informe mensual de actividades en enero. Bogotá D.C, febrero, 2020. p.18.

<sup>40</sup> Ibid., p.18.

<sup>41</sup> BOGTANA DE AGUAS Y SANAMIENTO, SUEZ LYONNAISE DES EAUX – DEGRÉMONT ESP S.A. Planta de tratamiento el Salitre – Fase I. Bogotá D.C, septiembre, 2000.

En cuanto a la producción de lodos, se encontró un documento publicado en el año 2010 por la EAAB, por lo que en la tabla 7 se referencia la fuente y se muestran las características generales, evidenciando que a la fecha la PTAR El Salitre obtiene aproximadamente 149 ton/día de lodos, con un contenido de casi 70 % de agua. Esta PTAR es la que más lodo genera en Colombia, involucrando cargas de sólidos suspendidos de más de 300 gramos por cada kilogramo de lodo que se produce, entendiendo que al día se está generando aproximadamente 150.000 kilogramos de lodos.

Por otra parte, en la tabla 8 se muestran los registros para el año 2020 referentes al volumen de cada tipo de lodo que se maneja en la planta y que es producido en el periodo de un mes, a su vez se evidencia la cantidad de biosólido que se genera.

**Tabla 7.** Características generales del lodo producido en la PTAR El Salitre

Característica	Unidad	Valor Promedio
Generación de lodo	ton/día	149
Humedad	%	69
Sólidos Totales	mg/kg	312.752
Sólido Volátiles	mg/kg	153.779
SV/ST	%	50

**Fuente:** EAAB. Producto 2. Plan de acción inmediato y alternativas futuras para el manejo de los biosólidos generados en el tratamiento de las aguas residuales de la ciudad de Bogotá D.C, noviembre, 2010. Versión 3.0. p. 26.

**Tabla 8.** Generación de lodos por la PTAR El Salitre en enero del 2020

Parámetro	Registro
Lodo Primario	278.619 m <sup>3</sup>
Lodo Espesado	105.770 m <sup>3</sup>
Lodo Digerido	30.520 m <sup>3</sup>
Lodo Deshidratado	30.676 m <sup>3</sup>
Biosólido Generado	3.503,54 Ton
Sequedad del Biosólido	28,22 %

**Fuente:** EAAB. Informe mensual de enero 2020. Tabla resumen, línea de lodos. [En línea]. Febrero, 2020. p.26. [Consultado 25, abril, 2020]. Disponible en: <<https://www.acueducto.com.co>>.

Para la presentación de datos referentes a la caracterización de biosólidos de la PTAR El Salitre y que se dispondrán en tablas, cabe resaltar que los valores fueron basados en datos operativos diarios reportados entre julio de 2004, fecha en la que la empresa de Acueducto inició la operación, mantenimiento y administración de dicha PTAR.

Es decir que estos valores promedio se han mantenido similarmente desde los reportes que se establecieron en aquella fecha<sup>42</sup>.

En la planta de tratamiento el Salitre se estimaron cifras del máximo mensual de generación de biosólidos para el año 2015 de aproximadamente 150 ton/día (545 m<sup>3</sup>/día), y para el 2020 de 159 ton/día (578 m<sup>3</sup>/día)<sup>43</sup>. A la fecha la PTAR El salitre está produciendo 148,5 ton/día (540 m<sup>3</sup>/día) con una humedad del 68.7%, según la tabla 9.

**Tabla 9.** Generalidades de los biosólidos de la PTAR El Salitre

Característica	Unidad	Valor Promedio
Biosólido Generado	ton/día	148,5
Humedad	%	68,7
Sólidos Totales	mg/kg	313.305
Sólidos Volátiles	mg/kg	149.137
SV/ST	%	50

**Fuente:** HAZEN AND SAWYER P.C, NIPPON KOEI. Producto Final – Anexo No. 20. Alternativas para el Manejo y Disposición de Biosólidos de la PTAR Salitre. [En línea]. Bogotá D.C, 2011. p. 20,9. [Consultado 30, abril, 2020].

Como bien ya se conoce que los biosólidos presentan características tanto fisicoquímicas como microbiológicas, en esta parte del capítulo se mostrará aquellas características que contienen los biosólidos de la PTAR El Salitre.

- **Parámetros fisicoquímicos:** En la PTAR El Salitre usualmente se hacen estimaciones de las muestras de biosólidos en dos tipos (puntual o compuesta), siendo la diferencia de que la muestra puntual es aquella en la que se interviene de forma manual, mientras que la muestra compuesta hace referencia a una combinación de muestras puntuales. Las tablas 10 y 11 muestran valores registrados en el año 2011 de nitrógeno y fósforo contenido en biosólidos de esta PTAR, además del pH.

**Tabla 10.** Macro nutrientes/Mezcla compuesta de biosólido en la PTAR El salitre

Parámetro	Valor
Nitrógeno Total Kjendhal (mg/kg Base Seca)	28.946
Fósforo (P) Total (mg/kg Base Seca)	10.805
pH	7,2

**Fuente:** HAZEN AND SAWYER P.C, NIPPON KOEI. Producto Final – Anexo No. 20. Alternativas para el Manejo y Disposición de Biosólidos de la PTAR Salitre. [En línea]. Bogotá D.C, 2011. p. 20,9.

<sup>42</sup> HAZEN AND SAWYER P.C, NIPPON KOEI. Producto Final – Anexo No. 20. Alternativas para el Manejo y Disposición de Biosólidos de la PTAR Salitre. Bogotá D.C, 2011. p. 9.

<sup>43</sup> Ibíd. p.11.

**Tabla 11.** Macro nutrientes / Mezcla puntual de biosólido en la PTAR El Salitre

Parámetro	Valor
Nitrógeno Total Kjendhal (mg/kg Base Seca)	30.179
Nitrógeno Amoniacal (mg/kg Base Seca)	5.472,8
Fósforo (P) Total (mg/kg Base Seca)	12.194,2
pH	7,8

**Fuente:** HAZEN AND SAWYER P.C, NIPPON KOEI. Producto Final – Anexo No. 20. Alternativas para el Manejo y Disposición de Biosólidos de la PTAR Salitre. [En línea]. Bogotá D.C, 2011. p. 20,10. [Consultado 30, abril, 2020].

A diferencia de la tabla 10, en la tabla 11 se estiman valores de nitrógeno amoniacal y orgánico, debido a que en esta tabla se analiza una mezcla puntual lo que permite un análisis con más detalle.

En términos de metales pesados inmersos en biosólidos de la PTAR el Salitre, la tabla 12 muestra valores registrados en la planta, que se reportaron en el año 2011.

**Tabla 12.** Metales pesados en biosólidos de la PTAR El Salitre

Parámetro	Valor (mg/Kg Base Seca)	Categoría Biosólidos - Normativa aplicable en Colombia (mg/Kg Base Seca)	
		A	B
Arsénico (As)	18,2	20	40
Cadmio (Cd)	8,7	8	40
Cobre (Cu)	188,4	1.000	1.750
Cromo (Cr)	118,5	1.000	1.500
Mercurio (Hg)	5,1	10	20
Níquel (Ni)	53,3	18	75
Plomo (Pb)	79,9	300	400
Selenio (Se)	23,3	36	100
Zinc (Zn)	1.067	2.000	2.800

**Fuente:** HAZEN AND SAWYER P.C, NIPPON KOEI. Producto Final – Anexo No. 20. Alternativas para el Manejo y Disposición de Biosólidos de la PTAR Salitre. [En línea]. Bogotá D.C, 2011. p. 20,10. [Consultado 30, abril, 2020].

A partir de la información de la tabla anterior, se deduce que los valores de metales pesados para una muestra de biosólido de la PTAR El Salitre se encuentran dentro de los valores máximos permisibles, mostrando que se obtuvieron para el cobre y el cromo valores por debajo de los 200 mg/kg, lo cual son relativamente bajos puesto que su límite es de 1000 mg/Kg para biosólidos de clase A.

- Parámetros microbiológicos: Para la PTAR El Salitre, usualmente se tienen en cuenta aspectos como; Coliformes fecales, Huevos de helmintos tanto viables como totales y la Salmonella. La tabla 13 evidencia estos parámetros, que también fueron reportados en el año 2011.

**Tabla 13.** Concentraciones microbiológicas en biosólidos de la PTAR El Salitre

Parámetro	Valor	Categoría Biosólidos - Normativa aplicable en Colombia	
		A	B
Coliformes fecales (UFC/g base seca)	1,24E+06	< 1,0E+03	< 1,0E+06
HH totales (<1huevos/4g Base Seca)	1,12E+01	-	-
HH viables (<1huevos/4g Base Seca)	6,83E+00	< 1,0	< 10,0
Salmonella (NMP/4g ST Base Seca)	5,43E+02	Ausencia	-

**Fuente:** HAZEN AND SAWYER P.C, NIPPON KOEI. Producto Final – Anexo No. 20. Alternativas para el Manejo y Disposición de Biosólidos de la PTAR Salitre. [En línea]. Bogotá D.C, 2011. p. 20,9. [Consultado 30, abril, 2020].

Con base en la tabla 13 se puede observar que los Coliformes fecales para estos biosólidos se aproximan a las características de un biosólido de clase B, notando un valor de 1'240.000 UFC/g. Además, los otros parámetros están dentro de la normativa.

## 2.2 PTAR CAÑAVERALEJO

La planta de tratamiento de aguas residuales de Cañaveralejo, se encuentra ubicada en la ciudad de Cali, Colombia, la cual cuenta con una población de más de 2,5 millones de habitantes, cumpliendo con la función de descontaminar las aguas residuales de la región que se vierten al río Cauca.

**Imagen 5.** Planta de tratamiento de aguas residuales Cañaveralejo

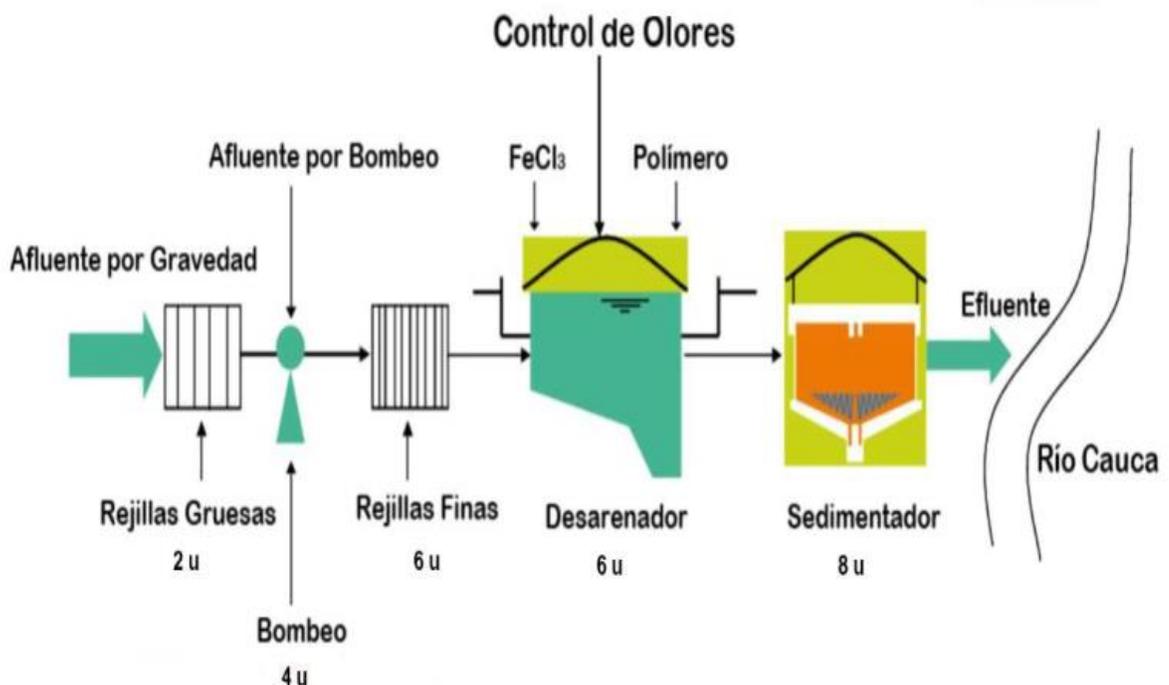


**Fuente:** CONCIVILES. Proyectos: Obras hidráulicas – PTAR Cañaveralejo. [Sitio WEB]. La entidad. [Consultado 5, mayo, 2020] Disponible en: <<http://www.conciviles.com/proyectos/obras-hidraulicas/planta-de-aguas-residuales-de-canaveralejo/>>.

Esta planta que es gestionada por las empresas municipales de Cali (EMCALI), opera desde el año 2002 y consta de un tratamiento primario químicamente asistido, conformado por una línea de agua y una de lodos como lo muestran las figuras 2 y 3, donde aproximadamente se remueve el 60 % de SST y el 35% de DBO<sup>44</sup>.

La planta cuenta con un caudal de diseño de 7,6 m<sup>3</sup>/s correspondiéndole un máximo horario de 12,24 m<sup>3</sup>/s y un pico máximo hidráulico de 17,19 m<sup>3</sup>/s, actualmente la planta opera con un caudal aproximado de 6.3 m<sup>3</sup>/s y produce 140 ton/día aproximadamente de biosólido<sup>45</sup>.

**Figura 3.** Línea de agua en la PTAR Cañaveralejo



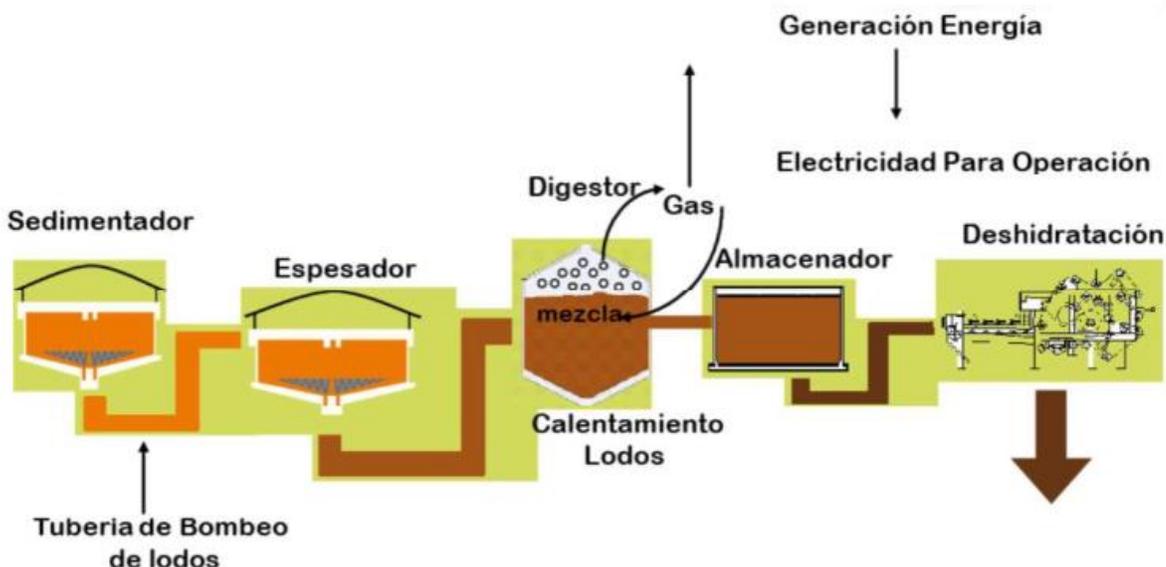
**Fuente:** MARTIN BRAULT, Jean. Caso de la PTAR Cañaveralejo Empresas Municipales de Cali (EMCALI) [En línea]. Buenos Aires, noviembre, 2018. [Consultado 15, mayo, 2020].

Como se pudo observar, esta planta de tratamiento cuenta con la etapa de cribado donde se tienen rejillas gruesas para objetos grandes y rejillas finas para objetos pequeños, posteriormente la etapa de desarenado y la dosificación de químicos.

<sup>44</sup> MARTIN BRAULT, Jean. Caso de la PTAR Cañaveralejo Empresas Municipales de Cali (EMCALI). Buenos Aires, noviembre, 2018.

<sup>45</sup> TORRES VALENCIA, Lina Paola. Desarrollo de una metodología para la identificación de alternativas de manejo de los biosólidos de la planta de tratamiento de agua residual de Cañaveralejo (PTAR – C) de Santiago de Cali. [En línea] Tesis. Universidad Autónoma de Occidente, Santiago de Cali, 2019. [Consultado 20, mayo, 2020] p40. Disponible en: < <http://red.uao.edu.co:8080/bitstream/10614/11376/5/T08597.pdf>>.

**Figura 4.** Línea de lodos en la PTAR Cañaveralejo



**Fuente:** MARTIN BRAULT, Jean. Caso de la PTAR Cañaveralejo Empresas Municipales de Cali (EMCALI) [En línea]. Buenos Aires, noviembre, 2018. [Consultado 15, mayo, 2020].

