

## **Información Importante**

La Universidad Santo Tomás, informa que el(los) autor(es) ha(n) autorizado a usuarios internos y externos de la institución a consultar el contenido de este documento a través del catálogo en línea, página web y Repositorio Institucional del CRAI-USTA, así como en las redes sociales y demás sitios web de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad.

Se permite la consulta a los usuarios interesados en el contenido de este documento, para todos los usos que tengan **finalidad académica**, siempre y cuando mediante la correspondiente cita bibliográfica se le dé crédito al trabajo de grado y a su autor, nunca para usos comerciales.

De conformidad con lo establecido en el Artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, la Universidad Santo Tomás informa que “los derechos morales sobre documento son propiedad de los autores, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.”

**Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación, CRAI-USTA  
Universidad Santo Tomás, Bucaramanga**

**Caracterización de biotransformación de lodos procedentes del tratamiento de aguas  
residuales domésticas**

**Lina Valeria Ramírez Corredor**

**Trabajo de grado para optar por el título de Química Ambiental**

**Directora**

**Alix Estela Yusara Contreras Gomez  
Ingeniera Ambiental, Msc.**

**Co- director**

**Joam Eduardo Monroy Becerra  
Químico Ambiental, Esp.**

**Universidad Santo Tomás, Bucaramanga  
División de Ingenierías y Arquitectura  
Facultad de Química Ambiental  
2020**

## Tabla de Contenido

	Pág.
Resumen	6
1. Planteamiento del problema	7
2. Justificación	8
3. Objetivos	9
3.1 Objetivo general	9
3.2 Objetivos específicos	9
4. Marco referencial	9
4.1 Marco conceptual	9
4.1.1 Lodos residuales	9
4.1.1.1 <i>Composición de lodos residuales.</i>	10
4.1.1.2 <i>Clasificación de lodos residuales.</i>	10
4.1.2 Biosólidos	11
4.1.2.1 <i>Contaminantes de biosólidos.</i>	11
4.1.3 Compostaje	12
4.1.3.1 <i>Factores de importancia en el proceso de compostaje.</i>	13
4.1.3.1.1 <i>Sustrato de partida.</i>	11
4.1.3.1.2 <i>Humedad.</i>	12
4.1.3.1.3 <i>Temperatura.</i>	13
4.2 Marco de antecedentes	15
5. Diseño metodológico	18
5.1 Muestreo de lodos residuales	18
5.1.1 Técnica de muestreo a empleada.	18
5.1.2 Conservación de las muestras.	18
5.2 Caracterización físico-químico	18
5.2.1 Humedad	18
5.2.2 Carbono orgánico oxidable	19
5.2.3 Nitrógeno total	20
5.2.4 Fósforo total	21
5.2.5 Intercambio catiónico	22
5.2.6 Capacidad de retención de agua	22
5.2.7 pH	23
5.2.8 Conductividad eléctrica	24
5.2.9 Densidad	24
5.3 Compostaje	25
5.3.1 Diseño de pilas para el compostaje.	25
5.3.2 Seguimiento y control del proceso de compostaje.	26
5.3.3 Proceso de biotransformación.	26
5.4 Determinación de metales	27
5.4.1 Determinación de Cobre (Cu) y Zinc (Zn) (ICONTEC, 2011b).	27
5.4.2 Determinación de Plomo (Pb) (ICONTEC, 2011b).	28
6. Resultados y análisis	28

6.1	Resultados caracterización físico-químico lodos, material compostado y biotransformado PTAR Floridablanca y PTAR Tunja.	28
6.1.1	Análisis lodos crudos.	29
6.1.1.1	<i>Lodos crudos PTAR Río Frío.</i>	29
6.1.1.2	<i>Lodos crudos PTAR Tunja.</i>	32
6.1.2	Análisis material compostado y biotransformado	34
6.1.2.1	<i>Compostado y biotransformado Río Frío.</i>	34
6.1.2.2	<i>Compostado y biotransformado Tunja.</i>	37
6.1.2.3	<i>Metales pesados en PTAR Río Frío y Tunja.</i>	39
6.1.2.4	<i>Parámetros microbiológicos PTAR Río Frío y Tunja</i>	42
7.	Conclusiones	42
	Bibliografía	44

## Lista de abreviaturas

C.I.C	Capacidad de intercambio catiónico
C.E	Conductividad eléctrica
M.O	Materia Orgánica
PTARD	Planta de tratamiento de aguas residuales domésticas.

### **Resumen**

Los lodos producidos en Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas –PTARD-, son considerados como productos de elevado impacto ambiental y social, pues son importantes generadores de contaminación a recursos naturales, hídrico y suelo, por su alto contenido de microorganismos patógenos y metales pesados. Esto genera la necesidad de buscar soluciones de disposición final eficientes que reduzcan dichos impactos negativos y que aporten, si es posible, un valor agregado desde el punto de vista ambiental y económico. De esta forma, el proyecto de investigación propone como alternativa para el manejo de los lodos residuales de PTARD la aplicación de un proceso de biotransformación y posterior constitución en biosólidos mediante la implementación de técnicas de compostaje utilizando larvas de escarabajo como biocatalizadores.

Durante el desarrollo de este trabajo se realizaron análisis fisicoquímicos y microbiológicos de los lodos residuales crudos provenientes de las PTARD Río Frío Floridablanca y Tunja y del producto resultante del proceso de biotransformación empleando larvas de escarabajos. Los resultados obtenidos fueron comparados con normativas nacionales que lograron establecer el cumplimiento de las variables químicas y microbiológicas analizadas, posibilitando su uso como materia prima en la producción de abonos o fertilizantes.

**Palabras Claves:** Biotransformación, escarabajos, lodos, metales, plantas de tratamiento de aguas residuales.

## 1. Planteamiento del problema

Las plantas de tratamiento de agua residuales domésticas –PTARD son sistemas que integran diferentes procesos físicos, químicos y biológicos con el único objetivo de disminuir la carga contaminante de los vertimientos de tipo doméstico y en ocasiones de tipo industrial, para sistemas compuestos, que se realizan a un determinado cuerpo hídrico receptor. En Colombia, la mayoría de estas plantas operan bajo la modalidad de digestión anaerobia, proceso del cual se obtienen subproductos como arenas, residuos sólidos, biogás y, en mayor proporción, lodos orgánicos residuales (López, 2015). Así mismo, el crecimiento poblacional registrado desde los últimos años en el país, ha generado un aumento considerable de estos subproductos en las plantas de tratamiento, transformando los métodos de eliminación de estos residuos en procesos ineficaces y costosos (Molina, Gomez & Merchan Bermudez, 2016).

Los lodos orgánicos residuales, representan un potencial riesgo para la sociedad pues están compuestos por sustancias tóxicas para los seres vivos, dentro de los cuales se encuentran metales pesados y agentes patógenos como los de mayor riesgo (Molina, Gomez & Merchan Bermudez, 2016). Dicha composición, los convierte en productos para los cuales la disposición final representa una problemática ambiental de alto impacto. Esto último, teniendo en cuenta que los métodos más empleados en Colombia son la liberación a fuentes hídricas, la producción de compostaje y la disposición en rellenos sanitarios, una opción poco viable teniendo en cuenta que según Paz Castro, Henríquez, & Freres, 2007, “con el transcurrir del tiempo tales receptáculos en los rellenos se han tornado insuficientes” además de la crisis ambiental que afronta el país por la clausura de la mayoría de los botaderos municipales (López, 2015).

La planta de tratamiento de aguas residuales domésticas PTARD Río Frío en Floridablanca, Santander es una referencia de la implementación de compostaje como medida de disposición final de lodos residuales. No obstante, según el decreto 1287 de 2014 la composición del compost obtenido lo posiciona en una categoría B, es decir, que no es adecuado para la adición en zonas cultivables debido a que algunos componentes como metales pesados -como los componentes de mayor persistencia y peligrosidad- exceden los límites establecidos.

De esta forma, se hace necesaria el desarrollo de innovación para dicho método que asegure: la obtención de beneficios normativos para las organizaciones prestadoras del servicio de

tratamiento de aguas –cumplimiento de la norma- y a su vez la disminución de problemáticas ambientales y sociales -contaminación de suelo, agua y proliferación de enfermedades- que no se cumplen desde la gestión ineficaz del momento (López, 2015).

## 2. Justificación

El compostaje es una medida de disposición final para lodos residuales que es posible debido al alto contenido de materia orgánica potencialmente aprovechable que presentan estos residuos. Esta, es una medida que de ser realizada adecuadamente podría constituir tanto con una solución eficiente a la problemática de eliminación de lodos residuales como al mejoramiento de suelos degradados (Mantilla Oviedo, 2015). De igual forma, este proceso permite la elaboración de un producto de elevada utilidad en el país –abono orgánico- teniendo en cuenta que en Colombia se destinan cerca de 4,8 millones de hectáreas para el sector agrícola (Unión Europea - Acción Social, 2011). Sin embargo, este proceso también presenta limitantes en la remoción de contaminantes de alto impacto como lo son los metales pesados y los cuales forman parte de la composición de la mayoría de lodos residuales.

La alternativa de biotransformación propuesta como medida de mejoramiento de los biosólidos obtenidos en la PTARD Río Frío consiste en la implementación de organismos escarabajos-estercoleros como biocatalizadores, dado que se conoce la capacidad de degradación de materia orgánica de dichos organismos, específicamente en su aplicación con residuos sólidos resultantes de plazas de mercado, por el desarrollo de la investigación entre la organización no gubernamental TIERRA VIVA y USTA Seccional Tunja (G. Viasus Tibamoso, comunicación personal, 2 de marzo, 2018).

Este plan de trabajo de grado hace parte del proyecto de investigación “caracterización de la biotransformación de lodos procedente de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas a partir de larvas de escarabajos” aprobado en la X convocatoria de investigación de la Universidad Santo Tomás y será financiado con recursos destinados a este proyecto.

### 3. Objetivos

#### 3.1 Objetivo general

Caracterizar el proceso de biotransformación de lodos procedentes de la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas “Río Frío” municipio de Floridablanca, Santander.

#### 3.2 Objetivos específicos

- Realizar muestreo de lodos crudos y producto final del proceso de biotransformación del lodo procedente de la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas “Río Frío”.

- Determinar las características fisicoquímicas de los lodos crudos y producto final del proceso de biotransformación del lodo procedente de la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas “Río Frío” usando las metodologías establecidas en la NTC 5167.

- Determinar las concentraciones de Zinc, Cobre y Plomo de lodos crudos y producto final del proceso de biotransformación del lodo procedente de la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas “Río Frío”.

### 4. Marco referencial

#### 4.1 Marco conceptual

**4.1.1 Lodos residuales.** El tratamiento de las aguas residuales, tanto municipales como industriales, tiene como principal objetivo remover la mayor cantidad de contaminantes presentes de los cuerpos hídricos con el fin de lograr generar el menor impacto en el medio ambiente, o bien encontrar alguna utilidad en otras actividades. No obstante, el tratamiento de estas aguas trae como consecuencia la formación de algunos productos no deseados, dentro de los cuales se encuentran los denominados lodos residuales, los cuales se definen según el decreto 1287 como “suspensión

de un sólido en un líquido proveniente del tratamiento de aguas residuales municipales”(Ministerio de Vivienda, 2014).

Según los últimos reportes, la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas PTARD Río Frío en Floridablanca, Santander recibe un volumen anual aproximado de 15.000 m<sup>3</sup> de agua residual, de lo cual se generan alrededor de 19.000 m<sup>3</sup> de lodos residuales, para una relación de 0,0013 m<sup>3</sup> de lodo por m<sup>3</sup> de agua tratada (EMPAS, 2017).

**4.1.1.1 Composición de lodos residuales.** Así mismo, el lodo de las aguas residuales, rico en nutrientes, contiene alrededor de 5% N, 3% P y 0.5% de K en peso seco y podría usarse para adicionar el suelo. El material húmico de los lodos hace de este un producto ideal en la mejora de las propiedades físicas y en la capacidad de intercambio catiónico del suelo. Sin embargo, los lodos de aguas residuales son colectores muy efectivos de metales pesados como Zinc, Cobre, Níquel, Cadmio entre otros, los cuales tienden a permanecer inmovilizados en el suelo por quelación con la materia orgánica, adsorción en minerales arcillosos y formando precipitados insolubles, tales como óxidos o carbonatos. Se ha encontrado que un elevado incremento en la utilización de lodos contaminados ha generado niveles elevados de Zinc y Cadmio en las hojas y los gramos de maíz (Manahan, 2007, pp. 238-240). Además de elevados niveles de metales pesados, los microorganismos patógenos (causantes de enfermedades) representan una importante problemática, pues pueden persistir en el lodo generado durante los procesos de tratamiento de aguas residuales. Dentro de dichos microorganismos se incluyen bacterias como *Enterobacter* y *Shigella*, y virus como los que causan la hepatitis y enterovirus (Bedoya, Acevedo, Peláez, & Agudelo, 2013).

**4.1.1.2 Clasificación de lodos residuales.** Dichos lodos pueden ser clasificados como lodos primarios y secundarios, teniendo en cuenta los procesos de los que pueden ser resultantes, es decir, tratamientos primario o secundario. Los problemas ambientales relacionados con estos productos inician con la formación de los mismos, debido a que una fracción importante de las sustancias contaminantes que se separan en los procesos de tratamiento de las aguas residuales termina allí, lo que los convierte en residuos con un elevado nivel de importancia (Oropeza García, 2006).

