

**TRABAJO DE GRADO**

**MONOGRAFIA**

**PROSPECCION DE TECNOLOGÍAS DE TRATAMIENTO, MANEJO Y DISPOSICIÓN  
FINAL DE LODOS DE PTAR MUNICIPALES**

**YANCELLY LEAL**

**UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA UNAD**

**Escuela de Ciencias agrícolas, pecuarias y de medio ambiente**

**Pregrado en Ingeniería Ambiental**

**Bogotá D.C., Diciembre de 2019**

**MONOGRAFÍA**

**PROSPECCION DE TECNOLOGÍAS DE TRATAMIENTO, MANEJO Y DISPOSICIÓN  
FINAL DE LODOS DE PTAR MUNICIPALES**

**YANCELLY LEAL**

**Director:**

**Jessica Paola Páez Pedraza**

**UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA UNAD**

**Escuela de Ciencias agrícolas, pecuarias y de medio ambiente**

**Pregrado en Ingeniería Ambiental**

**Bogotá D.C., Diciembre de 2019**

## AGRADECIMIENTOS

El paso por la vida, sus avatares, los triunfos, las metas alcanzadas, los sueños cumplidos, las caídas, el camino abrumador; son parte de un todo, son los escaños de una meta; los que nos hace levantarnos cada día con la mente puesta en un horizonte para llegar a él. Pero nada se logra sin un apoyo, ayuda, impulso, compañía de alguien que está dispuesto a mucho para que logres tus propósitos. Mi compañía, mi fuerza, mi ayuda y hasta mi asesor; es mi esposo. Por todo y más le agradezco mucho el lograr terminar este proyecto universitario, y seguimos más unidos que nunca.

Agradecerle igualmente a la decana **Julialba Ángel Osorio**, quien asumió mi proceso, para dar por terminados tres semestres en los cuales divague entre estar a un paso de ser profesional por las vicisitudes administrativas y organizacionales, que me lo impedían.

## **DEDICATORIA**

A mi esposo, por su valiosa compañía y ayuda sin importar la hora, el cansancio. Siempre has sido un apoyo incondicional.

## CONTENIDO

CONTENIDO .....	i
RESUMEN .....	vi
ABSTRACT.....	vii
1 INTRODUCCIÓN .....	1
2 JUSTIFICACIÓN .....	4
3 OBJETIVOS .....	5
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	5
3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	5
4 PRIMER CAPITULO. SISTEMAS DE TRATAMIENTO PARA AGUAS RESIDUALES	6
4.1 SISTEMAS DE TRATAMIENTO PARA AGUAS RESIDUALES .....	6
5 SEGUNDO CAPÍTULO. LODOS GENERADOS EN PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) .....	4
5.1 DEFINICIÓN DE LODO.....	4
5.1.1 Lodo residual .....	4
5.1.2 Biosólidos .....	4
5.1.3 Biosólidos y alternativas de aprovechamiento.....	5
5.2 CLASIFICACIÓN DE LOS LODOS PARA SU APROVECHAMIENTO .....	7
5.2.1 Tipos de lodos según el origen del efluente.....	8
5.2.2 Tipos de lodos generados según la etapa del tratamiento de aguas residuales .....	8
5.2.3 Tipos de lodo según su nivel de aprovechamiento .....	9
5.3 TIPO DE TRATAMIENTO DE LODOS .....	10
5.3.1 Tratamientos biológicos.....	10
5.3.2 Tratamientos físico - químicos.....	10
5.4 MARCO LEGAL.....	11

6	TERCER CAPITULO. TRATAMIENTO DE LODOS .....	13
6.1	PRE-TRATAMIENTO .....	13
6.1.1	Dilaceración .....	14
6.1.2	Desarenado.....	14
6.1.3	Mezclado.....	15
6.1.4	Almacenamiento .....	16
6.2	ESPESAMIENTO .....	16
6.2.1	Tambor Rotativo .....	17
6.2.2	Espesamiento por Centrifugacion .....	18
6.2.3	Espesamiento por gravedad .....	19
6.2.4	Espesamiento por flotación.....	20
6.3	ESTABILIZACIÓN .....	21
6.3.1	Estabilización biológica .....	21
6.3.2	Estabilización con Oxidación de Cloro.....	24
6.3.3	Estabilización química .....	24
6.4	ACONDICIONAMIENTO .....	25
6.4.1	Acondicionamiento químico.....	25
6.4.2	Acondicionamiento térmico.....	26
6.5	DESINFECCIÓN .....	27
6.5.1	Pasteurización .....	27
6.5.2	Almacenamiento a largo plazo.....	28
6.6	DESHIDRATACIÓN.....	29
6.6.1	Filtración al vacío .....	29
6.6.2	Filtro Banda .....	30
6.6.3	Centrifugacion.....	30

6.6.4	Lagunaje.....	31
6.6.5	Filtración a presión .....	31
6.7	SECADO .....	32
6.7.1	Secado por pulverización.....	32
6.7.2	Secado horno rotativo .....	32
6.7.3	Secado instantáneo.....	33
6.7.4	Hornos de piso .....	33
6.7.5	Eras de secado.....	34
6.7.6	Secado térmico.....	35
6.8	PROCESOS TÉRMICOS .....	36
6.8.1	Incineración.....	36
6.8.2	Coincineración .....	36
6.8.3	Gasificación del lodo .....	37
6.8.4	Pirólisis del lodo .....	38
6.8.5	Mixto de gasificación y pirólisis.....	39
6.8.6	Oxidación húmeda del lodo .....	39
7	CUARTO CAPITULO. DEBILIDADES Y FORTALEZAS DE ALGUNOS TRATAMIENTOS DE LODOS.....	41
8	QUINTO CAPÍTULO. DISPOSICION Y APROVECHAMIENTO DE LODOS .....	49
8.1	APROVECHAMIENTO Y DISPOSICION DE LODOS .....	49
8.1.1	Alternativa de fertilizante orgánico .....	50
8.1.2	Alternativa de material de construcción .....	50
8.1.3	Alternativa de restauración de espacios.....	51
8.1.4	Alternativa de extracción de carbón activado .....	51
8.1.5	Alternativa de aprovechamiento energético.....	51

8.2	DISPOSICIÓN DE LODOS .....	52
8.2.1	Alternativa de reverdecimiento de las tierras estériles .....	52
8.2.2	Alternativa de fijación química.....	53
8.2.3	Alternativa de incineración.....	53
8.2.4	Alternativa de Aplicación de lodos en suelo.....	54
8.2.5	Alternativa de disposición en relleno.....	54
9	SEXTO CAPÍTULO. DISPOSICION TERMINAL DEL CICLO DE LODOS .....	56
9.1	DISPOSICION TERMINAL DEL CICLO DE LODOS .....	56
9.1.1	Incineración.....	56
9.1.2	Depósito en vertederos controlados.....	57
9.1.3	Aplicación en los suelos.....	58
9.1.4	Recuperación de energía.....	60
9.1.5	Otros.....	61
10.	APROVECHAMIENTO Y DISPOSICIÓN EN PRINCIPALES PTAR DE COLOMBIA .....	63
10.1	APROVECHAMIENTO Y DISPOSICIÓN EN PRINCIPALES PTAR DE COLOMBIA	63
11.	RECOMENDACIONES.....	66
12.	CONCLUSIONES .....	68
13.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	70

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Sistemas de tratamientos de aguas residuales y eficiencia de remoción .....	6
Tabla 2. Composición de lodos generados en el tratamiento de aguas residuales.....	12
Tabla 3. Diferencia en la composición de un lodo crudo y un biosólido.....	4
Tabla 4. Valores máximos permisibles de categorización de biosólidos para su uso.....	5
Tabla 5. Normatividad legal en lodos generados en PTAR y Biosólidos.....	7
Tabla 6. Matriz de Ventajas y Desventajas de diferentes tratamientos de lodos.....	41
Tabla 7. Valores máximos permisibles de categorización de biosólidos para su uso.....	55
Tabla 8. Ventajas y desventajas en la recuperación de energía .....	64
Tabla 9. Análisis de procesos – tratamientos y aprovechamientos.....	63
Tabla 10. Características físicas de lodos en las principales PTAR de Colombia.....	63
Tabla 11. Posibles usos y aprovechamiento de los biosólidos.....	61

## RESUMEN

La propuesta para la monografía está dirigida a la revisión de los procesos llevados en el sistema de tratamiento de lodos, dentro de los cuales se llevan a cabo tratamientos de diferente tipo, como son preliminares, primarios, secundarios y demás, que producen elevados niveles de lodos residuales que son tratados, pero mínimamente aprovechados o dispuestos para su uso.

En la construcción de los temas abordados, se manejó los conceptos relacionados con los lodos residuales, y aquellas particularidades que le dan diferentes características para su aprovechamiento o manejo, evidenciando con la revisión, que los diferentes tipos de tratamiento generan condiciones en los lodos que permiten su aprovechamiento y/o disposición final.

Luego de abordar algunas generalidades de los tratamientos de aguas residuales y lodos, se acogieron las alternativas de uso o aprovechamiento, pero teniendo como premisa, que fueran las más viables para Colombia, tomando como relación, aspectos como el nivel de tecnologías de tratamientos en las PTAR, que en algunos casos afecta el tipo de tratamiento, el caudal de lodos producido y por ende las características.

Seguido a esto se hizo un análisis de tres alternativas de aprovechamiento para estos lodos, las cuales se identificaron de acuerdo con el tipo de tratamiento de cada PTAR en la producción de lodos residuales y el valor de caudal de entrada del agua.

Algo importante dentro de la parte final de la monografía son las recomendaciones y aunque no se hizo un análisis de laboratorio o muestras, es apreciable que los mismos datos existentes, en la revisión documental, y las características de los lodos generados, dan cuenta de varias opciones o alternativa de aprovechamiento de los lodos.

## ABSTRACT

The proposal for the monograph is aimed at reviewing the processes carried out in the sludge treatment system, within which different types of treatments are carried out, such as preliminary, primary, secondary and others, which produce high levels of sewage sludge that are treated, but minimally exploited or ready for use.

In the construction of the issues addressed, the concepts related to sewage sludge and those particularities that give it different characteristics for use or handling were handled, evidencing with the review that the different types of treatment generate conditions in the sludge that allow its use and  $\times 2F$ ; or final disposal.

After addressing some generalities of wastewater and sludge treatment, the alternatives of use or exploitation were accepted, but with the premise that they were the most viable for Colombia, taking as a relationship, aspects such as the level of treatment technologies in the WWTP, which in some cases affects the type of treatment, the flow of sludge produced and therefore the characteristics.

This was followed by an analysis of three alternative uses for these sludges, which were identified according to the type of treatment of each WWTP in the production of sewage sludge and the value of the water inlet flow.

An important part of the final part of the monograph are the recommendations and although no laboratory analysis or samples were made, it is appreciable that the same existing data, in the documentary review, and the characteristics of the sludge generated, account for several options or alternative use of the sludge.

# 1 INTRODUCCIÓN

Dentro de las problemáticas modernas, se ha hecho énfasis en tratar aquellas que tiendan por una mejora del medio ambiente, tomando acciones para que en primera instancia no afecten la salud humana y, en segundo lugar, sean amables con el planeta; entre algunas de las alternativas, está la ubicación distante de asentamientos humanos a estas problemáticas ambientales.

Este es el caso de las aguas residuales y los lodos generados durante su tratamiento, los cuales ocasionan un problema, como es la disminución de áreas para la disposición final o desecho de los lodos residuales, y que tenga como indicador o resultado? la no contaminación o afectación del entorno natural, esta es una premisa en Colombia, sustentada en la teoría y hasta en las políticas, dirigidas al cuidado y la preservación del medio ambiente, la reutilización y aprovechamiento de los lodos residuales, transformándolos de la consideración actual, como desecho o basura, en una alternativa o materia prima, tanto útiles para actividades económicas como benéficas para la naturaleza, gestiones programáticas que están por llevarse a cabo.

En las actividades de manejo de aguas residuales o disposición final, del sistema urbano municipal, correspondiente a las plantas de tratamiento de aguas residuales, se genera volúmenes de lodos considerables, que en caso de no darles un debido tratamiento o disposición final adecuada, contribuyen de manera directa e importante en la contaminación de la atmosfera, de las aguas o grandes vertientes hidrográficas y los suelos, afectando el ecosistema, y generando problemáticas de salud pública para las personas.

La Asociación Colombiana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (ACODAL, 2013), expone que el 31% de las ciudades en Colombia cuentan con PTAR (tratamiento primario el 29% y el 1% tratamiento terciario); donde se ha observado una incorrecta selección de las tecnologías, altos costos de inversión, operación y bajos niveles de aprovechamiento de lodos (aunque la inversión destinada al tratamiento de las aguas residuales no alcanza el 1% de lo invertido o destinado en agua potable) y una poca protección de las fuentes hídricas y aprovechamiento de lodos, lo cual pone en riesgo la sostenibilidad ambiental.

Las condiciones actuales de uso y desarrollo de los tratamientos de aguas residuales y plantas de tratamiento, son un punto que fue abordado por Donado Hoyos (2013), quien según en el informe técnico sobre sistemas de tratamiento de aguas residuales en Colombia, durante los años 2011-

2012, la Superintendencia de servicios inspeccionó 333 sistemas (como parte del seguimiento del Plan Nacional de Desarrollo 2010-2014), los cuales corresponden al 59% de los 562 instalados en 480 municipios del país; de ellos 89 plantas de tratamiento se encontraron fuera de operación, además en las visitas técnicas realizadas y el análisis de la información reportada por las empresas prestadoras, se observaron falencias como: incumplimiento a las normas de vertimiento de aguas residuales, desconocimiento de protocolos de operación, falta de mantenimiento a la infraestructura, así como incumplimiento y/o falta de seguimiento a lo establecido en los Permisos de Vertimientos y/o en los Planes de Manejo de Saneamiento y Manejo de Vertimientos (PSMV). Esta información es suficiente para suponer la finalidad de aprovechamiento de lodos, es una idea nada más, por ahora.

En la vida moderna es prioritario el uso máximo de los recursos, la reducción o uso más efectivo de los espacios, y la máxima eficiencia de un producto. Cuando se agrupan esos conceptos es importante enfocarse en últimas tecnologías en desarrollo tecnológico e industrial; el término amigable o protección del medio ambiente, tiene una relación directa, con las tecnologías y procesos en el manejo de las aguas residuales y los lodos producidos, por cuanto más actualizados o eficientes sean este tipo de procesos o tecnologías, se puede lograr una menor generación de residuos.

Según el informe de la procuraduría general de la nación, titulado “*el agua y el saneamiento básico en los planes de desarrollo departamentales y municipales*” del 2010, menciona con preocupación, que tantos municipios incluyan en sus planes de desarrollo solamente información parcial o en algunos casos ninguna información sobre el estado de sus sistemas de acueducto, alcantarillado y manejo de los residuos sólidos.

La mayoría reporta redes de acueducto y alcantarillado obsoletas o en mal estado, pero sólo una minoría tiene proyectos para mejorarlas o mantenerlas, y una mayoría informa que tiene plantas de tratamiento de agua, y a la vez reportan que la calidad del agua que distribuyen no es potable, pero más de la mitad no formulan proyectos para mejorar la planta de tratamiento. Tampoco se mantienen las plantas de tratamiento de aguas residuales, lo cual deteriora el ambiente y aumenta el riesgo de enfermedad, ni se diseñan planes para que la disposición de aguas residuales no acabe con las fuentes de agua.

Colombia es un país, que enmarca su información en las ciudades capitales, como forma de diagnosticar su estado o avance, al revisar información general y actual sobre los tratamientos de aguas, se presenta un panorama que da cuenta de un total rezago en lo que respecta a la infraestructura y tecnologías para el tratamiento de aguas residuales tanto en las ciudades capitales, como en los municipios, y todo esto va en conexión con el tipo de calidad de agua potable que llega a las personas, que no es la más apta.

Es en este punto cuando se encuentran como referencia los residuos provenientes de la contaminación del agua en los diferentes usos y el concepto como es el aprovechamiento del agua residual y del subproducto denominado lodo, tema relevante, pues el uso de los lodos da cuenta de una nueva línea de manejo, de mejora en las condiciones de proceso de los residuos y de una nueva alternativa o ingreso económico para la sostenibilidad de este tipo de industrias.

Las aguas residuales son una prioridad de atención, pero inmerso en ellas está la sostenibilidad e incidencia en el medio ambiente de los diferentes subproductos generados en los tratamientos o procesos, es por eso que se deben reconocer no sólo las alternativas presentes en el manejo de aguas residuales, sino también aquellas que generen subproductos, como lodos y sus posibles alternativas para el aprovechamiento y disposición, reduciendo con ello los volúmenes y dándole un uso positivo para el medio ambiente a los subproductos.

En Colombia, la información publicada en torno a experiencias de reutilización y tratamiento de los lodos provenientes de PTAR es escasa. En tres PTAR de tipo convencional de diferentes ciudades del país, se realiza el tratamiento de estos lodos donde prima el tratamiento físico por medio de la deshidratación, mientras que en el municipio de Caldas (Antioquia) se cuenta con una planta piloto para el tratamiento de lodos donde se espesan por medio de polímeros hasta su secado para su posterior disposición. Así mismo, han sido pocas las publicaciones para la reutilización y tratamiento de lodos provenientes de PTAR (Gutiérrez Rosero, 2014).

## 2 JUSTIFICACIÓN

De acuerdo con el Ministerio de Desarrollo (2018) y Planeación Distrital (2018), tanto en Latinoamérica, como en Colombia y su ciudad capital, no se encuentra información actualizada, formal del aprovechamiento de los lodos provenientes de las plantas de aguas residuales, algo que dificulta el inicio de estos procesos; asimismo, la información sobre las diferentes plantas de tratamiento y las características de las aguas residuales que éstas tratan, se encuentra desactualizada, lo que conlleva a tratamientos poco eficientes, afectando a su vez la posibilidad de aprovechamiento del lodo considerado para llegar al uso y aprovechamiento efectivo de los lodos, los cuales son considerados actualmente como residuos.

El presente trabajo de grado tiene como propósito indagar sobre las alternativas para el aprovechamiento de lodos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales, que podrían ser utilizados en otras actividades o propósitos, teniendo como factor resaltante, la problemática ambiental y actual que existe, los volúmenes de lodos, y los daños o afectaciones que crea su actual disposición mayoritaria en los cuerpos de agua.

A través de esta monografía se busca proponer opciones de uso, aprovechamiento y disposición de lodos, con base en alternativas o procesos descritos por autores o manuales reportados en diferentes fuentes o referencias bibliográficas, lo que puede permitir un avance con respecto al tema, y de cuenta de los beneficios o ventajas factibles tanto a nivel económico como ambiental con la transformación de prácticas actuales, como el vertimiento de los lodos en cuerpos de agua, y cambiarlos por un uso o aprovechamiento y respuesta amigable con el medio ambiente y la salud pública.

### **3 OBJETIVOS**

#### **3.1 OBJETIVO GENERAL**

Reconocer procesos tecnológicos para el tratamiento, uso y aprovechamiento de lodos en sistemas de tratamiento de aguas residuales, que permitan alternativas y/o oportunidades de disposición final.

#### **3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Identificar tecnologías para el tratamiento de lodos en las PTAR (Planta de Tratamiento de Aguas Residuales).
- Identificar las características fisicoquímicas de los lodos de aguas residuales que deben tenerse en cuenta para la selección de tecnologías de tratamiento.
- Considerar el ciclo de tratamiento de lodos y disposición final de lodos, encaminadas al uso y aprovechamiento.

## 4 PRIMER CAPITULO. SISTEMAS DE TRATAMIENTO PARA AGUAS RESIDUALES

### 4.1 SISTEMAS DE TRATAMIENTO PARA AGUAS RESIDUALES

Las diversas actividades domésticas y recreacionales del ser humano traen como consecuencia la contaminación de las aguas superficiales con sustancias químicas y microbiológicas, además del deterioro de sus características estéticas. Para hacer frente a esta situación es necesario someter al agua a una serie de operaciones o procesos unitarios, a fin de purificarla o potabilizarla para un uso posterior o consumo. Una operación unitaria es un proceso químico, físico o biológico mediante el cual las sustancias objetables que contiene el agua son removidas o transformadas en sustancias inocuas. La mayor parte de los procesos originan cambios en la concentración o en el estado de una sustancia, la cual es desplazada o incorporada en la masa de agua, en la Tabla 1, se presentan los diferentes procesos unitarios, y sus porcentajes de eficiencia en la remoción de los diferentes contaminantes presentes (Torres Navarro, 2016 citando a Ligia Vargas).