En la PTAR Cañaveralejo se estimaron valores acerca de la producción de biosólidos durante el año 2018 como lo muestra la tabla 14, evidenciando que la cantidad promedio estuvo entre los (3.100 y 4.100) toneladas.

**Tabla 14.** Reporte mensual de los biosólidos de la PTAR Cañaveralejo

Mes	Cantidad	Volumen	Promedio Diario	
	ton	m <sup>3</sup>	ton	m <sup>3</sup>
ENERO	3.229	2.935	111	101
FEBRERO	3.076	2.861	110	102
MARZO	4.141	3.793	143	131
ABRIL	3.690	3.256	127	112
MAYO	3.961	3.505	128	113
JUNIO	2.966	2.962	110	99
JULIO	3.707	3.413	120	110
AGOSTO	4.246	3.871	137	125
SEPTIEMBRE	4.563	4.140	152	138
OCTUBRE	5.590	5.168	180	167
NOVIEMBRE	4.902	4.241	163	141
DICIEMBRE	4.116	3.643	133	118
1er SEMESTRE	21.063	19.312	729	658
2do SEMESTRE	27.124	24.476	885	799
<b>TOTAL</b>	<b>48.187</b>	<b>43.788</b>	<b>1.614</b>	<b>1.457</b>

**Fuente:** TORRES VALENCIA, Lina Paola. Desarrollo de una metodología para la identificación de alternativas de manejo de los biosólidos de la planta de tratamiento de agua residual de Cañaveralejo (PTAR – C) de Santiago de Cali. [En línea] Tesis. Universidad Autónoma de Occidente, Santiago de Cali, 2019. p41. [Consultado 29, mayo, 2020].

Algunas de las características generales e importantes de los biosólidos, son evidenciadas en la tabla 15 durante el año 2018.

**Tabla 15.** Generalidades / Biosólidos de la PTAR Cañaveralejo para el 2018

Mes	pH		Densidad	Humedad	Sólidos Totales	Sólidos Volátiles	SV/ST
	Min	Max	g/ml	%	%	%	%
ENERO	7,78	8,85	1,10	68,99	31,01	13,31	0,43
FEBRERO	7,74	8,85	1,08	69,49	30,51	13,99	0,46
MARZO	7,77	8,80	1,09	68,57	31,43	12,69	0,40
ABRIL	7,35	8,81	1,14	67,08	32,93	11,52	0,35
MAYO	7,42	8,59	1,13	67,70	32,30	11,87	0,37
JUNIO	7,79	8,83	1,08	70,15	29,85	12,19	0,41
JULIO	7,24	8,76	1,09	69,52	30,48	13,49	0,44
AGOSTO	7,86	8,86	1,09	70,62	29,38	13,25	0,45
SEPTIEMBRE	7,83	8,65	1,10	72,08	27,92	13,41	0,48
OCTUBRE	7,71	8,84	1,08	71,05	28,95	13,03	0,45
NOVIEMBRE	7,77	8,87	1,13	67,18	32,82	12,18	0,38
DICIEMBRE	7,78	8,65	1,12	68,11	31,89	12,12	0,38

**Fuente:** TORRES VALENCIA, Lina Paola. Desarrollo de una metodología para la identificación de alternativas de manejo de los biosólidos de la planta de tratamiento de agua residual de Cañaveralejo (PTAR – C) de Santiago de Cali. [En línea] Tesis. Universidad Autónoma de Occidente, Santiago de Cali, 2019. p42. [Consultado 29, mayo, 2020].

En la tabla 16 se muestran los valores que se reportaron en la planta de Cañaveralejo durante el año 2007 hasta el año 2014, evidenciando reportes de las cargas de SST y la DBO que ingresan y salen de esta planta de tratamiento, a su vez evidenciando la carga removida que se ha obtenido de esos parámetros.

**Tabla 16.** Operaciones desde el año 2007 al 2014 en la PTAR Cañaveralejo

Año	Caudal	Carga Afluente		Carga Efluente		Carga Removida			
	Promedio Total	ton/día		ton/día		ton/día		%	
	m <sup>3</sup> /s	SST	DBO	SST	DBO	SST	DBO	SST	DBO
2007	3,97	62,1	68,1	21,4	42,6	41	25	64	37
2008	4,71	70,0	69,4	29,8	48,2	40	21	56	30
2009	5,42	90,7	87,1	32,0	53,5	59	34	63	37
2010	5,50	81,4	83,7	27,8	49,0	54	35	65	41
2011	6,10	98,2	85,6	31,7	50,7	67	35	67	40
2012	6,04	98,4	85,4	32,3	53,1	66	33	66	38
2013	6,07	87,2	76,1	32,6	47,8	55	28	61	37
2014	6,55	78,6	75,3	35,1	50,1	44	25	54	33

**Fuente:** DIRECCIÓN TÉCNICA ANTE EMCALI EICE ESP. Estudio macro tratamiento y disposición de lodos en la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR-C). [En línea]. Santiago de Cali, diciembre, 2015. p10. [Consultado el 22, mayo, 2020].

Se puede notar según la tabla anterior, que del 2007 al 2014 ha aumentado considerablemente el caudal de agua de ingreso a la PTAR, mostrando que para el año 2011 se presentó el valor más alto de remoción tanto de SST y DBO.

- **Parámetros fisicoquímicos:** Para la PTAR Cañaveralejo se evidencian principalmente reportes en la cantidad de N y P que contienen los biosólidos, para determinar su relación y así comprender que propiedades ofrecen antes de su aplicación. La tabla 17 presenta los valores respectivos y que fueron reportados en el año 2013.

**Tabla 17.** Macro nutrientes en los biosólidos de la PTAR Cañaveralejo

Parámetro	Unidad	Valor
pH	-	7,1 - 9,0
Humedad	%	64,5 - 74,2
Nitrógeno Total Kjendhal	mg/kg (B.S)	23.100
Nitrógeno Amoniacal	mg/kg (B.S)	2.983,8
Fósforo (P) Total	mg/kg (B.S)	10.200
Relación C/N	-	7,10
Cobre (Cu)	mg/kg (B.S)	218
Zinc (Zn)	mg/kg (B.S)	1.093

**Fuente:** SILVA LEAL, Jorge. BEDOYA RIOS, Diego. TORRES LOZADA, Patricia. Efecto del secado térmico y el tratamiento alcalino en las características microbiológicas y químicas de biosólidos de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas. *Revista de investigación*. 2013, Quim. Nova, Vol. 36, No. 2, 207-214.

Según la tabla 17, los valores referentes a humedad y pH se encuentran en un rango promedio de un biosólido de buena calidad, a su vez los valores de metales pesados como el cobre y el zinc se encuentran dentro de los valores máximos permisibles y aquí también se presentan contenidos de cobre relativamente bajos. Estos biosólidos presentan buena relación de carbono y nitrógeno, indicando que ofrecen buenos nutrientes para su uso agrícola.

- **Parámetros microbiológicos:** Para la PTAR Cañaveralejo se encontraron datos microbiológicos reportados en una revista de investigación en el año 2013, por lo que la tabla 18 evidencia sus valores y la fuente de la revista.

En cuanto a la tabla 18, se observa que los valores de Huevo de helmintos y Salmonella se encuentran dentro del rango de la normativa, mientras que los Coliformes fecales están por encima de los valores permisibles, lo que en esos casos el biosólido debe ser estudiado con precaución para su disposición, además esto indica que se puede evaluar el uso de esos biosólidos como cobertura de rellenos sanitarios o estabilización de taludes. Por consiguiente, con base a estos registros encontrados, se puede entender que no siempre el biosólido presenta los parámetros permisibles para su aprovechamiento.

**Tabla 18.** Criterios microbiológicos en biosólidos de la PTAR Cañaveralejo

Variable	Unidad	Valor	Categoría Biosólidos - Normativa aplicable en Colombia	
			A	B
Coliformes Fecales	UFC/g	1,47E+07	< 1,0 E+03	< 1,0 E+06
Huevos de helmintos	HH/4g	4	< 1,0	< 10,0
Salmonella spp	Ausencia/Presencia	Ausencia	Ausencia	< 1,0 E+03

**Fuente:** SILVA LEAL, Jorge. BEDOYA RIOS, Diego. TORRES LOZADA, Patricia. Efecto del secado térmico y el tratamiento alcalino en las características microbiológicas y químicas de biosólidos de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas. *Revista de investigación*. 2013, Quim. Nova, Vol. 36, No. 2, 207-214.

### 2.3 PTAR SAN FERNANDO

La planta de tratamiento de aguas residuales San Fernando se encuentra ubicada en el municipio de Itagüí, Colombia, donde se trata aproximadamente el 20% de las aguas residuales generadas en la parte sur del área metropolitana del Valle de Aburrá, descontaminando las aguas residuales de una población aproximada a los 600.000 habitantes<sup>46</sup>. Esta parte metropolitana cuenta con los municipios Sabaneta, La Estrella, Envigado, Itagüí y Caldas.

**Imagen 6.** Planta de tratamiento de aguas residuales San Fernando



**Fuente:** CONINSA. Energía/Saneamiento: Planta de tratamiento San Fernando. [Sitio WEB]. La entidad. [Consultado 10, junio, 2020] Disponible en: <<https://www.coninsa.co/construccion/proyectos/energiasaneamiento/planta-de-tratamiento-san-fernando>>.

La planta comenzó su operación en el año 2000 liderada por las Empresas Públicas de Medellín (EPM) y la capacidad instalada de tratamiento que se estableció fue de 1,8 m<sup>3</sup>/s, con proyecciones de tratar un caudal de agua hasta de 4,8 m<sup>3</sup>/s, actualmente el caudal máximo para la planta es de 3,6 m<sup>3</sup>/s y el promedio diario de caudal en esta planta está aproximadamente entre los 1,3 m<sup>3</sup>/s<sup>47</sup>.

<sup>46</sup> EPM. Nuestra empresa: Nuestras plantas – Agua, PTAR San Fernando. [Sitio WEB]. La entidad. [Consultado 6, junio, 2020] Disponible en: <<https://www.epm.com.co/site/home/nuestra-empresa/nuestras-plantas/agua>>.

<sup>47</sup> Ibíd.

El tratamiento que se realiza en esta PTAR consiste de un tratamiento secundario por medio de lodos activados y para el presente año su producción de biosólidos al día es aproximadamente de 90 toneladas, siendo normalmente la aplicación en suelos y la incineración su disposición final<sup>48</sup>.

La planta San Fernando reporta actualmente resultados superiores al 80% para la eficiencia de remoción de materia orgánica y a su vez con capacidades de remoción de hasta 30 ton/día de DBO y 37 ton/d de SST aproximadamente<sup>49</sup>. La tabla 19 ordena los valores descritos.

**Tabla 19.** Generalidades en los biosólidos de la PTAR San Fernando

Caudal Promedio (m <sup>3</sup> /s)	Biosólido Generado (ton/día)	Parámetro	Carga Removida (ton/día)
1,3	90	SST	37
		DBO	30

**Fuente:** elaboración propia.

A continuación, se muestra un esquema general del tratamiento realizado en la PTAR San Fernando donde se evidencian los procesos implementados.

**Figura 5.** Esquema PTAR San Fernando



**Fuente:** ORTEGA BEDOYA, Isabel Cristina. Evaluación de las interacciones físico-químicas y biodisponibilidad del cromo hexavalente en biosólidos de la planta de tratamiento de aguas residuales San Fernando - Medellín. [En línea] Tesis. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 2017. p.15. [Consultado 8, junio, 2020]. Disponible en: <<http://bdigital.unal.edu.co/63359/1/1128434555.2017.pdf>>.

<sup>48</sup> ORTEGA BEDOYA, Isabel Cristina. Evaluación de las interacciones físico-químicas y biodisponibilidad del cromo hexavalente en biosólidos de la planta de tratamiento de aguas residuales San Fernando - Medellín. [En línea] Tesis. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 2017. p.16. [Consultado 8, junio, 2020].

<sup>49</sup> Ibíd. p.15.

- Parámetros fisicoquímicos: Para la PTAR San Fernando se evidencian en la tabla 20 valores relacionados a los metales pesados y valores de los macronutrientes acerca de la cantidad de fósforo y nitrógeno que contienen, reportados en el año 2017.

**Tabla 20.** Macronutrientes / Biosólidos de la PTAR San Fernando

Parámetro	Valor	Unidades
Relación C/N	5,8	-
Fósforo (P) Total	2,76	% (B.S)
Nitrógeno (N) Total	2,28	% (B.S)

**Fuente:** ORTEGA BEDOYA, Isabel Cristina. Evaluación de las interacciones físico-químicas y biodisponibilidad del cromo hexavalente en biosólidos de la planta de tratamiento de aguas residuales San Fernando - Medellín. [En línea] Tesis. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 2017. ANEXO 6.2 - p.90. [Consultado 8, junio, 2020]. Disponible en: <<http://bdigital.unal.edu.co/63359/1/1128434555.2017.pdf>>.

En la tabla 21 se puede observar los parámetros de pH, relación C/N y densidad de los biosólidos de San Fernando, basado en reportes para cada mes del año 2013.

**Tabla 21.** Características del año 2013 – Biosólidos de la PTAR San Fernando

Mes	Relación C/N	pH	Densidad (g/ml)
Enero	7,8	7,2	0,7
Febrero	3,3	6,7	0,5
Marzo	4,7	7,2	0,51
Abril	5,0	6,6	0,5
Mayo	5,5	6,5	0,5
Junio	5,6	7,6	0,5
Julio	6,2	7,7	0,5
Agosto	8,0	7,1	0,6
Septiembre	5,9	7,7	0,4
Octubre	7,5	7,3	0,4
Noviembre	6,4	7,0	0,3
Diciembre	7,1	7,4	0,4

**Fuente:** BEDOYA URREGO, Katherine. ACEVEDO RUIZ, José M. ACEVEDO RUIZ, Carlos A. PELÁEZ JARAMILLO, Carlos A. AGUDELO LÓPEZ, Sonia del Pilar. Caracterización de biosólidos generados en la planta de tratamiento de agua residual San Fernando, Itagüí (Antioquia, Colombia). *Revista de investigación*. 2013, volumen 15, Número 5, p. 778-790. ISSN electrónico 2539-3596. ISSN impreso 0124-0064.

Con base a las tablas anteriores, los biosólidos de la PTAR San Fernando presentan valores óptimos referentes a pH y relación C/N, lo cual indica que son apropiados para aplicar en suelos u otras alternativas agrícolas.

Los valores respectivos de metales pesados se presentan en la tabla 22 y se da lugar a datos reportados en el año 2013.

**Tabla 22.** Metales pesados de los biosólidos de la PTAR San Fernando

Parámetro	Valor (mg/Kg Base Seca)	Categoría Biosólidos - Normativa aplicable en Colombia (mg/Kg Base Seca)	
		A	B
Arsénico (As)	8,0	20	40
Cadmio (Cd)	1,6	8	40
Cobre (Cu)	108,3	1.000	1.750
Cromo (Cr)	267,5	1.000	1.500
Mercurio (Hg)	1,5	10	20
Molibdeno (Mb)	1,9	18	75
Níquel (Ni)	130,2	80	420
Plomo (Pb)	33,9	300	400
Selenio (Se)	< 4,0	36	100
Zinc (Zn)	1.220	2.000	2.800

**Fuente:** ORTEGA BEDOYA, Isabel Cristina. Evaluación de las interacciones físico-químicas y biodisponibilidad del cromo hexavalente en biosólidos de la planta de tratamiento de aguas residuales San Fernando - Medellín. [En línea] Tesis. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 2017. ANEXO 6.2 - p.90. [Consultado 8, junio, 2020]. Disponible en: < <http://bdigital.unal.edu.co/63359/1/1128434555.2017.pdf>>.

Para los valores de metales pesados en la PTAR San Fernando, se puede deducir que si cumplen con la normativa establecida y que se comportan especialmente como biosólidos de clase A.

- Parámetros microbiológicos: Entre los aspectos más destacados de los biosólidos de la PTAR San Fernando en cuanto a criterios microbiológicos se refiere, se tienen los Coliformes fecales y totales junto con la Salmonella, como lo muestra la tabla 23 con valores reportados en el año 2010.

**Tabla 23.** Criterios microbiológicos en biosólidos de la PTAR San Fernando

Parámetro	Valor (NMP/g)
Coliformes Fecales	4,40E+04
Coliformes Totales	4,40E+03
Salmonella spp.	1,18E+07

**Fuente:** LÓPEZ SANCHEZ, Idalia Jacqueline. ACEVEDO CIFUENTES, Diana Rocío. Ordoñez Ante, Carlos Andrés. Seguimiento a patógenos presentes en biosólidos empleado como enmienda para revegetalizar un talud. Revista Ingenierías Universidad de Medellín, 2010, vol. 9, No. 17, pp. 29-40 - ISSN 1692-3324.