Tabla 1. *Parámetros medidos en lodos residuales de diferentes procesos.*

<i>Parámetros lodos</i>	<i>Tratamiento Primarios</i>	<i>Tratamiento Secundarios</i>	<i>Tratamiento terciario</i>
pH	5.5 -6.5	6.5-7.5	6.8-7.6
Contenido de agua (%)	92-96	97.5-98	94-97
SSV (%ss.)	70-80	80-90	55-65
Grasas (%ss.)	12-14	3-5	4-12
Proteínas (%ss.)	4-14	20-30	10-20
Carbohidratos (%ss.)	8-10	6-8	5-8
Nitrógeno (%ss.)	2-5	1-6	3-7
Fósforo (%ss.)	0.5-1.5	1.5-2.5	0.5-1.5
Bacterias Patógenas (NMP/100mL)	103-105	100-1000	10-100
Metales Pesados (%ss.)			
(Zn, Cu, Pb)	0.2-2	0.2-2	0.2-2

Fuente: Oropeza García, 2006.

En la mayoría de los casos, una buena parte de los lodos generados en las PTAR se eliminan de formas no adecuadas y sin ningún tratamiento, como por ejemplo vertiéndolos en los sistemas de alcantarillado, en los cuerpos de aguas, ríos, o disponiendo estos productos en botaderos municipales a cielo abierto. Es en este punto donde se genera la verdadera problemática ambiental y social, pues este tipo de disposiciones promueven la contaminación tanto de suelo, agua superficial, subterráneas como la proliferación de enfermedades por contaminación de insectos y demás vectores (Oropeza García, 2006).

**4.1.2 Biosólidos.** Los biosólidos se definen como el producto resultante de la estabilización de lodos residuales, es decir, de la disminución de capacidad de atracción de vectores y poder de fermentación. Estos, al ser productos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales, principalmente de tipo doméstico, presentan características físicas, químicas y microbiológicas que permiten que uno de sus factores más importantes sea la capacidad de reintegración a la cadena trófica. Esto último concede a los biosólidos un elevado potencial productivo tanto en el sector agrícola como en obras de recuperación de terrenos que han sido sobre degradados por erosión y contaminación (Ministerio de Vivienda, 2014).

**4.1.2.1 Contaminantes de biosólido.** Para el caso de la implementación de los biosólidos en el sector agrícola, existen diferentes factores que limitan dicha acción que corresponden principalmente a los diferentes contaminantes que pueden encontrarse en estos productos. Los

principales contaminantes que se encuentran en los lodos residuales se pueden clasificar en cuatro grupos:

**Metales.** Principalmente zinc (Zn), cobre (Cu), níquel (Ni), cadmio (Cd), plomo (Pb), mercurio (Hg) y cromo (Cr). Su potencial de acumulación en los tejidos humanos y su biomagnificación suscitan preocupaciones. Los metales están siempre presentes, en concentraciones bajas, en las aguas residuales domésticas, pero las concentraciones preocupantes son sobre todo las que se encuentran en las aguas residuales industriales (LeBlanc, Richard, & Beecher, 2009).

**Nutrientes y materia orgánica.** Su peligrosidad radica en su potencial de eutrofización para las aguas subterráneas y superficiales. Sin embargo, se pueden considerar como fertilizantes valiosos al igual que la materia orgánica (LeBlanc et al., 2009).

**Contaminantes Orgánicos.** Los plaguicidas, disolventes industriales, colorantes, plastificantes, agentes tensoactivos y muchas otras moléculas orgánicas complejas, generalmente con poca solubilidad en agua y elevada capacidad de adsorción, tienden a acumularse en los lodos (LeBlanc et al., 2009).

**Agentes patógenos.** Los agentes patógenos más importantes que se han encontrado en los lodos son las bacterias, los virus (especialmente enterovirus), los protozoos, los tremátodos, los céstodos y los nemátodos. Los residuos de animales sacrificados o muertos accidentalmente, los desechos hospitalarios y funerarios, entre otros, pueden elevar la carga y la diversidad de patógenos en el efluente (LeBlanc et al., 2009).

**4.1.3 Compostaje.** Dentro de los parámetros que sugieren una mayor preocupación ambiental, y que a su vez compromete la seguridad de la salud poblacional, se encuentran metales pesados y biológicos. De modo que el procedimiento a realizar sobre las muestras analizadas debía asegurar la estabilización de los biosólidos. Según la EPA (1999), la estabilización hace referencia a un proceso que reduce los niveles de patógenos, olor y contenido de sólidos volátiles. Dentro de los posibles métodos que menciona esta organización se encuentra el compostaje.

El compostaje, es un proceso de biotransformación en el que se genera la descomposición de diversos restos orgánicos, en condiciones controladas y por la acción de diversos grupos de

microorganismos aerobios, constituyentes prioritarios del proceso, que actúan sobre la materia orgánica en función de determinados factores abióticos y bióticos, generando un producto denominado compost, un producto final que además de ser estable presenta excelentes propiedades como fertilizante y bioestimulante (Márquez, Díaz Blanco, & Cabrera Capitán, 2005).

**4.1.3.1 Factores de importancia en el proceso de compostaje.** Ahora bien, para la realización de un buen proceso de compostaje se debe tener en cuenta la variedad de microorganismos que se desarrollen durante el proceso, para los cuales, a su vez, se depende considerar dos factores determinantes, los cuales corresponden a: el tipo de sustrato de partida, la humedad, la temperatura y las condiciones ambientales a las cuales se someta el proceso. De esta forma, dentro de la posible biota de dicho proceso se pueden identificar microorganismos aerobios mesófilos, termotolerantes y termófilos que a su vez incluyen bacterias, actinomicetos, mohos y levaduras (Márquez et al., 2005).

**4.1.3.1.1 Sustrato de partida.** El sustrato de partida o los materiales que pueden ser empleados en la preparación del compost se pueden clasificar en dos grupos: materiales húmedos y materiales secos. Los materiales húmedos son ricos en agua y sustancias con elevado aporte nutritivo con nitrógeno. Dentro de estos materiales se pueden encontrar restos de frutas, verduras, césped y poda fresca. Por otra parte, los materiales secos son principalmente compuestos de carbono, es decir, ramas, hojas secas, viruta, paja, cartón, entre otras. Como medida de aceleración del proceso de compostaje se puede agregar un componente extra que corresponde o bien a estiércol de animales de granja, exceptuando los excrementos de animales carnívoros, o compost maduro (Ayuntamiento de San Sebastian De Los Reyes, 2014).

Otros factores importantes relacionados al sustrato de partida corresponden a:

- **Tamaño de partícula:** Cuanto mayor sea la superficie expuesta al ataque microbiano mayor será la velocidad del proceso (FAO, 2013).

- **Relación C/N y C/P:** Este factor es de elevada importancia, pues influye en la velocidad del proceso y en la pérdida de amonio durante el compostaje. A una relación C/N superior a 40, la actividad biológica decrece. La relación C/P ideal se encuentra en el rango de 75 y 150, mientras que la relación N/P debe estar entre 5 y 20 (FAO, 2013).

- **Conductividad eléctrica:** La conductividad eléctrica del compost está dada por la naturaleza y composición del material de partida. La concentración de sales y la presencia de iones amonio o nitrato presentes en el material de partida promueven este factor. La CE del compost aumenta en la medida en que se genera una mayor mineralización de la materia orgánica, teniendo en cuenta que este último proceso promueve el aumento de la concentración de nutrientes (FAO, 2013).

*4.1.3.1.2 Humedad.* Teniendo en cuenta que el compostaje es un proceso de tipo biológico en el que se genera una descomposición de la materia orgánica, el agua es considerado como un factor determinante para el correcto funcionamiento del mismo, pues esta sustancia actúa como principal vía de movilidad de alimento necesario para el cumplimiento de necesidades fisiológicas básicas como la alimentación de los microorganismos que permiten dicho proceso (FAO, 2013).

Según Márquez et al., 2005, la humedad óptima para el crecimiento microbiano está entre el 50-70%. La razón es que la actividad biológica decrece mucho cuando la humedad está por debajo del 30%; superior al 70% el agua desplaza el aire de los espacios libres, reduciendo así mismo la transferencia de oxígeno y produciéndose una anaerobiosis. Esto último es un proceso que debe ser evitado pues es cuando se generan malos olores y disminuye la velocidad del proceso.

*4.1.3.1.3 Temperatura.* En la fase inicial del proceso, todo el material involucrado se encuentra a la misma temperatura, sin embargo, a medida que avanza el mismo, la actividad microbiana que se empieza a desarrollar generando calor y por lo tanto un aumento de temperatura. De esta forma, la temperatura se convierte en un factor de elevada importancia en este proceso, pues existe una relación directa entre este factor y la magnitud de degradación de la materia orgánica. La razón principal para esta relación se debe a que cada especie de microorganismos que interviene en el proceso posee un intervalo de temperatura en la cual su actividad de descomposición es óptima o decrece considerablemente. Para el caso de los mesófilos, se tiene que el rango más efectivo corresponde a 15-40°C y para los termófilos será de 40-70°C (Márquez et al., 2005).

**4.1.3.2 Ventajas ecológicas del compost.** Algunas de las ventajas ecológicas de la producción de compost corresponden a (FAO, 2013):

- Producción de menos aguas lixiviadas y gases contaminados.

- Menos consumo de terreno, menos impacto al paisaje, al suelo y a las aguas subterráneas.
- Producción de humus que puede servir como estabilizador contra la erosión.
- El compost es un fertilizador natural que no produce sobrecarga química al suelo.

#### 4.2 Marco de antecedentes

La implementación de lodos residuales como materia prima para la generación de abono orgánico ha sido un procedimiento ampliamente estudiado y utilizado en el mundo, pues además de mitigar la problemática ambiental de contaminación por parte de dichos lodos, se ha demostrado que estos nuevos productos presentan buenos resultados para el sector agrícola, promoviendo mejores características en el suelo destinado a la realización de actividades de cultivo, con respecto a otros fertilizantes.

Un primer trabajo corresponde a Bedoya, Acevedo, Peláez & Agudelo (2013) el cual se titula “Caracterización de biosólidos generados en la planta de tratamiento de aguas residuales San Fernando, Itagüí (Antioquia, Colombia)”. Este trabajo tenía como objetivo la realización de la respectiva caracterización fisicoquímica, microbiológica y parasitológica de los biosólidos generados en la PTAR San Fernando, en el municipio de Itagüí, Antioquia. La metodología empleada fue el análisis de 12 muestras de biosólidos, provenientes de la PTAR previamente mencionada, tomadas mensualmente en el periodo comprendido de enero a diciembre de 2010, con el fin de analizar la variabilidad en el contenido de macro y micro nutrientes y de las características fisicoquímicas evaluadas en los lodos residuales. Se determinó que los biosólidos generados en la planta de tratamiento San Fernando podrían ser empleados como materia prima para la realización de abono orgánico, siempre y cuando se realizaran algunos procesos de sanitización que permitieran el cumplimiento de los parámetros indicados en la norma NTC 5167 (Bedoya, Acevedo, Peláez, & Agudelo, 2013).

El trabajo previamente mencionado se relaciona con la investigación en curso debido a que en él se presentan valores de elevada importancia, los cuales están relacionados con la caracterización proporcionada de los lodos residuales que pueden ser tomados como puntos de comparación o de futuras referencia para caracterizaciones de estos productos.

Un segundo trabajo corresponde a la investigación realizada por Uwai, Okuyama, Nakano, Furukawa, Hiroshima, Azuma, Watanabe, Matsumoto, Tokiwa & Takeshita (2014) titulada “Biotransdormation of organic compounds *in vivo* using larvae of beetles (*Allomyrina dichotoma*) as biocatalysts”. El objetivo de esta investigación era determinar la viabilidad del uso de larvas de escarabajos como biocatalizadores en procesos de biotransformación de compuestos orgánicos. Para la realización de esta investigación se inició con la administración de los compuestos orgánicos a analizar pertenecientes a las fenil alcanodionas, las cuales se administraron de dos formas en las larvas de escarabajo, por boca y por inyección subcutánea. Los resultados demuestran que después de la adición de estos compuestos en las larvas se generaba una reducción de los mismos, similar al proceso ocurrido con microorganismos, razón por la cual se concluyó que el poder de reducción de las larvas se podría deber en parte a algunas bacterias que se encuentran en el intestino de estas larvas (Uwai et al., 2014).

Este trabajo se relaciona con la investigación en curso pues demuestra que las larvas de escarabajo poseen una capacidad de degradación de compuestos orgánicos importante y potencialmente aprovechable en diferentes procesos como la generación de compostaje a partir de productos como lodos residuales. De igual forma, teniendo en cuenta estos resultados surgen algunas dudas respecto a que otros compuestos pueden ser degradados por estos organismos, de modo que se puede incursionar en la búsqueda de nuevo conocimiento.

Un tercer trabajo corresponde a la investigación realizada por López Palomino (2015) la cual se titula “Manejo de biosólidos a raíz de la nueva normativa en la PTAR Río Frío, Bucaramanga (Santander)”. Esta investigación tenía como objetivo demostrar las medidas de manejo realizadas por parte de la PTAR Río Frío de los lodos residuales generados las cuales se realizaban procurando el cumplimiento del decreto 1287 de 2014, en el cual se establecen los lineamientos para el uso de los biosólidos resultantes de dichos procesos de estabilización (López, 2015).