**Tabla 1. Sistemas de tratamientos de aguas residuales y eficiencia de remoción**

	Unidades de tratamiento	Descripción	Eficiencia mínima de remoción de parámetros, porcentajes %						
			DBO5	DQO	SST	SSED	Grasas y aceites	Patógenos	Observaciones
<b>Pre-tratamiento</b>  <i>Se realiza por medio de sistemas que permiten la retención y remoción de material extraño que transporta el agua residual; pueden ser físicos o mecánicos.</i>	Cribado o desbaste	Rejas o tamices, que buscan la eliminación de objetos grandes para evitar obstrucciones que puedan provocar daños en las distintas unidades de la instalación o dificultar los restantes tratamientos. El uso de militamices y microcribas, permite separar o colectar las partículas más pequeñas.	0-15	0-10	10-50	0-6	0-40	N/A	Remociones con militamices y microcribas
	Desarenadores	Estructura diseñada para la eliminación de grava, arena y partículas minerales más o menos finas.	0-5	0-5	0-10	N/A	N/A	N/A	
	Trampa de grasas	Separación de aceites, grasas y sólidos suspendidos del agua clarificada. El agua entra en la primera cámara, todo el material flotante como las grasas, ascienden en el segundo compartimento de la cámara ya que son menos densas que el agua, mientras que el material más pesado se asienta como lodo en el fondo de la trampa de grasa; por último, en el tercer compartimento de la cámara, el agua clarificada sin grasa sale como efluente.	0-5	0-3	10-15	N/A	85-95	N/A	
<b>Tratamiento Primario</b>  <i>Tratamiento en el que se remueve una</i>	Sedimentación primaria	Tanques donde se lleva a cabo la eliminación de sólidos en suspensión susceptibles de separación por diferencia de densidad. Las partículas más pesadas que el agua son separadas por acción de la gravedad.	30-40	30-40	50-65	75-85	60-70	30-50	

	Unidades de tratamiento	Descripción	Eficiencia mínima de remoción de parámetros, porcentajes %						
			DBO5	DQO	SST	SSED	Grasas y aceites	Patógenos	Observaciones
<p>porción de los sólidos y de la materia orgánica del agua residual. Esta remoción normalmente es realizada por operaciones físicas como la sedimentación.</p>	Tanque Imhoff	Sistema de tratamiento anaerobio; el cual está equipado con un compartimiento inferior para la digestión de los sólidos sedimentados y una cámara superior de sedimentación; éstos sólidos se transportan por la abertura del compartimiento hacia la zona de digestión. El tanque puede disponer de dos cámaras de sedimentación sobre las cámaras de digestión.	25-40	15-30	50-70	75-85	60-70	30-50	
	Lagunas anaerobias	Reducción del contenido en sólidos y materia orgánica coloidal y disuelta del agua residual; mediante procesos biológicos anaerobios, la mayor parte del agua se encuentra en condiciones anaerobias y son las bacterias (Streptococos fecales, Actinomiceto) las encargadas de actuar en la digestión del lodo acumulado. El objeto de estas lagunas es retener la mayor carga orgánica posible. Debido a las altas cargas que soporta este tipo de unidades de tratamiento y a las eficiencias reducidas, se hace necesario el tratamiento posterior, generalmente por unidades de lagunas facultativas	50-70	30-50	50-60	75-85	80-90	80-90	
<p><b>Tratamiento Secundario</b></p> <p>Constituye una serie de procesos que tienen en común la utilización de microorganismos para llevar a cabo la eliminación de materia orgánica biodegradable. para después convertirla en sólidos suspendidos, su facilitando eliminación.</p>	Lagunas facultativas	Laguna de coloración verdosa cuyo contenido de oxígeno varía de acuerdo con la profundidad y hora del día. En el estrato superior de una laguna facultativa primaria existe una simbiosis entre algas y bacterias, en presencia de oxígeno; en los estratos inferiores se produce una biodegradación anaerobia de los sólidos sedimentables.	80-90	40-50	63-75	75-85	70-90	80-90	Sin contar con alsas
	Lagunas aireadas	Depósito para el tratamiento de aguas que acelera la descomposición biológica de la materia orgánica estimulando el crecimiento y la actividad de las bacterias, que son responsables de la degradación; mediante aireadores mecánicos, suministra oxígeno y mantiene a los organismos aerobios en suspensión y mezclados con el agua para alcanzar una elevada tasa de degradación orgánica.	80-95	60-70	N/A	N/A	N/A	80-90	Con sedimentación secundaria
	Reactor anaerobio RAP (Reactor Anaerobio de flujo a Pistón) RAP	Sistema que permite el paso del agua a través de un manto de lodos, degradando la materia orgánica. El RAP, trabaja con temperaturas entre 15 y 20°C, tiene un nivel de porosidad alto que permite mejorar la separación de gases y biomasa lo que proporciona una mezcla sin adherencia.	65-80	60-80	60-70	N/A	N/A	20-40	
	Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (UASB del inglés Upflow Anaerobic Sludge Blanket)	Degradación de materia orgánica por medio de microorganismos anaerobios; dando como resultado gas metano y material biológico ya estabilizado. A diferencia del RAP, el agua no se encuentra expuesta a la atmósfera. Existen dos tipos de reactor anaeróbico de flujo ascendente, el primero se refiere al reactor de lodo granular, que permiten buenas condiciones de sedimentación y actividad metanogénica aceptando altas cargas orgánicas específicas; el segundo es de lodo floculento que tiene menos capacidad de soportar cargas tanto hidráulicas como orgánicas.	65-80	60-80	60-70	N/A	N/A	20-40	

	Unidades de tratamiento	Descripción	Eficiencia mínima de remoción de parámetros, porcentajes %						
			DBO5	DQO	SST	SSED	Grasas y aceites	Patógenos	Observaciones
	Filtros anaerobios	Consiste en un tanque de sedimentación (o fosa séptica) seguido de una o más cámaras de filtración. Los materiales comúnmente usados para el filtro incluyen grava, piedras quebradas, carboncillo, o piezas de plástico formadas especialmente.	65-80	60-80	60-70	WA	N/A	20-40	
	Lodos activados convencionales	Empleado cuando el agua residual responde a tratamientos biológicos, no sin antes remover los sólidos gruesos, arenas, grasas y aceites. Su proceso aerobio, genera crecimiento en suspensión, donde los microorganismos se mantienen en suspensión durante 4 u 8 horas en un tanque de aireación (Reactores biológicos) por medio de mezcladores mecánicos o aire difuso. Su concentración en el tanque se mantiene por el retorno continuo de floculos biológicos sedimentados que provienen de un tanque de sedimentación secundario y luego se dirigen al tanque de aireación.	80-95	70-80	80-90	N/A	N/A	80-90	
	Filtros percoladores De alta tasa, roca De alta tasa, plástico	Es un filtro biológico de lecho fijo que opera bajo condiciones (principalmente) aeróbicas. Se "deja caer" o rocía agua de desecho decantada sobre el filtro. Al migrar el agua por los poros del filtro, la materia orgánica se degrada por la biomasa que cubre el material del filtro.	65-90 75-95	55-70 60-80	60-85 65-85	WA N/A	N/A N/A	80-90 80-90	
<b>Desinfección</b>  <i>Dstrucción de bacterias y virus de origen fecal en las aguas residuales, mediante un agente desinfectante.</i>	Rayos UV	La luz ultravioleta (UV) presenta un método de desinfección alternativo al uso del cloro y el ozono en muchas aplicaciones de tratamiento tanto de agua potable como de aguas residuales. La UV brinda una desinfección efectiva sin generar subproductos de desinfección problemáticos.	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	100	
	Cloración	El principal objeto de la cloración es la destrucción de microorganismos gracias a la acción germicida del cloro, pero también tiene una gran importancia la oxidación de sustancias inorgánicas reducidas (hierro, manganeso, sulfuros, etc.), la destrucción de compuestos que producen olor y sabor, eliminación de algas y microorganismos del légamo, así como el efecto coadyuvante en la coagulación.	N/A	N/A	WA	N/A	N/A	100	
	Laguna de maduración	laguna de estabilización diseñada para tratar efluente secundario o agua residual previamente tratada por un sistema de lagunas.	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	99,9	

Adaptado: Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS, 2017

## 5 SEGUNDO CAPÍTULO. LODOS GENERADOS EN PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR)

### 5.1 DEFINICIÓN DE LODO

#### 5.1.1 Lodo residual

Lodo residual es el residuo sólido, semisólido o líquido que se genera por el tratamiento de las aguas residuales. Su composición depende principalmente de las características del agua residual afluyente y del proceso de tratamiento utilizado. La composición y características varían en función del proceso del cual proceden o son tratados. Uno de los problemas para el uso y manejo de los lodos es su alto contenido de patógenos, por lo que se requiere su estabilización (Donado Hoyos, 2013). Dichas variaciones en la composición, se puede evidenciar en la Tabla 2, sobre composición de lodos.

**Tabla 2. Composición de lodos generados en el tratamiento de aguas residuales.**

Ítem	Tipo de Lodo y etapa de tratamiento		
	Primario	Secundario	Terciario
<i>Sólidos Suspendidos (uds)</i>	30 – 36	18 – 29	31 – 40
<i>Contenido de Agua (%)</i>	92 – 96	97,5 – 98	94 – 97
<i>Sólidos Suspendidos Volátiles</i>	70 – 80	80 – 90	55 – 65
<i>Grasas (% S. S)</i>	12 – 16	3 – 5	4 – 12
<i>Proteínas (% S. S)</i>	4 – 14	20 – 30	10 – 20
<i>Carbohidratos (% S. S)</i>	8 – 10	6 – 8	5 – 8
<i>pH</i>	5,5 – 6,5	6,5 – 7,5	6,8 – 7,6
<i>Fósforo (% S. S)</i>	0,5 – 1,5	1,5 – 2,5	1,5 – 2,5
<i>Nitrógeno (% S. S)</i>	2 – 5	1 – 6	3 – 7
<i>Bacterias Patógenas (Número más probable por 100 ml)</i>	103 – 105	100 – 1000	10 – 100
<i>Organismos Parásitos (Número más probable por 100 ml)</i>	8 – 12	1 – 30	1 – 3
<i>Metales Pesados (% S. S)</i>	0,2 – 2	0,2 – 2	0,2 – 2
<i>Cantidad de Lodo (l/hab)</i>	0,70	1,70	0,90

Adaptado de: López Pino & Martín Calderón (2015).

#### 5.1.2 Biosólidos

Dentro de las reglamentaciones vigentes, contenidas en el Decreto 1287/14, se definen los biosólidos como el producto resultante de la estabilización de la fracción orgánica de los lodos generados en el tratamiento de aguas residuales municipales, con características físicas, químicas y microbiológicas que permiten su uso.

Los lodos estabilizados, conocidos igualmente como Biosólidos, tienen como características, el haber pasado por un proceso o conjunto de procesos, que permiten la generación de un producto final o lodo, que presenta características para ser usado, sin que tenga ya alguna afectación en la salud pública o medio ambiente.

Cumpliendo con objetivos básicos, para su uso y/o aprovechamiento, como son:

- Minimizar la presencia de agentes patógenos o microorganismos.
- Eliminar o reducir los malos olores
- Inhibir, eliminar o reducir las bacterias generadoras de putrefacción.
- Reducir los efectos y procesos de compuestos orgánicos.

Comúnmente se suele confundir el término lodo y biosólidos. La principal diferencia radica en su nivel de fermentación, atracción de vectores y patogenicidad, logrando reducir el nivel de peligrosidad y el grado de restricción para su reutilización. Dicha diferencia en la composición de un lodo crudo y un Biosólido, se pueden apreciar a continuación en la Tabla 3.

**Tabla 3. Diferencia en la composición de un lodo crudo y un biosólido**

Parámetro	Unidades	Lodos Crudos	Lodos digeridos Anaeróbicamente (biosólidos)
<i>pH</i>	Unidades	5-8	6.5-7.5
<i>Alcalinidad</i>	mg/l de Caco 3	500-1500	2500-3500
<i>Nitrógeno</i>	% de ST	1.5 - 4	1.6 - 6
<i>Fosforo</i>	P 2 O 5 % de ST	0.8-2.8	1.5 - 4
<i>Grasas y Aceites</i>	% de ST	6-30	5 - 20
<i>proteínas</i>	% de ST	20-30	15-20
<i>Ácidos Orgánicos</i>	Mg/l Hac	6800-10000	2700-6800
<i>Sólidos totales</i>	%	2-8	6-12
<i>Sólidos Volátiles</i>	% de ST	60-80	30-60

Fuente: Crites & Tchobanoglous (2010)

### 5.1.3 Biosólidos y alternativas de aprovechamiento

La normatividad colombiana nos establece algunas opciones para el aprovechamiento de los biosólidos, las cuales están en el decreto 1077 de 2015, y los clasifica según su aprovechamiento en biosólidos tipo A y tipo B.

Los biosólidos Categoría A pueden ser empleados:

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

Los biosólidos Categoría B, pueden ser empleados:

- a. En agricultura, se aplicará al suelo.
- b. En plantaciones forestales.
- c. En la recuperación, restauración o mejoramiento de suelos degradados.
- d. Como insumo en procesos de elaboración de abonos o fertilizantes orgánicos o productos acondicionadores para suelos a través de tratamientos físicos, químicos y biológicos que modifiquen su calidad original. Los procesos de elaboración y características de los productos finales y su uso, queda sujeto a la regulación establecida por el ICA.
- e. Para remediación de suelos contaminados, lechos biológicos para el tratamiento de emisiones y vertimientos, soporte físico y sustrato biológico en sistemas de filtración, absorción y adsorción.
- f. Como insumo en la fabricación de materiales de construcción.
- g. En la estabilización de taludes de proyectos de la red vial nacional, red vial secundaria o terciaria.
- h. En la operación de rellenos sanitarios como: cobertura diaria, cobertura final de cierre y de clausura de plataformas y en actividades de revegetalización y paisajismo.
- i. Actividades de revegetalización y paisajismo de escombreras.
- j. En procesos de valorización energética.

Luego de ver como la normatividad nos define algunas opciones para el aprovechamiento de lodos, la normatividad nos refiere los valores permisibles o máximo para su uso, como se puede ver en la tabla 4, los valores tanto para los Biosólidos tipo A, como tipo B.

**Tabla 4. Valores máximos permisibles de categorización de biosólidos para su uso.**

Criterio	Variable	Unidad de medida	Categoría biosólido Valores máximos permisibles	
			A	B
Químicos- metales	Arsénico (As)	Mg / Kg de Biosólido (base seca)	20,0	40,0
	Cadmio (Cd)		8,0	40,0
	Cobre (Cu)		1.000,0	1.750,0
	Cromo (Cr)		1.000,0	1.500,0
	Mercurio (Hg)		10,0	20,0
	Molibdeno (Mb)		18,0	75,0
	Níquel (Ni)		80,0	420,0
	Plomo (Pb)		300,0	400,0
	Selenio (Se)		36,0	100,0
	Zinc (Zn)		2.000,0	2.800,0
Microbiológicos	Coliformes Fecales	Unidades formadoras de colonias - UFC / g de biosólido (base seca)	< 1,00 E (+ 3)	< 2,00 E (+ 6)
	Huevos de Helminthos Viabiles	Huevos de Helmintho viables / 4 g de biosólido (base seca)	< 1,0	< 10,0
	Salmonella sp	Unidades formadoras de Colonias - UFC / 25g de biosólido (base seca)	Ausencia	<1,0 E (+ 3)
	Virus Entéricos	Unidades Formadoras de Placas - UFP / 4 g de biosólido (base seca)	< 1,0	-

**Fuente:** Decreto 1287 de 2014, Bogotá, Colombia.

## 5.2 CLASIFICACIÓN DE LOS LODOS PARA SU APROVECHAMIENTO

Dentro del proceso de disposición y uso de los lodos residuales, generados en las plantas de tratamiento, es necesario conocer, cuáles son sus diferentes orígenes, los tipos de lodo que se generan durante el tratamiento del agua residual y la clasificación que se les da para su aprovechamiento.

## **5.2.1 Tipos de lodos según el origen del efluente**

### **5.2.1.1 Lodos urbanos / domésticos**

Proceden de aglomeraciones urbanas mediante los vertidos de la actividad humana doméstica, también lo constituye la mezcla de estas con las precedentes de actividades comerciales, industriales y agrarias dentro del casco urbano (Torres Carranza, 2016).

### **5.2.1.2 Lodos industriales**

Los lodos industriales son los residuos generados como subproducto en el tratamiento de aguas industriales, pueden aparecer elementos propios de cada actividad industrial como tóxicos, iones metálicos, productos químicos, hidrocarburos, detergentes, etc. (Torres Carranza, 2016).

## **5.2.2 Tipos de lodos generados según la etapa del tratamiento de aguas residuales**

### **5.2.2.1 Lodos crudos**

Lodo crudo, es aquel que no ha sido tratado ni estabilizado, que puede extraerse de plantas de tratamiento de aguas residuales. Tiende a producir la acidificación en la digestión y olor (Pérez Zúñiga, 2016).

### **5.2.2.2 Lodos primarios**

Son aquellos que se extraen de la sedimentación primaria, en la cual se remueven sólidos sedimentables, consisten principalmente en arena fina, sólidos inorgánicos y sólidos orgánicos. La consistencia se caracteriza por ser un fluido denso con un porcentaje en agua que varía entre 93 % y 97 %, de color marrón a gris, volviéndose sépticos y generan mal olor con gran facilidad (Pérez Zúñiga, 2016) citando a Cardoso & Ramírez.

### **5.2.2.3 Lodos secundarios**

Son lodos generados en el tratamiento secundario biológico de aguas residuales, que convierten residuos o substratos solubles en biomasa, también incluyen la materia particulada que permanece en el agua después de la sedimentación primaria y que se incorpora en la biomasa. Son de color marrón, no suelen generar olor con tanta rapidez; sin embargo, producen un olor tan fuerte como el lodo primario (Valderrama Pedraza, 2013).

#### **5.2.2.4 Lodos terciarios**

Dentro de los tratamientos y tecnologías más avanzadas, encontramos los lodos terciarios, los cuales, son definidos por Ortiz Ramos (2013), como aquellos producidos por procesos de tratamiento avanzado del agua residual, tales como la precipitación química y filtración. Los químicos usados en los procesos de tratamiento avanzados del agua residual, tales como aluminio, sales de hierro, cal o polímeros orgánicos, incrementan la masa del lodo y usualmente el volumen del lodo. Generalmente, si son usados cal o polímeros, las características del espesamiento y deshidratación del lodo serán mejores, si se usan sales de aluminio y hierro, la capacidad de la deshidratación y espesamiento del lodo comúnmente será reducido.

#### **5.2.3 Tipos de lodo según su nivel de aprovechamiento**

Abordaremos la clasificación, dirigida a la disposición final de los lodos o a su aprovechamiento, clasificación que es referida por Donado Hoyos (2013):

##### **5.2.3.1 Lodos aprovechables**

Son los lodos provenientes de un proceso de tratamiento que puede ser reutilizado directa o indirectamente en reciclaje, compostaje y generación de energía. La mayoría de los lodos provenientes de los procesos de tratamiento aerobios y anaerobios de las plantas de tratamiento de aguas residuales, una vez estabilizados, pueden ser utilizados como abonos, acondicionadores y restauradores de suelos.

##### **5.2.3.2 Lodos no aprovechables**

Son lodos que no tienen características aceptables para algún aprovechamiento, tienen muy poca o nula carga orgánica o poder calorífico muy bajo, estos pueden ser desechados junto con los residuos sólidos de origen doméstico en rellenos municipales o mono rellenos.

##### **5.2.3.3 Lodos peligrosos**

Son aquellos que contienen sustancias que pueden causar daño a la salud humana o al medio ambiente que deben ser dispuestos en sitios especiales con las medidas adecuadas de seguridad.

## **5.3 TIPO DE TRATAMIENTO DE LODOS**

### **5.3.1 Tratamientos biológicos**

El origen de los lodos genera diferentes características, las cuales describen Díaz, Lorenzo & Venta (2015):

Los lodos de las PTAR son el resultado de la concentración de los sólidos contenidos en el efluente (lodos primarios) o de la formación de nuevos sólidos suspendidos (lodos activados) resultantes de los sólidos disueltos, que son asimilados por los microorganismos durante la degradación de la materia orgánica. Los tratamientos de lodos provenientes de PTAR pueden ser sin digestión, basado en procedimientos de separación física, o con digestión, que comprenden procedimientos físicos y biológicos, en los cuales se reduce la presencia de patógenos, parásitos y el contenido de compuestos carbonados, a los cuales se suman los tratamientos químicos. Por tanto, la calidad de los lodos, en cuanto a su nivel de estabilización está determinada en gran medida por el régimen de tratamiento al que son sometidos.

El lodo activado es un proceso de tratamiento por el cual el agua residual y el lodo biológico (microorganismos) son mezclados y aireados en un tanque denominado reactor. Los flóculos biológicos formados en este proceso se sedimentan en un tanque de sedimentación, lugar del cual son recirculados nuevamente al tanque aireador o reactor, proceso que se repite en reiteradas ocasiones hasta el momento que estos son purgados y eliminados del sistema.

Entre sus características presentan un color marrón y una apariencia flocluenta, si no ha comenzado a degradarse, tiene un olor a tierra húmeda.

El lodo generado en los tratamientos biológicos de las PTAR está compuesto principalmente por microorganismos, y en segundo lugar por materia sólida.

### **5.3.2 Tratamientos físico - químicos**

Las características de los lodos activados están sujetos a la intervención de sustancias, como lo describieron en su trabajo Díaz, Lorenzo & Venta (2015):

El uso de coagulantes en el tratamiento de las aguas residuales fue muy difundido a principios del siglo veinte, pero las elevadas dosis utilizadas generaban una gran cantidad de lodos, por lo que

los tratamientos físicoquímicos empezaron a ser desplazados por tratamientos biológicos, que originan menos lodos y tienen una mejor eficiencia en términos de remoción de contaminantes.

Actualmente, el tratamiento físico químico usado en el tratamiento de las aguas residuales utiliza menores dosis de coagulantes, acompañado en ocasiones con una mínima dosis de polímeros, lo que implica bajos costos de operación y un ligero aumento en la cantidad de lodos generados respecto a los tratamientos convencionales.

Con el uso del hidróxido de sodio se produce un lodo que presenta color café para dosis bajas de coagulante y de color blanco para dosis elevadas.

### **5.3.3 Característica de medición de partículas en lodos**

Para intentar caracterizar el tamaño de las partículas se utiliza el índice volumétrico del flóculo, definido como la relación entre el volumen del flóculo y el volumen del lodo. Los flóculos de lodo contienen una gran cantidad de agua que será liberada, al menos en parte, por compresión. Esto hace que el tamaño del flóculo tenga un gran interés en los procesos de espesamiento y deshidratación del lodo, así para una buena caracterización del lodo, es conveniente conocer la proporción de agua y sólidos en el flóculo ( $\alpha$ ) que mide la relación entre el volumen de agua y el volumen de sólidos de un lodo parámetro que es bastante difícil de medir según González Granados (2016).

## **5.4 MARCO LEGAL**

Dentro de la operación de las plantas de tratamiento de aguas residuales y la generación o producción de biosólidos en Colombia, se ha hecho necesario la regulación de su manejo y disposición final, para reducir problemáticas ambientales, llegando a precisar en su normatividad las alternativas de uso de los biosólidos y las restricciones, juntamente con los valores máximos permitidos de microorganismos; esta normatividad se encuentra condensada en la Tabla 5.