## 2.4 EDAR ATOTONILCO

La Estación Depuradora de Aguas Residuales Atotonilco se encuentra localizada en México y cumple la función de tratar las aguas residuales generadas por la zona Metropolitana del Valle de México. Está ubicada en el municipio de Atotonilco de Tula en el estado de Hidalgo y ocupa 158,5 hectáreas<sup>50</sup>.

Esta EDAR tiene la capacidad de tratar aguas residuales con un caudal de 35 m<sup>3</sup>/s, permitiendo depurar las aguas residuales para una población de más de 12'000.000 de habitantes, por lo que se considera la planta de tratamiento más grande de Latinoamérica y de las más grande del mundo<sup>51</sup>.

La Planta cuenta con dos trenes de procesos para la línea de agua; Convencional (TPC) y Químico (TPQ), además de una línea de lodos.

El caudal máximo para esta planta en tiempo de lluvias es de 50 m<sup>3</sup>/s, siendo su caudal medio de 35 m<sup>3</sup>/s en temporadas de sequía y de 42 m<sup>3</sup>/s en épocas de lluvias, y su caudal promedio diario es aproximadamente de 3'628.800 m<sup>3</sup>/día<sup>52</sup>.

### Imagen 7. Estación depuradora de aguas residuales Atotonilco



**Fuente:** ACCIONA. Áreas de actividad: D&C de plantas de tratamiento de agua – EDAR ATOTONILCO (Año 2020). [Sitio Web]. Bogotá D.C. La entidad. [Consultado 20, junio, 2020]. Disponible en: <<https://www.accion-a-agua.com/es/areas-de-actividad/proyectos/dc-de-plantas-de-tratamiento-de-agua/edar/atotonilco/>>.

<sup>50</sup> ACCIONA. Áreas de actividad: D&C de plantas de tratamiento de agua – EDAR ATOTONILCO (Año 2020). [Sitio Web]. Bogotá D.C. La entidad. [Consultado 20, junio, 2020]. Disponible en: <<https://www.accion-a-agua.com/es/areas-de-actividad/proyectos/dc-de-plantas-de-tratamiento-de-agua/edar/atotonilco/>>.

<sup>51</sup> Ibíd.

<sup>52</sup> Ibíd.

Esta EDAR presenta en la actualidad aproximadamente una concentración en términos de SST de 250 g/m<sup>3</sup> a la entrada y entre (40-70) g/m<sup>3</sup> a la salida y en términos de DBO de 250 g/m<sup>3</sup> a la entrada y entre (30-35) g/m<sup>3</sup> a la salida, presentando remociones aproximadas de (83-84) % para DBO y (83-88) % para SST<sup>53</sup>. La tabla 24 ordena los valores mencionados.

**Tabla 24.** Parámetros de SST Y DBO para la EDAR Atotonilco

Caudal Afluyente (m <sup>3</sup> /s)	Parámetro	Concentración de Entrada (g/m <sup>3</sup> )	Concentración de Salida (g/m <sup>3</sup> )	Remoción (%)
35	SST	250	40-70	83-88
	DBO	250	30-35	83-84

**Fuente:** elaboración propia

- **Parámetros Fisicoquímicos:** Teniendo en cuenta que las características de estos lodos están ligados a su origen y a los tiempos de retención junto con el tipo de tratamiento de la PTAR, a continuación, en la tabla 25 se presentarán los valores de macro nutrientes presentes en lodos residuales que se obtienen generalmente en Estaciones Depuradoras de México, entendiendo que cada planta de este país normalmente se reserva la información pertinente para bienestar de la misma. Estos valores fueron reportados en una monografía publicada en el año 2013, por lo que en la tabla 25 se referencia su fuente.

**Tabla 25.** Características de los lodos de depuradora en México

Parámetro	Unidades	Lodo Primario	Lodo Primario digerido	Lodo Secundario
Sólidos Suspendidos Totales	%	5 - 9	2-5	0,8 - 1,2
Sólidos Volátiles	%	60 - 80	30 - 60	59 - 88
Nitrógeno (N)	%	1,5 - 4	1,6 - 3	2,4 - 5
Fósforo (P)	%	0,8 - 2,8	1,5 - 4	2,8 - 11
Óxido de Potasio (K <sub>2</sub> O)	%	0 - 1	0 - 3	0,5 - 0,7
pH	-	5 - 8	6,5 - 7,5	6,5 - 8

**Fuente:** LIMÓN MACÍAS, Juan Gualberto. Los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales, ¿problema o recurso? [En línea] Monografía. Guadalajara Jalisco, 2013. p.11. [Consultado 28, junio, 2020]. Disponible en: <[http://www.ai.org.mx/ai/images/sitio/201309/ingresos/jglm/doc\\_ingreso\\_gualberto\\_limon\\_trabajo\\_de\\_ingreso.pdf](http://www.ai.org.mx/ai/images/sitio/201309/ingresos/jglm/doc_ingreso_gualberto_limon_trabajo_de_ingreso.pdf)>.

<sup>53</sup> Ibíd.

Este capítulo fue de bastante importancia porque logró evidenciar aquellas características que los biosólidos presentan, notando que existen variaciones en las propiedades de los biosólidos que se producen en una planta como las que se producen en otra. Por ejemplo, para los biosólidos de la PTAR El Salitre se encontraron valores de contenido de zinc menores que a los de la PTAR San Fernando y Cañaveralejo, mientras que, para el contenido de cobre, los biosólidos de la PTAR San Fernando son los que generalmente presentan menores proporciones con respecto a las otras plantas de tratamiento estudiadas. En cuanto a pH, en todas las plantas los biosólidos reportan valores entre 6 y 8, lo cual es óptimo para un biosólido, la humedad de los biosólidos para estas plantas se sitúa en un rango de 67 – 72 % aproximadamente. En cuanto a contenido de NTK y fósforo, la PTAR Cañaveralejo presenta valores menores con respecto a la del Salitre, y comparando también estas variables para la PTAR San Fernando con la EDAR Atotonilco en términos de porcentaje, ambas presentan valores mayores al 2% de contenido, estando dentro de los valores promedios en biosólidos. Con base a las características microbiológicas, el contenido de Coliformes fecales, Huevos de helminto y Salmonela para cada planta estudiada de Colombia, representan similitud en donde sus características se aproximan a un biosólido tipo B generalmente, mientras que la EDAR de México normalmente obtiene biosólidos de tipo C. Siempre teniendo en cuenta la norma EPA 503.

Para finalizar queda por decir que las características de los biosólidos garantizan que puedan ser utilizados y que se aprovechen en campos como; La agricultura, aplicación en suelos, compostaje, valorización energética entre otras aplicaciones relacionadas.

### **3. SELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA DE APROVECHAMIENTO PARA BIOSÓLIDOS**

Para indagar con más detalle aquellas alternativas que existen para aprovechar biosólidos que provienen de plantas de tratamiento de aguas residuales, este capítulo menciona las alternativas con biosólidos más reconocidas, junto con experiencias encontradas en una búsqueda literaria, con el fin de establecer una selección entre las alternativas que se planteen, por medio de una matriz de decisión y así en el siguiente capítulo llevar la alternativa a gran escala. Es necesario aclarar que la investigación tendrá continuidad utilizando la información consultada anteriormente referente a las plantas de tratamiento que están ubicadas en Colombia y por ende su normativa vigente pertinente en cuanto a biosólidos.

#### **3.1 USOS PARTICULARES DE LOS BIOSÓLIDOS**

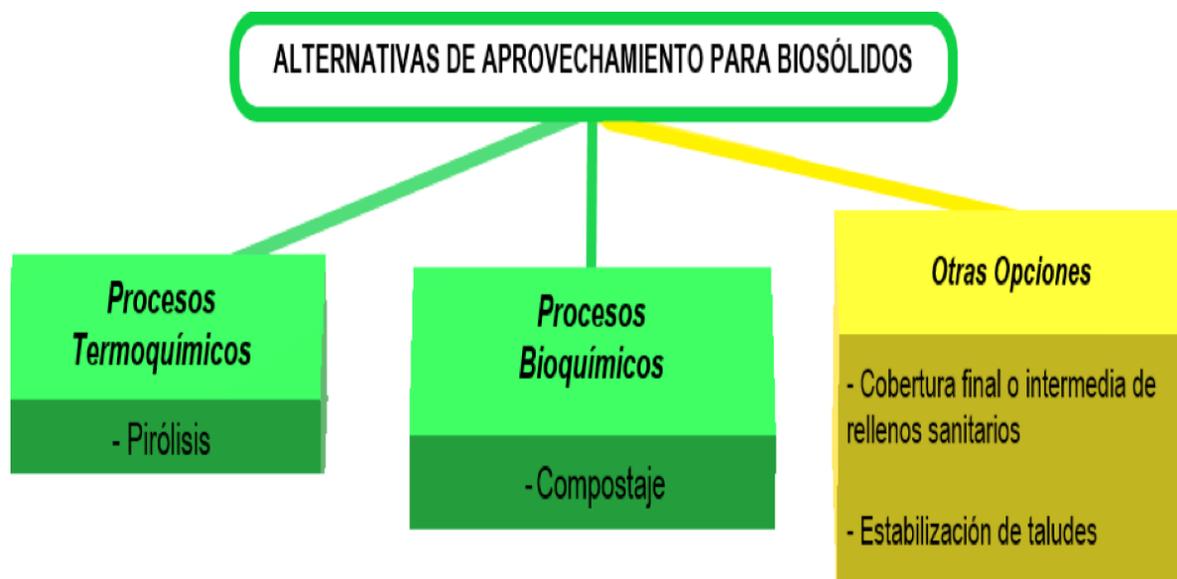
Como bien se estudió en capítulos anteriores, se han diferenciado varias opciones para emplear biosólidos, pero en este capítulo se destacarán las opciones que han sido objeto de estudio y que son más reconocidas y empleadas por las propias plantas de tratamiento. Para una mejor comprensión del tema, se clasificaron las alternativas de aprovechamiento de biosólidos dentro de tres grupos específicos, y para desarrollar la respectiva clasificación las opciones fueron basadas en el capítulo teórico del presente proyecto referentes a la disposición de biosólidos y a los cuadros 1, 2 y 3 correspondiente a las alternativas que se emplean según la clase de biosólido que se tenga.

Los tres grupos específicos para este proyecto acerca de las alternativas de aprovechamiento con biosólidos están conformados por: Procesos termoquímicos que hace referencia a el uso de biosólidos como valorización energética y en donde es necesario emplear calor, procesos bioquímicos que hacen referencia al uso de biosólidos donde se involucran microorganismos y oxígeno en exceso, y por último se encuentra el grupo de otras opciones, en donde se puede encontrar aquellas alternativas que se emplean como medida de emergencia o como opción apropiada para darle un uso adecuado al biosólido. La respectiva clasificación se hizo teniendo en cuenta que hay alternativas de aprovechamiento de biosólidos que pueden ser escaladas industrialmente debido a los criterios, propiedades, antecedentes y beneficios que presentan, mientras que hay otras alternativas que son más bien de tipo emergente o como opción de las empresas para mitigar los impactos sociales, ambientales y económicos que generan los biosólidos, conllevando aspectos positivos y resultados benéficos para el ambiente, la industria y la sociedad.

Por tal motivo esta investigación se enfocará en los grupos de alternativas relacionadas a los procesos termoquímicos y bioquímicos, que son los que permiten desarrollar con certeza un escalamiento industrial.

Sabiendo lo anterior, en el siguiente diagrama se mostrará la respectiva clasificación de las opciones de aprovechamiento que abarcan los biosólidos, presentando los tres grupos relevantes.

**Diagrama 1.** Clasificación de biosólidos según su uso



**Fuente:** elaboración propia.

Partiendo de la información del diagrama anterior, ya se pueden diferenciar las alternativas para aprovechar biosólidos que se evaluarán en este proyecto, las cuales son el compostaje de biosólidos y la pirólisis de biosólidos.

Para una breve descripción de estas alternativas se tienen:

- Compostaje: Se refiere a un proceso biológico exotérmico que consiste en convertir la materia presente en los residuos hacia formas más estables<sup>54</sup>.
- Pirólisis: Se trata de la descomposición térmica de biomasa que para este proyecto sería el biosólido, empleando temperaturas hasta de 550°C y en ausencia de oxígeno, donde se involucran reacciones mediante las cuales el material orgánico se descompone<sup>55</sup>.

<sup>54</sup> TORRES Patricia, PÉREZ Andrea, ESCOBAR Juan C, URIBE Iris E, IMERY Ricardo. Compostaje de biosólidos de plantas de tratamiento de aguas residuales. [En línea]. Bogotá D.C, 2007. p.267-275 [Consultado 21, junio, 2020].

<sup>55</sup> ARAGONEZ GONZÁLEZ, Martha Patricia. Análisis termo gravimétrico de la pirólisis de biosólidos de la planta de tratamiento de agua residual el Salitre. [En línea]. Monografía.

Cabe mencionar que dentro del compostaje se pueden estudiar las opciones relacionadas a la elaboración de abonos orgánicos y fertilizantes, ya que en la mayoría de veces éstas son la finalidad de desarrollar compostaje, también el proceso de compostaje se realiza con el fin de conocer las propiedades del biosólido para luego disponerlo en otras aplicaciones ya sea como la restauración de suelos, uso agrícola, biorremediación de suelos contaminados, entre otras posibles aplicaciones.

Es importante recordar que, al identificar las características físicas, químicas y microbiológicas de los biosólidos, se logró entender con más claridad que los biosólidos se comportan con propiedades nutricionales para la utilización en suelos o lo relacionado, por ende el compostaje es un proceso bastante útil para aprovechar los micronutrientes que están presentes en una muestra de biosólidos con la finalidad de preparar el biosólido antes de ser dispuesto en alternativas benéficas para la agricultura o afines.

Sin más preámbulo es necesario mencionar que las características de los biosólidos provenientes de plantas en Colombia se adaptan a un biosólido tipo B y contienen los nutrientes necesarios para un proceso de compostaje.

Por otra parte, la pirólisis es la opción que presenta posibilidad de convertir un biosólido en biocombustible, ya que también existen opciones de valorización energética como la incineración o combustión, coincineración evaluada para procesos en cementeras y gasificación evaluada para la producción de biogás, pero que son procesos ligados más a las propiedades de un lodo residual antes de ser convertido en biosólido.

**3.1.1 Antecedentes de los biosólidos.** Con el fin de interiorizar mejor la temática, en esta parte del capítulo se presentará algunas investigaciones con relación a las alternativas de aprovechamiento descritas anteriormente.

Por consiguiente, se mostrará en forma de cuadros, los antecedentes correspondientes al uso de biosólidos como compostaje, pirólisis y aplicación en suelos.

Estos antecedentes fueron basados en revistas de investigación, tesis y publicaciones relevantes, las cuales demuestran avances tecnológicos de las alternativas de aprovechamiento, y en la mayoría los resultados son favorables.

Para presentar los antecedentes se menciona el título de la investigación, se hace una descripción detallada y concisa de lo desarrollado y por último se evidencian los resultados obtenidos en la investigación.

---

Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C, 2015. [Consultado 25, junio, 2020]. Disponible en: <[http://bdigital.unal.edu.co/48357/1/1032410813.2015\\_1.pdf](http://bdigital.unal.edu.co/48357/1/1032410813.2015_1.pdf)>.

**Cuadro 4.** Antecedentes de biosólidos en procesos bioquímicos

Título de la Investigación	Breve Descripción	Resultados Obtenidos
CRECIMIENTO MICROBIANO EN PILAS DE COMPOSTAJE DE RESIDUOS ORGÁNICOS Y BIOSÓLIDOS DESPUÉS DE LA AIREACIÓN	El presente estudio se enfocó en determinar el efecto de la aireación sobre el crecimiento de bacterias y actinomicetos en dos pilas de compostaje. Ambas contenían arcilla, lama y biosólidos, la diferencia era que la pila 2 llevaba fracción orgánica contenida en los residuos sólidos urbanos (FORSU), mientras que la pila 1 no <sup>56</sup> .	La aireación tuvo resultados favorables, ya que presentó un efecto significativo en el crecimiento microbiano para la fase termófila, debido a que se provocó la alteración de las condiciones de los microsistemas, siendo menor para los actinomicetos que para las bacterias. Además, se notó que los residuos fácilmente degradables favorecieron la actividad de la población de microorganismos <sup>57</sup> .
CALIDAD Y TIEMPO DEL COMPOST BIOSÓLIDO AL VARIAR LAS PROPORCIONES Y EL PESO DE LOS SUSTRATOS	Este estudio indagó acerca de los efectos de la variación de proporciones de sustratos y pesos de los montículos, sobre la calidad y tiempo de compostaje de biosólidos <sup>58</sup> .	Se presentaron diferencias significativas en los parámetros de calidad con respecto a los sustratos y pesos del montículo. Hubo tratamientos que representaron el menor tiempo de proceso, con mayor contenido de MO, NTK, P y mayor relación de C/N <sup>59</sup> .