Este trabajo se relaciona con la investigación en curso, pues en él se encuentran algunos datos de elevado interés que permitirán realizar una valoración de la metodología propuesta, en el proyecto de investigación actual, como medida de disposición final de los lodos residuales. Esta valoración consistirá en la realización de comparaciones entre las caracterizaciones realizadas a los compost obtenidos tanto por parte de la PTAR como en el proyecto en curso, de tal forma que

se logre establecer bajo qué medidas es posible la obtención de un producto de buena calidad según el decreto 1287, apto tanto para la recuperación de suelos degradados como para la aplicación en zonas cultivables.

Un cuarto trabajo corresponde a una investigación de Mantilla Oviedo (2015) titulada “Validación de uso de lodos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales de tipo UASB como insumo en recuperación de suelos agrícolas”. Esta investigación tenía como objetivo la evaluación del producto de compostaje de lodos residuales como posibles insumos en el mejoramiento de suelos degradados por actividades agrícolas. La metodología empleada inició con el proceso de secado de lodo de los reactores UASB mediante el almacenando de los mismos en recipientes con sistemas de filtrado y realizando volteos constantemente. Este proceso tardó alrededor de dos meses y se tuvieron en cuenta parámetros de humedad y temperatura. Posteriormente, se almacenó el producto seco para permitir un proceso de maduración en pilas controlando que la temperatura se estabilizara con el medio ambiente. Finalmente, se realizaron las respectivas caracterizaciones del compost obtenido que permitieron establecer que dicho producto se podía clasificar en la categoría A, según el decreto 1287 de 2014 (Mantilla Oviedo, 2015).

Este trabajo se relaciona con la investigación en curso pues confirma que los lodos residuales pueden ser transformados en productos útiles para la remediación de suelos degradados, así como en la producción de compost aplicable en zonas cultivables. Además, ofrece algunos datos de interés relacionados con la caracterización del compost obtenido de lodos residuales.

Un quinto trabajo corresponde a una investigación de Tello, Jiménez, Sánchez, Caballero & Burrola (2018) titulada “Revalorización de lodos residuales: Compostaje”. Esta investigación tenía como objetivo principal presentar una visión general del estado del arte en el uso de diversas enmiendas que aceleran el proceso de compostaje.

Este trabajo se relaciona con la investigación en curso, pues aporta conocimiento de alto valor en la importancia de la mezcla de los lodos residuales con materiales de enmienda adecuados que permitan un mejoramiento del material compostado en términos de características fisicoquímicas como humedad, relación C/N y porosidad. Así mismo, exalta la importancia de las

altas temperaturas en los lechos de compostaje para una reducción efectiva de parámetros microbiológicos.

## 5. Diseño metodológico

### 5.1 Muestreo de lodos residuales

La metodología propuesta para el muestreo de lodos residuales se basó en las NTC-5667-13 y NTC-5667-15.

**5.1.1 Técnica de muestreo a empleada.** La toma de muestra de lodos residuales se realizó empleando la técnica sistemática de muestreo cuadrícula, como se muestra en la figura 1.

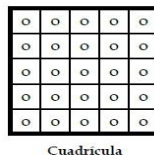


Figura 1. Técnicas sistematicas empleada para toma de muestras de lodos.

**5.1.2 Conservación de las muestras.** Se tomaron diferentes muestras puntuales de diferentes pilas de secado de lodos, las cuales se agregaron cuidadosamente en los recipientes adecuados y se conservaron dependiendo del tipo de análisis que se deseaba realizar. Los instrumentos, recipientes, y métodos necesarios de preservación de las muestras recolectadas se encuentran en la NTC-5667-15. Apéndice A.

### 5.2 Caracterización físico-químico

**5.2.1 Humedad.** La determinación de humedad se realizó por el método que establece la norma NTC 5167.

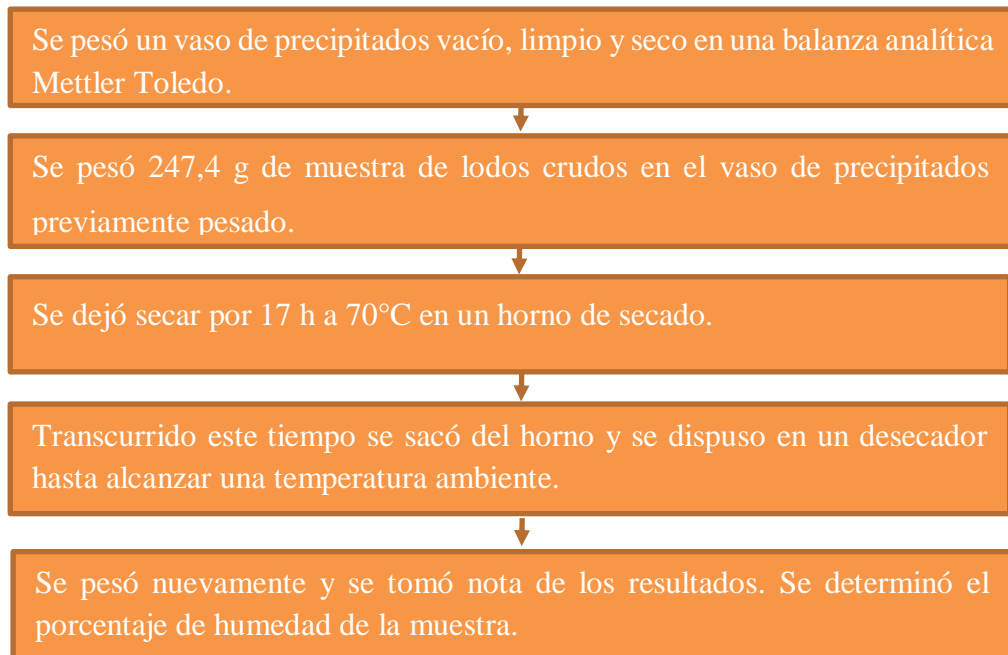


Figura 2. Metodología determinación humedad. Adaptado de ICONTEC, 2011b.

**5.2.2 Carbono orgánico oxidable.** La determinación de carbono orgánico oxidable se realizó por el método Walkley Black, como lo establece la norma NTC 5167.

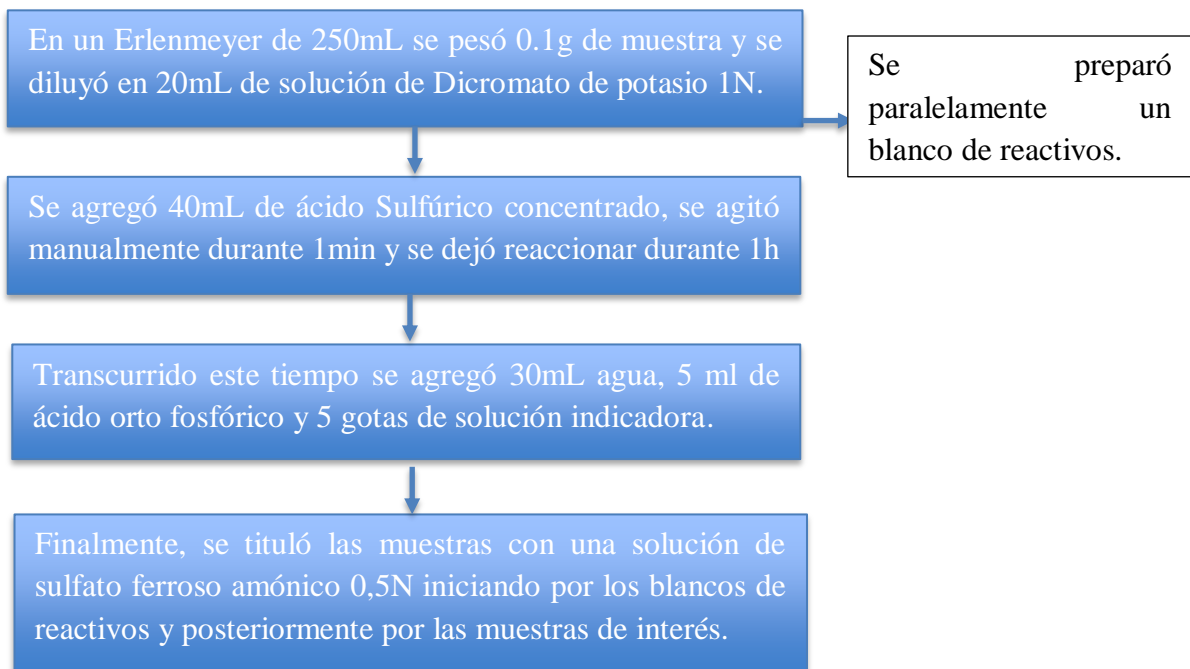
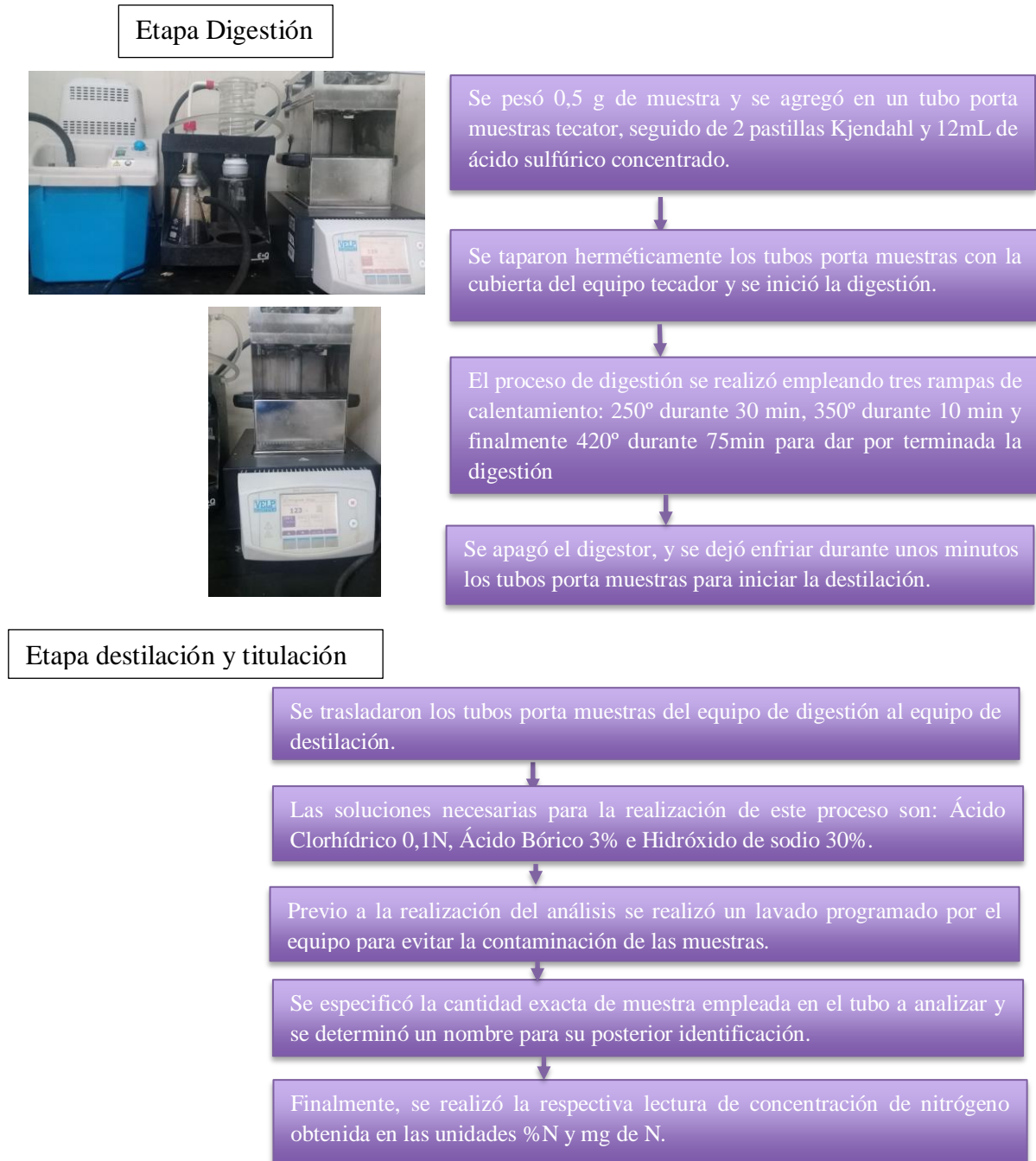


Figura 3. Metodología determinación CO. Adaptado de ICONTEC, 2011b

**5.2.3 Nitrógeno total.** La determinación de nitrógeno se realizó teniendo en cuenta el procedimiento establecido por el manual del equipo UDK 159, específicamente el método 27 denominado “Determinación de nitrógeno total en suelo”. El procedimiento realizado se describe a continuación:



*Figura 4.* Metodología determinación de nitrógeno total y esquemas equipo de digestión.

**5.2.4 Fósforo total.** La NTC 5167 establece que para la determinación de fósforo total se debe seguir el procedimiento establecido en la norma NTC 234 (ICONTEC, 1996), sin embargo, se empleó el método Bray II.

**5.2.4.1 Preparación de soluciones.**

**5.2.4.1.1 Solución extractora.** (HCL 0,1N + NH<sub>4</sub>F 0,03N): Se tomó 0,111g de NH<sub>4</sub>F y 833 µL de HCL concentrado en agua y se llevó a 100mL.