**Tabla 5. Normatividad legal en lodos generados en PTAR y Biosólidos**

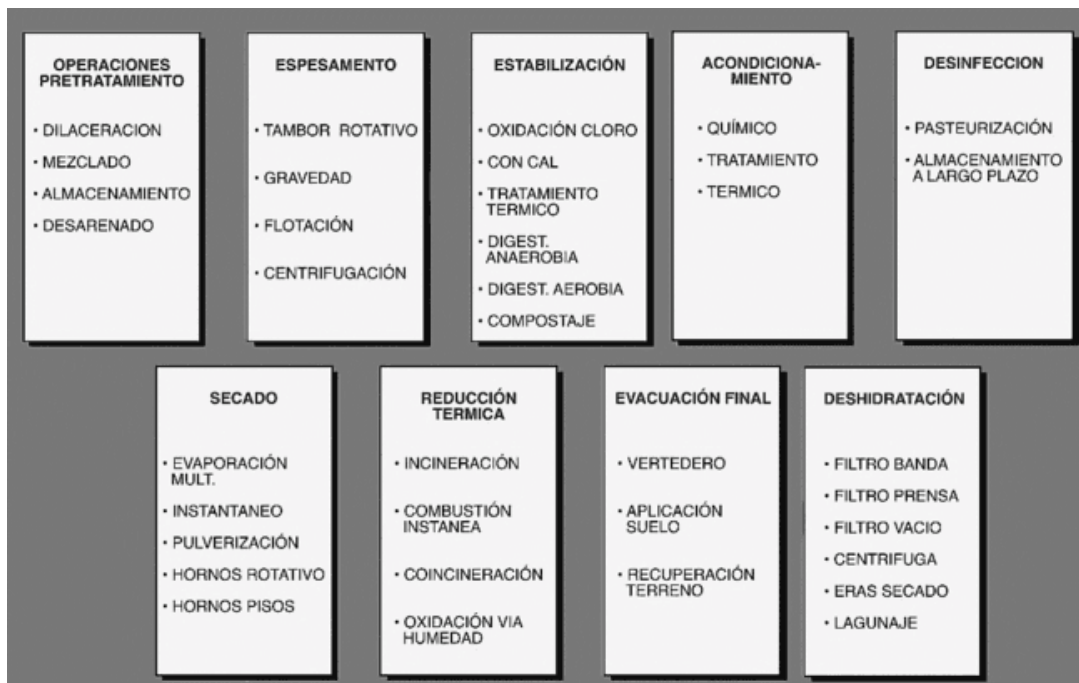
Decreto	Objeto
<i>Decreto 1594 de 1984</i>	Derogado por el art. 79, Decreto Nacional 3930 de 2010, salvo los arts. 20 y 21. Artículo 70. Los sedimentos, lodos, y sustancias sólidas provenientes de sistemas de tratamiento de agua o equipos de contaminación ambiental, y otras tales como cenizas, cachaza y bagazo, no podrán disponerse en cuerpos de aguas superficiales, subterráneas, marinas, estearinas o sistemas de alcantarillado, y para su disposición deberá cumplirse con las normas legales en materia de residuos sólidos. (Se define por primera vez el término lodo).
<i>Resolución 822 de 1998</i>	Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el sector de Agua Potable y Saneamiento Básico- RAS98. Se define el término lodo biológico.
<i>Resolución 1096 de 2000</i>	Mejoramiento de la RAS, con el fin de que los servicios públicos tal como agua potable y saneamiento básico estén en constante mejoramiento de acuerdo con estándares de calidad
<i>RAS 2000</i>	En el título C, indica el proceso de tratamiento de los lodos producidos en aguas duras y hervidas. Se define el término biosólido, pero no reglamenta la gestión de los mismos.
<i>Decreto 1713 de 2002</i>	Por el cual se reglamenta la Ley 142 de 1994, la Ley 632 de 2000 y la Ley 689 de 2001, en relación con la prestación del servicio público de aseo, y el Decreto Ley 2811 de 1974 y la Ley 99 de 1993 en relación con la Gestión Integral de Residuos Sólidos
<i>NTC 5167 de 2004</i>	Esta norma tiene por objeto establecer los requisitos que deben cumplir y los ensayos a los cuales deben ser sometidos, los productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y como enmiendas de suelo.
<i>Decreto 3930 de 2010</i>	Reglamenta los usos del agua y residuos líquidos, establece en su artículo 25 que: “Los sedimentos, lodos, y sustancias sólidas provenientes de sistemas de tratamiento de agua o equipos de contaminación ambiental, no podrán disponerse en cuerpos de aguas superficiales, subterráneas, marinas, estearinas o sistemas de alcantarillado, y para su disposición deberá cumplirse con las normas legales en materia de residuos sólidos.”
<i>Decreto 1287 de 2014</i>	Por el cual se establecen criterios para el uso de los biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales.
<i>Decreto Único Reglamentario 1077 de 2015</i>	Compila las disposiciones sobre servicios públicos domiciliarios de acueducto y alcantarillado. Establece los criterios para el uso de los Biosólidos producidos a partir de los lodos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales (Artículo 2.3.1.4.1 al 2.3.1.4.19).
<i>Resolución 330 de 2017 (RAS 2017)</i>	Reglamenta los requisitos técnicos que se deben cumplir en las etapas de planeación, diseño, construcción, puesta en marcha, operación, mantenimiento y rehabilitación de la infraestructura relacionada con los servicios públicos domiciliarios de acueducto, alcantarillado y aseo. Deroga las resoluciones 1096 de 2000, 424 de 2001, 668 de 2003, 1459 de 2005, 1447 de 2005 y 2320 de 2009 (Sección 5: Gestión de subproductos del tratamiento de agua residual).

Fuente: Autora

## 6 TERCER CAPITULO. TRATAMIENTO DE LODOS

El tratamiento de lodos, comprende unas fases previas que proporcionan características para la posible disposición o aprovechamiento de los lodos, teniendo como objetivo que luego de someter los lodos a cualquiera de los tratamientos de aguas residuales, se tenga como premisa, la reducción de los impactos ambientales y el aprovechamiento eficiente de los lodos.

El aprovechamiento de los lodos residuales producidos en procesos de tratamiento de aguas residuales implica básicamente la separación del agua y sólidos, por lo que el nivel de tratamiento requerido es una función relación del método de aprovechamiento o disposición final. En la Figura1. Observamos el diagrama de proceso general.



**Figura 1. Diagramas de procesos general**

**Fuente:** Adaptado de Hierro Guilmain, J. (2013)

### 6.1 PRE-TRATAMIENTO

Para conseguir que la alimentación de lodo a las instalaciones de su tratamiento sea relativamente constante y homogénea, en algunos casos es necesario dilacerar, desarenar, mezclar y almacenar

el lodo, dependiendo de la naturaleza del lodo y de la disposición final. La mezcla y almacenamiento se puede llevar a cabo en una única unidad diseñada para cumplir ambas funciones, o de forma separada en otros elementos de la planta.



**Figura 2. Esquema Pretratamiento**

Fuente: Universidad del País Vasco, 2017

### **6.1.1 Dilaceración**

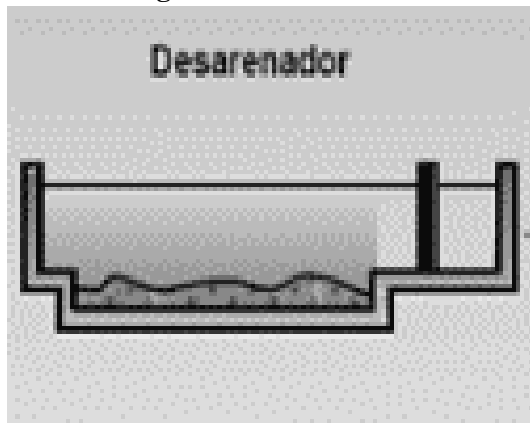
La dilaceración es un proceso en el que los sólidos de gran tamaño contenidos en el lodo son cortados o desmenuzados en partículas más pequeñas para evitar obturaciones y la formación de madejas en los equipos rotatorios. Históricamente, los dilaceradores siempre han precisado de mucho mantenimiento, pero los diseños modernos de baja velocidad han resultado ser más fiables y ofrecer una mayor durabilidad. Estos diseños incluyen mejoras en el sellado, en cojinetes, cuchillas de aceros endurecidos, sensores de sobrecarga, y mecanismos que intervienen en el sentido de rotación de las cuchillas para eliminar obstrucciones o, en caso de que no sea posible eliminar las obstrucciones, la desconexión de la unidad (Turbo Aroquipa, 2019).

### **6.1.2 Desarenado**

En algunas plantas de tratamiento de aguas residuales, en las que no se dispone de desarenadores antes de los decantadores primarios, o en las que las instalaciones de desarenado no son adecuadas para el manejo de los caudales punta y las cargas punta de arena, puede ser necesario desarenar el lodo antes de proceder a su tratamiento. En los casos en los que se va a proceder al espesamiento del lodo primario, es de buena práctica tener en cuenta la posibilidad del desarenado del mismo. El método más efectivo de eliminar arenas del lodo consiste en la aplicación de fuerzas centrífugas a una masa de agua en movimiento para separar la arena del lodo orgánico. Esta separación se consigue mediante el uso de desarenadores de ciclón, elementos que carecen de elementos móviles.

El lodo se aplica tangencialmente a una zona de alimentación cilíndrica, lo cual induce una fuerza centrífuga. Las partículas de arena más pesadas se desplazan hacia la parte exterior del cilindro y se descargan a través de una sección cónica. El lodo orgánico se extrae de la unidad a través de una salida diferente (Griffa & Schierano, 2015).

**Figura 3. Desarenador**



**Figura 3. Desarenador**

Fuente: Universidad Tecnológica de Pereira, 2017

### **6.1.3 Mezclado**

El lodo se genera en los procesos de tratamiento primario, secundario y avanzado. El lodo primario está formado por sólidos sedimentables existentes en el agua residual bruta. El lodo secundario está formado por sólidos biológicos y cantidades adicionales de sólidos sedimentables. El lodo generado en los procesos de tratamiento avanzado puede estar formado por sólidos biológicos y sólidos de origen químico. El lodo se mezcla para conseguir que la alimentación a los subsiguientes procesos y operaciones de tratamiento sea un material uniforme. La uniformidad de la mezcla adquiere mayor importancia en el caso de sistemas de corto tiempo de detención, como puede ser el caso de la deshidratación del lodo, el tratamiento térmico, o la incineración. La alimentación de un lodo bien mezclado y con características uniformes favorece en gran medida el funcionamiento y rendimiento de las plantas. El mezclado de los lodos primarios, secundarios y del lodo generado en los procesos de tratamiento avanzado, se puede llevar a cabo de diferentes formas como lo refiere Turbo Aroquipa (2019):

- A. En tanques de decantación primaria. Los lodos secundarios o terciarios se pueden recircular los decantadores primarios para su sedimentación y mezcla con el lodo primario.

- B. En tuberías. Para asegurar un mezclado adecuado, este procedimiento requiere de un cuidadoso control de los puntos de generación del lodo y de las velocidades de alimentación. Si no se ejerce este control, son de esperar amplias variaciones en la consistencia del lodo.
- C. En instalaciones de tratamiento de lodos que procuran largos tiempos de retención. Los digestores aerobios y anaerobios (tipo mezcla completa) pueden conseguir una mezcla uniforme de los lodos alimentados.
- D. En un tanque de mezcla independiente. Esta práctica proporciona el mejor método de control de la calidad de los lodos mezclados. En plantas de tratamiento con capacidad inferior a 3800 m<sup>3</sup>/día, el mezclado se suele llevar a cabo en los decantadores primarios. En las instalaciones de grandes dimensiones, la eficacia óptima se consigue espesando los lodos en unidades independientes antes de proceder al mezclado. Para asegurar un mezclado adecuado, los tanques de mezcla suelen estar equipados con mezcladores mecánicos y deflectores.

#### **6.1.4 Almacenamiento**

El almacenamiento del lodo debe realizarse para laminar las fluctuaciones de la producción de lodos y permitir la acumulación de estos durante los períodos en los que las instalaciones de tratamiento subsiguientes se hallan fuera de servicio (por ejemplo, turnos de noche, fines de semana, y períodos de parada de equipos no programados). El almacenamiento del lodo es particularmente importante en el caso de los procesos de estabilización con cal, tratamiento térmico, deshidratación mecánica, secado y reducción térmica, para los cuales es importante asegurar que la alimentación se lleve a cabo a caudal constante (Griffa & Schierano, 2015).

#### **6.2 ESPESAMIENTO**

El espesamiento de lodos tiene como objeto la reducción del volumen de estos, mediante concentración de su contenido en sólidos, por eliminación del agua contenida en el lodo.

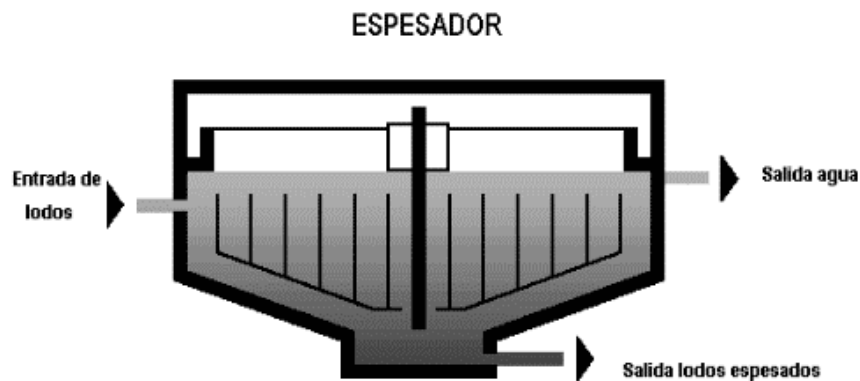
De acuerdo con González Granados (2016), el interés primordial de este proceso es incrementar la eficacia y economía de los procesos posteriores, permitiendo reducir la capacidad de tanques y equipos, cantidad de reactivos químicos para el acondicionamiento del lodo y cantidad de calor y combustible en digestores, secado e incineración. Tener en cuenta que, con pequeños incrementos

en la concentración de sólidos, se consigue una reducción considerable del volumen, lo que se traduce en economía en los costes de inversión y explotación.

Señalar las diferencias entre espesamiento y deshidratación ya que, aunque ambos procesos tienen como resultado un aumento de la concentración del lodo y una reducción del volumen, el grado de concentración alcanzado por cada uno de ellos es diferente y es donde estriba la diferencia entre ambos procesos.

Con el espesamiento se consiguen concentraciones menores y los lodos espesados presentan características de líquido, pudiendo ser bombeados por métodos similares al agua. El lodo deshidratado, por el contrario, presenta concentraciones más altas y se comporta como un sólido.

Según estudios, desarrollado por Heras (2009), menciona que el grado de concentración que separa ambos procesos no puede establecerse claramente como un porcentaje único; sin embargo, la experiencia demuestra que un lodo con una concentración de sólidos totales (ST) superior al 10% en peso, comienza a presentar problemas de manejo y bombeo. Cuando la concentración supera el 20% el lodo presenta características de sólido y puede ser paleado.



**Figura 4. Espesador**

Fuente: Universidad Tecnológica de Pereira, 2017

### 6.2.1 Tambor Rotativo

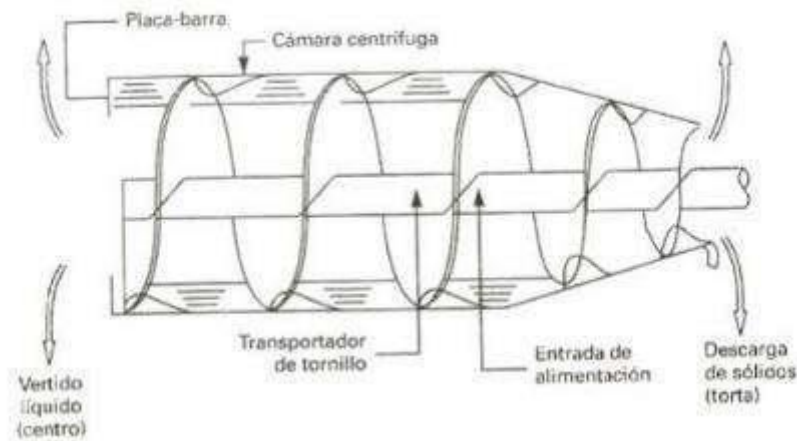
Consiste en un sistema de acondicionamiento del lodo biológico (incluyendo la alimentación de polímero), y unos tamices cilíndricos rotativos. El lodo se mezcla con el polímero en el tambor de mezcla y acondicionamiento y, a continuación, el lodo pasa a una serie de tamices rotativos que

separan los sólidos floculados del agua. El lodo espesado sale por un extremo de los tambores, mientras que el agua se filtra a través de los tamices. Se consiguen espesamientos de lodos biológicos del orden de 3-4% con la adición de polímeros (Turbo Aroquipa, 2019).

### 6.2.2 Espesamiento por Centrifugación

Las centrifugas se utilizan, tanto para espesar lodos como para deshidratarlos. Su aplicación para el espesado se suele limitar al espesado de lodos activados. El espesado por centrifugación implica la sedimentación de las partículas de lodo bajo la influencia de fuerzas centrifugas

La centrifuga de camisa maciza consiste en una camisa maciza dispuesta horizontalmente, con un extremo de forma troncoconica. El lodo se alimenta a la unidad de forma continua, y los sólidos se concentran en la periferia. Un tornillo helicoidal, que gira a una velocidad ligeramente distinta, desplaza el lodo acumulado hacia el extremo tronco conico, donde se produce una concentración de sólidos adicional previamente a la descarga del lodo (Turbo Aroquipa, 2019).



**Figura 5. Espesador por centrifugado**  
Fuente: Universidad del País Vasco, 2017

### 6.2.3 Espesamiento por gravedad

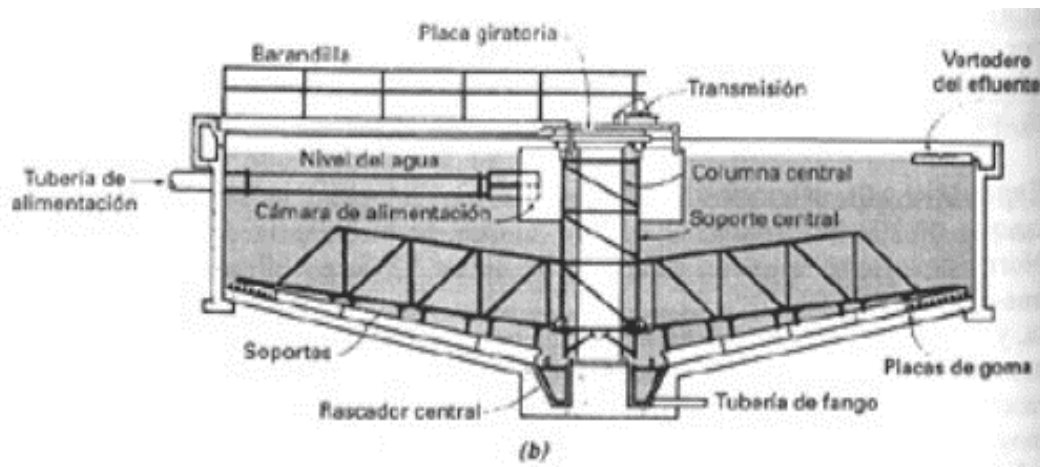
Este método elimina agua del lodo gracias a la acción de la gravedad. Los espesadores de gravedad tienen una estructura similar a la de los sedimentadores, usualmente son tanques de sección circular en los que se dispone de un mecanismo para alimentar el tanque y otro para retirar los lodos.

El lodo diluido es conducido hacia una cámara de alimentación central y comienza a sedimentar y a compactarse en la parte inferior, el lodo espesado se extrae del fondo del tanque y el agua restante se extrae por la parte superior (Vargas Vargas & Silva Cancino, 2015).

En este tipo de espesamiento los lodos se concentran por gravedad, siendo el fundamento de este tratamiento la teoría de la sedimentación por zonas. Sedimentación y espesamiento tendrán lugar de forma diferente en función de la concentración de sólidos y de la capacidad para unirse en flóculos de dichos sólidos (González Granados, 2016).

El tiempo de retención del lodo en un espesador de gravedad puede variar de 1 a 2 días para un lodo primario dependiendo de la temperatura. En el caso de lodos mixtos, este rango oscila entre 18 y 30 horas, también en función de la temperatura (Heras, 2009).

Para evitar posibles olores, a menudo, se procede a recubrir el espesador mediante una cubierta estanca que puede ser fija o desmontable, éste último facilita el mantenimiento (González Granados, 2016).



**Figura 6. Espesador por Gravedad.**  
Fuente: Universidad del País Vasco, 2017

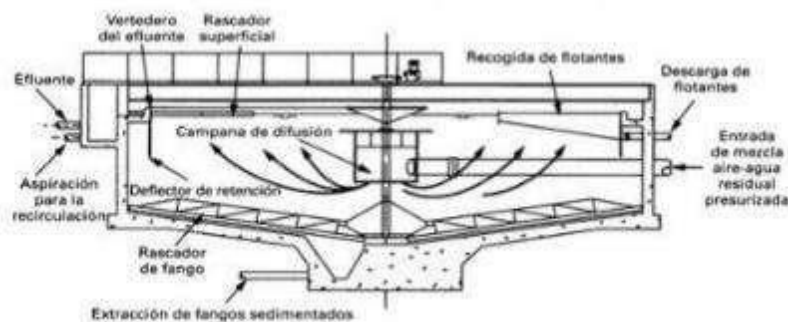
#### 6.2.4 Espesamiento por flotación

Como lo explican en su trabajo Vargas Vargas & Silva Cancino (2015), en este tipo de espesadores se inyecta aire a presiones altas, para crear burbujas que se adhieran a los sólidos, siendo arrastrados a la superficie con la velocidad necesaria. Con esto se busca que la densidad de las partículas a retener sea menor a la del agua. Al mezclar el caudal inyectado de aire y de lodos, éste entra al tanque con una velocidad baja a través de una conducción de mezcla que desemboca en el compartimiento de entrada. El agua pasa por una compuerta y entra al compartimiento de separación

El flotado tiene también como finalidad concentrar el lodo. Sin embargo, la principal diferencia con respecto al espesado por gravedad es que los sólidos se concentran en la parte superior del tanque, y está indicado para concentrar los lodos biológicos procedentes del tratamiento secundario, también llamados lodos en exceso. Mediante estos equipos, se puede concentrar el lodo secundario desde un 0,3-1,0% en sólidos hasta un 3-5% (Bes Mia & Mendoza Roca, 2013).