Fuente: elaboración propia.

<sup>56</sup> BALLESTEROS TRUJILLO, Marisol. HERNÁNDEZ BERRIEL, María del Consuelo. GÓMEZ, Isaías de la Rosa. MAÑÓN SALAS, María del Consuelo. CARREÑO DE LEÓN, María del Carmen. Crecimiento microbiano en pilas de compostaje de residuos orgánicos y biosólidos después de la aireación. *Revista de investigación*. 2018, vol. 45, ISSN: 2223-4861.

<sup>57</sup> *Ibíd.*

<sup>58</sup> JUÁREZ ROBLES, Beatriz. GÓMEZ, Isaías de la Rosa. MAÑÓN SALAS, María del Consuelo. HERNÁNDEZ BERRIEL, María del Consuelo. VACA PAULÍN, Rocío. DE LA FUENTE, Jorge Lugo. Calidad y tiempo de compostaje de biosólidos al variar las proporciones y pesos de los sustratos. *Revista de investigación*. 2017, vol.23 no.3 Chapingo.

<sup>59</sup> *Ibíd.*

**Cuadro 5.** Antecedente de biosólidos en procesos termoquímicos

Título de la Investigación	Breve Descripción	Resultados Obtenidos
<p>PIROLISIS DE BIOSÓLIDOS EN HORNO ROTATORIO</p>	<p>Este estudio es una tesis en la cual se realiza una evaluación de las principales variables que influyen en el proceso de pirólisis de biosólidos en un horno rotatorio con el fin de incrementar las reacciones secundarias de conversión de alquitranes en la fase volátil generada. Lo anterior es enfatizado en poder obtener biocombustible a partir de biosólidos<sup>60</sup>.</p>	<p>Se logró evidenciar el valor de los biosólidos a través de la conversión termoquímica, representando una alternativa de aplicación sostenible para esos residuos. A su vez, se comprendió que a través del proceso de pirólisis de biosólidos se reduce la masa de esos residuos obteniendo productos con valor energético importante<sup>61</sup>.</p>
<p>ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO DE LA PIRÓLISIS DE BIOSÓLIDOS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EL SALITRE</p>	<p>Este proyecto es una tesis que comprende la caracterización fisicoquímica de los biosólidos, en donde se realiza un análisis próximo y elemental, poder calorífico y un estudio de la composición de los biosólidos mediante espectroscopia de absorción atómica. Además, se analizaron las cenizas de los biosólidos consecuentes de la pirólisis, por medio de difracción y fluorescencia de rayos x. Lo anterior con el fin de evaluar el comportamiento de los biosólidos cuando se somete a cambios de temperatura altos<sup>62</sup>.</p>	<p>En esta investigación se logró obtener resultados de la pérdida de masa del biosólido con respecto a la temperatura observando señales de baja intensidad que corresponden a fluctuaciones las cuales se hacen más fuertes a temperaturas mayores a 600 °C <sup>63</sup>.</p>

**Fuente:** elaboración propia.

<sup>60</sup> MENDOZA GENEY, Pirólisis de biosólidos en horno rotatorio. [En línea] Monografía. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C, 2016. [Consultado 20, junio, 2020]. Disponible en: <<http://www.bdigital.unal.edu.co/56019/1/91511684.2017.pdf>>.

<sup>61</sup> *Ibíd.*

<sup>62</sup> ARAGONEZ GONZÁLEZ, Martha Patricia. Op. Cit.

<sup>63</sup> *Ibíd.*

Por otra parte, también es necesario mostrar antecedentes con base en las alternativas que se emplean con mayor frecuencia en la actualidad, para que así se entienda mejor la capacidad de aplicación que presentan los biosólidos.

**Cuadro 6.** Antecedentes de biosólidos como aplicación en suelos

<b>Título de la Investigación</b>	<b>Breve Descripción</b>	<b>Resultados Obtenidos</b>
EFECTO DE LA APLICACIÓN DE BIOSÓLIDOS SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE UN SUELO CULTIVADO CON CAÑA DE AZÚCAR	El estudio se basó en el efecto que se produce al aplicar biosólidos en un suelo con características vérticas donde se cultivó caña de azúcar, analizando el comportamiento de las propiedades físicas del suelo, así como el rendimiento del cultivo <sup>64</sup> .	Se observó que el pH fue alcalino y se obtuvieron contenidos altos de N, P, K y bases intercambiables, pero con desbalance en la relación Mg/K lo cual podría llevar a que se afecte la absorción de esos nutrientes por parte de las plantas y por ende perjudique al cultivo. Se concluyó que la estructura del suelo se afectaría y que los biosólidos empleados funcionarían mejor en suelos básicos gracias a las características que presentaron <sup>65</sup> .
EVOLUCIÓN DE ALGUNAS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DE UN SUELO CALCÁREO ACONDICIONADO CON BIOSÓLIDOS	En este estudio se buscaba establecer la dosis adecuada de lodos de depuradora para un cultivo de maíz en un suelo calcáreo, es decir, un suelo con alto contenido de carbonato de calcio <sup>66</sup> .	Al aplicar los biosólidos en el suelo calcáreo, se notó el incremento de las características vegetativas del cultivo, y a su vez se evidenció una disminución del pH a lo largo del experimento, lo cual garantiza una mayor disponibilidad de los nutrimentos presentes en el mismo <sup>67</sup> .

**Fuente:** elaboración propia.

<sup>64</sup> WALDEMAR PEÑARETE M. SILVA LEAL, Jorge. URRUTIA C, Norberto. DAZA T, Martha. TORRES LOZADA, Patricia. Efecto de aplicación de biosólidos sobre las propiedades físicas de un suelo cultivado con caña de azúcar. *Acta Agronómica*. 2013, 62(3), p. 251-260, SSN: 0120-2812.

<sup>65</sup> *Ibíd.*

<sup>66</sup> ROBLEDO SANTOYO. MALDONADO TORRES, R. ESPINOSA HERNÁNDEZ, V. RUBIÑOS PANTA, E. OJEDA TREJO, E. HERNÁNDEZ ACOSTA, E. CORLAY CHEE, L. Evolución de algunas características químicas de un suelo calcáreo acondicionado con biosólidos. *Revista de investigación*. Universidad Autónoma Chapingo, México, 2011.

<sup>67</sup> *Ibíd.*

## 3.2 MATRIZ DE DECISIÓN

Con el propósito de hacer una selección apropiada para una alternativa de aprovechamiento de biosólidos, en esta parte del capítulo se llevará a cabo un tipo de matriz de decisión, siguiendo una metodología que permita establecer todas las partes de la matriz y así estructurarla.

La matriz que se abordará en esta investigación se conoce como matriz de priorización.

**3.2.1 Definición de la matriz.** La matriz de priorización consiste de una serie de opciones y criterios en un arreglo de filas y columnas que al enfrentarlas permiten realizar una elección, utilizando una ponderación<sup>68</sup>. El éxito de la matriz de priorización depende de que los criterios elegidos sean apropiados al igual de la calificación y ponderación que se realice. Existen varias formas para disponer de la matriz de priorización, que su complejidad depende de la cantidad de opciones que se establezcan. Entre las ventajas de esta matriz se encuentra que es flexible, es decir que puede involucrar pocas o muchas opciones y puede involucrar pocos o muchos criterios. Además, este tipo de matriz facilita el consenso, quiere decir que cuando es difícil ponerse de acuerdo brinda una solución viable<sup>69</sup>.

**3.2.2 Definición del objetivo para la matriz.** Es muy necesario tener en cuenta y de manera clara qué se busca saber con la matriz de priorización, ya que aventurar en una elección sin conocer exactamente que se pretende, causaría dudas en el desarrollo de la matriz.

Sabiendo lo anterior, se puede establecer que en este proyecto el principal objetivo de la matriz es: Seleccionar una alternativa de aprovechamiento de biosólidos dentro de unas opciones ya planteadas anteriormente, para así poder abordar su estudio a profundidad.

**3.2.3 Opciones para la matriz.** Como se determinó anteriormente, las opciones que se estudian en este capítulo son solo dos, por lo que la matriz de priorización resulta ligera de desarrollar y más enfocada a los criterios que se establezcan, aun así, ofreciendo una la elección pertinente. De acuerdo a lo explicado con base en los usos particulares de los biosólidos, entre las opciones candidatas para el aprovechamiento de biosólidos se encuentran: El compostaje de biosólidos y la pirólisis de biosólidos. Vale la pena recordar que son estas alternativas las que permiten la posibilidad de desarrollar un escalamiento.

---

<sup>68</sup> INGENIO EMPRESA. Análisis y mejora de procesos: Matriz de priorización. [Sitio Web]. La entidad. [Consultado 1, julio, 2020]. Disponible en: <<https://ingenioempresa.com/matriz-de-priorizacion/>>.

<sup>69</sup> Ibíd.

**3.2.4 Criterios de decisión.** Los criterios que se emplean son especialmente aquellos que se necesitan para abordar un escalamiento industrial donde se resalten las ventajas que ofrecen tanto el compostaje como la pirólisis.

La escogencia de estos criterios está basada en el planteamiento del problema de este proyecto con el fin de encontrar argumentos que mitiguen aquellas problemáticas que los biosólidos ofrecen; a su vez el desarrollo que se ha llevado de esta investigación otorga una mejor comprensión de la temática y, por ende, se puede establecer criterios necesarios para escoger la alternativa para biosólidos pertinente. Los criterios que se utilizarán para desarrollar la matriz son:

- **Experiencias con la alternativa de aprovechamiento.** Se refiere a la historia, la variedad de conocimiento respecto a la alternativa utilizada y los antecedentes que se encuentran.
- **Factibilidad del uso de biosólido con base a sus propiedades.** Destaca la posibilidad de emplear un biosólido en cuanto a sus parámetros de humedad y pH, entre otros, a su vez teniendo en cuenta la regulación existente referente a las características y su aplicación.
- **Menores costos involucrados.** Hace referencia a la viabilidad en cuanto a los costos que implica la implementación de la alternativa de aprovechamiento.
- **Menor Impacto negativo ambiental.** Destaca posibles efectos negativos sobre el ecosistema en donde se está llevando a cabo la implementación.
- **Menor Impacto negativo social.** Describe posibles efectos negativos sobre el área social o circundante del espacio de aplicación de la alternativa (olores, plagas, emisiones, ruido de la maquinaria).

**3.2.5 Ponderación de los criterios y las opciones.** Para esta parte del capítulo se establecerá la forma de valorar los criterios y opciones, junto con el peso porcentual que cada criterio representa, haciendo la respectiva justificación. La importancia de la ponderación en la matriz radica en que ofrece un discernimiento numérico para poder seleccionar la opción de aprovechamiento más apropiada.

En el cuadro 7 se evidencian los parámetros de evaluación con su debido valor, los cuales serán utilizados para establecer una respectiva calificación de los criterios y opciones ya establecidos anteriormente, por otra parte, es necesario conocer el nivel de importancia que cada criterio establecido presenta, por lo que en el cuadro 8 se implica el peso porcentual de cada criterio y la explicación de aquello.

**Cuadro 7.** Criterios de calificación para el aprovechamiento de biosólidos

Evaluación	Valor
ALTO (A)	3
MEDIO (M)	2
BAJO (B)	1

Fuente: elaboración propia.

**Cuadro 8.** Peso porcentual de criterios para el aprovechamiento de biosólidos

Criterio	Peso	Justificación
Experiencias con la alternativa de aprovechamiento.	12%	Los antecedentes de biosólidos son importantes como guía para la implementación de una alternativa, pero no es el aspecto más relevante a la hora de una evaluación técnica.
Factibilidad del uso de biosólido con base a sus propiedades.	8%	Habiendo estudiado en el capítulo anterior las características de los biosólidos, se pudo entender que su caracterización es flexible y conlleva a que se pueda emplear el biosólido para diferentes aplicaciones, por lo que es muy poco probable que presente dificultades en la implementación de las alternativas establecidas en este capítulo.
Menores costos involucrados.	40%	Este criterio contiene el mayor peso porcentual debido a que para la selección de la alternativa principalmente se evalúan los gastos involucrados, donde se tienen en cuenta todos los costos relacionados a la implementación de la alternativa, tales como la planta de operación, puesta en marcha del proceso, personal requerido, equipos, suministro de recursos, entre otros que se presenten.
Menor Impacto negativo ambiental.	20%	Es necesario velar por la seguridad del ambiente, ya que su protección es de las principales causas por las que se pretende establecer una buena disposición de biosólidos, debido a esto se le debe considerar un buen valor porcentual de peso a este criterio.
Menor Impacto negativo social.	20%	Al igual que el ambiente, la sociedad también representa gran relevancia en su protección, por lo que se debe, ante todo brindar la protección de la salud de las personas. Por consiguiente, el peso porcentual debe ser considerable para este criterio.
<b>TOTAL</b>	<b>100%</b>	-

Fuente: elaboración propia.

Para soportar los porcentajes establecidos anteriormente, este proyecto se basó en una tesis desarrollada en Cali, Colombia<sup>70</sup>; en donde también se realiza una

<sup>70</sup> TORRES VALENCIA, Lina Paola. Desarrollo de una metodología para la identificación de alternativas de manejo de los biosólidos de la planta de tratamiento de agua residual de Cañaveralejo (PTAR – C) de Santiago de Cali. [En línea] Tesis. Universidad Autónoma de Occidente, Santiago de Cali, 2019. p.57. [Consultado 9, octubre, 2020]. Disponible en: < <http://red.uao.edu.co:8080/bitstream/10614/11376/5/T08597.pdf>>.

matriz de decisión para implementar diferentes alternativas de uso con biosólidos de la PTAR Cañaveralejo. Allí también se fomentan los criterios usados en este proyecto y representan jerarquía con respecto a su valor conceptual a la hora de implementar una alternativa de aprovechamiento con biosólidos.

**Cuadro 9.** Valores correspondientes a criterios de decisión para biosólidos

Criterio	COMPOSTAJE		PIRÓLISIS	
	Valor	Justificación	Valor	Justificación
Experiencias con la alternativa de aprovechamiento.	<b>A = 3</b>	El compostaje es una de las alternativas que más antecedentes de biosólidos presenta.	<b>B = 1</b>	No se presenta gran variedad de investigaciones referente a la pirólisis de biosólidos.
Factibilidad del uso de biosólido con base a sus propiedades.	<b>A = 3</b>	Normalmente los biosólidos que se compostan no presentan dificultad en cuanto a su humedad, y el pH es el apropiado para el proceso, además de que las características que contienen aportan los nutrientes necesarios.	<b>A = 3</b>	La valorización energética emplea biosólidos de todos los tipos en especial los de clase C, por lo que las propiedades generalmente siempre serán adecuadas para realizar pirólisis.
Menores costos involucrados.	<b>M = 2</b>	El compostaje es una alternativa que requiere de altos gastos, pero son menores a los que representan las opciones de valorización energética.	<b>B = 1</b>	La pirólisis es de las alternativas más costosas gracias a que requiere de implementar energía y de equipos de gran calibre.
Menor Impacto negativo ambiental.	<b>M = 2</b>	El compostaje mitiga el impacto ambiental de cierto modo, ya que brinda opciones para disponer favorablemente de los biosólidos al ambiente. Pero aun así implica complicaciones ambientales.	<b>M = 2</b>	La pirólisis presenta la problemática de generar emisiones de gases al ambiente pero a su vez reutiliza el biosólido como fuente alterna de energía.
Menor Impacto negativo social.	<b>B = 1</b>	El compostaje involucra la formación de plagas y malos olores, además de una logística operacional amplia.	<b>M = 2</b>	La emisión de gases son perjudiciales para la salud humana, pero pueden ser controlados por la planta.

**Fuente:** elaboración propia.

Observando el cuadro 9, se puede denotar tanto el valor numérico como el conceptual que representa cada alternativa de aprovechamiento de biosólidos con respecto a cada criterio establecido.

**3.2.6 Selección de la mejor opción.** Para finalizar la selección de la alternativa de aprovechamiento de biosólidos, a continuación, se mostrará la matriz de priorización con todos sus parámetros correspondientes y previamente establecidos de forma adecuada, evidenciando los resultados que se obtuvieron.