**5.2.4.1.2 Solución A:** Se disolvió 3,020g de Molibdato de Amonio en 10mL de H<sub>2</sub>O. Se añadió 72,3 mg de tartrato de antimonio y potasio y se disolvió. Se agregó lentamente con agitación suave 35mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> concentrado. Se dejó enfriar y finalmente se llevó a 50 mL.

**5.2.4.1.3 Solución B:** Se disolvió 6,1116 g de ácido ascórbico en agua. Se completó a 50mL.

**5.2.4.1.4 Solución de trabajo:** Se tomó 12,5 mL de la solución A, se transfirió a un recipiente con 400mL de H<sub>2</sub>O y se mezcló. Seguidamente, se tomó 5mL de la solución B y se añadió en este mismo recipiente para finalmente completar a un volumen de 500 mL.

**5.2.4.1.5 Estándar de fósforo:** Se disolvió 21,8 mg de fosfato de hidrógeno y de potasio cristalizado, previamente secado 1h a 105°C y se disolvió en un balón aforado de 100mL.

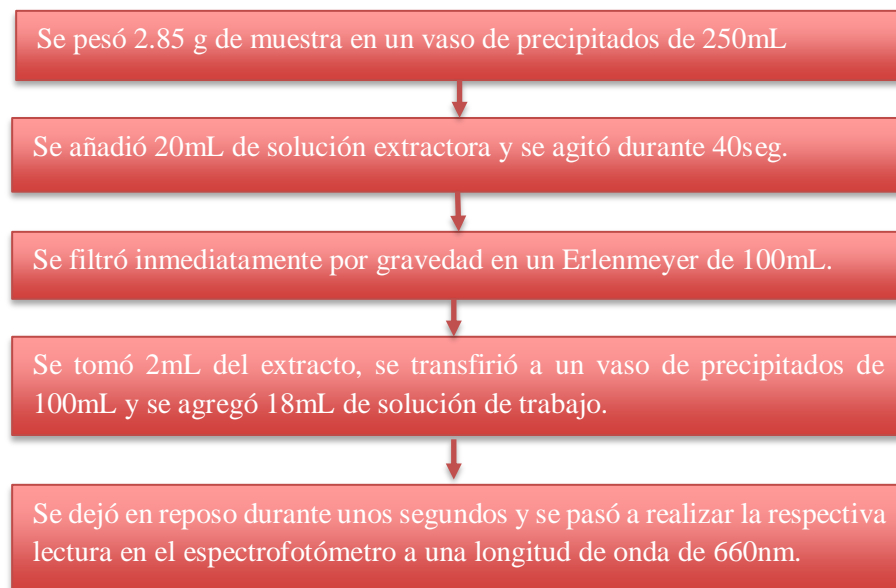
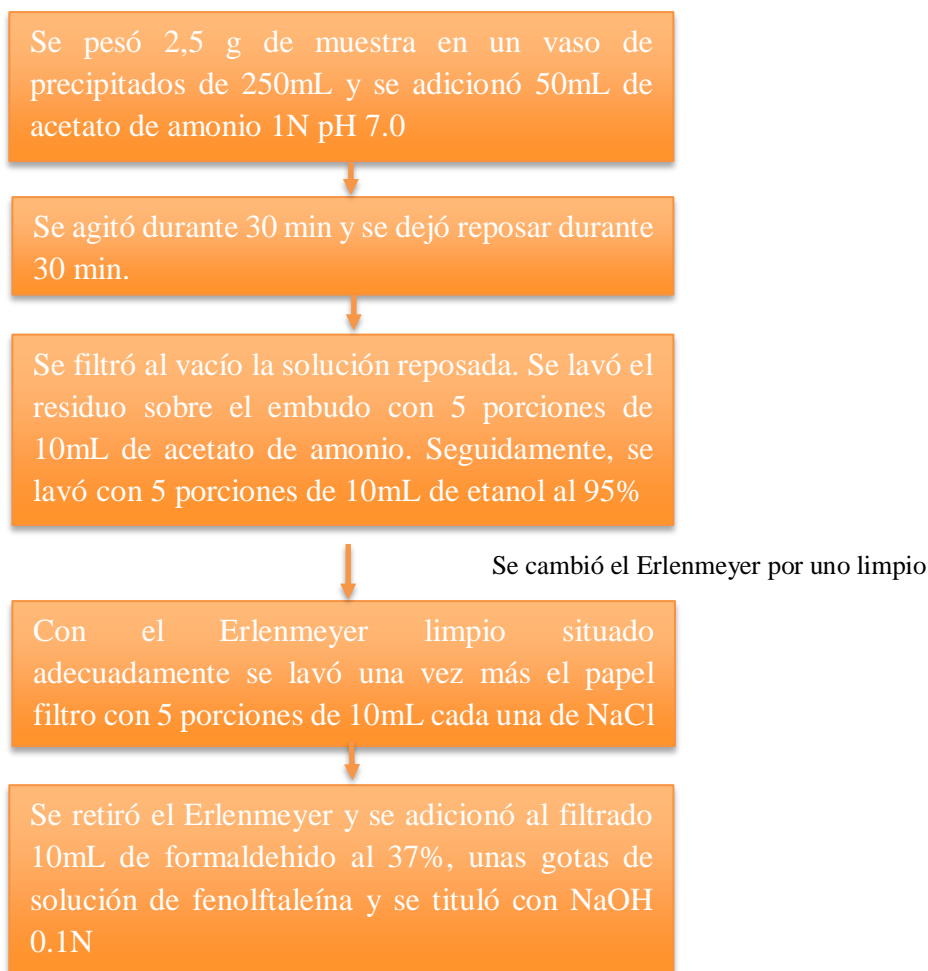


Figura 5. Metodología determinación fósforo total. Adaptado de ICONTEC, NTC 234.

**5.2.5 Intercambio catiónico.** Para la determinación de Intercambio catiónico se seguirá el procedimiento establecido en la norma NTC 5167.



*Figura 6.* Metodología determinación intercambio catiónico. Adaptado de ICONTEC, 2011b.

**5.2.6 Capacidad de retención de agua.** Para la determinación de capacidad de retención de agua se siguió el procedimiento establecido en la norma 5167 (ICONTEC, 2011b)

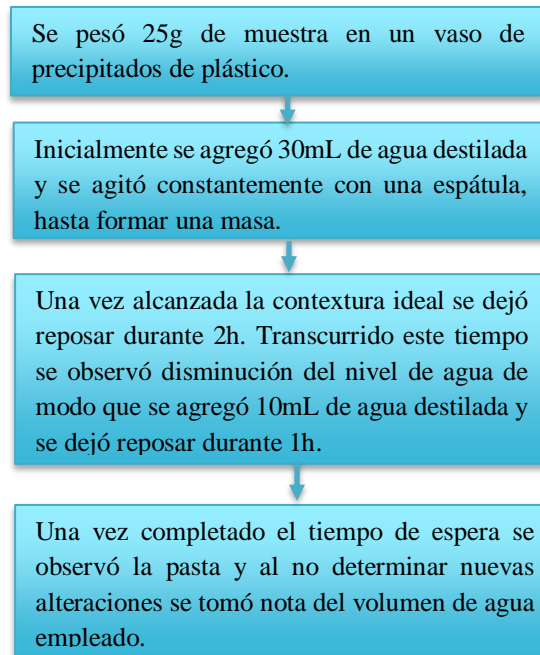


Figura 7. Metodología determinación capacidad de retención de agua. Adaptado de ICONTEC, 2011b.

**5.2.7 pH.** Para la determinación de pH se siguió el procedimiento establecido en la norma 5167 (ICONTEC, 2011b).

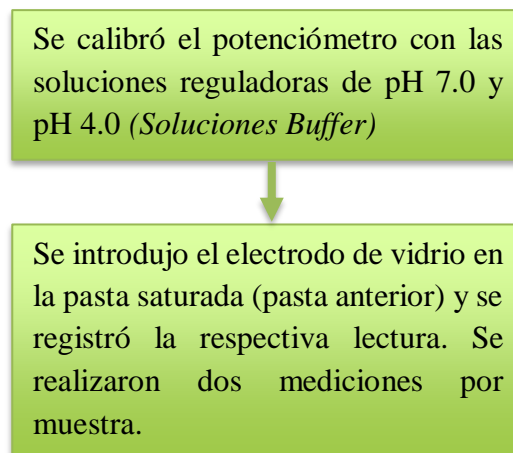
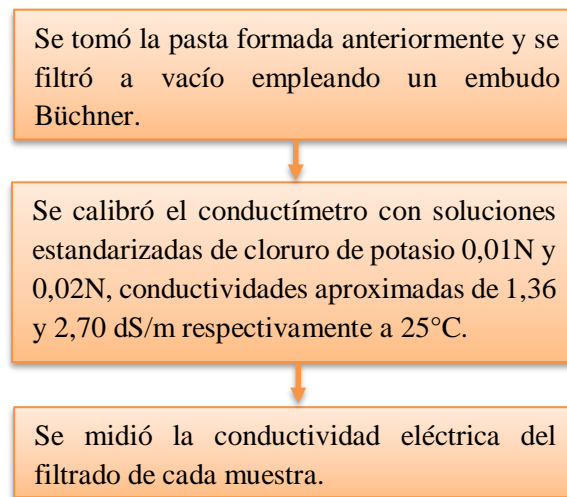


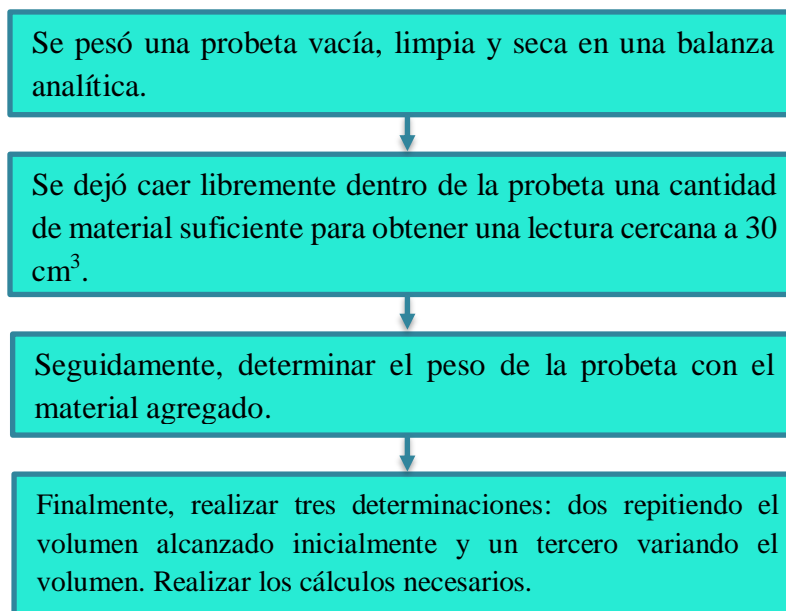
Figura 8. Metodología determinación pH. Adaptado de ICONTEC, 2011b.

**5.2.8 Conductividad eléctrica.** Para la determinación de conductividad eléctrica se seguirá el procedimiento establecido en la norma 5167 (ICONTEC, 2011b).



*Figura 9.* Metodología determinación conductividad eléctrica. Adaptado de ICONTEC, 2011b.

**5.2.9 Densidad.** Para la determinación de densidad se seguirá el procedimiento establecido en la norma 5167.



*Figura 10.* Metodología determinación densidad. Adaptado de ICONTEC, 2011b.

### 5.3 Compostaje

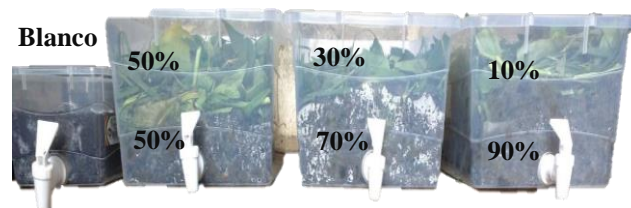
Los biosólidos generados en las diferentes plantas de tratamiento de agua residual, presentan una composición compacta y de difícil aireación debido a los volúmenes generados, lo que imposibilita el crecimiento microbiológico de organismos aeróbicos. Por lo tanto, teniendo en cuenta que en el proceso de compostaje los microorganismos más importantes son aeróbicos, se hace necesaria la realización de volteo como método de aireación y la incorporación de materiales de enmienda para aumentar la porosidad.

**5.3.1 Diseño de pilas para el compostaje.** Las pilas empleadas fueron de capacidad de once litros (11 L) y se prepararon de la siguiente manera:

Inicialmente se tomaron 4 pilas de plástico, seguidamente se pasó a realizar las diferentes proporciones de lodos espesado proveniente de la PTAR Río Frio de Floridablanca (departamento de Santander) y residuos de podas vegetales como material de enmienda (figura2).

Las relaciones empleadas de lodo-residuos vegetales corresponde a: 50/50; 70/30; 90/10 y un blanco. El blanco o referencia fue el montaje de dos pilas, en las que se usaron 4 kg de lodo, se cubrieron con tierra y no se aplicaron volteos.

*Figura 11.* Desarrollo de pilas de compostaje.