Las necesidades de aire disuelto para espesar mediante este sistema los lodos mixtos son excesivamente grandes, por lo que es preferible concentrar por separado los lodos primarios por gravedad y los biológicos por flotación.

El espesamiento por flotación se emplea para concentrar lodos biológicos (lodos procedentes de procesos de lodos activados, filtros percoladores, contacto-estabilización, aireación prolongada) y digeridos aeróbicamente ya que espesan fácilmente mediante este sistema gracias al bajo peso específico de los flóculos, y su débil capacidad para sedimentar y compactarse (González Granados, 2016).



**Figura 7. Espesador por Flotacion.**

Fuente: Universidad del Pais Vasco, 2017

## **6.3 ESTABILIZACIÓN**

### **6.3.1 Estabilización biológica**

#### **6.3.1.1 Estabilización termica**

Este tratamiento se utiliza como proceso de estabilización y de acondicionamiento, aunque en la mayoría de los casos se utiliza como proceso de acondicionamiento.

Consiste en someter al lodo a presiones y temperaturas determinadas durante un periodo corto de tiempo. Consigue liberar el agua ligada a los sólidos, coagulándolos e hidrolizando la materia proteica.

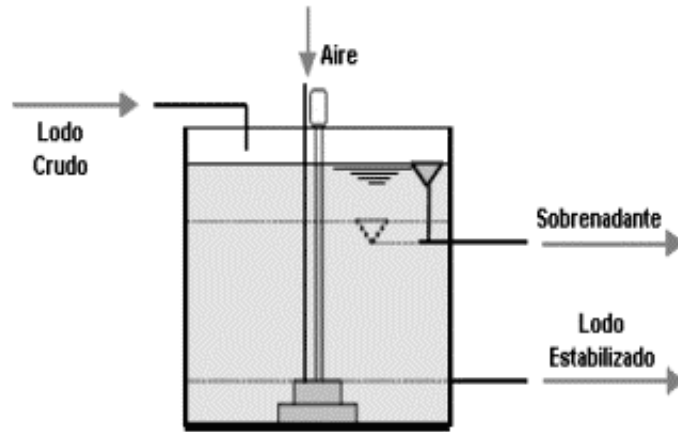
El lodo resultante de estos procesos de tratamiento es denominado tipo A, según las condiciones especificadas por la norma EPA 40, el contenido de bacterias patogénicas, virus entéricos y huevos viables de helmintos son reducidos a los niveles detectables indicados en la normatividad. Estos lodos pueden ser aplicados en suelo para uso agrícola sin restricciones. Este lodo debe ser monitoreado para parámetros de huevos de helminto, coliformes fecales, Salmonella sp., asegurando que no ocurra recrecimiento (Hiero Guilmain, 2013).

#### **6.3.1.2 Digestión o Estabilización aeróbica**

Proceso biológico en el que, por acción microbiológica, se oxida la materia orgánica (MO), mediante un aporte de oxígeno en los digestores abiertos. De este modo se reduce la masa final del lodo, modificándolo para adecuarlo a procesos posteriores (Cardona Mejía & Orozco Álzate, 2018).

Se emplea como tratamiento secundario de una PTAR sin tratamiento primario. También puede emplearse para lodos mixtos con un aporte más elevado de oxígeno. Los factores que afectan a este proceso son:

- Tiempo de retención.
- Temperatura.
- Necesidades de oxígeno y de mezcla.



**Figura 8. Estabilización Aeróbica**

Fuente: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2016

### **6.3.1.3 Digestión o Estabilización aeróbica termófila**

Se trata de una digestión aeróbica desarrollada para conseguir cumplir las regulaciones cada vez más estrictas. Se basa en la conservación de la energía térmica generada en la digestión aeróbica de la MO de los lodos, para alcanzar y mantener temperaturas termófilas (50-70°C) (Cardona Mejía & Orozco Álzate, 2018):

### **6.3.1.4 Digestión o Estabilización anaeróbica**

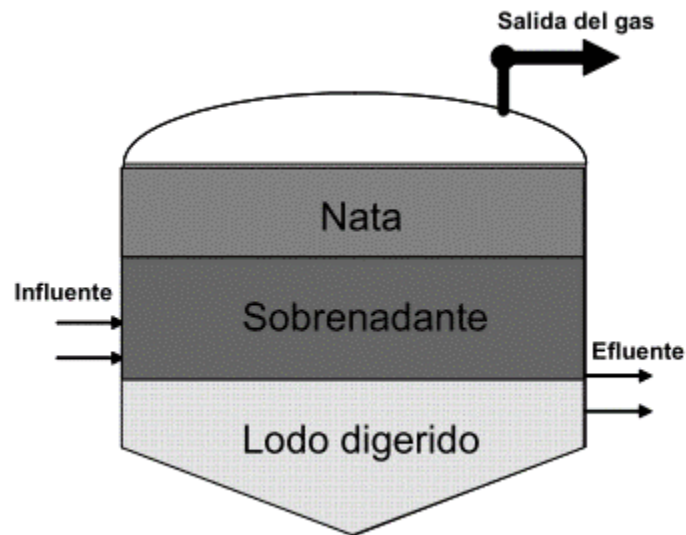
Su concepto y dinámica del proceso, fue definida por Cardona Mejía & Orozco Álzate (2018), es uno de los métodos más comunes para la estabilización de lodos. Consiste en la degradación de la MO, por la acción en ausencia de oxígeno, liberando energía, metano (CH<sub>4</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y agua (H<sub>2</sub>O), gracias a la acción de algunos tipos de bacterias.

Se produce en 4 etapas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metalogénesis.

Estos sistemas se clasifican en: baja carga, alta carga, contacto anaeróbico y con separación de gases. En este proceso deben controlarse:

- pH.
- Temperatura.
- Alimentación de lodo.
- Tiempo de retención.

- Producción de gas.



**Figura 9. Estabilización Anaeróbica**

Fuente: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2016

### 6.3.1.5 Compostaje

Se trata de un proceso de descomposición biológica y estabilización de MO en condiciones controladas y aeróbicas, desarrollando temperaturas termófilas, producto del calor generado biológicamente. El resultado es un producto estable y libre de patógenos. La MO se descompone en CO<sub>2</sub>, agua, minerales y MO estabilizada (Cardona Mejía & Orozco Álzate, 2018).

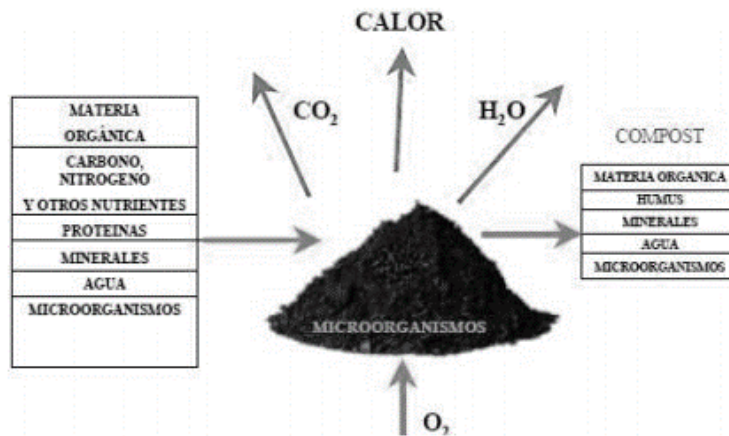
Se puede llevar a cabo solo con lodos o mezclándolos con agentes estructurantes que faciliten las condiciones aeróbicas. Las principales etapas son:

- Mezclado.
- Fermentación o compostaje.
- Maduración.
- Refino.

Es efectivo en la descontaminación de contaminantes orgánicos como: Hidrocarburos de petróleo, compuestos monos aromáticos, explosivos, cloro fenoles, algunos pesticidas y compuestos aromáticos poli cíclicos.

Los microorganismos pueden actuar mineralizándolos o transformándolos parcialmente. En el caso de los contaminantes metálicos no son retirados significativamente durante el proceso. Se producen reacciones de oxidación y reducción de los mismos que influyen en la solubilidad, reduciéndose su disponibilidad y toxicidad en la fracción sólida.

Es necesario un adecuado control de los parámetros críticos (pH, aireación, humedad, relación C/N), para evitar condiciones anaeróbicas en la masa de compostaje que provoquen aumento de olores (Cardona Mejía & Orozco Álzate, 2018).



**Figura 10. Compostaje**

Fuente: Instituto Universitario de las Aguas y de las Ciencias Ambientales, 2011

### 6.3.2 Estabilización con Oxidación de Cloro

Oxidación con cloro, se incorpora una dosis alta de cloro al lodo a tratar. Se lleva a cabo en reactores cerrados y se necesitan periodos de retención cortos. Por ahora este sistema no está extendido a nivel industrial (Rivero Rojas. 2017).

### 6.3.3 Estabilización química

Es una alternativa a la estabilización biológica para el tratamiento de lodos. El objetivo de este tipo de estabilización es la de reducir o minimizar los patógenos y reducir sustancialmente los microorganismos capaces de producir olores (Carranza Noriega, 2017).

El producto aplicado mayoritariamente es la cal. Se añade al lodo a la dosis adecuada para mantener el pH a 12 durante el tiempo suficiente (mínimo 2 h) para eliminar o reducir los microorganismos patógenos y los responsables de los olores. Este sistema se suele usar.

- Depuradoras pequeñas con incorporación de lodos a terrenos naturales o almacenados antes del transporte
- Depuradoras con necesidad de estabilización adicional
- Sistema complementario de estabilización durante periodos en que otros sistemas están fuera de servicio

Normalmente se incorpora antes del secado de los lodos, aunque también puede emplearse a posteriori, empleando menores cantidades de cal. La dosificación de cal depende de:

- Tipo de lodo
- Composición química del lodo (incluyendo la MO)
- Concentración del lodo

El proceso busca, la destrucción de los patógenos y proporcionar la suficiente alcalinidad residual para que el pH no descienda a menos de 11. Permitiendo, así, el tiempo suficiente para almacenamiento o disposición del lodo estabilizado. La cantidad de cal necesaria para estabilizar el lodo está determinada por el tiempo de este, su composición química y la concentración de sólidos. A grosso modo, el rango va desde el 6 hasta el 51%. Teniendo en cuenta que los lodos primarios son los que menos cantidad de cal requieren y los lodos activados los que mayor cantidad emplean (Carranza Noriega, 2017).

## **6.4 ACONDICIONAMIENTO**

El acondicionamiento del lodo se realiza con el fin de mejorar sus características de deshidratación. Los métodos más usados suponen la adición de productos químicos y el tratamiento térmico. (Mosquera Calle & Martínez Martínez, 2017).

### **6.4.1 Acondicionamiento químico**

El acondicionamiento químico da como resultado la coagulación de los sólidos y la liberación del agua. Los productos químicos empleados son cloruro férrico, cal, sulfato de alúmina y polímeros orgánicos, las ventajas, es que proveen una desinfección y estabilización del lodo al reducir el

riesgo de daño a la salud y los malos olores. Los polímeros no proporcionan una desinfección, pero son más fáciles de suministrar y frecuentemente más económicos (Mosquera Calle & Martínez Martínez, 2017).

El acondicionamiento químico permite reducir la humedad del lodo, desde el 90-99% hasta el 60-85%, dependiendo de la naturaleza de los sólidos a tratar. El acondicionamiento químico conduce, por la aplicación de los fenómenos de coagulación y floculación, a la aglomeración de las partículas coloidales formando flóculos que facilitan la posterior filtración o centrifugación. Los floculantes pueden ser inorgánicos como sales de hierro y sulfato de aluminio, solas o con adición de cal y productos orgánicos como los polis electrolitos. Los primeros aumentan la masa de sólidos de los lodos por formación de productos de reacción, tales como hidróxidos y carbonatos, mientras que los segundos no modifican apenas la composición de la fracción sólida precipitada. Las sales de hierro utilizadas son cloruro férrico, sulfato férrico, cloro sulfato férrico y sulfato ferroso. Normalmente, se suele emplear  $Cl_3Fe$  como coagulante y  $CaO$  para ajustar el pH. Los productos orgánicos más utilizados actualmente son los poli electrolitos sintéticos. Están formados por largas cadenas macromoleculares ramificadas con grupos de carácter aniónico o catiónico. Los polímeros catiónicos son eficaces en los lodos con un elevado contenido en materia orgánica, mientras que los aniónicos se emplean en las suspensiones minerales. La dosis óptima de cada floculante varía según las características del lodo, siendo necesario realizar ensayos de laboratorio para obtener el valor de la resistencia específica a la filtración. A veces es necesario una combinación aniónica-catiónica para optimizar el proceso (Murcia Navarro, 2013).

#### **6.4.2 Acondicionamiento térmico**

Como proceso de acondicionamiento, el tratamiento térmico consiste en calentar el lodo durante cortos periodos de tiempo bajo presión. El tratamiento térmico da como resultado la coagulación de los sólidos y una reducción de la afinidad del agua por parte de los sólidos del lodo, facilitando su deshidratación y secado. El secado es necesario en la fabricación de fertilizantes para poder triturar el lodo, reducir su peso y evitar una continua acción biológica (Mosquera Calle & Martínez Martínez, 2017).

Este tipo de tratamiento tiene mayor aplicación a los lodos biológicos, que pueden ser difíciles de estabilizar por otros medios. Su uso está limitado en general a grandes plantas debido a los altos

costos de inversión. La ruptura de los enlaces entre el agua y la materia coloidal también se puede conseguir por vía térmica mediante elevación de la temperatura o congelación, si bien hasta ahora el procedimiento de congelación resulta caro y ha tenido pocas aplicaciones. El procedimiento más usual consiste en el calentamiento del lodo bajo presión entre los 160°C y 210°C durante un tiempo comprendido entre 30 y 60 minutos. Durante este proceso se producen transformaciones irreversibles, destruyéndose los geles coloidales al solubilizarse algunas materias en suspensión (como el almidón que se hidroliza formando azúcares) y precipitar otras (como la glucosa) (Murcia Navarro, 2013).

Con este tipo de tratamiento se reduce aproximadamente un 25 % de la DQO del lodo, y se obtiene de forma sencilla y sin necesidad de reactivos químicos, un material con muy buenas características para su posterior deshidratación y prácticamente esterilizado. El inconveniente de este método es la necesidad de protección contra olores y los elevados gastos de instalación (Murcia Navarro, 2013).

## **6.5 DESINFECCIÓN**

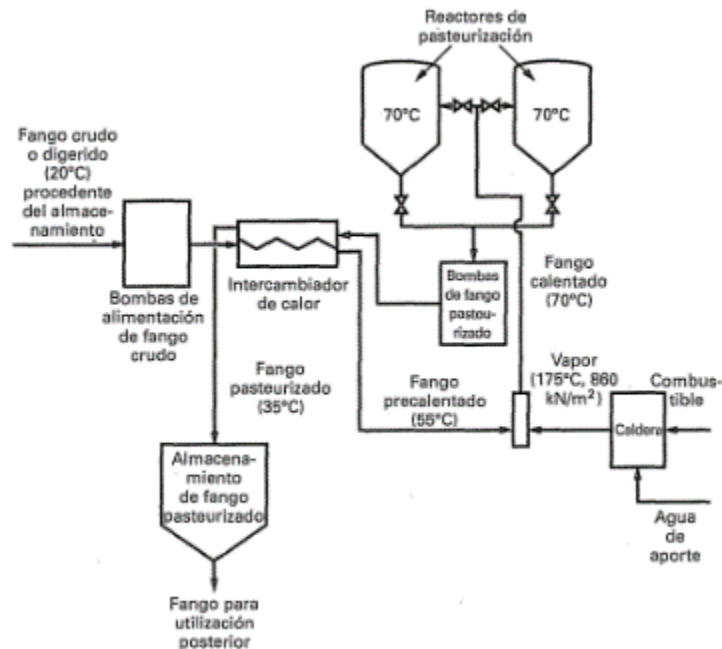
### **6.5.1 Pasteurización**

Diocaretz Vergara (2010) indica que la pasteurización consiste en exponer los sólidos a 70°C para inactivar larvas y huevos de parásitos, es decir, higienizarlo. El lodo puede ser calentado a través de intercambiadores de calor o por inyección de vapor. Se prefiere el método de inyección de vapor porque es más efectivo en el mantenimiento de las temperaturas del lodo.

Los lodos son pasteurizados en discontinuo para evitar la recontaminación que pudiera ocurrir en un proceso continuo. Posteriormente, el lodo debe ser almacenado de forma adecuada porque la materia orgánica no se ha estabilizado y, por lo tanto, se pueden producir olores y crecimiento de microorganismos patógenos si los lodos se vuelven a inocular. Los principales componentes estructurales son: caldera de vapor, calefactores, reactor, estanques sopladores y de almacenamiento de lodos.

Es un proceso que no requiere insumos, pero en el existe mayor requerimiento de energía externa para operar. Las potenciales desventajas de esta tecnología incluyen los problemas de olores y la necesidad de contar con sistemas de almacenamiento cuando la aplicación de los biosólidos no es

posible, como en el invierno. No es muy usado en Estados Unidos, pero en países europeos como Suiza y Alemania es obligatorio antes de que los biosólidos sean aplicados al suelo.



**Figura 11. Pasteurización.**  
Fuente: Metcalf-Eddy, 2003

### 6.5.2 Almacenamiento a largo plazo

El lodo líquido digerido se suele almacenar en lagunas excavadas en el suelo, lo cual requiere disponer de un terreno amplio. En los sistemas de aplicación al suelo, el almacenamiento suele ser necesario para retener el lodo durante los períodos en los que no se puede aplicar al terreno debido a las condiciones climáticas o a las características de los cultivos. El lodo almacenado en lagunas aumenta su concentración y sufre un proceso de estabilización adicional debido a la continua actividad de las bacterias anaerobias. Los tiempos de retención típicos varían entre 60 días a 20°C y 120 días a 4°C (Encarnación Melo, 2007).

El almacenamiento de los lodos a largo plazo disminuye el pH inicial y solidifica los lodos para facilitar el proceso de biodegradación. Con este tratamiento se minimizan las alteraciones en el medio ambiente. Adicionalmente, se evitan molestias entre la población presente en las zonas aledañas, ya que se hace una recuperación productiva del terreno.

Dentro del manejo de este tipo de tratamiento, tenemos que los lodos deben ser almacenados como mínimo 1 año, por su contaminación con huevos de helmintos, o hasta que se asegure una presencia menor a 1 huevo de helminto / 1000 g de lodo mojado. Las condiciones previas para su almacenamiento, implica tener un área de almacenaje cercada por una malla, cuya función principal es restringir el ingreso de animales que habitan en los alrededores, evitando así, su contaminación.

Para evitar la contaminación del suelo con estos lodos, se debe recubrir el área de almacenaje con una capa protectora, antes de colocar los lodos, la capa debe ser de un material resistente a los efectos del clima y con un tiempo de duración mayor a un año (Chunga Zapata, 2017).

## 6.6 DESHIDRATACIÓN

En este tratamiento se elimina parte del agua contenida en los lodos, transformándolos en sólidos fácilmente manejables y transportables. Los lodos deshidratados presentan un 20-25% de materia seca (López Longueira & Lojo Fernández, 2012).

### 6.6.1 Filtración al vacío

De esta manera se puede conseguir una torta de lodo crudo o digerido uniformemente deshidratado. La concentración mínima de sólidos generalmente aceptable para una filtración económica es de 4%. El lodo deshidratado puede ser cargado para su eliminación final, venta, uso como acondicionador de suelos o fertilizante, o sometido a secado térmico y/o incineración. El líquido filtrado contiene una alta concentración de sólidos finos suspendidos el cual puede ser mezclado con el agua residual que entra en la planta (Mosquera Calle & Martínez Martínez, 2017).

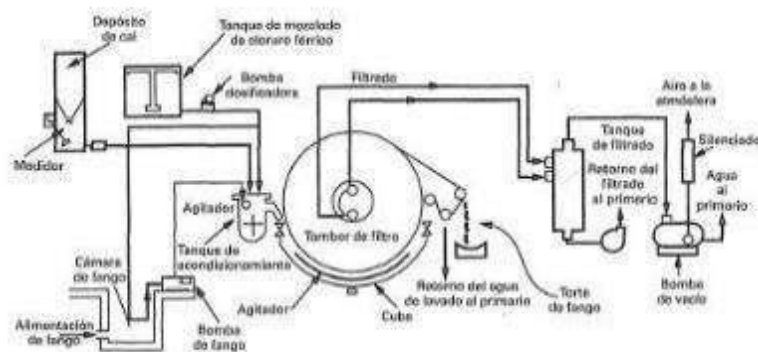
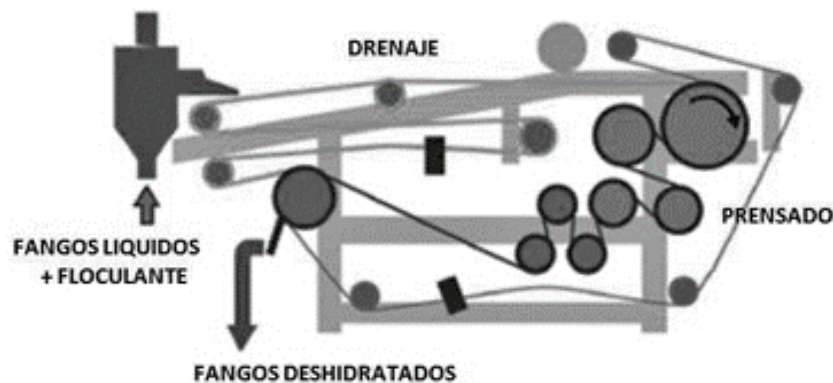


Figura 12. Filtración al vacío.

### 6.6.2 Filtro Banda

Un filtro banda consiste, básicamente, en una cinta transportadora sobre la que se coloca el lodo, y en una cinta cobertora. El lodo se sitúa entre ambas cintas, que son permeables. Este conjunto pasa a través de una serie de rodillos colocados para conseguir la compresión del lodo. En algunos modelos se hace el vacío en alguna zona del recorrido para aumentar la extracción del agua (Tejero, Suárez, Jácome, & Temprano, 2011).