**Cuadro 10.** Matriz de priorización para el aprovechamiento de biosólidos

<b>Criterio</b> \ <b>Opciones</b>	<b>Compostaje</b>	<b>Pirólisis</b>
Experiencias con la alternativa de aprovechamiento.	<b>ALTO</b>	<b>BAJO</b>
Valor Porcentual	12%	
<b>Ponderado</b>	0,36	0,12
Factibilidad del uso de biosólido con base en sus propiedades.	<b>ALTO</b>	<b>ALTO</b>
Valor Porcentual	8%	
<b>Ponderado</b>	0,24	0,24
Menores costos involucrados.	<b>MEDIO</b>	<b>BAJO</b>
Valor Porcentual	40%	
<b>Ponderado</b>	0,8	0,4
Menor Impacto negativo ambiental.	<b>MEDIO</b>	<b>MEDIO</b>
Valor Porcentual	20%	
<b>Ponderado</b>	0,4	0,4
Menor Impacto negativo social.	<b>BAJO</b>	<b>MEDIO</b>
Valor Porcentual	20%	
<b>Ponderado</b>	0,2	0,4
<b>TOTAL</b>	<b>2</b>	<b>1,56</b>

**Fuente:** elaboración propia

Se observa con base en la matriz desarrollada que, en los resultados totales, el compostaje presenta mayor ponderación con un valor de 2 frente a 1,56 de la pirólisis, por lo que se ve que la alternativa para aprovechar biosólidos más apropiada según los criterios planteados es el proceso de compostaje.

Se deduce que estos resultados se dieron debido a que para la pirólisis se tenía pocos criterios calificados como valor alto, lo cual disminuyó su ponderación, además sabiendo que el criterio más importante es el referente a costos involucrados, y allí la pirólisis obtuvo una calificación baja.

Aunque el compostaje presenta también dificultades para su aplicación en términos industriales (capacidad instalada, facilidad del cambio de condiciones a las que se debe operar, factor tiempo, logística requerida, entre otros), contiene aspectos que contrarrestan las problemáticas (aprovechamiento de un gran porcentaje del residuo que se emplea como materia prima, beneficios para la parte agrícola, solución inmediata para las empresas que producen biosólidos, transformación de residuos en alternativas de aprovechamiento, entre otros), por lo que resultó ser la alternativa más apropiada para ser escalada industrialmente frente a la pirólisis que aunque también presenta ventajas, las dificultades debido a su peso de complicación (gasto energético y por ende altos costos, tecnología sofisticada, falta de antecedentes del proceso, emisión de gases), hacen que sea la alternativa menos viable.

Finalmente, al desarrollar la matriz de decisión se pudo entender la importancia de los criterios que están involucrados a la hora de optar por una alternativa de aprovechamiento para así poder estudiar las distintas escalas a las cuales se pueda trabajar.

## 4. ESCALAMIENTO A NIVEL INDUSTRIAL

En este capítulo se describe con más detalle la alternativa seleccionada que es el compostaje para el aprovechamiento de los biosólidos, y proponer su escalamiento a nivel industrial únicamente de carácter teórico.

### 4.1 DESCRIPCIÓN DE LA ALTERNATIVA SELECCIONADA

Con base en el capítulo anterior, se concluyó que el compostaje es la alternativa más viable frente a la pirólisis según criterios de decisión, y por ende en esta parte del capítulo se evidenciará los fundamentos del compostaje y características importantes.

**4.1.1 Compostaje.** Abarca todos los residuos orgánicos e inorgánicos desechados por los seres humanos o animales que se disponen en un proceso biológico exotérmico en presencia de oxígeno para descomponer la materia orgánica presente<sup>71</sup>. La idea principal de realizar el compostaje es reducir el volumen ocupado por los residuos y además este permite la optimización de los recursos sin requerir de tecnologías avanzadas para su recuperación, generalmente se debe tener en cuenta varios parámetros para favorecer la actividad de los microorganismos como se observa en la tabla 25 y que son la temperatura, el pH, el contenido de carbono y nitrógeno disponible, porosidad, entre otros<sup>72</sup>.

**Tabla 26.** Parámetros iniciales del compostaje

Parámetro	Condiciones
Porosidad	Cerca del 30%
Humedad	50 - 70%
Temperatura	50 - 65°C
Oxígeno	15 - 21 %
pH	6 - 8

**Fuente:** AGENCIA DE RESIDUS DE CATALUNYA. Guía práctica para el diseño y la explotación de plantas de compostaje [En línea]. Bogotá D.C, 2007. p.8. [Consultado 16, agosto, 2020]. Disponible en: <contrastbcn.com>.

Los parámetros de mayor importancia en proceso de compostaje son el contenido de nitrógeno y carbono presente, la cantidad de humedad, oxígeno y los diferentes microorganismos que intervienen en este procedimiento.

<sup>71</sup> TORRES Patricia, PÉREZ Andrea, ESCOBAR Juan C, URIBE Iris E, IMERY Ricardo. Compostaje de biosólidos de plantas de tratamiento de aguas residuales. [En línea]. Bogotá D.C, 2007. p.267 [Consultado 16, agosto, 2020]. Disponible en: <[https://www.researchgate.net/publication/250983004\\_Compostaje\\_de\\_biosolidos\\_de\\_plantas\\_de\\_tratamiento\\_de\\_aguas\\_residuales\\_Plant\\_biosolids\\_composting\\_of\\_wastewater\\_treatment](https://www.researchgate.net/publication/250983004_Compostaje_de_biosolidos_de_plantas_de_tratamiento_de_aguas_residuales_Plant_biosolids_composting_of_wastewater_treatment)>.

<sup>72</sup> AGENCIA DE RESIDUS DE CATALUNYA. Guía práctica para el diseño y la explotación de plantas de compostaje [En línea]. Bogotá D.C, 2007. p.8. [Consultado 16, agosto, 2020]. Disponible en: <Primera de noviembre 2016 contrastbcn.com>.

Por otra parte, existe una cadena de recirculación entre el compost que se forma y el que se recircula al proceso, el cual da origen a la formación de dióxido de carbono agua y calor.

**4.1.2 Fases del compostaje.** Al descomponer el contenido de carbono y nitrógeno, los microorganismos carecen de nutrientes esenciales para su crecimiento y tienen a desaparecer en poco tiempo, por tanto, las bacterias desprenden el calor el cual es medible a través de las variaciones de temperatura a lo largo del tiempo. Según la temperatura que es generada durante el proceso, se da paso a tres fases indispensables en el compostaje, aparte de una fase de maduración de duración variable.

Estas tres fases llevan el nombre de: Fase Mesófila, fase termófila y fase de enfriamiento. Para profundizar cabe resaltar que el compostaje es un proceso metabólico que se lleva a cabo empleando microorganismos en presencia de oxígeno, con el propósito de aprovechar el nitrógeno y el carbono presentes en la mezcla y así producir biomasa, por tanto, a partir de la biomasa se puede producir un sustrato sólido con menor cantidad de carbono y nitrógeno pero a su vez más estable<sup>73</sup>.

Si se desea obtener compostaje de calidad, es necesario supervisar adecuadamente cada una de las etapas, debido a que intervienen procesos físicos, biológicos y microbiológicos, donde este último componente juega un papel importante en la transformación de la materia orgánica que se desea compostar. Por otro lado, se deben reconocer diferentes variables como la temperatura, porque es fundamental para el crecimiento de los microorganismos y de esta forma realicen su actividad biológica para reproducirse crecer y morir.

- **Fase Mesófila.** Principalmente es conocida como una fase de corta duración entre dos y ocho días, en donde el material de partida comienza el proceso de compostaje a temperatura ambiente y en poco tiempo la temperatura aumenta hasta 45°C. Este aumento de temperatura se da gracias a la actividad microbiana, donde los microorganismos proveen de nutrientes esenciales para su desarrollo<sup>74</sup>.
- **Fase Termófila o de higienización.** Durante el compostaje se llega a un punto en el que el material alcanza temperaturas mayores a los 45°C, y allí se remplazan los microorganismos mesófilos por aquellos microorganismos que crecen a temperaturas mayores y se conocen generalmente como bacterias termófilas, estas se encargan de transformar el nitrógeno en amoníaco.

---

<sup>73</sup> ROMÁN Pilar, MARTÍNEZ María M, PANTOJA Alberto. FAO. Manual de compostaje del agricultor - Experiencias en américa latina. Oficina Regional para América Latina y el Caribe, Santiago de Chile, 2013. p.22. ISBN 978-92-5-307844-8.

<sup>74</sup> Ibid. p.23.

La fase termófila se conoce como fase de higienización debido a que el calor que se genera en esta fase elimina bacterias como *Salmonella spp* presente en las heces fecales de los seres humanos. Gracias a esta fase, la temperatura que se produce es mayor a 50 °C aproximadamente, dando lugar a la posibilidad de destruir organismos contaminantes como los quistes y huevos de helminto, esporas de hongos fito patógenos y semillas de malezas que pueden encontrarse en el material de partida<sup>75</sup>.

- **Fase de enfriamiento o Mesófila II.** En el compostaje al transcurrir un buen tiempo de proceso, los microorganismos comienzan agotar los nutrientes esenciales y carecen de alimentos para poder crecer y multiplicarse por lo cual las fuentes de carbono se agotan haciendo que se disminuya la temperatura, para alcanzar la fase mesofílica es complicado llegar a las temperaturas estipuladas (40 - 45°C), por tal motivo se presenta la fase de enfriamiento o agotamiento, allí se siguen degradando polímeros como la celulosa y aparecen algunos hongos visibles a simple vista<sup>76</sup>.
- **Fase de Maduración.** Según la Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura, es una etapa en la cual se pueden demorar varios periodos de tiempo y generalmente la temperatura que se emplea en el ambiente, durante este proceso se producen reacciones secundarias de condensación y polimerización de los compuestos de carbono, dando paso a la formación de ácidos húmicos y fúlvicos<sup>77</sup>.

**Figura 6.** Fases del compostaje



**Fuente:** AGENCIA DE RESIDUS DE CATALUNYA. Guía práctica para el diseño y la explotación de plantas de compostaje [En línea]. Bogotá D.C, 2007. p.11. [Consultado 16, agosto, 2020]. Disponible en: <Primera de noviembre 2016 contrastbcn.com>.

<sup>75</sup> Ibid. p.23.

<sup>76</sup> Ibid. p.24.

<sup>77</sup> Ibid. p.24.

**4.1.3 Monitoreo durante el compostaje.** Sabiendo que el compostaje es un proceso biológico en el cual están involucrados microorganismos, es necesario tener en cuenta varios de los parámetros mencionados anteriormente porque afectan su crecimiento y reproducción. Entre los más importantes se encuentran el oxígeno, la humedad, y temperatura. El proceso de compostaje es proporcional al sistema de compostaje que se emplee<sup>78</sup>.

- **Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>).** El dióxido de carbono subproducto del proceso de compostaje, se forma gracias a la presencia de oxígeno en la biomasa, si bien el oxígeno se encarga de oxidar y transformar a la materia orgánica que contiene alto contenido de carbono. Durante la operación de compostaje se puede producir de 2 a 3 kilos de Dióxido de Carbono por cada tonelada<sup>79</sup>.
- **Humedad.** Los microorganismos presentes en el compostaje necesitan de agua para poder sobrevivir, el agua es indispensable para la vida, por tanto, es esencial en cualquier ser vivo para nutrirse mediante la membrana celular. La humedad en una planta de compostaje es un parámetro importante porque esta define las condiciones de entrada o el hábitat a los microorganismos para poder desarrollarse, si la humedad del compostaje es inferior a los 55% por tanto a este valor las condiciones son aptas para habitar y desarrollarse libremente, porque cuentan con la abundancia de nutrientes, la actividad de las bacterias va a hacer menos, por tanto, se va a requerir mayor tiempo. Es importante medir la humedad porque se puede llevar un control de las condiciones iniciales del proceso evitando pérdidas o excesos que afecten el compostaje. Según la teoría consultada, el rango ideal para el proceso es de 45-60% porque satisface las necesidades en cada una de las tres etapas del proceso biológico del compost<sup>80</sup>. Para obtener la medición de la humedad en el compostaje, se puede utilizar un tensiómetro de baja tensión.
- **Temperatura.** Para esta variable que es uno de los parámetros más importantes y fundamentales para el crecimiento de los microorganismos porque a su vez es un factor limitante de las actividades microbianas y en cada una de las fases del compostaje. Dicha temperatura afecta o proporciona diferentes atributos, puede acelerar un proceso o volverlo más lento. Cuando aumenta la temperatura favorece la descomposición de la materia orgánica y eliminan algunos agentes patógenos que puede contener la mezcla. Incidiendo de manera indirecta a la higienización apto para utilizarse en la agricultura<sup>81</sup>. En la tabla 27 se puede observar datos de temperatura para eliminación de patógenos en el compostaje.

---

<sup>78</sup> Ibid. p.25.

<sup>79</sup> Ibid. p.26.

<sup>80</sup> Ibid. 23.

<sup>81</sup> FERNANDEZ Carlos. Proyecto de Diseño de un biorreactor para la producción de compost a partir de Biorresiduos. p.27. [Consultado 20, agosto, 2020]. Disponible en: <<http://repositori.uji.es/xmlui/bitstream/handle/10234/183933/TFG%20C.Pastor.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>.

Existe un termómetro profesional conocido como K-Thermocouple Thermometer para medir la temperatura en el compostaje, el cual utiliza sondas termopar tipo-K para realizar mediciones de temperatura en 2 rangos; de (50,0 a 199,99) °C y de (200 a 1350) °C. Para una mayor precisión en la medición, el termómetro lleva incorporado un microprocesador<sup>82</sup>.

**Tabla 27.** Temperatura en la eliminación de patógenos

Microorganismo	Temperatura	Tiempo de exposición
<i>Salmonella spp</i>	55 °C	1 hora
	65 °C	15-20 minutos
<i>Escherichia coli</i>	55 °C	1 hora
	65 °C	15-20 minutos
<i>Brucella abortus</i>	55 °C	1 hora
	62 °C	3 minutos
<i>Parvovirus bovino</i>	55 °C	1 hora
<i>Huevos de ascaris lumbricoides</i>	55 °C	3 días

**Fuente:** JONES, P. MARTÍN, M. 2003. A review of the literature on the occurrence and survival of pathogens of animals and humans in green compost. In: Health IfA, editor. Oxon, UK2003. p.33.

- **pH.** Esta variable se ve afectada por las características que conlleva el material que se va a compostar, por que presenta un comportamiento en cuanto a cómo se va crecer o cómo se desea activar la presencia microbiana en el cultivo. “La mayor actividad bacteriana se produce a pH 6,0-7,5, mientras que la mayor actividad fúngica se produce a pH 5,5-8,0. El rango ideal es de 5,8 a 7,2”<sup>83</sup>. En los primeros estadios del proceso, el pH se acidifica por la formación de ácidos orgánicos. En la fase termófila, debido a la conversión del amonio en amoníaco, el pH sube y se alcaliniza el medio, para finalmente estabilizarse en valores cercanos al neutro<sup>84</sup>. Para obtener valores de pH en el compostaje, se puede utilizar un pH-metro que contiene una sonda que permite la medición.
- **Relación C: N.** Esta relación actúa como un indicador importante para evaluar el desarrollo y calidad del compostaje, que también varía a lo largo del proceso, siendo una reducción continua, con valores óptimos desde 35:1 a 15:1<sup>85</sup>. Esta relación debe calcularse matemáticamente.

<sup>82</sup> INFOAGRO. [Sitio Web]. [Consultado 6, octubre, 2020]. Disponible en: <[https://www.infoagro.com/instrumentos\\_medida/medidor.asp?id=13024&\\_termometro\\_profesional\\_economico\\_para\\_compost\\_y\\_semisolidos\\_con\\_2\\_canales\\_tienda\\_on\\_line](https://www.infoagro.com/instrumentos_medida/medidor.asp?id=13024&_termometro_profesional_economico_para_compost_y_semisolidos_con_2_canales_tienda_on_line)>

<sup>83</sup> ROMÁN Pilar, Op. Cit. Manual de compostaje de agricultor. p.30.

<sup>84</sup> Ibíd. 30.

<sup>85</sup> POSADA María y PULIDO María. Factibilidad del uso de compostaje como alternativa de tratamiento para los residuos orgánicos expuestos a medicamentos de cuarta generación. p 27 [Consultado 25, junio, 2020]. Disponible en: <[https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1814&context=ing\\_ambiental\\_sanitaria](https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1814&context=ing_ambiental_sanitaria)>.

La tabla 28, describe un resumen de los parámetros del compostaje descritos anteriormente.

**Tabla 28.** Resumen de los parámetros de compostaje

Parámetro	Rango ideal al comienzo (2-5 días)	Rango ideal para compost en fase termofílica II (2-5 días)	Rango ideal de compost maduro (3-6 meses)
C:N	25:1 - 35:1	15/20	10:1 – 15:1
Humedad	50% - 60%	45% - 55 %	30% - 40%
Concentración de Oxígeno	10%	10%	10%
pH	6,5 - 8,0	6,0 - 8,5	6,5 - 8,5
Temperatura	45 - 60 °C	45°C	T ambiente
Densidad	250 - 400 kg/m3	<700 kg/m3	<700 kg/m3
Materia Orgánica (Base Seca)	50% - 70%	>20%	>20%
Nitrógeno Total (Base seca)	2,5 - 3%	1 - 2%	1%

**Fuente:** ROMÁN Pilar, MARTINEZ María y PANTOJA Alberto. Manual de compostaje de agricultor. p 23 ISBN 978-92-5-307845-5. PDF. [Consultado, 17, agosto, 2020]. Disponible en: < <http://www.fao.org/3/a-i3388s.pdf>>.