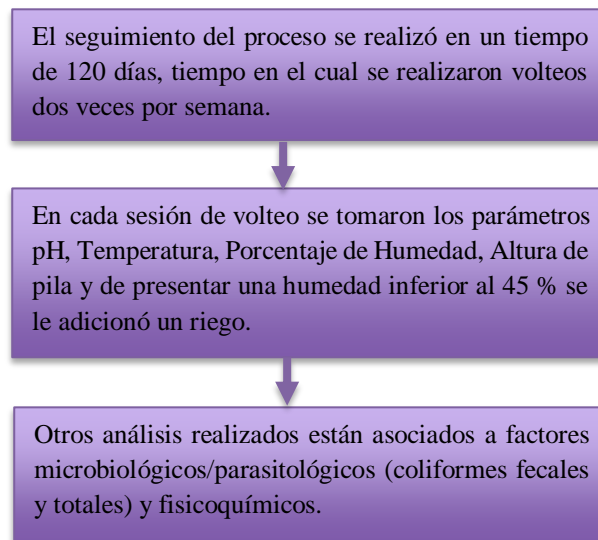


*Figura 12.* Pilas de compostaje.

Estas mezclas se realizaron en las proporciones mencionadas, combinando en primer lugar el material de soporte con el lodo, con el fin de analizar la proporción ideal de obtención del compost.

El proceso de compostaje tuvo un seguimiento de 120 días que al finalizar se pasó por un tamizaje para retirar grumos y material grande, como medida para el buen terminado del compost.

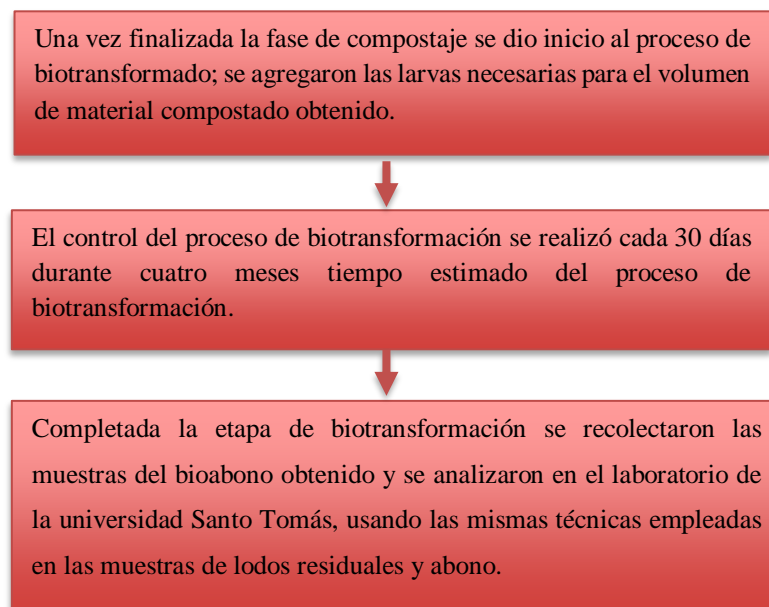
### 5.3.2 Seguimiento y control del proceso de compostaje.



*Figura 13.* Metodología del proceso de seguimiento del compostaje.

Los análisis de carácter microbiológico fueron realizados y reportados por parte de la Universidad Santo Tomás seccional Tunja.

### 5.3.3 Proceso de biotransformación.



*Figura 14.* Metodología del proceso de seguimiento del biotransformado.

#### 5.4 Determinación de metales

Los análisis fisicoquímicos se realizaron en el laboratorio de investigación de la universidad Santo Tomas, seccional Bucaramanga, se evaluaron los parámetros que establece el decreto número 1287 de 2014 para el uso de los biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales. Las variables de caracterización serán: Cobre (Cu), Plomo (Pb) y Zinc (Zn).

La metodología a seguir será la propuesta por la NTC 5167 de 2004 de Productos para la Industria Agrícola. Productos Orgánicos Usados Como Abonos o Fertilizantes y Enmiendas de Suelo.

##### 5.4.1 Determinación de Cobre (Cu) y Zinc (Zn) (ICONTEC, 2011b).

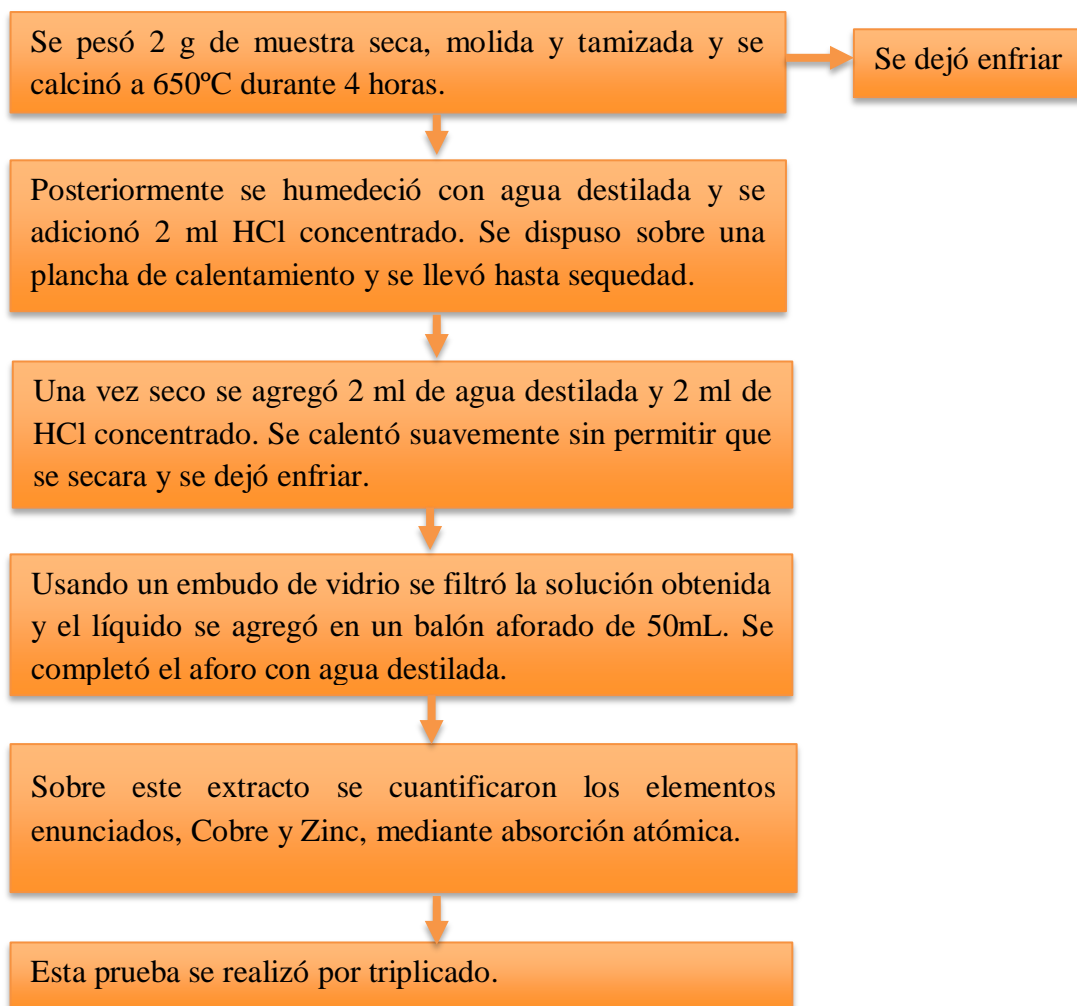


Figura 15. Metodología determinación Cu & Zn. Adaptado de ICONTEC, 2011b.

#### 5.4.2 Determinación de Plomo (Pb) (ICONTEC, 2011b).

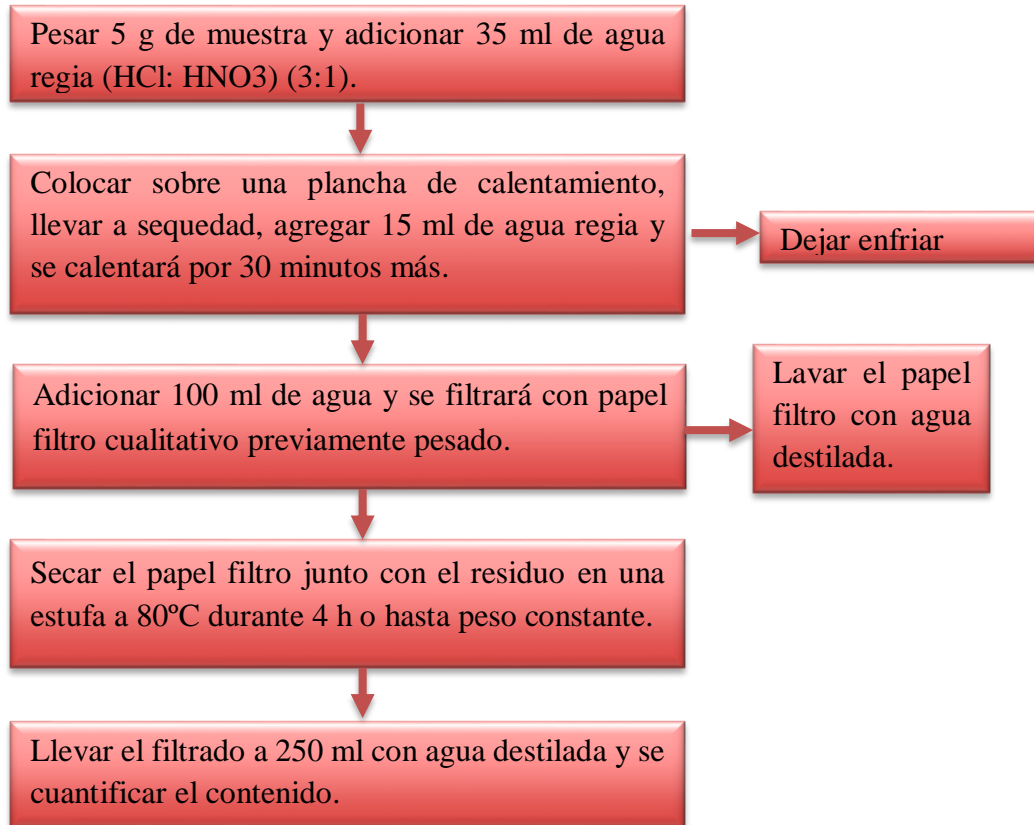


Figura 16. Metodología determinación Pb. Adaptado de ICONTEC, 2011b.

Los resultados obtenidos se compararán con Norma Técnica Colombiana (NTC) 5167 para verificar si la concentración de los metales pesados evaluados se encuentra dentro de los parámetros establecidos en la NTC. Así mismo, se comparará con la norma para el aprovechamiento de Biosólidos.

## 6. Resultados y análisis

### 6.1 Resultados caracterización físico-químico lodos, material compostado y biotransformado PTAR Floridablanca y PTAR Tunja.

Los resultados obtenidos para lodos crudos de las PTAR Río Frío y Tunja fueron comparados con el decreto 1287 de 2014 y con la EPA 40 CFR 503, tablas 2 y 3, respectivamente. De igual

forma, los datos obtenidos para material compostado y biotransformados de ambas muestras fueron comparados con la NTC 5167, tabla

El decreto 1287 de 2014 es la normativa colombiana que establece los criterios para el uso de los biosólidos que son generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales. Según este decreto, los parámetros de caracterización determinantes son químicos-metales pesados y microbiológicos (Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, 2014). De esta forma, se realizó una comparación de los datos obtenidos de los diferentes procesos realizados con los establecidos en esta normativa con el fin de establecer el cumplimiento de las muestras analizadas provenientes de las PTAR Río Frío y Tunja y de los productos obtenidos de los procesos de compostaje y biotransformación.

La EPA 40 CFR 503, "Normas para el uso o eliminación de lodos de depuradora", instauro los requisitos generales, los límites de contaminantes, las normas operativas y las prácticas de gestión que se aplican a los lodos de depuración o residuales aplicados a la tierra, ya sea colocado en un sitio de disposición superficial, o despedido en un incinerador de lodos de depuradora.

La NTC 5167 establece los requisitos que deben cumplir los productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y como enmiendas o acondicionadores de suelo.

**6.1.1 Análisis lodos crudos.** Partiendo de los resultados obtenidos del proceso de caracterización de lodos crudos se comprueba la necesidad de la intervención en la estabilización de los biosólidos, en términos de metales pesados y patógenos, obtenidos en las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, Río Frío Floridablanca y Tunja a través del proceso de compostaje y biotransformación de estos residuos.

**6.1.1.1 Lodos crudos PTAR Río Frío.**

Tabla 2. Resultados caracterización FQ lodos crudos PTAR Río Frío.

<i>Parámetro</i>	<i>Resultado Lodos crudos PTAR Río Frío</i>	<i>Decreto 1287 de 2014</i>		<i>EPA 40 CFR 503** Uso o disposición de Lodos de aguas residuales</i>	
		<i>Tipo A</i>	<i>Tipo B</i>	<i>Tipo A</i>	<i>Tipo B</i>
<b>Humedad (%)</b>	20	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.

Tabla 2. (Continuación).