**Figura 13. Filtración Banda.**

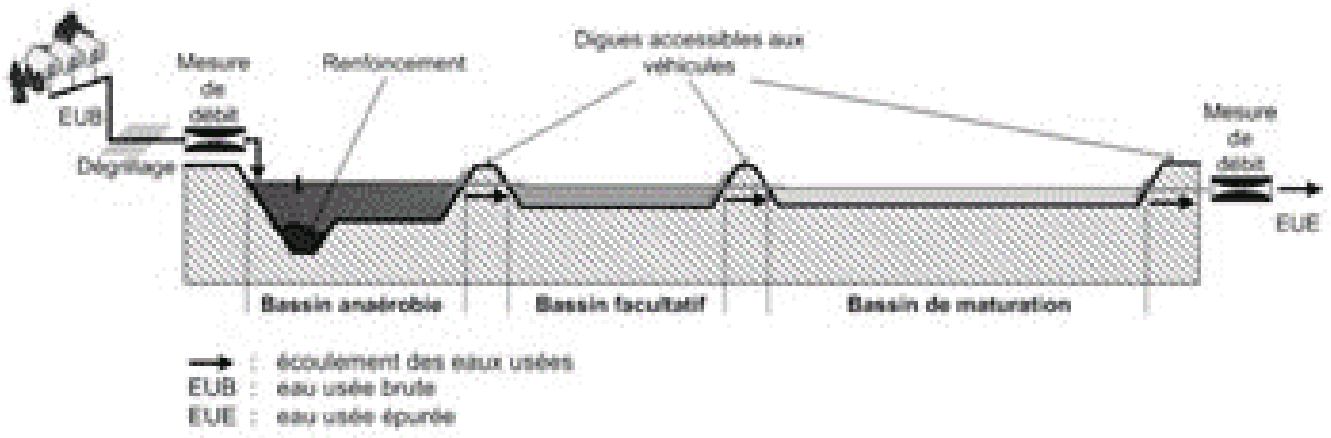
Fuente: TECPA Ingeniería y Medio Ambiente, 2016

### 6.6.3 Centrifugacion

El proceso de centrifugación es muy utilizado en la industria para la separación de líquidos de diferente densidad, espesamiento de lodos, o separación de sólidos. Este proceso también es aplicable a la deshidratación de lodos de aguas residuales, y su aplicación se ha llevado con diferentes grados de éxito. El proceso de separación de las fases sólida y líquida de un lodo mediante el uso de centrifugas espesadoras es muy similar al que tiene lugar en el espesamiento por gravedad; la diferencia es que con las centrifugas se le aplica al lodo una fuerza centrífuga que supera a la de la gravedad de 500 a 3000 veces, y es esta la que provoca la separación y concentración de los sólidos en suspensión (Tejero, Suárez, Jácome, & Temprano, 2011).

#### 6.6.4 Lagunaje

Las lagunas de secado se pueden emplear para la deshidratación de lodo digerido en lugar de las eras de secado. Debido a los posibles problemas asociados al desprendimiento de olores, las lagunas de secado no son adecuadas para la deshidratación de lodos crudos, lodos tratados con cal, ni lodos con sobrenadantes muy concentrados. Al igual que en el caso de las eras de secado, el rendimiento de las lagunas depende del clima; las precipitaciones y las bajas temperaturas inhiben el proceso de deshidratación. La mejor aplicación de las lagunas de secado se da en zonas con elevadas tasas de evaporación. La deshidratación por drenaje superficial y percolación está limitada por las cada vez más estrictas normativas ambientales y de control de las aguas subterráneas. Caso de que en la zona situada por debajo de la laguna se encuentre un acuífero utilizado para el suministro de agua potable, será necesario revestir la laguna o limitar la percolación (Griffa & Schierano, 2015).



**Figura 14. Lagunaje**

Fuente: Comisión Europea, 2010

#### 6.6.5 Filtración a presión

Para deshidratar el lodo se han utilizado distintos tipos de filtros prensa uno de estos tipos consiste en una serie de placas rectangulares, ranuradas a ambos lados, que están colocadas una en frente de la otra en posición vertical, sobre un bastidor de altura fija o variable y una tela filtrante se ajusta sobre cada placa. Las placas se mantienen juntas con fuerza suficiente para que se adhieran herméticamente y puedan así resistir la presión aplicada durante el proceso de filtración. Para que

las placas permanezcan unidas se utilizan prensas hidráulicas o tornillos acondicionados mecánicamente (Mosquera Calle & Martínez Martínez, 2017).

Durante el funcionamiento se bombea lodo acondicionado al espacio existente entre las placas y se aplica una presión forzando el líquido a pasar a través de la tela filtrante y de los orificios de las placas. Estas seguidamente se separan y se procede a retirar el lodo; el filtrado es normalmente retornado a la entrada de la planta de tratamiento (Mosquera Calle & Martínez Martínez, 2017). Citando a Villamayor.

## **6.7 SECADO**

La deshidratación y secado son operaciones unitarias físicas (mecánicas) utilizadas para reducir el contenido de humedad del lodo, de forma que pueda manipularse y procesarse como semisólido, la forma de diferenciarlos es la variación en el porcentaje de pérdida de agua de los lodos, tal como lo describe González Granados (2016):

- Lodos deshidratados: son los lodos tratados sometidos a un proceso de pérdida de agua por procedimientos físico-químicos o térmicos, previo a su utilización. El contenido de humedad no debe superar el 80%.
- Lodos secados: son lodos tratados con un contenido de humedad inferior al 70%.

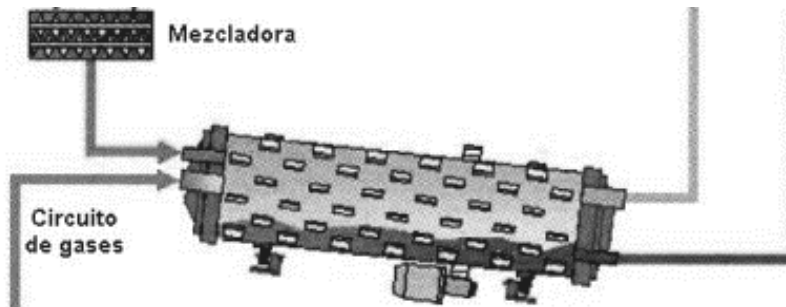
### **6.7.1 Secado por pulverización**

Un secador por pulverización utiliza un tanque centrifuga de alta velocidad a la que se alimenta lodo líquido. La fuerza centrífuga sirve para pulverizar el lodo en partículas finas y para difundirlas en la parte superior de la cámara de secado, en la que se produce la transferencia constante de humedad a los gases calientes. En lugar de un tanque se puede emplear una salida tubular, el objetivo del diseño de la misma es tal que impida su obstrucción (Griffa & Schierano, 2015).

### **6.7.2 Secado horno rotativo**

Los sistemas de secado rotativos se han empleado en varias plantas para el secado de lodos y para la incineración de residuos sólidos urbanos e industriales. En los secadores térmicos directos el material a secar se halla en contacto con los gases calientes. En los secadores indirectos, la cámara central se halla envuelta en vapor, el cual se añade al eje hueco del agitador. Como combustible

se puede utilizar carbón, gasóleo, gas, residuos sólidos urbanos o el propio lodo seco. Para levantar y agitar el material durante el giro del tambor, se pueden instalar placas deflectoras (Griffa & Schierano, 2015).



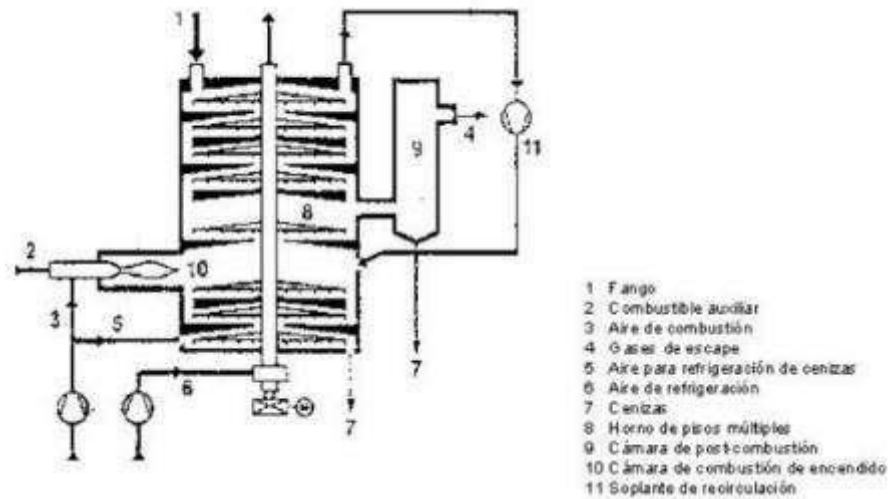
**Figura 15. Horno Rotativo.**  
Fuente: Universidad De Sevilla, 2004

### 6.7.3 Secado instantáneo

Su nombre hace referencia a lo rápido que se produce el secado del material en este tipo de secador. El sistema de funcionamiento de este secador consiste en mezclar el material a secar con una corriente de gases calientes a alta velocidad. Uno de los requisitos para su buena operación necesita que el tamaño de las partículas del material sea reducido. Debido a la rapidez del secado, estos equipos resultan ser más compactos que los rotatorios pero debido a su sistema de funcionamiento consume más energía eléctrica. Se puede utilizar cualquiera de estos equipos para secar lodos residuales, sin embargo, los costos de implantación, mantenimiento y operación de estos equipos son altos (Griffa & Schierano, 2015).

### 6.7.4 Hornos de piso

Los hornos de pisos múltiples son los más experimentados para este tipo de productos. Son hornos verticales con distintos pisos, en los que se alimentan los lodos por la parte superior y se rastrillan lentamente hacia el centro del horno, cayendo al piso inferior, donde los rastrillos los conducen hacia la periferia. Allí caen hacia el siguiente piso donde los rastrillos los vuelven a conducir hacia el centro y así sucesivamente. La torta de lodo y el combustible auxiliar se queman en los pisos intermedios a una temperatura de 800 - 900 °C.

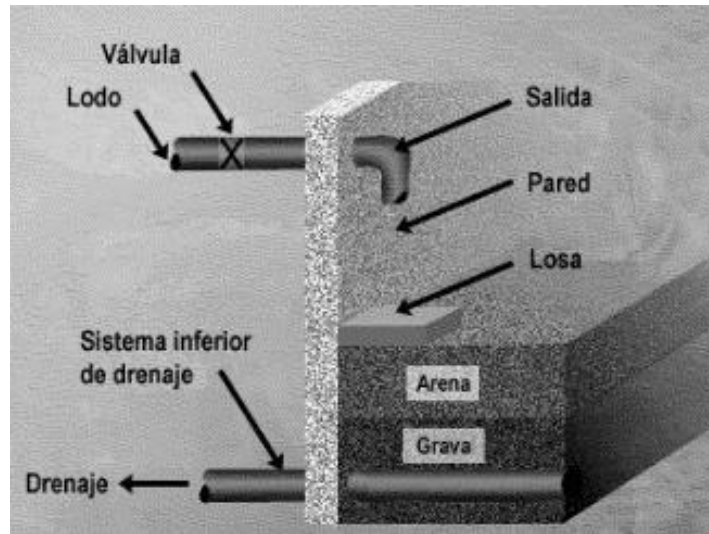


**Figura 16. Horno de Piso. 1**  
 Fuente: Universidad De Sevilla, 2004

### 6.7.5 Eras de secado

Las eras de secado son capas de materiales drenantes dispuestas de forma vertical en un receptáculo. El lodo se hace pasar sobre estas capas de grava o arena produciéndose el filtrado y la deshidratación de los lodos por evaporación. " Esta evaporación dependerá de las condiciones climáticas de la zona, los días de exposición de los lodos y las características del lodo. " El material drenante suele estar formado por capas de 10 cm de arenas sobre una capa de grava de 10-20 cm, colocando una red de tuberías en la parte inferior para recoger el agua que volverá a ser tratada en la PTAR. La capa de arena debe reponerse cada cierto tiempo ya que se pierden arenas en el proceso de filtrado y recogida de los lodos. Este método se utiliza para poblaciones de 20.000 habitantes o inferiores. El inconveniente que presenta este proceso es la gran superficie de terreno que se requiere (Hoyos López, 2017).

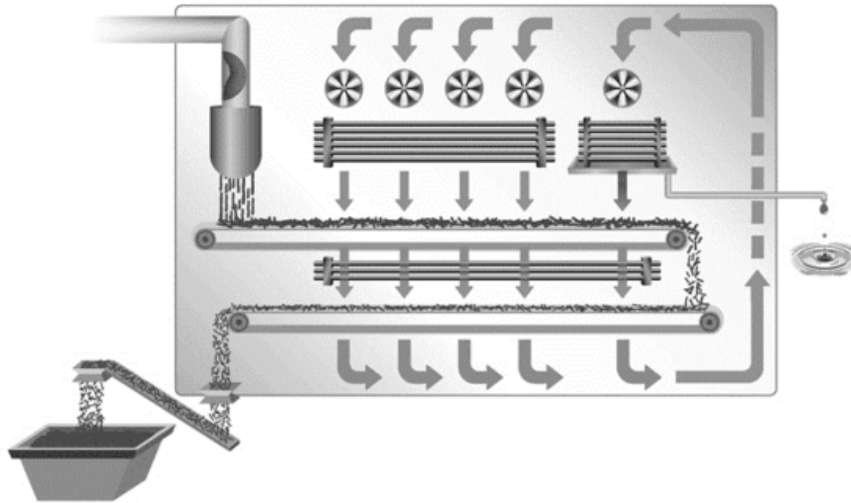
Los lechos de secado son dispositivos que eliminan una cantidad de agua suficiente de los lodos para el que el resto pueda manejarse como material sólido, con un contenido de humedad inferior al 70 %. (Hoyos López, 2017).



**Figura 17. Eras de Secado.**  
Fuente: Universidad de Salamanca, 2019

#### 6.7.6 Secado térmico

Es una operación unitaria que involucra la reducción del contenido de agua por la vaporización de este al aire. El secado térmico puede ser por secado directo o indirecto. " En el primer caso se utilizan gases calientes que se ponen en contacto con el lodo a deshidratar, obteniéndose una sequedad de hasta un 90%." En el secado térmico indirecto el medio calefactor es una pared secadora, similar a un intercambiador de calor, obteniéndose sequedades menores que por el método anterior, de un 60-70%. (Hoyos López, 2017).



**Figura 18. Secado Térmico.**  
Fuente: Tecnoaqua, 2016

## 6.8 PROCESOS TÉRMICOS

### 6.8.1 Incineración

Proceso de eliminación de lodos por combustión (quemado) de los mismos. Los lodos del tratamiento de aguas residuales provenientes de la deshidratación contienen cantidades elevadas de agua superiores al 60 %, lo que hace aconsejable su desecación antes de incinerarlos. Normalmente los gases de salida del incinerador se utilizan para secar el lodo. Debido al poder calorífico de los lodos superior a 3.500 kilocalorías por kilogramo de sólidos secos, sólo se necesita una pequeña cantidad de combustible para su incineración. Los hornos de incineración más utilizados son: horno de hogar múltiple, hornos rotatorios y hornos de lecho fluido. Los hornos rotatorios son los más utilizados industrialmente. La alimentación de los lodos es, en la mayor parte de los casos, húmeda, realizándose el secado y la posterior combustión, en el mismo horno (Real academia de ingeniería, 2019).

### 6.8.2 Coincineración

La incineración conjunta o co-incineración es el proceso de incineración de lodos de agua residual junto con residuos sólidos urbanos. El principal objetivo es la reducción de los costes globales de la incineración del lodo y de los residuos sólidos por separado. Actualmente, no es una práctica de

uso muy extendida. El proceso presenta las ventajas de producir la energía necesaria para la evaporación del agua contenida en el lodo, y mantener la combustión de los residuos sólidos y lodos y la producción de un exceso de calor útil para la generación de vapor, si se desea, sin necesidad de emplear combustibles fósiles auxiliares (Griffa & Schierano, 2015).

### **6.8.3 Gasificación del lodo**

La gasificación es el proceso térmico en el que el contenido carbonoso de los lodos se transforma en un gas combustible y otras sustancias, en presencia de un agente gasificante (aire, oxígeno, vapor de agua o dióxido de carbono) a elevada temperatura y en una atmósfera netamente reductora (Fytili & Zabaniotou, 2008).

El producto de interés es el gas y está compuesto principalmente por monóxido de carbono, hidrógeno, dióxido de carbono, vapor de agua, metano, otros hidrocarburos ligeros y, en el caso de gasificar con aire nitrogenado. Además de este gas, se obtiene un residuo sólido carbonoso (char) y una mezcla de gases condensables orgánicos aromáticos denominados alquitranes, que son indeseables al poder degradar equipos aguas abajo (Gil Lalaguna, 2014).

El proceso puede agruparse, básicamente, en tres etapas. En primer lugar, se produce la evaporación de la humedad de los lodos (secado), según éstos se van calentando en el reactor hasta una temperatura de unos 200°C. A continuación, tiene lugar la pirolisis o desvolatilización del lodo entre los 350 - 500°C, generándose un residuo carbonoso o char, gases condensables (alquitranes) y un gas producto no condensable. Finalmente, tiene lugar la gasificación del carbonizado por oxidación incompleta a partir de los 600°C (Rey García, 2016) Citando a Dogru.

Durante la gasificación tienen lugar numerosas transformaciones físicas y químicas, tanto homogéneas como heterogéneas (Fytili & Zabaniotou, 2008).

Las principales reacciones químicas que tienen lugar en el gasificador son las de tipo exotérmico, que proporcionan el calor necesario para compensar las necesidades energéticas de las reacciones endotérmicas que se producen en el secado, en la pirolisis y en la zona de reducción (De Andrés Almeida, 2010).

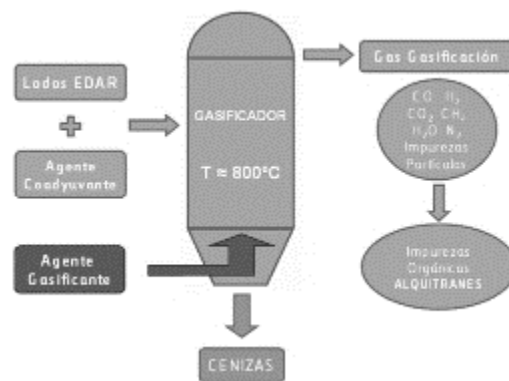
La gran ventaja del sistema es la correcta transformación del combustible en gases y la ausencia de inquemados sólidos. Como inconveniente debe resaltarse la formación de compuestos

intermedios, hidrocarburos policíclicos (alquitranes) que suelen originar problemas durante el enfriamiento del gas (Rey García, 2016).

Estos procesos transforman la materia orgánica de los lodos. De este modo, se consigue una reducción muy importante del volumen de residuo, además de la posibilidad de generar combustibles almacenables.

La gran cantidad de materia inorgánica presente en los lodos puede desempeñar un papel destacado en la reducción de alquitranes gracias al efecto catalítico de muchos de sus cationes (calcio y potasio principalmente).

Es económicamente viable, energéticamente aprovechable y ambientalmente aceptable, considerando los biosólidos como fuente renovable. La emisión de compuestos contaminantes a la atmosfera es mucho menos comparada con la incineración (Cardona Mejía & Orozco Álzate, 2018).



**Figura 19. Gasificación de Lodo.**

Fuente: Cadagua, 2016

#### 6.8.4 Pirolisis del lodo

La pirolisis consiste en una degradación térmica de la materia orgánica en ausencia de agente oxidante. Es un sistema que precisa, como la gasificación, aporte externo de calor. Existen muchas marcas comerciales que extraen este calor de la combustión parcial de parte del combustible. Si bien hay que reconocer que ello choca con la ortodoxia de la propia definición, muchos fabricantes se han inclinado por este sistema para evitar males mayores. Los gases que se generan en la pirolisis tienen un poder calorífico inferior (PCI) más elevado que los generados durante la

gasificación. No obstante, al estar calientes, unos 500°C, una eventual entrada de aire conlleva peligro inminente de explosión, como desgraciadamente ha ocurrido en muchos lugares. La proporción entre los productos de la pirolisis es función del lodo pirolizado y de las condiciones de proceso. Una buena aproximación es calcular un tercio de gases, un tercio de vapores (de líquidos o aceites pirolíticos a temperatura ambiente) y el resto de sólidos (coque). Cuanto mayor es la temperatura de proceso, mayor es la generación de gases y menor la de líquidos y sólidos. La ventaja de la pirolisis es la baja emisión de partículas, principalmente debido a la reducida temperatura del proceso, a parte, de la transformación del combustible en gas. Como inconvenientes cabe citar la generación de coque (char). En el caso de los lodos de depuradora, este residuo carbonoso puede superar el 25% en peso de la fracción orgánica. Este coque es de difícil reutilización, incluso su incineración es complicada. Otro resultado es la formación de productos tóxicos intermedios (Castells, 2012).

#### **6.8.5 Mixto de gasificación y pirólisis**

Considerando las ventajas e inconvenientes de los procesos de gasificación y pirolisis, la síntesis de ambos procesos es la solución, teóricamente ideal, para resolver el problema de la valorización de la fracción orgánica de los lodos generados en una Planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR). Los lodos secos se introducen con una humedad residual del 20 – 30%, junto con ciertos aditivos inorgánicos en un reactor rotativo que trabaja a una temperatura de unos 900°C con defecto de aire. En el reactor tienen lugar reacciones de gasificación y pirolisis. La elevada temperatura favorece la pirolisis-flash, con lo que la generación de gases es máxima. La inclinación y rotación del reactor favorece la completa gasificación de la materia orgánica, a base de aumentar el tiempo de residencia de los sólidos. A la salida del reactor se separa por la parte inferior, la fracción no combustible (parte inorgánica del lodo y aditivos añadidos), y por la parte superior la masa de gases. Los gases pasan a una cámara de oxidación donde se les añade el oxígeno que exige la legislación para ser enviados a la caldera de recuperación (Castells, 2012).