Sabiendo que esta investigación pretende desarrollar un escalado a nivel industrial, es necesario conocer qué ventajas presenta un biosólido después de ser compostado, por lo que el siguiente cuadro evidencia las diferencias entre un biosólido sin compostar y un compostado.

**Cuadro 11.** Diferencias del biosólido en el compostaje

Biosólido antes de compostar	Biosólido después de compostar
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Contiene microorganismos patógenos que afectan su uso.</li> <li>- Presenta complicaciones para el sector agrícola o afines, si el biosólido se dispone inmediatamente.</li> <li>- Ocupan gran cantidad de espacio.</li> <li>- Es un biorresiduo que no puede ser aprovechado económicamente ya que no es posible venderlo.</li> <li>- Debido a su alta degradabilidad biológica, no es posible que sea almacenado por mucho tiempo, por lo que se le debe asignar un uso lo más rápido posible.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La fase termófila ayuda a eliminar aquellos microorganismos patógenos que no resisten altas temperaturas.</li> <li>- El proceso biológico realizado hace que la disposición del biosólido para el sector agrícola o afines sea óptimo.</li> <li>- Cuando se obtiene el producto terminado su volumen ocupa menos espacio con respecto al inicio del proceso.</li> <li>- El producto terminado a base de biosólido puede ser rentable ya que es posible emplear su venta una vez adquiera propiedades útiles para la industria agrícola y pecuaria.</li> </ul>

**Fuente:** elaboración propia.

## 4.2 REQUERIMIENTOS PARA EL ESCALADO DE COMPOSTAJE

Para llevar la alternativa de compostaje a gran escala se debe tener en cuenta una serie de lineamientos que permitan establecer de manera apropiada la disposición de biosólidos como compostaje, por lo que en esta parte del capítulo se presentarán aquellos lineamientos y se realizará su respectiva descripción.

Esta parte de la investigación se hará basada en la guía práctica para el diseño y explotación de plantas de compostaje, desarrollada por la agencia de residuos de Catalunya<sup>86</sup>. Cabe mencionar que para el compostaje existen dos tipos de opciones para su procesamiento, sistemas abiertos que es desarrollado en pilas de compostaje y obedece a grandes cantidades de material a compostar y sistemas cerrados que se emplean en recipientes, generalmente para usar a nivel familiar.

Por tal motivo la opción favorable para el proyecto es la de pilas de compostaje ya que se estudiarán toneladas de biosólidos y por ende su logística representa complejidad.

**4.2.1 Logística Involucrada.** Para implementar una planta de compostaje existen una serie de lineamientos que hay que considerar para establecer una mejor propuesta, basados en la cantidad de biosólido que va a ingresar al proceso, ubicación de la planta, infraestructura de instalación, equipos y maquinaria.

- **Ubicación de la planta:** Con la finalidad de mitigar el impacto social y ambiental negativo y también problemáticas de gestión operacional, se recomienda que la instalación de la planta de compostaje se haga alejada de zonas inundables, zonas con freáticos muy superficiales, núcleos habitados y cauces de ríos<sup>87</sup>. La instalación podría emplearse en zonas rurales o semirurales, que ofrezcan vías de acceso con capacidades para vehículos de gran tonelaje y áreas extensas ya que se empleará toneladas de biosólidos en grandes proporciones.
- **Infraestructura de instalación:** La planta de compostaje debe contar con una valla perimetral que delimite toda la instalación para mejor seguridad, zona de limpieza y desinfección de vehículos, sistemas para el control de proceso de compostaje, sistemas de recogida y gestión de lixiviados, aguas sucias y pluviales, zonas de almacenamiento, entrada para la materia prima y salida para el producto terminado, sistemas de canalización y balsa o balsas, y depósitos de recogida de lixiviados, aguas sucias y aguas pluviales limpias<sup>88</sup>.

---

<sup>86</sup> AGENCIA DE RESIDUOS DE CATALUNYA. Guía práctica para el diseño y la explotación de plantas de compostaje [En línea]. Bogotá D.C, 2007. p.14. [Consultado 18, agosto, 2020]. Disponible en: <Primera de noviembre 2016 contrastbcn.com>.

<sup>87</sup> Ibíd. 14.

<sup>88</sup> Ibíd. 17.

**4.2.2 Etapas del proceso.** Para operar una planta de compostaje se requiere de una serie de procesos que garanticen la obtención de compost de buena calidad, por consiguiente, en esta parte del capítulo se explicará cada etapa involucrada para operar el proceso de compostaje a gran escala.

Inicialmente, en una planta de compostaje se emplea una etapa que consiste en la recepción de la materia prima y el almacenamiento, allí es donde se recibe el material a compostar, teniendo en cuenta la descarga del material que se puede hacer directamente en una zona de almacenamiento o en una zona intermedia desde donde se trasladarán hasta la zona de tratamiento, a su vez en esta etapa se realiza el registro del material junto con el protocolo pertinente y el pesaje del material<sup>89</sup>. Para esta etapa se puede adaptar la preparación de los materiales que se vayan a emplear como estructurante y también la limpieza de camiones que transportan la materia prima.

La siguiente etapa del proceso se conoce como etapa de pre tratamiento y se debe a un mezclado del material de partida con un material que funciona como llenante, con el fin de mejorar las propiedades del material a compostar. Esta etapa principalmente busca que la mezcla se obtenga en condiciones óptimas de porosidad, estructura, humedad, pH, proporción de materia orgánica biodegradable y relación C/N, para así iniciar y completar el proceso de compostaje exitosamente<sup>90</sup>.

Después del pre tratamiento comienza la etapa de descomposición en donde ya se desarrollará el compostaje y se produce la descomposición biológica de las moléculas que son fáciles de degradar con una liberación de energía ya que aquí se presenta la fase termófila en donde se presenta aumento de la temperatura del material y por ende la evaporación del agua contenida en este material, también se presenta una disminución inicial del pH por formación de ácidos orgánicos<sup>91</sup>. Esta etapa es importante para estabilizar parcialmente e higienizar el material de partida con el fin de brindar un ámbito óptimo para el desarrollo de los microorganismos.

La siguiente etapa se conoce como etapa de maduración en donde se desarrolla la descomposición de materia orgánica, esto indica que no existe consumo elevado de oxígeno ni alta liberación de energía. Se debe tener precaución especialmente a temperaturas demasiado elevadas y sequedad excesiva<sup>92</sup>.

Cuando se termine la etapa de maduración, se da vía a una etapa llamada post tratamiento la cual involucra operaciones que son necesarias para separar los

---

<sup>89</sup> Ibíd .20.

<sup>90</sup> Ibíd .33.

<sup>91</sup> Ibíd .45.

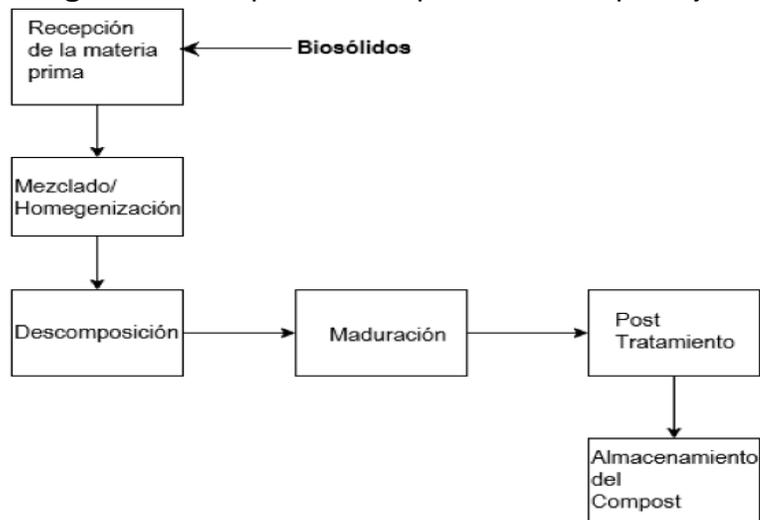
<sup>92</sup> Ibíd .55.

impropios del compost generado, recuperar el estructurante si es de interés hacerlo y a su vez mejorarles sus características físicas, obtener productos aptamente comercializables y ofrecer una determina presentación del producto<sup>93</sup>.

Finalmente, en una planta de compostaje se debe integrar la etapa de almacenamiento del compost producido, teniendo en cuenta el tiempo de almacenamiento con el fin de que se pueda gestionar las emergencias logísticas, la trazabilidad del producto producido y el control o la reducción de la incidencia del polvo y su dispersión<sup>94</sup>.

Para mejor entendimiento del proceso, el siguiente diagrama explica las etapas en una planta de compostaje.

**Diagrama 2.** Etapas en una planta de compostaje



**Fuente:** elaboración propia

**4.2.3 Maquinaria.** Dentro de la maquinaria más relevante para un proceso de compostaje, se encuentra: La trituradora para el material estructurante, la mezcladora, máquinas volteadoras, cribas, ensacadoras, distribuidores y espaciadores. Hay que destacar que en las plantas de compostaje normalmente se cuenta con una máquina transportadora del material a compostar de una etapa del proceso a otra.

Cabe resaltar que, dentro de estos grupos de maquinaria, existen varios modelos y tipos, que las escogencias de ellos dependen de la planta de compostaje que se implemente y a su vez de la logística y costos involucrados.

El siguiente cuadro ilustra la maquinaria común en un proceso de compostaje.

<sup>93</sup> Ibíd. 63.

<sup>94</sup> Ibíd. 71.

**Cuadro 12.** Maquinaria Implicada en un proceso de compostaje

Equipo	Imagen	Función
TRITURADORAS PARA EL MATERIAL ESTRUCTURANTE		Reducir el tamaño de partícula del material.
MEZCLADORAS DE COMPOST		Homogenizar el material de partida con el material estructurante.
MAQUINAS VOLTEADORAS DE COMPOST		Realizar el volteo del compost para brindarle aireación.
CRIBAS DE COMPOST		Eliminar impropios del producto terminado, también haciendo más fino el polvo obtenido.
ENSACADORAS DE COMPOST		Empacar el producto terminado.
DISTRIBUIDORAS DE COMPOST		Transportar el compost de un lugar a otro.
ESPACIADORES DE COMPOST		Brindar una debida organización del producto terminado.

Fuente: elaboración propia.

### 4.3 DIMENSIONAMIENTO DEL PROCESO DE COMPOSTAJE

Finalmente, se evidenciará una propuesta de escalado para operar una planta de compostaje de biosólidos, basado en las etapas anteriormente descritas con criterios fundamentales para una debida operación de la planta. Como se mencionó anteriormente, se empleará la temática con base a sistemas abiertos de compostaje, y a su vez se tendrá en cuenta un material estructurante además del material de partida que son los biosólidos.

**4.3.1 Cantidad de biosólidos para operar en una planta de compostaje.** Para establecer el flujo másico de biosólidos que se llevará a cabo en una planta de compostaje, se tendrá en cuenta los datos de producción de biosólidos generados en las plantas de tratamiento de Colombia (PTAR: El Salitre, Cañaveralejo, San Fernando) estudiadas anteriormente en el capítulo 2, con el fin de operar la planta de compostaje con una cantidad de biosólido referente a dichas plantas de tratamiento. Por consiguiente, la tabla 28 evidencia la producción diaria aproximada de biosólidos en estas plantas de tratamiento de aguas residuales.

**Tabla 29.** Producción de biosólidos en Colombia

PTAR	Biosólido Generado (ton/día)
Salitre	148,5
Cañaveralejo	140
San Fernando	90
<b>Promedio</b>	<b>126,16</b>

Fuente: elaboración propia

La tabla anterior establece un promedio de la producción de biosólido en las plantas de tratamiento de Colombia estudiadas en el presente proyecto, por lo cual ese valor obtenido que fue de 126,16 ton/día se utilizará como criterio principal para el escalado de una planta de compostaje aproximándolo a 130 ton/día para factibilidad de desarrollo.

**4.3.2 Recepción y almacenamiento de los biosólidos.** El diseño para una planta de compostaje debe contar con:

- **Pesaje:** Se debe disponer de una báscula para el pesado de los camiones que llegan con biosólidos.
- **Zona de descarga:** En esta zona se deben tener en cuenta las características del biosólido que llega a la planta (humedad, granulometría, pastosidad, etc.) y la capacidad adecuada de los volúmenes a manipular; a su vez se preverá espacios flexibles y compartimiento para los casos en que no se lleve a pre tratamiento el biosólido por algún motivo.

- Zona para el material estructurante: Es necesario incorporar el espacio dedicado a la preparación (trituration) de material que será utilizado como estructurante. Por lo tanto, se pueden encontrar tres espacios bien delimitados que son: La recepción y el almacenamiento del material tal como llega, su preparación y su almacenamiento.
- Zona de almacenamiento previo: Para esta zona se debe tener en cuenta los factores que limitan la capacidad de almacenamiento y la adaptación a los sistemas de vaciado y transporte hasta el pre tratamiento. Para ello se es necesario disponer de una solera que almacenará los biosólidos, diseñada preferiblemente con una pendiente adecuada para conducir los lixiviados hasta el sistema de almacenamiento. Es recomendable que una vez se recibe el material, se dirija lo más pronto posible a la zona de pre tratamiento.
- Zona de almacenamiento temporal: Esta zona puede emplearse al aire libre siempre que la planta brinde seguridad para la emisión de olores, además hay que tener en cuenta que en caso de líquido que presenten fuerte olores, estos deben almacenarse en una balsa y disponer de un sistema de aireación superficial.

Como el material que se va a compostar son biosólidos, particularmente se conoce que son de alta degradabilidad pre estabilizados<sup>95</sup>, es decir que son susceptibles a ser biodegradados con facilidad y han tenido un tratamiento biológico previamente. Por tal motivo el almacenamiento de estos residuos de alta degradabilidad debe efectuarse en naves, silos o depósitos cerrados, dotados con sistemas de extracción y tratamiento de gases. Es importante prever la metodología de trabajo referente a esta parte del proceso y a su vez el tiempo que deben permanecer los biosólidos confinados. Es importante tener en cuenta que la duración y capacidad máximas para el almacenamiento de los residuos de alta degradabilidad no puede superar los tres días en caso de que más de un 80 % de su peso sean residuos pre estabilizados, a su vez la capacidad de almacenamiento no puede superar el triple de la capacidad diaria de tratamiento prevista para la instalación, por cuestiones de emergencia<sup>96</sup>.

**4.3.3 Pre tratamiento.** Para esta etapa se debe considerar la preparación del material estructurante, la humectación si la mezcla no llega a presentar la humedad adecuada para compostar y por último la eliminación de improprios gruesos para no contaminar el material que se va a compostar. Por consiguiente, el pre tratamiento se realiza en:

---

<sup>95</sup> AGENCIA DE RESIDUS DE CATALUNYA. Guía práctica para el diseño y la explotación de plantas de compostaje [En línea]. Bogotá D.C, 2007. p.26. [Consultado 18, agosto, 2020]. Disponible en: <Primera de noviembre 2016 contrastbcn.com>.

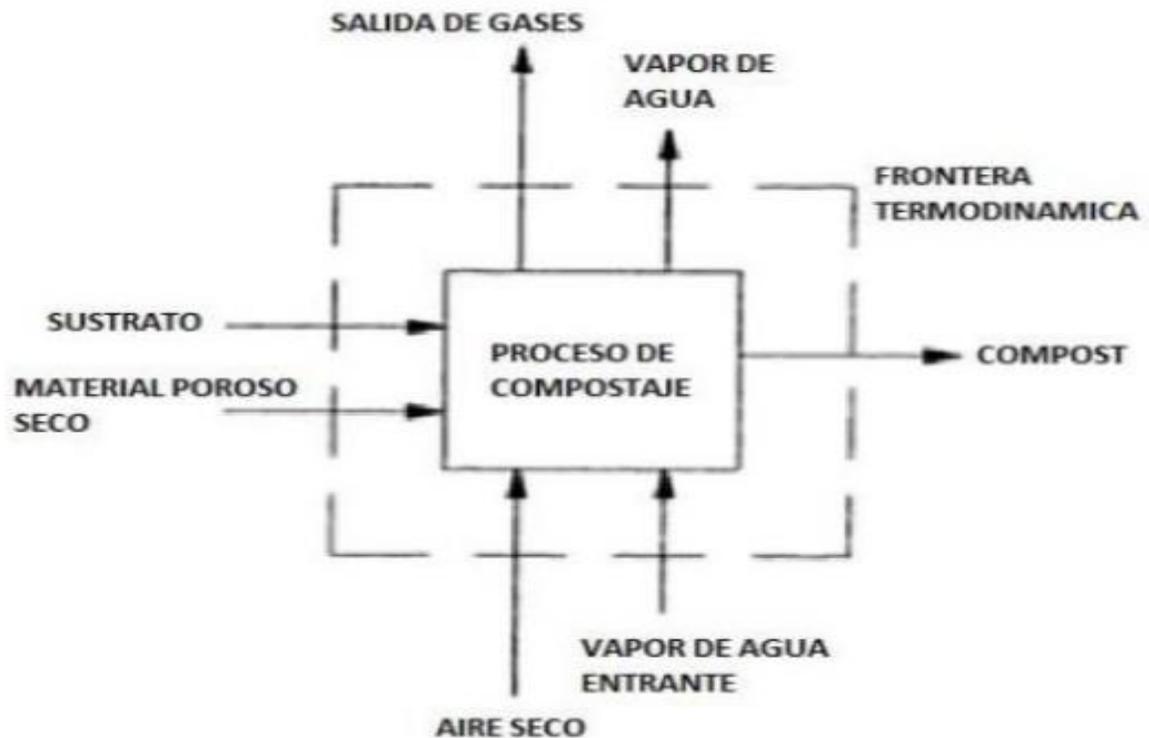
<sup>96</sup> Ibíd. 27.