<b>Fosforo (ppm)</b>	158	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
<b>Nitrógeno (%)</b>	2,29	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
<b>Materia Orgánica (%)</b>	5,98	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
<b>Intercambio Catiónico (meq/100 gr)</b>	2	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
<b>pH</b>	7,6	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
<b>Conductividad eléctrica (mS/cm)</b>	5,61	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
<b>Densidad (g/cm<sup>3</sup>)</b>	0,54	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
<b>As*</b>	30,73	20.0	40	75	
<b>Cd*</b>	1,5	8	40	85	
<b>Cu</b>	82,99	1000	1750	4300	
<b>Cr*</b>	18,32	1000	1500	3000	
<b>Hg*</b>	2,58	10	20	57	
<b>Mo*</b>	5,05	18	75	75	
<b>Ni</b>	14,48	80	420	420	
<b>Pb</b>	19,21	300	400	840	
<b>Se*</b>	0,34	36	100	100	
<b>Zn</b>	108,78	2000	2800	7500	
<b>Coliformes Fecales*</b>	5,50E+06	<1,00 E+3	<2,00 E+6	<1,00	<2 *106
<b>Huevos de Helmintos*</b>	Presente	<1,0	<10,0	<1,0	N.A.
<b>Salmonella*</b>	Presente	Ausencia	<1,00E+3	<3,00	N.A.

\* Tomado de Contreras & Monroy, 2018.

\*\* Tomado de EPA (Environmental Protection Agency). 1994. A Guide for Land Appliers on the Requirements of the Federal Standards for the Use or Disposal of Sewage Sludge, 40 CFR Part 503. Office of Enforcement Environmental and Compliance Assurance Protection Agency. Washington, Estados Unidos. 17 p.

Los resultados obtenidos para la muestra de lodo crudo procedente de la PTAR Río Frío se muestran en la tabla 2. Dentro de los parámetros analizados se encuentra la materia orgánica (M.O) para el cual se obtuvo un valor de 5,98%. Este valor indica que la muestra en estudio se clasifica como suelo de clase alto, según la tabla de “Interpretación del contenido de materia orgánica en

suelo” apéndice B. Dicha composición es un factor típico de lodos residuales municipales, debido a que los residuos que son vertidos en los cuerpos de agua corresponden principalmente a desechos de origen doméstico. Este alto contenido de material orgánico sugiere el uso de estos materiales como fertilizante de suelos, no obstante, el contenido de metales pesados impide su completo aprovechamiento (Gomez & Merchan, 2016).

De igual forma, para el caso del parámetro capacidad de intercambio catiónico (C.I.C), se obtuvo un valor de 2 meq/100 gr (tabla 2). Según el apéndice C, “clasificación de la fertilidad del suelo a partir de la C.I.C”, la muestra de la PTAR Río Frío analizada corresponde a un suelo o superficie de tipo muy pobre; además presenta características de tipo arenoso, propio de suelos con baja C.I.C. Así mismo, este parámetro guarda relación con el pH, pues es común en suelos de esta clase que posean niveles neutros o alcalinos, tales como los obtenidos en este análisis. Estos datos indican que las muestras corresponden a suelos que poseen bajas reservas de nutrientes debido a las pérdidas que se pueden generar por procesos de lixiviación (Gomez & Merchan, 2016).

El análisis del parámetro conductividad eléctrica (C.E) permitió conocer que la muestra estudiada poseía un valor de 5,61 mS/cm. Tomando este dato se realiza una clasificación de la muestra empleando la tabla de “Clasificación del suelo según su conductividad eléctrica” apéndice D; la comparación del valor obtenido y lo establecido en la tabla mencionada revelan que la muestra pertenece a un tipo de suelo moderadamente salino. Esta clasificación señala que la muestra corresponde a un suelo de baja calidad pues, según Gomez & Merchan (2016), los suelos con altos niveles de conductividad eléctrica impiden el buen desarrollo de las plantas, ya que pueden afectar procesos vitales como la germinación normal de las semillas, el crecimiento de las plantas y la absorción de agua por parte de las mismas, entre otras, debido a la elevada cantidad de sales en solución de estos suelos.

La caracterización de la muestra de lodos crudos PTAR Río Frío permitió conocer su alta carga contaminante tanto de metales pesados como de agentes patógenos. Al comparar los datos obtenidos para estos parámetros con el decreto 1287 de 2014 y la EPA 40 CFR 503 se evidencia un incumplimiento de ambas normas en términos de parámetros microbiológicos, específicamente

debido a su alta carga en coliformes fecales, lo cual imposibilitó la respectiva clasificación de la muestra analizada.

**6.1.1.2 Lodos crudos PTAR Tunja.**

Tabla 3. Resultados caracterización FQ lodos crudos PTAR Tunja.

Parámetro	Resultado Lodos crudos  PTAR Tunja	Decreto 1287 de 2014		EPA 40 CFR 503** Uso o disposición de Lodos de aguas residuales	
		Tipo A	Tipo B	Tipo A	Tipo B
<b>Humedad (%)</b>	78,03	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
<b>Fosforo (ppm)</b>	256	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
<b>Nitrógeno (%)</b>	3,03	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
<b>Materia Orgánica (%)</b>	4,64	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
<b>Intercambio Catiónico (meq/100 gr)</b>	3	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
<b>pH</b>	7,6	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
<b>Conductividad eléctrica (mS/cm)</b>	9,73	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
<b>Densidad (g/cm<sup>3</sup>)</b>	1,04	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
<b>As*</b>	27,46	20.0	40	75	
<b>Cd*</b>	1,66	8	40	85	
<b>Cu</b>	36,57	1000	1750	4300	
<b>Cr*</b>	9,04	1000	1500	3000	
<b>Hg*</b>	2,84	10	20	57	
<b>Mo*</b>	0,49	18	75	75	
<b>Ni</b>	3,61	80	420	420	
<b>Pb</b>	18,04	300	400	840	
<b>Se*</b>	0,33	36	100	100	
<b>Zn</b>	98,23	2000	2800	7500	
<b>Coliformes Fecales</b>	4,80E+06	<1,00 E+3	<2,00 E+6	<1,00	<2 *106
<b>Huevos de Helminthos</b>	Presente	<1,0	<10,0	<1,0	N.A.
<b>Salmonella</b>	Presente	Ausencia	<1,00E+3	<3,00	N.A.

\* Tomado de Contreras & Monroy, 2018.

\*\* Tomado de EPA (Environmental Protection Agency). 1994. A Guide for Land Appliers on the Requirements of the Federal Standards for the Use or Disposal of Sewage Sludge, 40 CFR Part 503. Office of Enforcement Environmental and

Compliance Assurance Protection Agency. Washington, Estados Unidos. 17 p.

La muestra analizada de lodo crudo procedente de la PTAR Tunja presentó valores superiores en los parámetros humedad, fósforo, nitrógeno, C.I.C, C.E y densidad en comparación con la muestra de la PTAR Río Frío (tabla 2). El parámetro humedad permitió comprobar la influencia de procesos de pre-secado sobre las muestras, teniendo en cuenta que para Tunja se obtuvo un valor de 78% en este parámetro (tabla 3), mientras que en el caso de Río Frío se presentó un valor de 20% (tabla 2). En la PTAR Río frío, los lodos obtenidos de los reactores son depositados en cuencas denominadas lechos de secado, a cielo abierto, lo que permite una reducción considerable del porcentaje de humedad. La PTAR Tunja, por su parte, no cuenta con éste pre tratamiento para lodos residuales, pues es posible que dicho método sea ineficaz en esta ciudad debido a los factores climáticos que presenta, no obstante, cuenta con una maquinaria de prensa, pero que para el caso específico de la toma de muestra dicha maquinaria no se encontraba en funcionamiento.

En el caso de la M.O para esta muestra se obtuvo un valor de 4,64% (tabla 3); comparando éste dato con la tabla de “Interpretación del contenido de materia orgánica en suelo” apéndice B, se logra identificar que la muestra hace parte de un suelo de clase alto. La clasificación alcanzada por parte de la muestra en estudio es coherente con el tipo de lodos que se generan al interior de la planta de tratamiento de Tunja, es decir, lodos residuales municipales, debido a que los residuos vertidos en los cuerpos de agua corresponden principalmente a desechos de origen doméstico.

A través de análisis de C.I.C para la muestra de la PTAR Tunja se determinó un valor de 3 meq/100 gr (tabla 3). Teniendo en cuenta el apéndice C, “clasificación de la fertilidad del suelo a partir de la C.I.C”, según el cual los suelos con valores  $< 6$  meq/100 gr se clasifican como superficies muy pobres, se logra identificar que la muestra en estudio no supera el límite previamente mencionado por lo cual se clasifica como un suelo de este tipo. Al presentar ésta clasificación se asume que la muestra también posee características de tipo arenoso pues es una cualidad de suelos con baja CIC.

Así mismo, el parámetro conductividad eléctrica (C.E) permitió conocer que la muestra poseía un valor de 9,73 mS/cm. Empleando la tabla de “Clasificación del suelo según su

conductividad eléctrica” apéndice D se encuentra que la muestra de la PTAR Tunja se clasifica como un tipo de suelo fuertemente salino.

Al igual que en el caso de la muestra de lodos crudos de la PTAR Río Frío, el análisis de la muestra de la PTAR Tunja permitió conocer un alto contenido en los valores para los parámetros metales pesados y agentes patógenos. Al comparar los valores de metales pesados se observa que los elementos analizados se encuentran dentro de los valores permitidos tanto para el decreto 1287 como para la EPA 40 CFR 503, en consecuencia, la muestra de la PTAR Río Tunja podría ser clasificada como biosólido tipo B, no obstante, al estudiar las variables microbiológicas se logra determinar que no es posible debido al incumplimiento del parámetro coliformes fecales.

**6.1.2 Análisis material compostado y biotransformado.** Mediante el proceso de compostaje de lodos crudos de las muestras PTAR Río Frío y Tunja realizado, empleando las diferentes proporciones mencionadas en las tablas 4 y 5 se estableció que la mezcla ideal para la obtención de un producto de buena calidad es la correspondiente a 70/30, es decir, 70% lodos crudos y 30% de material de enmienda, para ambas plantas. Esta selección fue basada en la reducción que presentaron estas muestras en términos de metales pesados y parámetros microbiológicos.

#### 6.1.2.1 Compostado y biotransformado Río Frío.

Tabla 4. Resultados caracterización FQ material compostado y biotransformado PTAR Río Frío.

<i>Parámetro</i>	<i>Resultados muestras PTAR Río Frío</i>					<i>NTC 5167</i> <i>Abonos o fertilizantes orgánicos-minerales sólidos</i>
	<i>Blanco</i>	<i>Compostado</i>			<i>Biotransformado</i>	
		<i>50-50</i>	<i>70-30</i>	<i>90-10</i>	<i>90-10</i>	
<b>Humedad (%)</b>	6,6	12,2	12,5	11,1	11,34	Máximo 15%
<b>Fósforo* (ppm)</b>	113	123	125	131	135	Mínimo
<b>Nitrógeno* (%)</b>	2,13	1,43	1,49	1,08	1,2	2%
<b>Materia Orgánica (%)</b>	3,63	5,87	6,99	1,2	2,5	Mayor de 5%

Tabla 4. (Continuación).

<b>Intercambio Catiónico</b>	3,8	17	13	11	12	N.A.
<b>pH</b>	5,1	5,8	5,6	5,8	5,78	N.A.
<b>Conductividad eléctrica (mS/cm)</b>	3,94	3,89	4,47	3,68	4,93	N.A.
<b>Densidad (g/cm<sup>3</sup>)</b>	0,71	1,19	0,66	0,8	0,42	N.A.

\* Tomado de Contreras & Monroy, 2018.

La caracterización del material compostado y biotransformado de la PTAR Río Frío permitió observar reducciones en el contenido del nutriente nitrógeno en relación con los resultados de lodos crudos o blanco. La disminución en este parámetros puede estar relacionada con el proceso de secado, generado principalmente durante el proceso de compostaje debido a las altas temperaturas que se alcanzan en el lecho de secado, lo cual puede influir en la pérdida de este elemento posiblemente por volatilización (FAO, 2013).

Según la EPA, (1999) los biosólidos compostados son productos que, por lo general, contienen menos nitrógeno total que la mayoría de las otras formas de biosólidos tratados, un factor principalmente generado debido al procesamiento de las muestras, la deshidratación, la dilución de nutrientes por el material de carga y la pérdida de amoníaco durante el proceso de compostaje. Sin embargo, esta no representa una característica negativa del producto, pues este nitrógeno se libera más lentamente y, por lo tanto, está disponible para las plantas durante un período de tiempo mucho más largo, en relación con las necesidades de absorción de la planta, y a su vez reduce la lixiviación de nitrógeno en el nivel freático (EPA, 1999).

No obstante, a pesar de que las reducciones no representan una limitante, al tener en cuenta la NTC 5167 se evidencia un incumplimiento de la normativa frente al parámetro nitrógeno, tanto en el material compostado como en el biotransformado, pues en ninguno de los casos se logró superar un 2% de concentración como lo establece la norma.

El contenido de materia orgánica en material compostado y biotransformado fue uno de los parámetros que presentó variaciones, en comparación con los resultados obtenidos en la caracterización de lodos crudos residuales. En el caso del material compostado se observó una

disminución en este parámetro a medida que se aumentaba la relación lodo/enmienda, de tal forma que la mezcla 50/50 presentó el contenido más alto en M.O mientras que la de 90/10 el más bajo. Los datos presentados permitieron que las muestras finales se clasificaran como suelos de tipo medio y alto en contenido de materia orgánica, para compostado y biotransformado, según la tabla de “Interpretación del contenido de materia orgánica en suelo” apéndice B. Un alto contenido de materia orgánica en productos diseñados con futuras funciones como fertilizantes representa un índice de alta calidad del producto, pues este es un material que influye positivamente en todas las propiedades del suelo, tanto físicas como químicas y biológicas; produce sustancias aglutinantes que ayudan a estabilizar la estructura de los suelos en los que sean empleados, genera una liberación de nutrientes esenciales y regula la actividad microbiana del suelo (Gomez & Merchan, 2016). Comparando los resultados de caracterización de la muestra para M.O con la NTC 5167 se analiza que en el caso del material compostado las muestras que cumplen con lo establecido en la normativa previamente mencionada son las proporciones de 50/50 y 70/30 para Río Frío, Floridablanca y en el caso del material biotransformado no superó el límite establecido para este parámetro.