#### **6.8.6 Oxidación húmeda del lodo**

La oxidación por vía húmeda es un proceso atractivo empleado para la destrucción de biosólidos procedentes de la depuración de aguas residuales urbanas, cuando estos están demasiado diluidos para su incineración o bien demasiado concentrados para un tratamiento biológico posterior. El

proceso implica la oxidación de los compuestos orgánicos e inorgánicos siempre en fase acuosa, tanto disueltos como en suspensión, usando oxígeno (o aire) a temperaturas y presiones elevadas, pero siempre en condiciones subcríticas. A las temperaturas en que se realiza la oxidación se precisa mantener una presión suficiente que mantenga el agua en fase líquida (como agua sobrecalentada) y a su vez mantenga una concentración suficiente de oxígeno soluble (Sanz Ataz, Guerrero Gallego & Ortega Díaz, 2015).

Las condiciones típicas de la oxidación húmeda se mantienen en el intervalo de 160°C y 20 bar a 320°C y 140 bar. Los tiempos de residencia en el reactor de oxidación oscilan entre 15 y 120 minutos en función del grado de oxidación requerido. La demanda química de oxígeno (DQO) se reduce en un rango entre 75% - 90% (Djafer et al.,1994). El grado de oxidación obtenido es principalmente función de la temperatura, presión parcial de oxígeno, tiempo de residencia, naturaleza y estado de oxidación de los compuestos presentes. Empleando oxígeno puro, la cantidad de gases generados es 10 veces inferior a los que se generan por incineración de los mismos biosólidos con aire. Además, los productos de la oxidación quedan retenidos mayoritariamente en disolución y una parte mínima son emitidos a la atmósfera después de atravesar un convertidor catalítico (Sanz Ataz, Guerrero Gallego & Ortega Díaz, 2015).

Los principales componentes del proceso comprenden un reactor, bombas de alimentación y recirculación, intercambiadores de calor y caldera, unidad de tratamiento de gases, equipos de dosificación, depósito de oxígeno y decantador lamelar. El reactor es un recipiente a presión de diseño convencional fabricado con materiales metálicos especiales para soportar las temperaturas y presiones indicadas, así como resistencia química a la corrosión.

El resultado de la oxidación húmeda de los biosólidos es la conversión de la materia orgánica insoluble en compuestos orgánicos simples y solubles, que a su vez se oxidan en buena parte hasta dióxido de carbono sin emisión de óxidos de nitrógeno  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{HCl}$ , dioxinas, furanos, cenizas volantes, etc. La fracción orgánica más reticente a la oxidación está formada por ácidos orgánicos de cadena corta y especialmente por ácido acético. El nitrógeno orgánico amoniacal se transforma en amoníaco y debido a su solubilidad la eliminación de nitrógeno es del orden del 10 al 20 (Sanz Ataz, Guerrero Gallego & Ortega Díaz, 2015).

## 7 CUARTO CAPITULO. DEBILIDADES Y FORTALEZAS DE ALGUNOS TRATAMIENTOS DE LODOS

Tener en cuenta las alternativas que existe para el tratamiento de los lodos residuales, es bastante importante, pero también saber cuáles son sus ventajas y desventajas en la generación de los lodos aprovechables o reutilizables, sirve para optimizar esa relación directa que se busca entre el tratamiento de aguas residuales, reducción de la contaminación de efluentes o cuerpos receptores, y lo que concluye con un ciclo de sostenibilidad al aprovecharlos o darle un camino alternativo a la disposición final inmediata.

**Tabla 2. Matriz de Ventajas y Desventajas de diferentes tratamientos de lodos.**

Proceso / tratamiento	VENTAJAS	DESVENTAJAS
<i>Espesamiento</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduce el volumen y tamaño de los lodos que van a ser dispuestos finalmente. por presentar una mayor consistencia de los lodos.</li> <li>• Generar un lodo de mayor concentración, lo que facilita las cualidades necesarias, para entrar en proceso de deshidratación, y facilitar dicho proceso.</li> <li>• Dependiendo del tipo de manejo final o disposición, este proceso facilita su movilización y transporte, tanto para ser aplicando posteriormente en suelos.</li> <li>• Estos lodos son usados o aprovechados en distintas formas, entre las que encontramos el incrementar la concentración de los lodos, sino que puede igual usarse en mejorar las condiciones del agua en el proceso de clarificado en el tanque de espesamiento. Facilitando el proceso para que estos sean liberados a una fuente receptora, o para su recirculación en la línea de tratamiento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El hecho de ser necesario el uso de polímeros, para incrementar el tamaño de las partículas, reducción de las partículas en el agua, y generar un acondicionamiento de los hidróxidos, tanto de hierro y aluminio, para aumentar la velocidad del proceso de sedimentación.</li> <li>• No es viable en plantas pequeñas, ya que no es buena la relación de los costos y eficiencia.</li> <li>• El uso de los polímeros no garantiza un efecto directo sobre el grado de compresión de los lodos, lo que hace también necesario controlar el tiempo, para la obtención de un grado de espesamiento.</li> <li>• Es necesario hacer un control estricto a las concentraciones del hidróxido de magnesio, y que este disminuye el nivel de secado en los lodos, generando, con ello una disminución del compactación y densidad de los lodos secados.</li> </ul>
<i>Filtración a Vacío o presión</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Presenta alto niveles de efectividad de secado, en aquellos lodos que provienen de procesos de liberación del agua.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Este sistema basa su principio en la presión, según fuentes teóricas, puede aplicarse hasta una presión de 14.7 psi (103 KPa), pero en el trabajo</li> </ul>

Proceso tratamiento /	VENTAJAS	DESVENTAJAS
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dentro de sus ventajas, está el conseguir un adecuado proceso de secado de lodos, que vienen de procesos de floculación, coagulación.</li> <li>• Sirve para lodos que presentan características difíciles de manejar, como aquellos con presencia de sólidos bajo presión, Por periodos largos, lo que permite obtener una consistencia adecuada.</li> <li>• Como resultado final este proceso, permite obtener una torta con lodos con un rango de concentración que oscila como mínimo entre el 15% y 25%.</li> <li>• Las variables que permite para el manejo u operaciones de los lodos, permite operar con altas presiones, lo que genera una mayor concentración de sólidos, produciendo un resultado de tortas con 30% y 45% en su concentración, precisando que esta es una de las más altas concentraciones, que puede obtener en equipos de deshidratación de lodos.</li> </ul>	<p>en campo, solo se ha podido determinar una media de 10 psi (70 KPa), lo que limita su eficiencia.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Un factor importante, es el hecho de requerir de un seguimiento a las concentraciones de hidróxido de magnesio, para los lodos que provienen de procesos de liberación o ablandamiento.</li> <li>• El lienzo requiere de un control y mantenimiento, el cual es sometido a presiones que lo deterioran o afecta su funcionamiento.</li> <li>• Todo el material que va a ser tratado, requiere obligatoriamente de un tratamiento previo.</li> <li>• El uso de personal debidamente formado y calificado, ya que este tratamiento presenta y genera diferentes variables que debe ser controladas y revisadas, como son el tipo de lodo, la tensión, velocidad, volumen, entre otras.</li> </ul>
<i>Centrifugación</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Este proceso es bastante rápido, ya que produce el espesamiento en lodos de aluminio, con un nivel de concentración de sólidos de aproximadamente un 11% en un tiempo medio de cuarenta minutos.</li> <li>• Dentro de las fases, pueden realizarse una concentración de los residuos, como en el retro lavado del filtro, de un 6% de sólidos en veinte minutos, y respectivamente de un 10% con polímeros en ochenta minutos.</li> <li>• Los niveles de recuperación alcanzada, está muy cercana al 90% con el uso de polímeros, y de un 99% con 0,5% a 1.0% de polímeros por cada tonelada de los residuos sólidos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Es un sistema que trabaja con baja presión, lo que disminuye su eficiencia en el resultado final.</li> <li>• Tiene algunos parámetros que deben ser previamente controlados o revisados, para realizarlo, como son el revisar los porcentajes de magnesio removido y los tiempos del proceso.</li> <li>• Es una alternativa de manejo, que viene cada vez en menor uso, sobre todo en el secado de lodos de tipo químicos.</li> <li>• Cuando se usa en lodos de procesos de alúmina, se ha encontrado concentraciones que oscilan entre el 17% y el 18%, un valor inferior al 205 que es requerido, para poder transportar los lodos, por medios de tipo mecánico.</li> <li>• Genera un alto consumo de energía.</li> </ul>

Proceso tratamiento /	VENTAJAS	DESVENTAJAS
<i>Ecualizador</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Este proceso permite que el proceso tenga continuidad en las diferentes fases del proceso, recibiendo en un mismo punto los desagües de la planta de tratamiento.</li> <li>• Debido a la continuidad del proceso, este no depende de la carga únicamente, sino de la constancia de los flujos que son dirigidos para el proceso. El proceso tiene una dinámica de recirculación, lo que facilita el retornar el agua para ser clarificada y para ser reutilizada en el mismo proceso.</li> <li>• Reduce la generación de impactos por la alteración hidráulica.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La acumulación de aguas en las áreas de desagües genera problemas de vectores en la planta.</li> <li>• Este sistema en su proceso o manejo es bastante económico, pero el inicio o construcción puede ser costoso, ya que requiere de un área amplia para su puesta.</li> </ul>
<i>Lechos de Secado</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• En un proceso que requiere de adaptarse, con arena bajo el drenado, tuberías perforadas y grava, puede trabajar tanto por gravedad, como al vacío.</li> <li>• El hecho de poder colocar varios lechos de secado en un mismo punto, ofrece ventajas tanto en el uso de espacio, manejo y ahorro de inversión.</li> <li>• La rotación de los lechos en tiempos y etapas, favorece la optimización de los tiempos, ya que algunos pueden estar en la etapa de cargado, otros pueden estar en la de secado, lo que permitirá en unos u otros una nueva aplicación de residuos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El uso de esta técnica, está limitado en gran parte por las condiciones del clima, en promedio son de 1 a 20 por año, y esto puede ser más aprovechable con el uso de polímeros.</li> <li>• Tanto para el tratamiento, como para la disposición o almacenamiento, deberá tenerse en cuenta las condiciones del clima, para que este sea factible, y hagan factible el tipo de tratamiento y sostenibilidad del sistema.</li> <li>• El uso y rotación de las camas, para su uso o nueva disposición en el proceso de tratamiento, está sujeto al clima y la disposición de posibilidades para el almacenamiento, y por consiguiente la remoción de sólidos y la preparación de las camas.</li> <li>• Algunas condiciones o características previas, deben ser tenidas en cuenta para disponer de este tipo de tratamientos, como son el clima, la topográfica y las restricciones en operatividad, que puedan generar la eficiencia del proceso.</li> </ul>
<i>Lagunas de Deshidratación</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Este proceso de tratamiento tiene un mayor nivel de volumen o carga que</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La dificultad más apreciable de este sistema, es poder fijar el tamaño del</li> </ul>

Proceso tratamiento /	VENTAJAS	DESVENTAJAS
	<p>los lechos de secado, lo que por ende genera un mayor tiempo de secado, y cuentan con una estructura de decantador y drenaje inferior.</p>	<p>mismo, pues las concentraciones de sólidos drenados pueden variar al terminar la carga.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Debido a la amplitud del sistema, en las fases de operación las capas que corresponde a la parte inferior, no se secan.</li> </ul>
<p><i>Espesamiento de lodos</i></p>	<p>Según Villa Manosalvas (2011), pueden ser atribuidas las siguientes ventajas principales:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Mejores condiciones técnicas y económicas en la operación de digestores por reducción del espacio necesario; la cantidad de calor necesaria al calentamiento del digestor disminuye; caso ya existan unidades de digestión, el periodo de retención aumenta; se produce una menor cantidad de líquido sobrenadante; permite una mayor tasa de aplicación de sólidos por metro cúbico de capacidad; mejora la eficiencia de la acción de los microorganismos de la digestión.</li> <li>2. La reducción de volumen reduce los costos de bombeo de lodo y la disposición final sobre el terreno o en el océano.</li> <li>3. Reduce los costos de condicionadores químicos que deberán ser adjuntados previo al desaguado del lodo debido a la mayor concentración de sólidos.</li> <li>4. Elimina el agua donde normalmente es más fácil, es decir, previo a la digestión o al desaguado.</li> <li>5. Amortigua las fluctuaciones de flujo y concentración de lodo.</li> <li>6. Muchas veces reduce los costos generales de tratamiento, tal como en la grandeza física de las unidades, en la mano de obra y en el gasto de energía.</li> </ol> <p>Antiguamente el espesamiento era considerado un arte, pero hoy están disponibles técnicas apropiadamente conocidas a punto de poder considerarlas como parte de procesos de ingeniería reproductibles.</p> <p>Asimismo, hay aún mucha controversia al respecto. Un poco de arte queda siempre, por lo que los operadores deben ser</p>	<p>Según Villa Manosalvas (2011), no siempre en el espesamiento se presentan ventajas. Hay algunos inconvenientes o desventajas que deben ser resaltados:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. El proceso requiere operadores adiestrados y atentos, debido a las fluctuaciones de composición y concentración del lodo.</li> <li>2. Es frecuente el desarrollo de malos olores debido a la septicidad o anaerobiosis que se instala cuando el tiempo de espesamiento es muy largo, principalmente durante la elevación de la temperatura ambiente y de los líquidos cloacales.</li> <li>3. El costo inicial de implantación es más elevado.</li> <li>4. No es apropiado para pequeñas plantas de tratamiento, donde es preferible utilizar unidades de constitución, con características propias, como son los tanques Imhoff, o con características especiales, como los sedimentadores con pozo de espesamiento, o aún por medio de operación adecuada de remoción frecuente de líquido sobrenadante de los digestores.</li> <li>5. Los aditivos, casi siempre necesarios para que se logre un resultado compensador, en general no son producidos en los países en desarrollo, debiendo ser importados de las naciones más industrializadas, lo que da nacimiento a gastos elevados y resulta en una dependencia de importación de un mercado que puede ser manipulado según la voluntad de las firmas exportadoras, Puede constituirse en un gran inconveniente para el país importador, como es el caso de los poli electrolitos, que en general son de precio elevado.</li> </ol>

Proceso tratamiento /	VENTAJAS	DESVENTAJAS
	convenientemente seleccionados y adiestrados para ese menester.	
<i>Digestión anaerobia</i>	<p>Respecto a este tratamiento Cruz Ruiz (2014), menciona las siguientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• El consumo de energía es muy bajo con el tratamiento anaerobio. Por ejemplo, no tiene que ser provisto de oxígeno y no es necesario un mezclado intenso.</li> <li>• La mayoría del material orgánico en el agua residual se convierte en biogás, que puede ser combustionado con el fin de obtener energía o vapor. La energía se puede utilizar en la planta de producción de biogás o se puede proveer a la red de la energía.</li> <li>• La producción de lodo en el tratamiento anaerobio es muy baja (ya estabilizados y espesados), porque la mayoría del material orgánico se convierte en biogás, no en lodo. Además, el lodo anaerobio se estabiliza y se puede desecar fácilmente por gravedad.</li> <li>• Se puede utilizar para la arrancada de nuevos reactores anaerobios, o se puede utilizar como bioabono en la tierra. Los gastos de transportación del lodo son por consiguiente mínimos.</li> <li>• Son sistemas que asimilan altas y bajas cargas orgánicas.</li> <li>• La remoción de materia orgánica se encuentra entre el 60 y 80 % según el tipo de agua residual.</li> <li>• El lodo anaerobio puede ser almacenado y conservado fácilmente, lo que simplifica los arranques sucesivos después de paradas o los períodos con cargas orgánicas reducidas.</li> <li>• Existe la posibilidad de trabajar a tiempos de retención hidráulicos muy bajos, o lo que es igual, se necesitan menores volúmenes de instalación, abaratando las inversiones.</li> </ul>	<p>Respecto a este tratamiento Cruz Ruiz (2014), menciona las siguientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• El proceso anaerobio no permite conseguir la calidad de efluente que se puede alcanzar en una planta de lodos activos y otros sistemas aerobios, pero sí permite eliminar gran parte de los SS y de la DQO y/o DBO5, incluso en una sola etapa, que sustituiría al decantador primario, al digestor de lodos activos (aerobio) y al digestor anaerobio de estabilización de lodos.</li> <li>• Requerimiento de un lodo granular para arranques rápidos. Arranque lento (seis meses) en caso de no contar con lodos inoculados.</li> <li>• En ocasiones, hay presencia de malos olores, para lo cual se requiere de un sistema simple de control.</li> </ul>

Proceso tratamiento /	VENTAJAS	DESVENTAJAS
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Los costos de inversión son bajos, porque se aplican altas cargas orgánicas al reactor y los tiempos de la retención son cortos. Además, el diseño y la construcción de un reactor anaerobio es simple, lo que reduce aún más los costos.</li> </ul>	
<i>Digestión aerobia</i>	<p>La digestión aerobia es una alternativa viable con respecto a la digestión anaerobia para la estabilización de los lodos. Las ventajas y desventajas de la digestión aerobia se listan a continuación.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Una reducción de sólidos volátiles aproximadamente igual a la obtenida por vía anaerobia. El sobrenadante obtenido tiene un contenido menor de DBO que el obtenido por digestión anaerobia. El sobrenadante aerobio tiene comúnmente una DBO menor de 100 mg/t.</li> <li>• Esto es importante ya que el tratamiento se facilita al no tener la sobrecarga debido al reciclaje de los licores sobrenadantes con altos valores de DBO que se tienen en los digestores anaerobios.</li> <li>• Formación de un producto final inodoro, parecido al humus, que es biológicamente estable y que puede ser fácilmente eliminado.</li> <li>• Producción de un lodo con excelentes características de deshidratación.</li> <li>• Recuperación de los valores fertilizantes básicos del lodo.</li> <li>• Hay menos problemas de operación debido a que el sistema es más estable. Es por esto que se requieren menores costos de mantenimiento y menor mano de obra especializada para la operación de la planta.</li> <li>• Menor inversión de capital.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El principal inconveniente es el elevado costo de energía asociado al suministro de oxígeno necesaria.</li> <li>• La eficiencia en la reducción de sólidos varía con las fluctuaciones de temperatura.</li> <li>• El espesamiento por gravedad seguido de una digestión aerobia, generalmente se tiene un sobrenadante con alta concentración de sólidos.</li> <li>• Algunos lodos aparentemente no es fácil deshidratar por filtración al vacío después de una digestión aerobia.</li> <li>• El que un subproducto útil, como el metano, no sea recuperado puede suponerse también otro inconveniente.</li> </ul>
<i>Estabilización con cal.</i>	<p>Visto desde la perspectiva de Fuentes Silva (2015), se encuentran las siguientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bajos Costos Operacionales.</li> <li>• Fácil Aplicación.</li> </ul>	<p>Visto desde la perspectiva de Fuentes Silva (2015), se encuentran las siguientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• No se reduce el contenido de materia orgánica.</li> </ul>

Proceso / tratamiento	VENTAJAS	DESVENTAJAS
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Posibilita reducción de agentes patógenos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumento de volumen de producto final.</li> </ul>
<i>Acondicionamiento químico</i>	<p>Tiene como finalidad, mejorar la eficiencia de algunos procesos, como lo afirman Suárez López, Jácome Burgos &amp; Ures, Rodríguez (2015), el acondicionamiento del lodo consiste en el tratamiento químico para mejorar la eficiencia de los procesos de espesado o desaguado. Lo que genera un incremento de los sólidos del lodo.</p>	<p>Aunque la información de este tratamiento, es escasa, de acuerdo con Aldana Tique &amp; Pérez Rojas (2017), el acondicionamiento químico del lodo requiere del empleo de grandes dosis de cal Ca (OH)<sub>2</sub> o de cloruro férrico (CL<sub>3</sub>Fe), lo que supone un costo elevado de eliminación. Otras consideraciones importantes irán dirigidas a la recuperación energética, buscando la utilización del gas metano, producido en la digestión anaerobia del tratamiento de lodos residuales.</p>
<i>Acondicionamiento térmico</i>	<p>Los beneficios de este tratamiento son puntuales, como lo refieren Galarza Espinoza &amp; Quezada Tirira (2012), el gas producido en exceso en la digestión sirve para satisfacer gran parte de la demanda energética necesaria, y los digestores se utilizan como depósitos de almacenamiento. Esto permite mantener la cocción con un caudal continuo y estable de lodos.</p>	<p>Se definen aspectos puntuales, por parte de Galarza Espinoza &amp; Quezada Tirira (2012), el acondicionamiento térmico requiere importantes inversiones de instalación y elevados costes de mantenimiento. Esto hace que sea interesante, sobre todo, en grandes plantas, en las que existan una digestión anaerobia de los lodos.</p>
<i>Deshidratación</i>	<p>Las opciones favorables de este tratamiento, las describen Bermeo Barreto &amp; Idrovo Heredia (2014):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Este proceso permite la reducción del contenido de humedad del lodo proveniente del esperador, de tal manera que haya una mayor concentración de sólidos, menor volumen y mejor facilidad de manipulación.</li> <li>• Costos en el transporte del lodo hasta el lugar de evacuación final, estos disminuyen a medida que disminuye el volumen de lodo a ser transportado.</li> <li>• Ofrece una mejor manipulación que el lodo líquido o espesado, en muchas ocasiones puede incluso hasta ser manipulado mediante tractores y con cintas transportadoras.</li> <li>• Si el proceso siguiente es el de incineración, la deshidratación es un proceso de suma importancia con el</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La mayoría de procesos son de tipo mecánico o manual, lo que hace difícil los ajustes o dosificación.</li> </ul>