- Pre mezcla: Aquí se realiza la agregación primaria y habitualmente incompleta de los constituyentes de la mezcla que se destinará a compostaje en las proporciones necesarias.
- La mezcla: En donde se realiza la homogenización ya total que permite obtener la mezcla correspondiente.
- Almacenamiento de la mezcla: En caso de que no se dirija inmediatamente al proceso de descomposición.

**4.3.4 Etapa de descomposición.** Con el fin de llevar a cabo esta etapa, que biológicamente es la más activa, es necesario atender parámetros referentes a temperaturas excesivas, condiciones anaeróbicas y pérdidas innecesarias del nitrógeno en forma de  $\text{NH}_3$ .

Por consiguiente, en esta etapa es importante involucrar la aireación forzada por medio de ventiladores, con el fin de aportar  $\text{O}_2$  suficiente para garantizar la actividad microbiana. La siguiente figura esquematiza el balance de masa en una pila de compostaje.

**Figura 7.** Descripción superficial de las corrientes involucrada en el compostaje



**Fuente:** QUISHPE SACANCELA, María Elizabeth. Elaboración de compost a partir de estiércol de cuy (*Cavila porsellus*) y su aplicación en la comuna lumbisí (sector cumbayá). [En línea]. Tesis. Universidad Central del Ecuador, Quito, 2017. p.20.

Por otra parte, se debe considerar la duración de la etapa de descomposición en donde generalmente se necesitan de 2 semanas si más del 80% del biosólido se ha pre estabilizado y de 4 semanas si más del 20% no se ha pre estabilizado<sup>97</sup>.

En esta investigación se recomienda llevar a cabo para las pilas de compostaje, sistemas estáticos debido a que disminuyen los gastos en maquinaria que transporte el material y maquinaria que realice volteo a su vez evitando logística sofisticada, también teniendo en cuenta que estos sistemas son adecuados para material compostable en grandes proporciones.

En el dimensionamiento del proceso de compostaje, se tendrá en cuenta que el tiempo para lograr el compost de biosólido será de 4 semanas por los que pasadas las cuatro semanas debe estar disponible el espacio para un nuevo ciclo de compost, en el caso que no sea así, se debe disponer de una zona de almacenamiento temporal para el biosólido.

Basado en antecedentes para biosólidos de la PTAR El Salitre, según HAZEN AND SAWYER P.C<sup>98</sup>.

El valor de diseño para desarrollar compostaje, estima una producción de biosólido en promedio para el 2020 de 127 ton/día equivalente a 460 m<sup>3</sup>/día, por lo que estos valores serán tenidos en cuenta para determinar el área requerida del proceso de compostaje, usando por seguridad un valor 465 m<sup>3</sup>/día.

Normalmente las pilas de compost cuentan con un ancho entre (2 - 4) m y un alto entre (1,5 - 2) m, por lo que serán valores tenidos en cuenta para el dimensionamiento. Se recomienda dejar mínimo 4 m de espacios entre pilas y se destina un largo de pila de 20 m.

---

<sup>97</sup> Ibíd.46.

<sup>98</sup>HAZEN AND SAWYER P.C, NIPPON KOEI. Producto Final – Anexo No. 20. Alternativas para el Manejo y Disposición de Biosólidos de la PTAR Salitre. [En Línea]. Bogotá D.C, 2011. pág. 20,49. [Consultado 28, agosto, 2020].

A continuación, se muestra una propuesta de las dimensiones de la fase de descomposición en el compostaje.

**Cuadro 13.** Dimensiones para el sistema de compostaje o descomposición

Dimensionamiento zona de compostaje	Unidad	Escenario optimista
Cantidad de biosólido a compostar	ton/día	130
Volumen aproximado que ocupa el biosólido por día	m <sup>3</sup>	465
Ancho de la pila	m	3
Alto de la pila	m	2
Largo de la pila	m	20
Nº Pilas por día	-	4
Nº Pilas por mes	-	80
Separación entre pilas	m	4
Tiempo de compostaje	semanas	4
Área para las pilas de compostaje	m <sup>2</sup>	4.800

**Fuente:** elaboración propia.

Respecto al cuadro anterior, para hallar el área requerida para el proceso de descomposición se tuvo que;  $465 \text{ m}^3 / (3 \times 2 \times 20) \text{ m}^3 = 3,88$  que será el número de pilas por días por lo que se aproximó a un valor de 4 pilas/día. Si la planta funciona cinco días a la semana sin tener en cuenta fines de semana, entonces se tendrán 20 días de operación al mes, por lo que;  $20 \text{ días} \times 4 \text{ pilas/días} = 80 \text{ pilas}$  al mes. Finalmente, el área total neta requerida será;  $80 \text{ pilas} \times 3 \text{ m}$  (ancho de las pilas)  $\times 20 \text{ m}$  (largo de las pilas)  $= 4.800 \text{ m}^2$  de espacio para operar las pilas de compostaje en el periodo de un mes.

Basta aclarar que en esta área calculada no se tuvo en cuenta la separación entre pilas, ya que depende de cuántas pilas se deseen disponer por fila y por columna; tampoco se tuvo en cuenta el área de circulación que ya es criterio de la planta de compostaje según como le quede mejor posible operar.

**4.3.5 Etapa de maduración.** Para esta etapa, se debe establecer:

- La superficie necesaria.
- Las alternativas tecnológicas para la etapa.
- La aireación forzada.
- Una estructura con cubierta fija o sin cubierta.
- La incorporación de líquidos.

Es muy importante que la planta de compostaje maneje de manera apropiada y responsable los lixiviados que son los líquidos que generan los biosólidos ya sea en la recepción, en el almacenamiento, en las operaciones de pre mezcla y mezcla o durante las etapas de descomposición o de maduración.

**4.3.6 Post tratamiento.** En esta etapa es importante considerar la posibilidad de confinamiento del material resultante de la maduración, a su vez hay que tener en cuenta que los materiales que pueden resultar del post tratamiento son el compost, el estructurante y los rechazos. Uno de los principales propósitos de esta etapa es recuperar el material estructurante, por consiguiente, en el post tratamiento está involucrado:

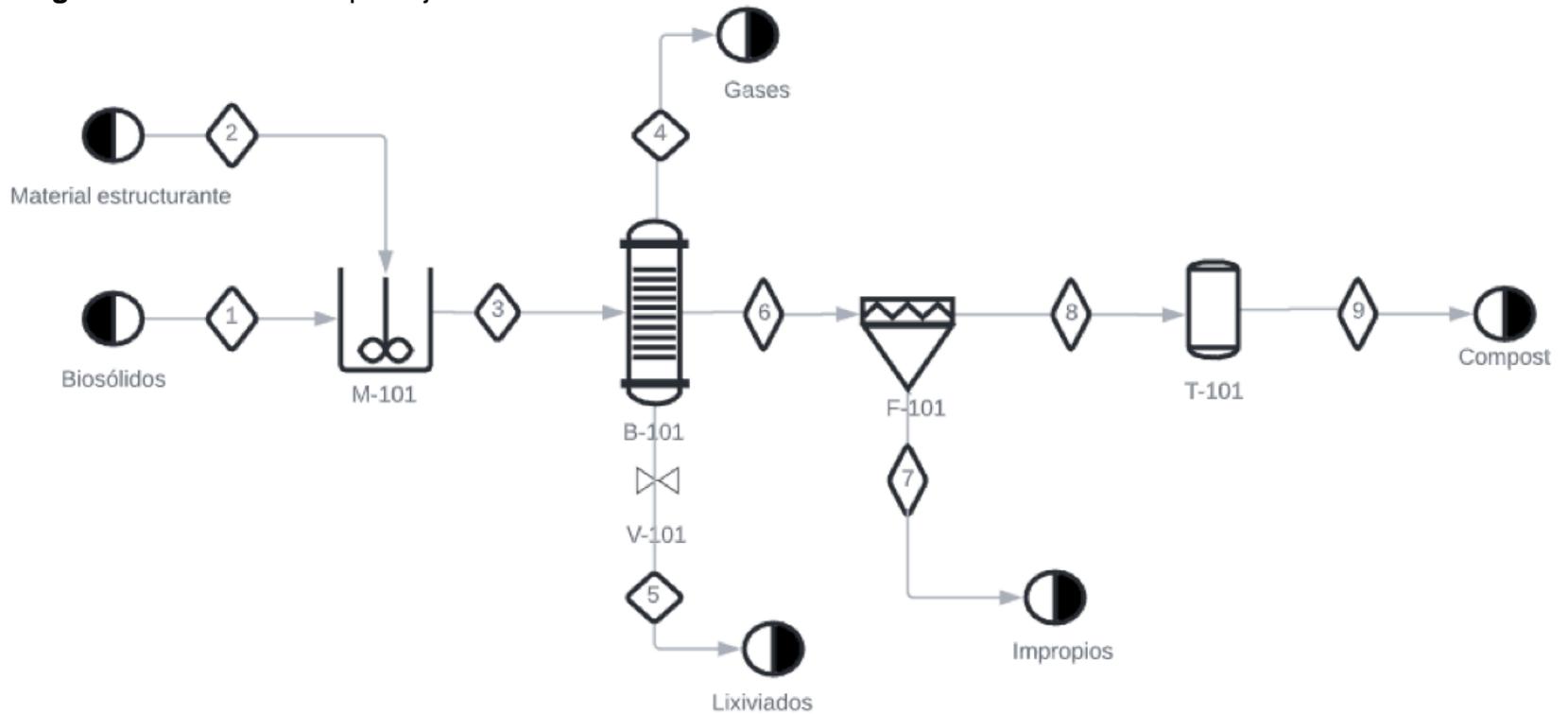
- Cribado: En donde eliminan impropios en el material de interés.
- Acondicionamiento del estructurante recuperado.
- Preparación de mezclas para comercializar: También se determina la granulometría del producto a comercializar.
- El empaquetado.

**4.3.7 Almacenamiento del compost.** Para finalizar con éxito el compostaje la planta debe tener en cuenta:

- La duración de almacenamiento del compost maduro.
- Las características del almacén.
- Las alternativas tecnológicas para el desarrollo de la etapa.
- Las instalaciones y equipos complementarios.

- **Obtención de compost a partir de biosólidos.** El proceso de obtención de compost por medio de transformación biológica de los biosólidos se encuentra sintetizado en el diagrama 3, y su el balance de masa correspondiente se presenta en la figura 8.

**Diagrama 3.** PFD de compostaje con biosólidos



**Fuente:** elaboración propia.

**Figura 8.** Balance de masa del compost con biosólidos y nomenclatura

<b>Corriente</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>
Temperatura (K)	273,15	273,15	273,15	273,15	273,15	273,15	273,15	273,15	273,15
Presión (Kpa)	101,325	101,325	101,325	101,325	101,325	101,325	101,325	101,325	101,325
<b>Componente</b>	<b>Fracción Másica</b>								
Biosólido	1	0	0,6	0,6	0,6	0,6	0	1	1
Materia Estructurante	0	1	0,4	0,4	0,4	0,4	1	0	0
<b>Nomenclatura</b>	<b>Equipo</b>	<b>Función</b>							
B-101	Biorreactor	Desarrolla la etapa de descomposición y maduración del biosólido acondicionado							
F-101	Filtro tipo criba	Elimina los impropios del producto terminado							
M-101	Mezclador	Homogeniza el biosólido con el material estructurante							
T-101	Tanque de almacenamiento	Almacena el producto terminado.							
V-101	Válvula	Controla los lixiviados salientes del proceso de descomposición.							

**Fuente:** elaboración propia.

Como se pudo detallar, el dimensionamiento de una planta de compostaje conlleva varios requerimientos y procesos fundamentales para obtener un producto de calidad; por tal motivo, al momento de diseñar una planta de compostaje se debe evaluar a profundidad sus necesidades, la materia prima y el presupuesto disponible; por ende, el dimensionamiento y uso de maquinaria está sujeto a la comodidad y optimización que pretenda la empresa que desee operar una planta de compostaje.

En esta investigación se evidenciaron las etapas que debe tener una planta de compostaje y con ello los requerimientos más importantes, así mismo ofreciendo unos valores de dimensionamiento para la etapa de descomposición de compostaje referente a biosólidos producidos en Colombia, teniendo en cuenta antecedentes encontrados.

Fue posible también asimilar que para dimensionar una planta de compostaje es necesario hacer un estudio a profundidad en donde se tengan en cuenta todos aquellos aspectos sociales, ambientales y económicos que son de los más relevantes para desarrollar un escalado.

Frente a la etapa de descomposición se sugiere el uso 80 pilas para proceder al compostaje lo cual tendrá un tiempo de 4 semanas para que se renueve el ciclo y se siga compostando; para este caso se necesita un área total de 4.800 m<sup>2</sup> lo cual implica que la ubicación de la planta debe disponer de un terreno bastante amplio para abordar con éxito el proceso de una planta de compostaje, por tal motivo se recomienda ubicar la planta en una zona rural.

Para concluir la investigación en este capítulo fue posible mostrar los criterios del compostaje junto con los requerimientos y necesidades que requiere el escalado de esta alternativa, a su vez de una propuesta de dimensionamiento para compostar biosólidos que se producen en plantas de tratamiento de aguas residuales, junto con un diagrama de proceso y un balance de masa, permitiendo abordar una temática que procure mitigar el impacto negativo o la problemática que presentan los biosólidos actualmente.

## 5. CONCLUSIONES

- Teniendo en cuenta las características fisicoquímicas y microbiológicas consultadas y analizadas de las plantas de tratamiento estudiadas, se concluye que el contenido de metales pesados y de microorganismos patógenos en biosólidos de Colombia representan bastante similitud e implican que se clasifiquen en clase A y B según el decreto 1287 del 2014 de la normativa aplicable de biosólidos.
- Mediante un análisis comparativo se observó que las características de un biosólido dependen del tipo de tratamiento y metodología que emplee la planta donde se producen, a su vez del agua residual que tratan. Por ejemplo, la PTAR El Salitre emplea un tratamiento primario químicamente asistido y reporta valores aproximados de contenido de zinc de 1.067 mg/kg y de cobre de 188,4 mg/kg, diferentes a los encontrados en la PTAR San Fernando que emplea un tratamiento secundario, y que reporta valores aproximados en el contenido de zinc de 1.220 mg/kg y en el de cobre de 108 mg/kg, resultando los valores de la PTAR San Fernando mayor para el zinc y menor para el cobre con respecto a la PTAR El Salitre.
- Basado en el análisis de la matriz de priorización, se seleccionó la alternativa de aprovechamiento más viable en cuanto los criterios evaluados (económico, ambiental, social, entre otros), la cual cumplió la función de brindar el resultado que permitiera deducir la alternativa de aprovechamiento para posteriormente estudiarla a profundidad. Siendo el compostaje la alternativa seleccionada, se pudo entender también que el compostaje es una herramienta para mejorar las propiedades de un biosólido y de esta forma las aplicaciones que se les puede dar en el sector agrícola, pecuario y afines.
- Gracias a los conocimientos técnicos y al análisis de una diversidad de factores involucrados en la gestión de biosólidos, fue posible presentar un escalamiento a nivel industrial de una alternativa de aprovechamiento, en donde se evidenciaron aspectos técnicos necesariamente útiles para desarrollar el escalado, además de una propuesta de dimensionamiento que destacó un área de 4.800 m<sup>2</sup> como espacio para operar las pilas de compostaje en el periodo de un mes. Posterior a esto se desarrolló un diagrama de flujo en donde se tuvo 9 corrientes, un biorreactor, un área de mezclado, un equipo de cribado, y un tanque de almacenamiento, adjuntando el balance de masa que le compete.