Los valores del parámetro intercambio catiónico obtenidos en los análisis de material compostado y biotransformado PTAR Río Frío presentaron variaciones en relación con los datos iniciales de lodos crudos caracterizados. Las variaciones generadas correspondieron a aumentos en los valores obtenidos, de forma que se logró clasificar las muestras como suelos de tipo bajo y medio en términos de fertilidad según la tabla “Clasificación de la fertilidad de suelos a partir de la C.I.C” apéndice C; de igual forma, los suelos con alta C.I.C son generalmente superficies de tipo arcilloso (Gomez & Merchan, 2016).

Ahora bien, en el caso del pH se registraron valores iniciales ligeramente ácidos, en el blanco, y posteriormente, en el material compostado y biotransformado se evidenció un aumento en estos valores, pero manteniendo su característica ácida. Partiendo de los valores de C.I.C y de pH es posible indicar que las muestras analizadas corresponden a un suelo de alta calidad, pues poseen la capacidad de almacenamiento de grandes cantidades de reservas de nutrientes, debido a los múltiples sitios de unión orgánicos e inorgánicos que se presentan bajo condiciones ácidas de pH y que a su vez evitan la pérdida de dichos elementos por procesos de lixiviación (Gomez & Merchan, 2016).

El parámetro conductividad eléctrica (C.E) también presentó variaciones en los valores obtenidos para la caracterización del material compostado y biotransformado de la PTAR Río Fío. Comparando los resultados con la tabla de “Clasificación del suelo según su conductividad eléctrica” apéndice D, se tiene que las muestras de material compostado corresponden a un tipo de suelo entre ligeramente y moderadamente salino, mientras que las muestras de material biotransformado hacen referencia a un suelo moderadamente salino. A pesar de que las muestras de material biotransformado no obtuvieron un resultado ideal en este parámetro, la C.E es un factor que puede ser controlado, en este caso teniendo en cuenta que corresponde a una muestra con exceso de sales, empleando lavados del suelo como medida de remoción en el exceso de dichos componentes que pueda poseer el material.

**6.1.2.2 Compostado y biotransformado Tunja.**

Tabla 5. Resultados caracterización FQ material compostado y biotransformado PTAR Tunja.

<i>Parámetro</i>	<i>Resultados muestras PTAR Tunja</i>					<i>NTC 5167 Abonos o fertilizantes orgánicos-minerales sólidos</i>
	<i>Blanco</i>	<i>Compostado</i>			<i>Biotransformado</i>	
		<i>50-50</i>	<i>70-30</i>	<i>90-10</i>	<i>90-10</i>	
<b>Humedad (%)</b>	15,7	15,7	12	32,18	31,73	Máximo 15%
<b>Fósforo* (ppm)</b>	120	123	128	129	142	Mínimo 2%
<b>Nitrógeno* (%)</b>	0,52	1,02	0,83	1,086	1,23	Mayor de 5%
<b>Materia Orgánica (%)</b>	1,96	2,52	5,87	2,6	9,02	N.A.
<b>Intercambio Catiónico</b>	10	9	9	9	9	N.A.
<b>pH</b>	4,8	5,1	5,3	4,6	4,68	N.A.
<b>Conductividad eléctrica (mS/cm)</b>	5,07	1,51	1,26	1,07	5,12	N.A.
<b>Densidad (g/cm<sup>3</sup>)</b>	0,75	0,79	0,81	0,79	0,29	N.A.

\* Tomado de Contreras & Monroy, 2018.

La caracterización del material compostado y biotransformado de la PTAR Tunja permitió observar aumentos en parámetros como humedad, fósforo, nitrógeno, M.O, pH y densidad en el

caso del material compostado y una reducción en densidad en el caso del material biotransformado (tabla 5).

Una de las variaciones más evidentes dentro de los parámetros analizados fue la humedad, específicamente en el caso de la mezcla 90/10, en la cual se obtuvo un valor de 32,18%. Teniendo en cuenta que el aumento registrado es muy elevado es probable que corresponda a una contaminación de la muestra, esto debido a que el proceso de compostaje se realizó en un espacio abierto en el cual se pudo generar una filtración de líquido de lluvia que posteriormente arrojaría el resultado en discusión. En el caso de las demás mezclas se evidencia un cumplimiento de la NTC 5167. Además, se observó un aumento en la concentración de los nutrientes fósforo y nitrógeno.

Al observar los resultados del contenido de M.O en material compostado y biotransformado de las muestras PTAR Tunja se evidencia un aumento en los valores de dicho parámetro. Según la tabla de “Interpretación del contenido de materia orgánica en suelo” apéndice B, las muestras de material compostado se clasificaron como suelos de tipo medio y alto, mientras que la muestra de material biotransformado alcanzó una clasificación de suelo de tipo muy alto pues presentó concentraciones superiores a  $> 6,0\%$ . Teniendo en cuenta la normativa NTC 5167 se tiene que las muestras que alcanzaron el cumplimiento de la misma corresponden a la mezcla 70/30 en el caso del material compostado y a la muestra del material biotransformado.

El parámetro C.I.C registró una reducción en el valor del material compostado la cual se mantuvo en el material biotransformado. Dicha reducción permitió clasificar las muestras como suelos de tipo bajo en términos de fertilidad según la tabla “Clasificación de la fertilidad de suelos a partir de la C.I.C” Apéndice C.

Así mismo, el parámetro conductividad eléctrica (C.E) también presentó variaciones en los valores obtenidos para la caracterización del material compostado y biotransformado de la PTAR Tunja. Al comparar los resultados con la tabla de “Clasificación del suelo según su conductividad eléctrica” apéndice D, se tiene que las muestras de material compostado corresponden a un tipo de suelo no salino, mientras que la muestra de material biotransformado hace referencia a un suelo moderadamente salino.

**6.1.2.3 Metales pesados en PTAR Río Frío y Tunja.** Los resultados obtenidos de metales pesados en material compostado y biotransformado de las PTAR Río Frío y Tunja se muestran en las tablas 6 y 7, respectivamente.

Tabla 6. *Resultados Metales pesados compostado y biotransformado Río Frío.*

Parámetro	Resultados muestras PTAR Río Frío					Decreto 1287 de 2014 Biosólidos	
	Blanco	Compostado			Biotransformado	Tipo A	Tipo B
		50-50	70-30	90-10	90-10		
As*	34,47	34,4	29,02	29,66	35,28	20,0	40
Cd*	1,96	0,93	0,87	1,08	0,33	8	40
Cu	40,93	129,01	129,51	112,3	66,18	1000	1750
Cr*	16,87	25,25	30,57	28,73	30,25	1000	1500
Hg*	1,95	4,18	2,76	2,67	0,07	10	20
Mo*	2,92	5,28	5,29	5,41	4,77	18	75
Ni	4,13	23,83	24,71	23,94	24,27	80	420
Pb	13,94	24,34	22,71	26,73	11,65	300	400
Se*	0,78	0,71	0,22	0,34	0,07	36	100
Zn	98,21	112,99	113,29	112,43	93,49	2000	2800
Coliformes Fecales	2,03E+06	1,80E+06	1,03E+06	1,50E+06	1,50E+06	<1,00 E+3	<2,00 E+6
Huevos de Helmintos	Presente	Presente	Presente	Presente	Ausente	<1,0	<10,0
Salmonella	Presente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausencia	<1,00E+3

\* Tomado de Contreras & Monroy, 2018.

Tabla 7. *Resultados Metales pesados compostado y biotransformado Tunja.*

Parámetro	Resultados muestras PTAR Tunja					Decreto 1287 de 2014 Biosólidos	
	Blanco	Compostado			Biotransformado	Tipo A	Tipo B
		50-50	70-30	90-10	90-10		
As*	30,97	34,42	39,01	37,13	34,24	20,0	40
Cd*	2,12	1,46	1,6	1,67	0,99	8	40
Cu	12,51	46,43	35,08	37,74	22,8	1000	1750

Tabla 7. (Continuación).

<b>Cr*</b>	10,39	8,62	6,07	6,86	15,59	1000	1500
<b>Hg*</b>	1,73	1,86	1,51	1,28	0,08	10	20
<b>Mo*</b>	1,18	1,93	1,98	2,16	1,62	18	75
<b>Ni</b>	2,11	4,58	1,71	1,81	10,31	80	420
<b>Pb</b>	11,42	21,61	16,65	17,56	8,94	300	400
<b>Se*</b>	0,2	1,5	0,73	0,34	0,07	36	100
<b>Zn</b>	48,44	99,18	90,13	96,08	59,35	2000	2800
<b>Coliformes Fecales</b>	1,36E+06	1,90E+06	2,03E+06	1,73E+06	1,73E+06	<1,00 E+3	<2,00 E+6
<b>Huevos de Helmintos</b>	Presente	Presente	Ausente	Ausente	Ausente	<1,0	<10,0
<b>Salmonella</b>	Presente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausencia	<1,00E+3

\* Tomado de Contreras & Monroy, 2018.

Al observar los resultados obtenidos para metales pesados en material compostado y biotransformado de las PTAR Río Frío y Tunja se evidencian variaciones en comparación con los datos iniciales de lodos crudos. Si bien, las reducciones generadas en algunos de los elementos analizados es un comportamiento ideal, el aumento en algunos de dichos valores representa una anomalía. Elementos como As, Cu, Cr y Ni, aumentaron su concentración considerablemente durante el proceso de compostaje de los lodos residuales de las PTAR Río Frío y Tunja. Por lo tanto, el aumento en la concentración de estos metales se relaciona directamente con contaminación del material de enmienda empleado en la realización del proceso mencionado, teniendo en cuenta que el material vegetal fue tomado de sitios expuestos a emisiones de fuentes móviles (Contreras & Monroy, 2018). En el caso de las muestras provenientes de la PTAR Tunja se observa que el único elemento que se encuentra por encima de los valores registrados de los demás metales pesados analizados corresponde a Cd.

Comparando los resultados de metales pesados en las muestras de material compostado y biotransformado de las PTAR Río Frío y Tunja con los límites establecidos en el decreto 1287 de 2014 se evidencia el cumplimiento de dicha normativa, logrando alcanzar la clasificación de biosólidos tipo B en ambos casos. De igual forma, se identificaron dos factores limitantes, en la

muestra biotransformado Río Frío, para el cumplimiento total de los valores mínimos establecidos de biosólidos tipo A, los cuales correspondieron al metal arsénico (As) y coliformes fecales como parámetro biológico. En el caso de la muestra biotransformado Tunja, se identificaron las mismas limitantes previamente mencionadas, agregando una más correspondiente a la Salmonella.

**6.1.2.4 Parámetros microbiológicos en PTAR Río Frío y Tunja.** Los resultados correspondientes a parámetros biológicos fueron realizados por parte de la microbióloga Luz Ángela Cuellar en la Universidad Santo Tomás seccional Tunja, gracias al trabajo multicampus de este proyecto. Al realizar la respectiva comparación de los datos microbiológicos entre lodos crudos y material compostado se determinan altos porcentajes de reducción en Coliformes fecales como se muestran en la tabla 8.

Tabla 8. *Porcentajes de reducción de coliformes fecales entre lodos crudos y material compostado PTAR Río frío y Tunja.*

<i>Muestra</i>	<i>Reducción coliformes fecales</i>	
	<i>Río frío</i>	<i>Tunja</i>
<b>Blanco</b>	63%	72%
<b>50-50</b>	67%	60%
<b>70-30</b>	81%	58%
<b>90-10</b>	73%	64%

Teniendo en cuenta los resultados de la tabla 8, se observa que para el caso de la muestra correspondiente a la PTAR Río frío el porcentaje de reducción más alto se presentó en la proporción 70/30 con un 81% y para la muestra de la PTAR Tunja esta correspondió al blanco con un 72% de reducción. Gracias a estas proporciones generadas se logró realizar una clasificación de ambas muestras, compostado PTAR Río frío y Tunja, como biosólidos tipo B según el decreto 1287 de 2014.

Para el parámetro Huevos de helmintos se registraron reducciones totales en el material compostado de la muestra Tunja, específicamente en las proporciones 70/30 y 90/10 (tabla 7) y

una eliminación total en el material biotransformado de ambas muestras, PTAR Río frío y Tunja (tablas 6 y 7).

Finalmente, el parámetro salmonella presentó reducciones totales en todas las muestras del material compostado y biotransformado de las muestras PTAR Río frío y Tunja.

Estos resultados permiten comprobar la eficiencia del proceso de compostaje como medio de estabilización de lodos residuales en la reducción de patógenos, principalmente Coliformes fecales, como uno de los parámetros de mayor riesgo (Contreras & Monroy, 2018).

## 7. Conclusiones

- Los muestreos de lodos crudos, material compostado y material biotransformado permitieron la realización y obtención de las respectivas caracterizaciones fisicoquímicas y microbiológicas de las PTAR Río frío y Tunja.

- Los lodos crudos analizados de la PTAR Río frío presentaron valores inferiores en los parámetros humedad, fósforo, nitrógeno, intercambio catiónico, conductividad eléctrica y densidad en comparación con los lodos crudos analizados de la PTAR Tunja.