Proceso / tratamiento	VENTAJAS	DESVENTAJAS
	fin de poder aumentar el poder calorífico del lodo.	
<i>Gasificación de lodos</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Riesgo de corrosión más bajo pero similar disponibilidad</li> <li>• Tratamiento de gases más sencillo</li> <li>• Valorización material, reutilización de escorias como agregados de construcción.</li> <li>• Apropiaada para vertederos en minería.</li> <li>• Se adapta mejor a tamaños pequeños</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Operación más compleja</li> <li>• Eficiencias algo menores</li> <li>• Requiere pre-tratamiento</li> <li>• Tecnologías menos probadas y fiables</li> </ul>
<i>Pirolisis de lodos</i>	<p>Los aspectos positivos de este tratamiento, se encuentran definidos en el trabajo de Farfán Castro &amp; Vargaz Muñoz (2014):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Muy baja emisión de partículas contaminantes.</li> <li>• Es un proceso controlable por definición ya que las reacciones son endotérmicas.</li> <li>• Determinados compuestos son recuperables a partir del residuo carbonoso.</li> <li>• El volumen de residuo es reducido significativamente.</li> <li>• Los vapores condensables de valor económico, pueden ser recuperados.</li> <li>• El gas, volátiles, se suele usar como combustible.</li> </ul>	<p>Los aspectos a tener en cuenta se encuentran definidos en el trabajo de Farfán Castro &amp; Vargaz Muñoz (2014):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Parte de la energía del residuo queda retenida en el residuo carbonoso. residuo carbonoso (coque).</li> <li>• Los gases y, sobre todo, los vapores deben ser destruidos correctamente.</li> <li>• Gran cantidad de coque de difícil valorización.</li> <li>• Los altos costos de operación, si los residuos están húmedos, se requiere una gran cantidad de calor para secarlos antes de someterlos a la pirolisis.</li> </ul>
<i>Oxidación húmeda del lodo</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se reduce significativamente el volumen de los lodos.</li> <li>• Se logra tanto la estabilización de los metales disueltos, como de los lodos.</li> <li>• Se elimina por completo la carga de tipo microbiana.</li> <li>• El mismo proceso genera una mineralización, ya sea total o parcial de los lodos.</li> <li>• El proceso final de vertido, se realiza sin el uso de algún tipo de gas que sea considerado, como peligroso.</li> </ul>	<p>No existe factores estudiados en profundidad, sobre los aspectos negativos de este proceso, pero un aspecto puntual, fue referido por Garcia Figuerelo (2016), que refiere los altos costos de inversión, esto debido a que dentro de la infraestructura física, se deben usar materiales de alto costo, que soporten las condiciones del proceso, como son altas temperaturas y alta presión.</p>

Fuente: Autora

## 8 QUINTO CAPÍTULO. DISPOSICION Y APROVECHAMIENTO DE LODOS

### 8.1 APROVECHAMIENTO Y DISPOSICION DE LODOS

Dadas las consideraciones mencionadas anteriormente en la monografía, la generación elevada de volúmenes de lodos, hace necesario una debida gestión de aprovechamiento de los mismos, pero se debe tener en cuenta algunas condiciones y características de los mismos, para su disposición final, uso o aprovechamiento, dicho proceso de manejo, está dado por el Decreto 1287 de 2014, la cual sugiere parámetros o características, con las cuales, se puede considerar el uso aprovechamiento, y estas están resumidas en la Tabla 7 siguiente:

**Tabla 7. Valores máximos permisibles de categorización de biosólidos para su uso.**

Criterio	Variable	Unidad de medida	Categoría biosólido Valores máximos permisibles	
			A	B
Químicos- metales	Arsénico (As)	Mg / Kg de Biosólido (base seca)	20,0	40,0
	Cadmio (Cd)		8,0	40,0
	Cobre (Cu)		1.000,0	1.750,0
	Cromo (Cr)		1.000,0	1.500,0
	Mercurio (Hg)		10,0	20,0
	Molibdeno (Mb)		18,0	75,0
	Níquel (Ni)		80,0	420,0
	Plomo (Pb)		300,0	400,0
	Selenio (Se)		36,0	100,0
	Zinc (Zn)		2.000,0	2.800,0
Microbiológicos	Coliformes Fecales	Unidades formadoras de colonias - UFC / g de biosólido (base seca)	< 1,00 E (+ 3)	< 2,00 E (+ 6)
	Huevos de Helmintos Viables	Huevos de Helminto viables / 4 g de biosólido (base seca)	< 1,0	< 10,0
	Salmonella sp	Unidades formadoras de Colonias - UFC / 25g de biosólido (base seca)	Ausencia	<1,0 E (+ 3)
	Virus Entéricos	Unidades Formadoras de Placas - UFP / 4 g de biosólido (base seca)	< 1,0	-

**Fuente:** Decreto 1287 de 2014, Bogotá, Colombia.

Las características de los lodos conducen a definir sus posibles usos o alternativas de aprovechamiento, entre las que se encuentran:

### **8.1.1 Alternativa de fertilizante orgánico**

Primero tener en cuenta que este producto puede ser comercializado dependiendo de las características finales, se le realiza un proceso de estabilización a los lodos residuales con el fin de aprovechar sus características como acondicionadores de suelos o abono, en parques, en áreas forestales y jardines.

En cuanto a la materia prima, esta alternativa es bastante viable, según datos publicados por Castañeda Pedraza (2018), El 97% del total de biosólidos producidos en el país, corresponden a las principales plantas de tratamiento de agua del país: El Salitre (Bogotá), Cañaveralejo (Cali) y San Fernando (Itagüí) las cuales generan en total una cantidad aproximada de 274 toneladas/día.

### **8.1.2 Alternativa de material de construcción**

En una industria constante y de alta demanda, los diferentes materiales de construcción, generan necesidades en la consecución y elaboración de sus materias primas para la construcción, surge esta alternativa. Según las investigaciones previas revisadas, los productos resultantes de estos materiales, han demostrado una perfecta adecuación a las normas técnicas de construcción.

Uno de los puntos que se considera importante al momento de aprovechar los lodos, es la presencia de agentes tóxicos, sustancias químicas y metales pesados, algo que se minimiza o extingue con esta alternativa, tal como lo refiere Orellana León (2015), a través de investigaciones, se evidencia un significativo bajo impacto ambiental al incorporar estos lodos a la fabricación de ladrillos. Luego de haberlos incorporado, la mayor parte de su composición química tanto como los metales pesados fueron extintos durante la cocción o solidificados durante el curado, así el producto final es totalmente conforme a las normas. De manera general, la utilización de lodos recuperados para fabricación de ladrillos cerámicos produce ladrillos de buena calidad a la vez que provee de una disposición final amigable con el medio ambiente para estos lodos.

### **8.1.3 Alternativa de restauración de espacios**

El objetivo es recuperar estéticamente terrenos, anteriormente áridos y sin un específico uso productivo, en ocasiones algunas industrias, afecta considerablemente las características del suelo, dejando completamente árido, esta alternativa, se basa en la recuperación de minas de explotación, a prados y terrenos forestales. Inicialmente, se necesita de una aplicación inicial para que el lodo se descomponga rápidamente y se formen colonias de lombrices, y después de un año la vegetación se vuelva uniforme.

Esta tercera alternativa tiene como ventaja, que la sobre carga de algunos nutrientes y de materia orgánica, es favorable, para el propósito final, tal como lo refiere García Gutiérrez (2008), los lodos de depuradora son subproductos con un alto contenido en materia orgánica y con cantidades importantes de nutrientes (nitrógeno, fósforo y oligoelementos). Es por este motivo que son de gran interés en la restauración de suelos degradados, ya que mejoran algunas de sus propiedades, tanto químicas, como físicas y biológicas: aumentan la resistencia a la erosión, incrementan la concentración de nutrientes y son una aportación de materia orgánica.

### **8.1.4 Alternativa de extracción de carbón activado**

Solo los lodos con alto contenido en carbono, son los utilizados para este tipo de aprovechamiento, el cual es utilizado en procesos para la limpieza y/o purificación de aguas y aire.

Dentro de los procesos industriales para manejo ambiental, se está manejando la extracción de diferentes tipos de sustancias contaminantes o tóxicas para lo cual se usa carbono activado, los cuales pueden ser generados con lodos, tal y como lo corrobora González Sáez, Otelo Cabelo, Junco Horta & Pardini (2009), quienes señalan, en estudios realizados recientemente se ha comprobado que los lodos de depuradoras urbanas pueden ser valorizados para la elaboración de adsorbentes, demostrándose que pueden ser convertidos con efectividad y economía en carbón activado, pues por sí solos resulta un recurso obtenido en grandes cantidades a bajo costo.

### **8.1.5 Alternativa de aprovechamiento energético**

Para aprovechar los lodos de esta manera, se requiere que tengan un porcentaje de humedad inferior al 5%, este se puede realizar o por digestión anaerobia o digestión aerobia.

Entender que los lodos pueden ser una gran fuente de energía, producto de su alto contenido de biomasa, tal como refieren en su investigación Pliego Bravo, García Reyes, Urrea García & Vergara Hernández (2014), La biomasa puede ser considerada como la fuente de energía renovable más popular debido a su disponibilidad y abundancia. Biomasa es el término generalmente utilizado para describir al material renovable rico en materia orgánica que proviene de varias plantas. El lodo residual, que es el residuo obtenido del proceso de tratamiento de aguas residuales, es rico en materia orgánica en una composición comparable a las plantas. Por tanto, el lodo residual es frecuentemente considerado como biomasa.

## **8.2 DISPOSICIÓN DE LODOS**

### **8.2.1 Alternativa de reverdecimiento de las tierras estériles**

El objetivo es recuperar terrenos, anteriormente fértiles y en uso de producto para cultivos, la industria causa graves daños al medio, los casos con mayor frecuencia son la escoria de las minas gracias a los desperdicios metálicos o la descarga de desperdicios domésticos. Por esta razón, se ha tratado de cubrirlos de humus a fin de que puedan sembrar en ellos hierbas y otras plantas. Dependiendo de las características fisicoquímicas, microbiológicas del suelo y del lodo, este último puede ser útil en la recuperación ecológica de ecosistemas como el de alta montaña.

Esta técnica, se conoce también como recuperación edafologica y es poco conocida su implementación, algunas condiciones o características de esta alternativa fueron abordados por Rodríguez Torres (2015), la aplicación moderada de lodos de plantas de tratamiento puede mejorar las condiciones físicas del suelo, por la floculación de partículas coloidales que favorecen la agregación del suelo mediante reacciones análogas al tratamiento del agua. Con el fin de darle un uso a los lodos se han intentado cubrir con humus con el fin que se puedan sembrar en ellos hierbas y otras plantas. Dependiendo de las características de los lodos deshidratados estos podrían ser un elemento de interés para este tipo de métodos, tanto desde el campo de la agricultura como el ambiental, pero se debe tener en cuenta el tipo de vegetación que se desea plantar ya que se pueden tener inconvenientes por los materiales pesados que estos contengan; de igual manera con los riesgos causados por la infiltración o escurrimiento de estos compuestos.

### **8.2.2 Alternativa de fijación química**

Esta alternativa tiene como proceso la mezcla de lodo deshidratado, con agentes que poseen características estabilizadoras, como pueden ser el cemento, silicato de sodio, materiales puzolánico (silicatos finos) y la cal, para que reaccione químicamente con los residuos de lodo y lo bloquee. El proceso puede presentar un producto con un nivel elevado pH, que genera la inactividad de las bacterias patógenas y de virus.

El uso de esta alternativa es diferente dependiendo del tipo de lodos, sea industrial o urbanos, como lo menciona puntualmente Rodríguez Torres (2015), El proceso se emplea en el tratamiento de lodos de origen industrial y residuos peligrosos para inmovilizar los compuestos no deseables. Adicional se ha utilizado para estabilizar lodos urbanos para su uso como material para recubrimiento de vertederos y proyectos recuperación de terreno.

### **8.2.3 Alternativa de incineración**

Consiste básicamente en dos procesos: Evaporación del agua e incineración de la sustancia seca con una cierta adición de combustible, en caso de que el contenido de calor de la sustancia seca no proporcione el calor necesario para la evaporación, es decir que la incineración es la destrucción completa de materiales por calor a sus componentes inertes. Se debe tener en cuenta que este método, dependiendo de la forma de operación, produce cenizas que requieren una última disposición.

El proceso de incineración, es una alternativa netamente de disposición final, esto lo explica de forma concreta Santiago Díaz, (2017), la eliminación de los lodos se puede realizar en cualquiera de las fases en las que se encuentren los lodos desde la fase de agua residual sin tratar, si se decide no depurar, hasta los lodos secados térmicamente. La elección de cuál es la fase en la que se deben de eliminar estará influenciada por diferentes aspectos, de los cuales los más importantes podrían ser:

- Cantidades de agua residual y/o lodos producidos
- Capacidad de almacenaje de estos.

#### **8.2.4 Alternativa de Aplicación de lodos en suelo**

Incluye el uso agrícola, aplicación en silvicultura, aplicación para la recuperación de terrenos o zonas degradadas. La aplicación de lodos de plantas de tratamiento puede optimizar las condiciones físicas del suelo, por la floculación de partículas coloidales mediante reacciones análogas al tratamiento del agua.

Dentro de las condiciones a tener en cuenta en esta alternativa, está el escoger para que tipo de cultivo se usaran, ya que esto es un factor de riesgo o desventaja, como lo señalan Jácome Isaza & Mora Chinchilla (2012), desde el punto de vista ambiental y ética profesional es recomendable la no aplicación de lodos para aquellos terrenos agrícolas, ya que los lodos provenientes del sistema tienen un alto nivel de bioacumulación lo que hace que aquellos metales pesados que son tóxicos para los seres vivos tengan grandes afectaciones para aquellos organismos que fueron expuestos a los cultivos tratados con lodos, muchos metales pesados son indestructibles y representan una amenaza ya que no pueden ser degradados ni química, ni biológicamente, es decir no son biodegradables, algunos de estos metales pueden concentrarse a lo largo de la cadena alimenticia y eventualmente bioacumularse en el cuerpo humano.

#### **8.2.5 Alternativa de disposición en relleno**

Existen dos opciones de disposición final de los lodos generados en plantas de tratamiento: relleno sanitario y mono relleno. Para ello, existen una serie de parámetros a considerar en su implementación, que está basado en tener lodos, que no son aprovechables por su alto grado de humedad, contaminantes o por no tener características para su uso posterior, de tal forma que se requiere su disposición, en condiciones que garanticen tanto el adecuado funcionamiento como la salud pública de la población y el ambiente.

La alternativa del relleno sanitario o mono relleno, permite la disposición final de los residuos sólidos ordinarios en el suelo, provenientes del servicio público de aseo, que no sean objeto de aprovechamiento, debe hacerse mediante la técnica de relleno sanitario, la cual puede ser de tipo mecanizado o manual dependiendo de la cantidad de residuos a disponer. En otros términos, el relleno sanitario se constituye en la única forma admitida en las normas nacionales para disponer residuos sin fines de aprovechamiento, y el mono relleno para la disposición final exclusiva de lodos sin fines de aprovechamiento (EAAB-ESP,2010).

**Tabla 3. Ventajas y desventajas de las alternativas de disposición**

Alternativa de disposición	Ventajas	Desventajas
<i>Compostaje</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Genera la reducción de metales Pesados, posibles contaminantes de aguas o suelos.</li> <li>• Aumento eficiente de materia orgánica.</li> <li>• Reducción de la humedad</li> <li>• El producto final cumple con características necesarias para su comercialización.</li> <li>• El producto final puede ser usado para la remediación edáfica.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se maneja poco volumen que impide un desalojo rápido del lodo.</li> <li>• El contenido de humedad del lodo no permite hacer compostaje.</li> <li>• La cantidad de variables a manejar hace del compostaje una técnica complicada.</li> <li>• La excesiva concentración de metales pesados impide el metabolismo de las bacterias de este proceso.</li> <li>• Se requiere adecuación del lodo e insumos de acondicionamiento.</li> </ul>
<i>Disposición como relleno</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• su manejo es rápido y permite el desalojo rápido del lodo.</li> <li>• No se requiere un proceso de adecuación de lodo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Es necesario tener disponible un gran terreno.</li> <li>• Implica un sistema de construcción complejo.</li> </ul>
<i>Fijación química y fabricación de aislantes</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El producto final tiene las características necesarias para ser comercializado.</li> <li>• su manejo es rápido y permite el desalojo rápido del material.</li> <li>• No debe cumplir con importantes características del lodo para optar por esta opción.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requiere otros insumos y maquinaria.</li> <li>• Requiere tiempo para su implementación debido a la consecución de los equipos y a estudios preliminares.</li> </ul>
<i>Disposición sobre el suelo</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Su manejo es rápido y permite el desalojo rápido del material.</li> <li>• No requiere adecuación.</li> <li>• Cumple con las normas legales sobre lodos.</li> <li>• Dependiendo sus características sirve para la remediación edáfica, otorgándole propiedades benéficas al suelo y las plantas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se requiere de disponibilidad de terreno.</li> <li>• Se requiere controlar parámetros como Al y Fe.</li> <li>• Se requiere análisis del terreno donde se va a disponer.</li> </ul>

Fuente: Autora

## **9 SEXTO CAPÍTULO. DISPOSICION TERMINAL DEL CICLO DE LODOS**

### **9.1 DISPOSICION TERMINAL DEL CICLO DE LODOS**

El Informe Mundial sobre Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017 se plantea que una mejor gestión de las aguas residuales implica no sólo la eliminación de contaminantes sino también y de manera importante, la reutilización de las aguas tratadas y la recuperación de los subproductos, como es el caso de los lodos (WWAP, 2017).

Respecto al destino final de los lodos de depuradora, éste ha de estar perfectamente controlado para no causar contaminación, y ha de poseer los menores riesgos posibles para el medio ambiente, dando al mismo tiempo, el mejor uso a sus cualidades. La disposición final de estos materiales está estrechamente ligada a las disposiciones legales vigentes cuyo objetivo es minimizar los potenciales impactos medioambientales, consiguiendo el aprovechamiento de un recurso. Entre los destinos más utilizados para estos materiales (alguno de ellos, en la actualidad se encuentran fuera del régimen jurídico en la legislación actual), se pueden citar los siguientes, según Murcia Navarro, (2013):

#### **9.1.1 Incineración**

Puede ser una opción válida para productos como los lodos, en particular cuando dispongan de alguna característica especial que los haga ser considerados como valorizables energéticamente. Se trata de un tratamiento caro debido a su propia tecnología y a la necesidad de controlar perfectamente las emanaciones gaseosas y cenizas volátiles. Si los residuos a incinerar no son peligrosos, y pueden tener algún tipo de aprovechamiento, este sistema debe ser considerado como un desaprovechamiento de recursos. Interesa advertir que hoy en día existen tecnologías avanzadas para incinerar residuos, a pesar del encarecimiento que la puesta a punto de dichas tecnologías puede suponer, así como el incremento de los costes de los combustibles. En un primer momento se tiende a pensar en que la incineración de los lodos resulta poco interesante pues supone un desperdicio energético importante, además reduce solamente a la mitad el volumen de lodo y las cenizas deben de ser eliminadas, generalmente en vertederos (Murcia Navarro, 2013) citando a Girovich.

Del mismo modo, el inconveniente del costo de energía podría quedar resuelto si se consiguiese realizar un estudio global de la instalación y diseñar un proceso completo que conduzca a la combustión de los lodos. En Japón, la legislación limita el transporte a vertedero de las cenizas que contengan metales pesados (como la procedente de incineradoras), ello ha conducido al desarrollo de la tecnología de “fusión de lodos”. Este proceso vitrifica el lodo en una cámara de combustión a 1400°C, lo que estabiliza y disminuye al mínimo el volumen ocupado por el lodo, al tiempo que ofrece posibilidades para reutilizarlo como material de construcción (cemento, cerámica, escoria cristalizada,) (Murcia Navarro, 2013), Citando a Magoarou.

La purificación del agua mediante el uso de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) conlleva a la generación de lodos, los cuales presentan una variedad de compuestos: materia orgánica, nutrientes, metales pesados y presencia de organismos patógenos, situación que en la mayoría de los casos dificulta su aprovechamiento y disposición final (Valderrama Pedraza, M. 2013). convirtiéndose en un potencial contaminante del medio ambiente. Una alternativa de aplicación es como abono, pero en algunos países del mundo está restringido, debido a los malos olores, sustancias tóxicas y productos químicos farmacéuticos que pueden estar presentes en ellos. Incluso, la incineración de lodos puede generar emisiones que contienen metales pesados y dioxinas (Mancipe Arias & Triviño Restrepo 2018) citando a Tyagi VK.

### **9.1.2 Depósito en vertederos controlados**

Este método de eliminación impide aprovechar los recursos contenidos en los lodos EDAR. En la actualidad, esta opción no está permitida por la UE debido a que los residuos biodegradables son considerados como materiales fermentables, su depósito en vertederos se va a ver impedida de manera paulatina. El depósito de los lodos en vertederos controlados se suele efectuar combinándolos con los residuos sólidos urbanos. Un vertedero controlado consiste en la extensión de capas de residuos que se cubren cada día, o a veces en intervalos menores, con otras de menor espesor de un material inerte, tierra o arcilla, que confiera a la capa de residuos una impermeabilización. Esta disposición da lugar a un proceso de digestión hasta que se produce la definitiva estabilización. Este procedimiento es aceptable desde el punto de vista medioambiental y es una solución asequible en aquellas ciudades que tengan un vertedero controlado de residuos urbanos, ya que la cantidad de lodos residuales será proporcionalmente poco importante en relación con los residuos sólidos urbanos que se produzcan. Es necesario, o mejor dicho

indispensable, que el lodo no tenga una humedad importante para mantener la estabilidad de los terraplenes que conforman el mencionado vertedero (Murcia Navarro, 2013).

Los vertederos controlados, éstos se consideran controlados cuando se toman las medidas oportunas para evitar todo lo que sea nocivo o molesto para la población y el entorno. El vertido controlado consiste en la colocación de los residuos sobre el terreno extendiéndolos en capas de poco espesor y compactándolos para disminuir su volumen. Además, los residuos se cubren diariamente con material adecuado para minimizar los riesgos de contaminación ambiental y para favorecer la transformación biológica de los materiales fermentables. Dentro de la estrategia europea relativa a la gestión de residuos, el vertedero se considera la última opción en dicha gestión, ya que los residuos que son depositados en vertedero no pueden ser aprovechados de ninguna forma y generan una gran cantidad de impactos ambientales en relación con las emisiones a la atmósfera de los gases que contribuyen al efecto invernadero, la contaminación de los lixiviados y otros problemas de contaminación como olores, daños a la vegetación, etc.

La principal ventaja de los vertederos controlados es económica, pero puede presentar numerosos problemas medioambientales; transcurrido un cierto tiempo y concluidas las actividades en el vertedero por alcanzar su máxima capacidad, se procede a la clausura y sellado, para posteriormente reforestar y restaurar la zona de modo que esta pueda ser empleada para otros usos (Senent Aparicio, 2012).