## 6. RECOMENDACIONES

- Como complemento al presente documento, se recomienda desarrollar el análisis de costos que representa el escalado de la alternativa de aprovechamiento evaluada técnicamente.
- Teniendo en cuenta que las características de un biosólido son cambiantes frecuentemente, se recomienda que se implemente una plataforma virtual en la se actualicen periódicamente todos los datos referentes a los biosólidos de las plantas más reconocidas de Colombia con el fin de poder acceder con factibilidad a toda la información requerida.
- Indagar en otro prototipo de matriz de decisión para la selección de una alternativa de aprovechamiento de biosólidos, con el fin de establecer otras posibilidades para evaluar criterios que involucren la aplicación de biosólidos.

## BIBLIOGRAFÍA

ACCIONA. Áreas de actividad: D&C de plantas de tratamiento de agua – EDAR ATOTONILCO (Año 2020). [Sitio Web]. Bogotá D.C. La entidad. [Consultado 20, junio, 2020]. Disponible en: <<https://www.accion-aagua.com/es/areas-de-actividad/proyectos/dc-de-plantas-de-tratamiento-de-agua/edar/atotonilco/>>.

ACUEDUCTO DE BOGOTÁ. Ambiente: Saneamiento – PTAR El Salitre. [Sitio Web]. Bogotá D.C. La entidad. [Consultado 25, febrero, 2020]. Disponible en: <<https://www.acueducto.com.co/>>.

ACUEDUCTO DE BOGOTÁ. Brochure: Línea de lodos. [Sitio Web]. Bogotá D.C. La entidad. [Consultado 28, febrero, 2020]. Disponible en: <[https://www.acueducto.com.co/wps/html/resources/PTAR/Plegable\\_tecnico.pdf](https://www.acueducto.com.co/wps/html/resources/PTAR/Plegable_tecnico.pdf)>.

ADINA et al. Bacterias indicadoras de contaminación fecal en la evaluación de la calidad de las aguas: Revisión de la literatura. [en línea]. 2013, 44(3). p.24-34. [Consultado 27, agosto, 2020]. ISSN: 0253-5688. <Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181229302004>>.

AGENCIA DE RESIDUS DE CATALUNYA. Guía práctica para el diseño y la explotación de plantas de compostaje [En línea]. Bogotá D.C, 2007. [Consultado 16, agosto, 2020].

ARAGONEZ GONZÁLEZ, Martha Patricia. Análisis termo gravimétrico de la pirólisis de biosólidos de la planta de tratamiento de agua residual el Salitre. [En línea]. Monografía. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C, 2015. [Consultado 25, junio, 2020]. Disponible en: <[http://bdigital.unal.edu.co/48357/1/1032410813.2015\\_1.pdf](http://bdigital.unal.edu.co/48357/1/1032410813.2015_1.pdf)>.

BALLESTEROS TRUJILLO, Marisol. HERNÁNDEZ BERRIEL, María del Consuelo. GÓMEZ, Isaías de la Rosa. MAÑÓN SALAS, María del Consuelo. CARREÑO DE LEÓN, María del Carmen. Crecimiento microbiano en pilas de compostaje de residuos orgánicos y biosólidos después de la aireación. *Revista de investigación*. 2018, vol. 45, ISSN: 2223-4861.

BEDOYA URREGO, Katherine. ACEVEDO RUÍZ, José M. ACEVEDO RUÍZ, Carlos A. PELÁEZ JARAMILLO, Carlos A. AGUDELO LÓPEZ, Sonia del Pilar. Caracterización de biosólidos generados en la planta de tratamiento de agua residual San Fernando, Itagüí (Antioquia, Colombia). *Revista de investigación*. 2013, volumen 15, Número 5, p. 778-790. ISSN electrónico 2539-3596. ISSN impreso 0124-0064.

BOGOTANA DE AGUAS Y SANEAMIENTO, SUEZ LYONNAISE DES EAUX - DEGREMONT ESP S.A. Elementos para una reglamentación de biosólidos. p. 6-10. [En línea]. [Consultado 18, marzo, 2020].

BOGOTANA DE AGUAS Y SANAMIENTO, SUEZ LYONNAISE DES EAUX – DEGRÉMONT ESP S.A. Planta de tratamiento el Salitre – Fase I. [En Línea]. Bogotá D.C, septiembre, 2000.

CAMPOS et al. Huevos de helmintos como indicadores de contaminación fecal en agua de riego agrícola, biosólidos, suelos y pastos. [En línea]. [Consultado 27, agosto, 2020] p.43. Disponible en: < ISSN 1727-9933>.

COLOMBIA. MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO. Decreto N° 1287. (10, julio,2014). Por el cual se establecen criterios para el uso de los biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales. En: Presidencia de la república de Colombia.

COMMITTEE ON TOXICANTS AND PATHOGENS IN BIOSOLIDS APPLIED TO LAND BOARD ON ENVIRONMENTAL STUDIES AND TOXICOLOGY DIVISION ON EARTH AND LIFE STUDIES. Biosolids Applied to Land. Washington, D.C. National Research Council of the National Academies. 2002. p.35. International Standard Book Number 0-309-08486-5.

CONCIVILES. Proyectos: Obras hidráulicas – PTAR Cañaveralejo. [Sitio WEB]. La entidad. [Consultado 5, mayo, 2020] Disponible en: <<http://www.conciviles.com/proyectos/obras-hidraulicas/planta-de-aguas-residuales-de-canaveralejo/>>.

CONINSA. Energía/Saneamiento: Planta de tratamiento San Fernando. [Sitio WEB]. La entidad. [Consultado 10, junio, 2020] Disponible en: <<https://www.coninsa.co/construccion/proyectos/energiasaneamiento/planta-de-tratamiento-san-fernando>>.

DÁGUER G, Gian Paolo. Gestión De Biosólidos en Colombia. [En línea]. Bogotá D.C. p.2. [Consultado 9, marzo, 2020].

DANE. Sistemas de información del medio Ambiente. Pastos. [En línea]. [consultado 27, agosto, 2020]. p.1-3. Disponible en: <[https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/pib/ambientales/Sima/solidos\\_suspension.pdf](https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/pib/ambientales/Sima/solidos_suspension.pdf)>.

DIRECCIÓN TÉCNICA ANTE EMCALI EICE ESP. Estudio macro tratamiento y disposición de lodos en la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR-C). [En línea]. Santiago de Cali, diciembre, 2015. Pág. 6–21.

EAAB. Informe mensual de actividades en enero. [En línea] Bogotá D.C, febrero, 2020. pág. 18-26. [Consultado 25, abril, 2020].

EAAB. Producto 2. Plan de acción inmediato y alternativas futuras para el manejo de los biosólidos generados en el tratamiento de las aguas residuales de la ciudad de Bogotá. [En línea] Bogotá D.C, noviembre, 2010. Versión 3.0. pág. 26-29. [Consultado 21, abril, 2020].

EPM. Nuestra empresa: Nuestras plantas – Agua, PTAR San Fernando. [Sitio WEB]. La entidad. [Consultado 6, junio, 2020] Disponible en: <<https://www.epm.com.co/site/home/nuestra-empresa/nuestras-plantas/agua>>.

FERNANDEZ Carlos. Proyecto de Diseño de un biorreactor para la producción de compost a partir de Biorresiduos. p.27. [Consultado 20, agosto, 2020]. Disponible: <<http://repositori.uji.es/xmlui/bitstream/handle/10234/183933/TFG%20C.Pastor.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>.

FIGUEROA OIM, VERDUGO RA. Mecanismos moleculares de patogenicidad de Salmonella sp. Microbiología. 2005;47(1-2): p.25-42. <[https://www.medigraphic.com/pdfs/lamicro/mi-2005/mi05-1\\_2e.pdf](https://www.medigraphic.com/pdfs/lamicro/mi-2005/mi05-1_2e.pdf) mucha hp>.

GAMARRA et al. Relación Carbono-nitrógeno en suelos de sistemas silvopastoriles del chaco. [En línea]. [Consultado, 27, agosto, 2020] p.47. Disponible en: <<https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i46.134>>.

GONZALEZ Lourdes. Nitrógeno amoniacal, importancia de su determinación. [En línea]. [Consultado 27, agosto, 2020] p.43. Disponible en: <<https://core.ac.uk/download/pdf/234020135.pdf>>.

GUZMÁN, Carolina. CAMPOS, Claudia. Indicadores de contaminación fecal en biosólidos aplicados en agricultura. Universitas Scientiarum [en línea]. 2004, 9(1). p.59-67. [Consultado 27, agosto, 2020]. ISSN: 0122-7483. Disponible en: <<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49990107>>.

HAZEN AND SAWYER P.C, NIPPON KOEI. Producto Final – Anexo No. 20. Alternativas para el Manejo y Disposición de Biosólidos de la PTAR Salitre. [En Línea]. Bogotá D.C, 2011. pág. 20,3-20,13 [Consultado 26, marzo, 2020].

IDEAM. Demanda química de oxígeno por reflujos cerrados y volumétrica. En línea [Consultado, 27, agosto, 2020] Disponible en: <<http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Demanda+Qu%C3%ADmica+de+Ox%C3%ADgeno..pdf/20030922-4f81-4e8f-841c-c124b9ab5adb>>.

IDEAM. Nitrógeno total en el agua por el método de Kjendhal-electrodo de amoniaco. Pastos [En línea]. [Consultado 27, agosto, 2020]. p.1. Disponible en: <<http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Nitr%C3%B3geno+Total+en+agua+M%C3%A9todo+Kjeldahl+Electrodo+de+Amoniaco.pdf/6eac7192-9d88-41cf-b4f0-7b5332467901>>.

INFOAGRO. [Sitio Web]. [Consultado 6, octubre, 2020]. Disponible en: <[https://www.infoagro.com/instrumentos\\_medida/medidor.asp?id=13024&\\_termometro\\_profesional\\_economico\\_para\\_compost\\_y\\_semisolidos\\_con\\_2\\_canales\\_tienda\\_on\\_line](https://www.infoagro.com/instrumentos_medida/medidor.asp?id=13024&_termometro_profesional_economico_para_compost_y_semisolidos_con_2_canales_tienda_on_line)>.

INGENIO EMPRESA. Análisis y mejora de procesos: Matriz de priorización. [Sitio Web]. La entidad. [Consultado 1, julio, 2020]. Disponible en: <<https://ingenioempresa.com/matriz-de-priorizacion/>>.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Compendio de normas para trabajos escritos. NTC-1486-6166. Bogotá D.C. El instituto, 2018 ISBN 9789588585673 153 p.

JONES, P. MARTÍN, M. 2003. A review of the literature on the occurrence and survival of pathogens of animals and humans in green compost. In: Health IfA, editor. Oxon, UK2003.

JUÁREZ ROBLES, Beatriz. GÓMEZ, Isaías de la Rosa. MAÑÓN SALAS, María del Consuelo. HERNÁNDEZ BERRIEL, María del Consuelo. VACA PAULÍN, Rocío. DE LA FUENTE, Jorge Lugo. Calidad y tiempo de compostaje de biosólidos al variar las proporciones y pesos de los sustratos. Revista de investigación. 2017, vol.23 no.3 Chapingo.

LIMÓN MACÍAS, Juan Gualberto. Los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales, ¿problema o recurso? [En línea] Monografía. Guadalajara Jalisco, 2013. p.10. [Consultado 28, enero, 2020]. Disponible en: <[http://www.ai.org.mx/ai/images/sitio/201309/ingresos/jglm/doc\\_ingreso\\_gualberto\\_1imon\\_trabajo\\_de\\_ingreso.pdf](http://www.ai.org.mx/ai/images/sitio/201309/ingresos/jglm/doc_ingreso_gualberto_1imon_trabajo_de_ingreso.pdf)>.

LÓPEZ SÁNCHEZ, Idalia Jacqueline. ACEVEDO CIFUENTES, Diana Rocío. Ordoñez Ante, Carlos Andrés. Seguimiento a patógenos presentes en biosólidos empleado como enmienda para revegetalizar un talud. Revista Ingenierías Universidad de Medellín, 2010, vol. 9, No. 17, pp. 29-40 - ISSN 1692-3324.

MARTIN BRAULT, Jean. Caso de la PTAR Cañaveralejo Empresas Municipales de Cali (EMCALI) [En línea]. Buenos Aires, noviembre, 2018. [Consultado 15, mayo, 2020].

MENDOZA GENEY, Pirolisis de biosólidos en horno rotatorio. [En línea] Monografía. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C, 2016.

MICROLAB INDUSTRIA. Parámetros - Sólidos totales volátiles. [Sitio Web]. La entidad. [Consultado 28, agosto, 2020]. Disponible en: <<http://www.microlabindustrial.com/>>.

ORTEGA BEDOYA, Isabel Cristina. Evaluación de las interacciones físico-químicas y biodisponibilidad del cromo hexavalente en biosólidos de la planta de tratamiento de aguas residuales San Fernando - Medellín. [En línea] Tesis. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 2017. pág. 15,16 y 90.

POSADA María y PULIDO María. Factibilidad del uso de compostaje como alternativa de tratamiento para los residuos orgánicos expuestos a medicamentos de cuarta generación. [Consultado 25, junio, 2020]. Disponible en: <[https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1814&context=ing\\_ambiental\\_sanitaria](https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1814&context=ing_ambiental_sanitaria)>.

PTAR EL SALITRE. [Sitio Web]. Bogotá D.C. La entidad. [Consultado 12, abril, 2020]. Disponible en: <<https://ptarsalitre.com.co/#ptarsalitre>>.

QUINCHÍA, Adriana María. CARMONA, Dora María. Factibilidad de disposición de los biosólidos generados en una planta de tratamiento de aguas residuales combinada. Revista de investigación. 2004, 62(3), p. ISSN 1794-1237 Número 2 p. 89-108.

QUISHPE SACANCELA, María Elizabeth. Elaboración de compost a partir de estiércol de cuy (*Calvia porsellus*) y su aplicación en la comuna lumbisí (sector cumbayá). [En línea]. Tesis. Universidad Central del Ecuador, Quito, 2017. p.20.

ROBLEDO SANTOYO. MALDONADO TORRES, R. ESPINOSA HERNÁNDEZ, V. RUBIÑOS PANTA, E. OJEDA TREJO, E. HERNÁNDEZ ACOSTA, E. CORLAY CHEE, L. Evolución de algunas características químicas de un suelo calcáreo acondicionado con biosólidos. Revista de investigación. Universidad Autónoma Chapingo, México, 2011.

ROMÁN Pilar, MARTÍNEZ María M, PANTOJA Alberto. FAO. Manual de compostaje del agricultor - experiencias en América latina. Oficina Regional para América Latina y el Caribe, Santiago de Chile, 2013. 106 p. ISBN 978-92-5-307844-8.

SILVA LEAL, Jorge. BEDOYA RÍOS, Diego. TORRES LOZADA, Patricia. Efecto del secado térmico y el tratamiento alcalino en las características microbiológicas y químicas de biosólidos de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas. *Revista de investigación*. 2013, Quim. Nova, Vol. 36, No. 2, 207-214.

TORRES Patricia, PÉREZ Andrea, ESCOBAR Juan C, URIBE Iris E, IMERY Ricardo. Compostaje de biosólidos de plantas de tratamiento de aguas residuales. [En línea]. Bogotá D.C, 2007. p.267-275 [Consultado 20, junio, 2020].

TORRES VALENCIA, Lina Paola. Desarrollo de una metodología para la identificación de alternativas de manejo de los biosólidos de la planta de tratamiento de agua residual de Cañaveralejo (PTAR – C) de Santiago de Cali. [en línea]. Tesis. Universidad Autónoma de Occidente, Santiago de Cali, 2018. pág. 29-58.

TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUALES. [Sitio Web]. [Consultado, 27, agosto]. La entidad. Disponible en: <<https://tratamientodeaguasresiduales.net/etapas-del-tratamiento-de-aguas-residuales/>>.

VÉLEZ ZULUAGA, Juan Alberto. Los biosólidos: ¿una solución o un problema? Revista de investigación. p.57-71. 2007, Vol. 2 No. 2. Disponible en: <[http://lasallista.edu.co/fxcul/media/pdf/RevistaLimpia/vol2n2/PL\\_V2N2\\_57-71\\_biosolidos.pdf](http://lasallista.edu.co/fxcul/media/pdf/RevistaLimpia/vol2n2/PL_V2N2_57-71_biosolidos.pdf)>.

WALDEMAR PEÑARETE M. SILVA LEAL, Jorge. URRUTIA C, Norberto. DAZA T, Martha. TORRES LOZADA, Patricia. Efecto de aplicación de biosólidos sobre las propiedades físicas de un suelo cultivado con caña de azúcar. *Acta Agronómica*. 2013, 62(3), p. 251-260, SSN: 0120-2812. [Consultado 15, junio, 2020]. Disponible en: <<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=1699/169929773009>>.