- La humedad fue un factor de elevada importancia para el buen manejo de las muestras con la relación a menor humedad mejor manejo. El lodo de la PTAR Río frío presentó las mejores condiciones al obtener un valor de 20% de humedad debido a procesos de pre-secado realizados en esta planta de tratamiento; La PTAR Tunja presentó un valor de 78,03% de humedad.

- Las concentraciones de metales pesados determinadas en el estudio demuestran la reducción en el proceso de biotransformación así: Cu 20%, Zn 14% y Pb 39% para Río frío, y Cu 38%, Zn 40% y Pb 50% para Tunja.

- De acuerdo con la caracterización de lodos crudos de la PTAR Río frío y PTAR Tunja los valores para los metales pesados Cu, Zn y Pb cumplen con el decreto 1287 de 2014 y EPA 40 CFR 503 para biosólidos tipo A, no obstante, los parámetros microbiológicos de lodos crudos, PTAR Río frío y PTAR Tunja representan una limitante para la clasificación de las muestras.

- Se logró comprobar la efectividad del compostaje como proceso de estabilización de lodos residuales, en términos de parámetros microbiológicos, teniendo en cuenta los porcentajes de reducción para coliformes fecales en las muestras Río frío y Tunja que presentaron un promedio de 71% y 64% respectivamente.

- El compostaje es una buena alternativa como tratamiento de lodos residuales que permite el cumplimiento normativo para su aprovechamiento como biosólido.

### **Recomendaciones**

- Teniendo en cuenta estudios externos se comprueba la influencia del material de enmienda como portador de elementos contaminantes como metales pesados, por lo tanto, se hace necesario realizar protocolos para los procesos de recolección de este material, así como caracterizaciones previas que eviten la contaminación del producto obtenido.

- Se recomienda realizar pruebas piloto del proceso de compostaje empleando pilas de más de un metro cúbico, de tal manera que se alcancen altas temperaturas en el lecho de compost y por lo tanto se logró disminuir en mayor proporción los parámetros microbiológicos para alcanzar el cumplimiento normativo en ésta etapa.

- Es necesario continuar con la realización de estudios que permitan la caracterización de lodos crudos en términos de contaminantes emergentes, y de esta forma aportar información para su futura respectiva implementación en la normativa para biosólidos.

- La PTAR Tunja debería poner en funcionamiento la maquinaria de prensa para la disminución del porcentaje de humedad para facilitar el manejo de los lodos.

- La PTAR Río frío debería considerar realizar pruebas piloto para un cambio en la relación lodo/enmienda de 90/10 a 70/30 dado que se presentan mayores reducciones de coliformes fecales.

- No se recomienda la realización del proceso de biotransformación planteado a gran escala pues al comparar los datos de material compostado con los biotransformado los resultados son de bajo impacto mientras que los materiales empleados generan costos que no se ven bien justificados.

### Bibliografía

- Ayuntamiento de San Sebastian De Los Reyes. Manual básico para hacer Compost (2014). Retrieved from <http://www.resol.com.br/cartilhas/252648184-manual-de-compostaje.pdf>
- Bedoya-Urrego, K., Acevedo-Ruíz, J. M., Peláez-Jaramillo, C. A., & Agudelo-López, S. del P. (2013). Caracterización de biosólidos generados en la planta de tratamiento de agua residual San Fernando, Itagüí (Antioquia, Colombia). *Revista de Salud Publica*, 15(5), 778–790.
- Contreras Gómez, A. E. Y. Monroy Becerra, J. E. (2018). Informe final caracterización de la biotransformación de lodos procedentes de plantas de tratamiento de aguas residuales domesticas a partir de larvas de escarabajos. Grupo de Investigación en Nuevos Materiales y Energías Alternativas – GIMNEA. Universidad Santo Tomás.
- Empresa Pública de Alcantarillado de Santander (EMPAS). 2017. Informe de gestión. Retrieved from <https://www.empas.gov.co/wp-content/uploads/2018/04/INFORME-DE-GESTION-EMPAS-2017-WEB.pdf>
- EPA (Environmental Protection Agency). 1999. Biosolids Generation, Use, and Disposal in the United States. Office of Solid Waste. Estados Unidos. 8-10.
- EPA (Environmental Protection Agency). 1994. A Guide for Land Appliers on the Requirements of the Federal Standards for the Use or Disposal of Sewage Sludge, 40 CFR Part 503. Office of Enforcement Environmental and Compliance AssuranceProtection Agency. Washington, Estados Unidos. 17 p.
- FAO. (2013). *Manual de compostaje del agricultor, Experiencias en América Latina. Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe*. <https://doi.org/10.1111/evo.12990>
- Gomez Molina, L.L. Merchan Bermudez, A.M. (2016). Caracterización fisicoquímica de los lodos provenientes de una planta de tratamiento de agua residual industrial de una empresa de café del departamento de caldas. *Tesis Pregrado*. Universidad catolica de Manizales. Manizales, Colombia.
- LeBlanc, R. J., Richard, R. P., & Beecher, N. (2009). *A Review of “Global Atlas of Excreta, Wastewater Sludge, and Biosolids Management: Moving Forward the Sustainable and*

*Welcome Uses of a Global Resource.*” *Proceedings of the Water Environment Federation* (Vol. 2009). <https://doi.org/10.2175/193864709793846402>

López Palomino, C. A. (2015) Manejo De Biosólidos a Raíz De La Nueva Normatividad En La Ptar Río Frío, Bucaramanga (Santander) Biosolids Management Following the New Regulations At Wwtp Rio Frio, Bucaramanga (Santander).

Mantilla Oviedo, G. A. (2015). Validación de Uso de Lodos Generados en Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Tipo UASB como insumo en Recuperación de Suelos Agrícolas. *Esaica*, 1, 18-23. Retrieved from <http://revistas.udes.edu.co/site/index.php/esaica/article/view/267>

Márquez, P. B., Díaz Blanco, M. J., & Cabrera Capitán, F. (2005). Factores que afectan al proceso de Compostaje. *Universidad de Huelva. Facultad de Ciencias Experimentales*, 16. Retrieved from [http://digital.csic.es/bitstream/10261/20837/3/Factores que afectan al proceso de compostaje.pdf](http://digital.csic.es/bitstream/10261/20837/3/Factores%20que%20afectan%20al%20proceso%20de%20compostaje.pdf)

Ministerio de Vivienda, C. Y. T. (2014). Decreto 1287 Del 10 de Julio De 2014. *10-Julio-2014*, 15. Retrieved from [http://wsp.presidencia.gov.co/Normativa/Decretos/2014/Documents/JULIO/10/DECRETO 1287 DEL 10 DE JULIO DE 2014.pdf](http://wsp.presidencia.gov.co/Normativa/Decretos/2014/Documents/JULIO/10/DECRETO%201287%20DEL%2010%20DE%20JULIO%20DE%202014.pdf)

Molina, Gomez, L. L., & Merchan Bermudez, A. M. (2016). Caracterizacion fisicoquimica de los lodos provenientes de una planta de tratamiento de agua residual industrial de una empresa de café del departamento de Caldas, 8–157. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Oropeza García, N. (2006). Lodos residuales : estabilización y manejo. *Caos Conciencia*, 1 (figura 1), 51–58.

Paz Castro, C., Henríquez, O., & Freres, R. (2007). Posibilidades de aplicación de lodos o biosolidos a los suelos del sector norte de la region metropolitana de santiago. *Revista de Geografía Norte Grande*, 37, 35–45.

Tello Andrade, A. F.; Jiménez Moleón, M. C.; Sánchez Galván, G.; Caballero Viñas, J.; Burrola Aguilar, C. (2018). Revalorización de lodos residuales: 1. Compostaje. En M. C. Jiménez (Ed.), *Ciencias del agua: perspectiva desde la academia*. (pp. 243-259). Estado de México,

México. Recuperado de file:///C:/Users/Admin/Downloads/PortadaISBNIndiceCAPXIII.pdf

Unión Europea - Acción Social. (2011). Campesinos, tierra y desarrollo rural: Reflexiones desde la experiencia del tercer laboratorio de Paz. *Reflexiones Desde La Experiencia Del Tercer Laboratorio de Paz*, 28. Retrieved from [http://eeas.europa.eu/delegations/colombia/documents/projects/cartilla\\_tierra\\_y\\_desarrollo\\_lab\\_paz\\_iii\\_es.pdf](http://eeas.europa.eu/delegations/colombia/documents/projects/cartilla_tierra_y_desarrollo_lab_paz_iii_es.pdf)

Uwai, K., Okuyama, Y., Nakano, H., Furukawa, K., Hiroshima, E., Azuma, H., ... Takeshita, M. (2014). Biotransformation of organic compounds in vivo using larvae of beetles (*Allomyrina dichotoma*) as biocatalysts. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 3(4), 129–133. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2014.09.005>

### Apéndices

**Apéndice A.** Tabla recipientes para muestras, condiciones de preservación y almacenamiento para diferentes parámetros medidos en sedimentos y lodos.

<i>Análisis o ensayo</i>	<i>Recipiente</i>	<i>Preservación</i>	<i>Condiciones de almacenamiento</i>	<i>Duración del almacenamiento</i>
pH	Dispositivo de muestreo	Refrigerar	Se determina en el campo	Ninguna
Conductividad	Polietileno/vidrio	Refrigerar	2°C a 5°C, hermeticidad, oscuridad	24 h
Nitrógeno Kjeldahl	Polietileno/vidrio	Refrigerar	2°C a 5°C, hermeticidad, oscuridad	1 mes
Nitrógeno amoniacal	Polietileno/vidrio	Refrigerar	2°C a 5°C, hermeticidad, oscuridad	Lo más corto posible
Aniones (por ejemplo, sulfatos)	Polietileno/vidrio	Refrigerar	2°C a 5°C, hermeticidad, oscuridad	28 d
Nitrato	Polietileno/vidrio	Refrigerar	2°C a 5°C, hermeticidad, oscuridad	2 d
Nitrito	Polietileno/vidrio	Refrigerar	2°C a 5°C, hermeticidad, oscuridad	Lo más corto posible
Fósforo	Vidrio	Refrigerar	2°C a 5°C, hermeticidad, oscuridad	1 mes

Apéndice A. (Continuación).

Metales	Polietileno	Refrigerar	2°C a 5°C,	1 mes
	Polietileno/vidrio	Congelar	hermeticidad, oscuridad	6 meses
		Secar (60°C)	≤ 2°C a 5°C, hermeticidad, oscuridad	6 meses
			Temperatura ambiente, oscuridad, hermeticidad	
Ensayos ecotoxicológicos	Polietileno/vidrio	Refrigerar	2°C a 5°C, hermeticidad, oscuridad	14 d
Examen bacteriológico	Vidrio estéril	Refrigerar	2°C a 5°C, hermeticidad, oscuridad	6 h
Actividad microbiana	Vidrio estéril	Ninguna	Ninguna	Ninguna
a. El análisis se debería iniciar lo más pronto posible.				

Fuente: NTC- 5667-15

**Apéndice B.** Tabla interpretación del contenido de materia orgánica en suelo.

<b>Clase</b>	<b>Materia Orgánica (%)</b>
Muy bajo	< 0,5
Bajo	0,6 – 1,5
Medio	1,6 – 3,5
Alto	3,6 – 6,0
Muy alto	> 6,0

Fuente: Gomez Molina, L.L. Merchan Bermudez, A.M. (2016). Caracterización fisicoquímica de los lodos provenientes de una planta de tratamiento de agua residual industrial de una empresa de café del departamento de caldas. *Tesis Pregrado*. Universidad catolica de Manizales. Manizales, Colombia.

**Apéndice C.** Tabla clasificación de la fertilidad de suelos a partir de la C.I.C.

<b>C.I.C meq/100 gr</b>	<b>Tipo</b>	<b>Observaciones</b>
< 6	Muy bajo	Suelo muy pobre: Necesario aporte importante de M.O
6-12	Bajo	Suelo pobre: Necesita aporte de M.O
12-25	Medio	Suelo medio
25-40	Alto	Suelo rico
>40	Muy alto	Suelo muy rico

Fuente: Gomez Molina, L.L. Merchan Bermudez, A.M. (2016). Caracterización fisicoquímica de los lodos provenientes de una planta de tratamiento de agua residual industrial de una empresa de café del departamento de caldas. *Tesis Pregrado*. Universidad catolica de Manizales. Manizales, Colombia.

**Apéndice D.** Tabla clasificación del suelo según su conductividad eléctrica.

<b>CE (mS/cm)</b>	<b>Tipo de suelo</b>	<b>Efectos</b>
0-2	No salino	Despreciables en su mayoría. No afecta cultivos.
2-4	Ligeramente salino	Se restringen o disminuyen los rendimientos de cultivos muy sensibles.
4-8	Moderadamente salino	Disminuye los rendimientos de la mayoría de los cultivos.
8-16	Fuertemente salino	Solo dan rendimientos satisfactorios los cultivos tolerantes.
>16	Extremadamente salino	Solo dan rendimientos satisfactorios algunos cultivos muy tolerantes.

Fuente: Gomez Molina, L.L. Merchan Bermudez, A.M. (2016). Caracterización fisicoquímica de los lodos provenientes de una planta de tratamiento de agua residual industrial de una empresa de café del departamento de caldas. *Tesis Pregrado*. Universidad catolica de Manizales. Manizales, Colombia.