### **9.1.3 Aplicación en los suelos**

Los lodos son, en la mayor parte de casos una fuente de materia orgánica importante, no obstante, deberá hacerse de forma racional y coherente para no provocar riesgos innecesarios. Es necesario considerar este empleo dentro de una tendencia clara para la sostenibilidad del mencionado suelo, dependiendo del tipo de suelo a aplicar y de las condiciones hidráulicas del entorno. Como se ha mencionado en varios apartados de esta introducción, debido al elevado contenido de materia orgánica que poseen los lodos, alrededor del 50% sobre peso seco, y a las considerables cantidades de macronutrientes, especialmente nitrógeno y fósforo, es conveniente la utilización de éstos como fertilizantes órgano-minerales. Los lodos por su alto contenido en materia orgánica también pueden utilizarse como acondicionadores o enmendarte de suelos, lo cual permitirá a largo plazo mejorar las propiedades físicas de los suelos, contribuyendo a reducir su erosión, así como a la

recuperación de zonas marginales improductivas (Murcia Navarro, 2013). citando a Guidi; Logan y Harrison.

Otra posibilidad es su utilización como sustrato para la producción de plantas ornamentales y hortícolas. Para ello se requiere mejorar las características físicas del lodo, lo que se consigue mediante la técnica del compostaje. También es posible el empleo de los lodos de depuradora para la formación y el establecimiento de suelos sobre escorias de minas, así como en la recuperación de suelos quemados y en silvicultura (Murcia Navarro, 2013).

La aplicación de lodos en suelos supone un ahorro doble de energía: por una parte, la que se emplea para eliminar los lodos, por otra parte, la necesaria para obtener fertilizantes de síntesis, cuyo coste se ha incrementado en los últimos años, según Murcia Navarro (2013). citando a Spinosa. Tras un análisis de los criterios establecidos por la Unión Europea respecto al manejo de lodos, concluye que el lodo debe ser utilizado en agricultura cuando sea posible o realizar otra gestión cuando sea necesario (por motivos de topografía, espacio, etc.). Los biosólidos resultantes del manejo de lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas-PTAR tienen un alto potencial para usos agrícolas debido a su contenido de materia orgánica y nutrientes. No obstante, la presencia de microorganismos patógenos es un limitante para la aplicación directa sin tratamiento previo de este tipo de residuo, debido a la amenaza para la salud humana y biótica, siendo necesario implementar tratamientos complementarios de estabilización como el secado térmico y el tratamiento alcalino, entre otros (Silva Leal, Bedoya & Torres Lozada, 2013)

En el caso de Colombia y según el Decreto 1287 del 10 de Julio de 2014, en el Artículo 8 del citado Decreto del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, que se establecen las alternativas de uso de los biosólidos de acuerdo con la categoría y clasificación A, B. Los de categoría A, se pueden destinar para zonas verdes, separadores viales, campos de golf y lotes vacíos; como producto para uso en jardines, antejardines, patios, plantas ornamentales y arborización; en agricultura. La categoría B pueden ser destinados para la agricultura y recuperación de suelos degradados, como insumo en procesos de elaboración de abonos, fertilizantes, productos acondicionadores para suelos a través de tratamientos físicos, químicos y biológicos, tratamiento de emisiones y vertimientos, soporte físico y sustrato biológico en sistemas de filtración. absorción y adsorción, como insumo en la fabricación de materiales de construcción, estabilización de taludes de proyectos de la red vial nacional, red vial secundaria o terciaria, rellenos sanitarios como

cobertura diaria, cobertura final de cierre y de clausura de plataformas y en actividades de re-vegetalización y paisajismo y valorización energética. También se presentan restricciones, siendo las más relevantes la prohibición de su utilización en playas, páramos y cuerpos de agua, suelos saturados, en zonas aledañas a fuentes de captación subterráneas, en suelos con alto riesgo de inundación; en los suelos rurales a menos de 100 m de viviendas aisladas; tampoco se pueden utilizar en suelos donde se encuentren especies de fauna y flora amenazados (Melo Cerón, Rodríguez González & González Guzmán, 2017).

Debido a la degradación de la materia orgánica de los lodos por la acción de los microorganismos en condiciones controladas, dejando un producto higienizado, el cual puede aprovecharse como fertilizante orgánico o aplicarlo al suelo como sustrato. El compostaje consta de algunas operaciones básicas: mezclado, descomposición, clarificación, recirculación, curado, almacenamiento y si este cumple con algunas normas requeridas se puede comercializar. Para esto, es necesario controlar ciertas variables como la temperatura, pH, contenido de humedad, y relación C/N (Torres Cortés, 2017).

El compostaje es un proceso sencillo para la producción de fertilizantes orgánicos o abono, el cual no necesita un operario capacitado para llevar a cabo el proceso y el control del mismo. Es importante tener un área suficiente dependiendo de la cantidad de compost que se vaya a producir, ya que materiales vegetales, estiércol, lodos residuales, compost listo, se mezclan en espacios abiertos con el fin de permitir la fermentación a través de la acción microbial natural en diferentes etapas (Torres Cortés, 2017).

#### **9.1.4 Recuperación de energía**

Desde el punto de vista energético se ha considerado a los lodos como punto de partida para la obtención de metano, fuel e hidrocarburos en general. Es una alternativa estudiada cada vez con más interés, aunque por el momento no es una solución económicamente viable. También se está utilizando el lodo como combustible auxiliar en ciertas instalaciones de incineración, como es el caso de las cementeras. Esto supone un ahorro en el consumo de combustibles fósiles y la estabilización de las cenizas formando parte del Clinker (Murcia Navarro, 2013).

Los lodos residuales, que por mucho tiempo han sido percibidos como un desecho sin valor en el momento de su coproducción, vienen demostrando muchas potencialidades para su reutilización.

Estos estudios necesitan usar herramientas útiles que anticipen, prueben y justifiquen estas potencialidades, además de que integren los temas de interés de los stakeholders, que generalmente son el aspecto económico-social, ambiental y energético. El análisis energético, además de integrar estos aspectos en su análisis, presenta una métrica de la sostenibilidad, lo que ayuda a interpretar resultados y, a la hora de querer hacer cambios para mejorar la sostenibilidad, saber cómo hacerlo y el grado de esta mejora, además del beneficio de contar con datos cuantitativos, permite compararlos con otras alternativas y sistemas (Gálvez Durand, 2016).

Es una forma de aprovechamiento de los lodos residuales, por medio del biogás obtenido como subproducto durante la digestión anaerobia, liberando energía y convirtiendo la materia orgánica en metano, dióxido de carbono y agua. La digestión anaerobia tiene como propósito producir un compuesto final estable, es decir, un lodo residual sin presencia de microorganismos patógenos, lo cual es importante ya que en el diagnóstico los parámetros microbiológicos no cumplieron con los valores máximos permisibles según el decreto 1287 (Torres Cortés, 2017).

Para la digestión anaerobia, se puede realizar el proceso en un digestor con capacidad de 0,5kg SV/ m3d hasta de 8 kg SV/ m3d, obteniendo grandes beneficios debido al porcentaje de metano en el gas (65-70%) (Torres Cortés, 2017).

**Tabla 8. Ventajas y desventajas en la recuperación de energía**

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Los lodos que están parcialmente tratados se digieren de mejor forma.</i></li> <li>• <i>Mayor velocidad en la reducción de sólidos volátiles.</i></li> <li>• <i>Mayor recuperación del lodo como fertilizante.</i></li> <li>• <i>Ausencia de olores.</i></li> <li>• <i>Proceso microbiológico sencillo.</i></li> <li>• <i>Buena inactivación de patógenos</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Limitación de cargas orgánicas</li> <li>• Requerimiento de grandes áreas.</li> <li>• Requiere de mucha energía eléctrica para el funcionamiento del digestor.</li> <li>• Altos costos de operación por los requerimientos energéticos.</li> <li>• Alta inversión inicial.</li> <li>• Mayor síntesis de células nuevas, que hace necesaria su digestión antes de sacarlos para su disposición.</li> </ul>

Fuente: (Torres Cortés, 2017). Citando a Colomer y Gallardo.

### 9.1.5 Otros

La recuperación de nitratos, fosfatos y determinados elementos metálicos a partir de los lodos residuales ha sido ensayada en plantas pilotos mediante distintas tecnologías, pero en la mayoría de los casos estos procesos no resultan rentables. Así mismo, también se ha estudiado la utilización del lodo como suplemento alimentario de la dieta animal, debido a su alto contenido proteico y de

En Europa se están desarrollando algunas aplicaciones novedosas de los lodos como puede ser la utilización de éstos y de sus cenizas para elaborar piedra artificial, como material para asfaltado de carreteras y la utilización de la mezcla de lodos y arcilla para la confección de ladrillos para la construcción. También se han realizado estudios para utilizar los lodos en la creación de filtros de carbón activo (Murcia Navarro, 2013). citando a Pérez.

## 10. APROVECHAMIENTO Y DISPOSICIÓN EN PRINCIPALES PTAR DE COLOMBIA

La revisión documental, permite identificar tres principales PTAR, en el país, que manejan diferentes sistemas de tratamiento de aguas residuales, pero conjuntamente nos muestra debilidades para la generación de más opciones de reutilización o aprovechamiento de los lodos, dado por atraso en la tecnología de tratamientos de agua, pero se puede inferir, algunas alternativas, basados en otros países y en las características presentes, en los lodos generados por las tres PTAR, definidas como guía para las alternativas de aprovechamiento.

### 10.1 APROVECHAMIENTO Y DISPOSICIÓN EN PRINCIPALES PTAR DE COLOMBIA

La disposición y aprovechamiento de lodos, tiene como alternativas de mayor escogencia, aquellas donde se dé un uso a los biosólidos, y en pocas ocasiones se eligen alternativas como la incineración, y debe ser tomado como última opción, tanto por ser un ítem final de los lodos, como por el hecho de generar contaminación del aire y cenizas.

Las alternativas de aprovechamiento y disposición de lodos, se hace teniendo como base las características de los lodos generados en las diferentes PTAR y las directrices técnicas, que se encuentran en el Reglamento Técnico del Sector Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS 2017), que define dos tipos de lodos (A y B), mencionados en capítulos anteriores.

**Tabla 9. Análisis de procesos – tratamientos y aprovechamientos**

<b>Proceso / tratamiento</b>	<b>Biosólidos PTAR El Salitre (Bogotá)</b>	<b>PTAR San Fernando (Medellín)</b>	<b>PTAR Cañavalejo (Cali)</b>
<i>Tratamiento del agua</i>	Tratamiento primario avanzado	Tratamiento primario y secundario (lodos activados)	Tratamiento primario y secundario (Reactor UASB y laguna facultativa)
<i>Tratamiento de lodos</i>	Digestión anaeróbica mesofílica y deshidratación por filtros banda	Digestión anaeróbica mesofílica y deshidratación por centrífuga	Digestión en UASB y deshidratación por lechos de secado
<i>Aprovechamiento / disposición final</i>	Cobertura final relleno sanitario Doña Juana	Recuperación de suelos	Aprovechamiento silvicultural (Viveros)

Fuente: Autora.

**Tabla 10. Características físicas de lodos en las principales PTAR de Colombia**

Parámetro	PTAR El Salitre Datos Sep 2000 - Dic 2002	PTAR San Fernando (Medellín) Datos de 2003	PTAR Cañaveralejo (Cali) Datos de 2003	PTAR Río Frío (Bucaramanga) Datos de 2003
Humedad (%)	67	68	66	29
Sequedad(%)	33	32	34	71
Producción Toneladas/día (Base húmeda)	130	80	60	2
Producción Toneladas/día (Base seca)	43	28	20	1.4

Fuente: (Daguer Guarin, 2003)

Teniendo como premisa este aspecto, y el hecho de contar en el país con tres PTAR, que son las de mayor reconociendo en los textos académicos e investigativos, las alternativas viables para estas PTAR son:

**Tabla 11. Posibles usos y aprovechamiento de los biosólidos**

PTAR El Salitre	PTAR San Fernando	PTAR Cañaveralejo
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aprovechamiento como cobertura final en el relleno sanitario Doña Juana</li> <li>• Compostaje de biosólidos</li> <li>• Biorremediación de suelos contaminados</li> <li>• Aprovechamiento forestal</li> <li>• Recuperación de suelos degradados</li> <li>• Indicadores de contaminación fecal de lodos y biosólidos de la PTAR El Salitre</li> <li>• Aprovechamiento agrícola de biosólidos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Recuperación suelos degradados</li> <li>• Compostaje de biosólidos</li> <li>• Revegetación de taludes</li> <li>• Aprovechamiento agricultura</li> <li>• Biorremediación de suelos</li> <li>• Lombricultura de biosólidos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aprovechamiento como cobertura final del botadero de basuras de Navarro</li> <li>• Aprovechamiento agrícola</li> <li>• Compostaje de biosólidos</li> <li>• Lombricultura de biosólidos PTAR Río Frío</li> <li>• Compostaje de biosólidos</li> <li>• Aprovechamiento de tipo forestal para viveros.</li> </ul>

Fuente: Autora.

La alternativa de usos posteriores de los lodos es variable según sus componentes, definición que fue dada por Sastoque Perilla (2015), Los lodos pueden contener componentes muy valiosos como materia orgánica y Fitonutrientes (macro y micro), y componentes problemáticos como metales pesados, contaminantes orgánicos y patógenos. Esta composición no sorprende dado su origen, pero es evidente que con un mejor control de las aguas vertidas y de los métodos de depuración se puede potenciar el valor de los componentes útiles y disminuir la peligrosidad de los otros. Igualmente, los biosólidos son un producto originado después de un proceso de estabilización de lodos orgánicos provenientes del tratamiento de aguas residuales. Gracias a este proceso, el

biosólidos tiene capacidad para utilización agrícola y forestal, y para la recuperación de los suelos degradados, entre otros.

## **10.2 PRIORIDADES Y VENTAJAS DEL APROVECHAMIENTO Y DISPOSICIÓN DE LODOS EN COLOMBIA**

### **Prioridades**

- Lejos de algunas creencias, el agua es un recurso renovable e ilimitado.
- Las áreas ocupadas por lodos desechados, son bastante amplias y cada día se reducen
- Reconocer que el tratamiento del agua y lodos, permite darle un segundo uso.
- La sostenibilidad ambiental, tiene un punto importante en el tratamiento de las aguas residuales y sus lodos.

### **Beneficios**

- La disposición final y aprovechamiento de lodos, permite la protección del medio ambiente y reducción del volumen de desechos.
- El uso de tecnologías o tratamientos avanzados, reduce el uso o permanencia de suministros de agua dulce o potable.
- Administrar de forma sostenida de los nutrientes encontrados en los lodos, que pueden ser favorables o no para el medio ambiente.
- El uso de los nutrientes provenientes o encontrados en los lodos suplen o reducen los costos, que puede significar usar suplementos agrícolas, abonos o fertilizantes.
- El generar procesos o tratamientos que generen lodos aprovechables, reduce los costos de traslado o embalaje para su uso específicos.
- Promover una nueva dinámica o cultural en la cual los beneficios y uso de lodos aprovechables, reduzca el gasto de agua potable en actividades industriales, o el uso de lodos aprovechables en diferentes actividades económicas.
- Reducir los costos de los servicios de aseo y tratamiento de agua.

## 11. RECOMENDACIONES

Es importante finalizar, aclarando que el tratamiento de aguas residuales, tiene una relación directa con la generación de lodos, y las características de los mismos para su manejo, aprovechamiento, uso y disposición final; lo que conlleva unos puntos críticos o recomendaciones a seguir, en años venideros, como son:

En las grandes ciudades y municipios pequeños, se debe generar una actualización o renovación de la tecnología, fortalecimiento de la infraestructura en cuanto a tratamiento de aguas residuales en el país. Con lo cual se promueve cambios sustanciales, para el fortalecimiento de los procesos de manejo y manteniendo de las plantas de tratamiento de aguas residuales, para generar mejores procesos de manejo y de los procesos en el tratamiento de aguas residuales.

La generación de un mapa censal, de la situación en cuanto al tratamiento de aguas residuales y generación de lodos, logrando con esto la iniciación en procesos de tecnologías, para el tratamiento de aguas, uso y disposición final de lodos. Para lo cual es necesario, llevar a cabo un proceso puntual, para evaluar en las plantas de tratamiento de aguas residuales, la eficiencia y favorabilidad, del actual tratamiento de aguas residuales, y de la disposición, aprovechamiento, manejo y uso de lodos.

Generar en la industria de tratamiento de aguas y aprovechamiento de lodos del país, una avanzada, que con lleve un salto tecnológico, en esta materia, llevando al país a las tecnologías de tipo terciario, que permiten un mayor grado de eficiencia en el tratamiento de aguas y en la remoción de contaminantes, para el aprovechamiento tanto de las aguas residuales, como de los lodos.

Debe generarse una política o reglamentación, para el uso de las aguas, que dé cuenta de las cantidades que se usan, las cantidades tratadas, pero esta alineadas con un seguimiento puntual a las características físico químicas y contaminantes, con que ingresa el agua a las plantas de tratamiento, y cuales son con las que sale, definiendo unos ítems más profundos y generadores de características más afines al aprovechamiento y uso de los lodos.

La base actual del manejo de lodos, tiene como finalidad la disposición final de ellos en fuentes hídricas o en terrenos, sin ningún tipo de propósito más que la disposición final, lo que ocasiona costos para las entidades, debiendo adquirir en algunos casos terrenos para dicha tarea, costo que se puede reducir, y sostener a largo plazo con la adopción de tecnologías que permitan brindar

alternativas de uso y aprovechamiento de los lodos, y por ende nuevos mercados, ante la solicitud de estos nuevos producto o lodos para diferentes usos.

En el proceso de renovación y actualización de tecnologías, es importante precisar las prioridades del país, como pueden ser los costos de la inversión inmediata, o los beneficios de la inversión a largo plazo, tanto para las PTAR, como para el medio ambiente, tal como lo refieren Młyński, Chmielowski & Młyńska (2016); una incorrecta selección de la tecnología y dimensiones de la planta de tratamiento puede dar lugar a posteriores altos costos operativos, eficiencia inadecuada de aguas residuales. tratamiento y, por lo tanto, el incumplimiento de los requisitos esperados en el tratamiento del agua que conlleva castigos económicos impuestos a las aguas residuales, instalaciones de tratamiento y demás proceso, por su baja eficiencia ambiental.

## 12. CONCLUSIONES

El terminar esta monografía, dejó un gran aprendizaje, pues la información recolectada, revisada, asumida y usada en el documento, da un horizonte de las condiciones del tratamiento de aguas residuales y de los lodos, en su aprovechamiento y uso final; según las fuentes consultadas, el país tiene aproximadamente 628 plantas de tratamiento de aguas residuales, de estas la mitad de ellas usan un tratamiento secundario, una sexta parte usan un tratamiento primario y una décima parte de estas, usan un tratamiento preliminar, y en un nivel muy bajo o incipiente, usan un tratamiento terciario.

Los sistemas de tratamiento de agua que más se usa, son las lagunas de estabilización, algo que se dijo en las ventajas y desventajas, está asociado a los bajos costos del diseño; la segunda más usada son los reactores aerobios para lodos activados, el cual tiene como ventaja sobresaliente, la remoción de la materia orgánica, de las aguas de uso urbano y domiciliario. Luego de estos tratamientos, los que más encontramos en uso en el país, son los reactores anaeróbicos, muy útiles en el tratamiento de aguas, con alto contenido de carga orgánica, no siendo muy eficientes en el tratamiento de aguas domesticas o domiciliarias.

El país tiene una tarea pendiente en la gestión de las aguas residuales y los lodos, para alcanzar un bienestar del medio ambiente, como lo refiere Danso Boateng (2017), la gestión y el manejo efectivos de las aguas residuales en una forma respetuosa con el medio ambiente se ha convertido en una cuestión de importancia mundial, debido a los riesgos potenciales para la salud del medio ambiente. Es importante destacar que los lodos de aguas residuales contienen grandes cantidades de componentes orgánicos y nutrientes; Por lo tanto, la recuperación de recursos de una biomasa tan abundante es necesaria.

Dentro de toda la revisión realizada, es muy importante señalar, que el país, viene en el proceso de formulación de nuevas alternativas, actualización y tecnologías para el tratamiento de aguas residuales y aprovechamiento de lodos, pero tiene un punto crítico, y es que en desarrollo de estos estudios o formulaciones, mucha de la información, no cuenta con estudios y diseños técnicos suficientes y viables, producto de no tener información actualizada, algo que puede ir en detrimento de su puesta en marcha, presupuesto, eficiencia y beneficios esperados.

La falta de estudios y seguimiento específico, y el poco cumplimiento de las múltiples legislaciones y reglamentaciones, en cuanto a las plantas de tratamientos de aguas residuales, y la disposición final de las mismas, y los lodos, no da claridad sobre la situación actual crucial de estas temáticas y del atraso tecnológico del país, algo que refiere con claridad Yang, X (2010), quien refiere, como los procesos de lodos activados son la principal alternativa al tratamiento de aguas residuales debido a su bajo costo y alta eficiencia. Sin embargo, los procesos de lodos activados pueden llevar a un problema de eliminación de desechos sólidos debido a la producción de lodos de aguas residuales, que aumenta con cantidades crecientes de aguas residuales que se tratan. A su vez, esto conduce a dificultades cada vez mayores en la gestión de los lodos como un recurso para la producción de energía y al cumplimiento de criterios cada vez más estrictos para la eliminación.

Dentro de todas las visiones modernas que tiene la humanidad, es claro que un factor importante para que algo se cambie o transforme es el factor económico, y el tema de las aguas residuales y los lodos, tiene condiciones, para convertirse, en una fuente de ingreso económico y sostenibilidad, tal como lo refiere Bawiec, Garbowski & Wiśniewski (2018), se puede decir que el agua es un componente clave del desarrollo socioeconómico. y mantiene el medio ambiente en buenas condiciones, el gran interés en este tema internacional. estimula el desarrollo de las nuevas aguas residuales. tecnologías de tratamiento.

Dentro de las opciones de desarrollo del país, el tratamiento de las aguas residuales y la disposición más amable y eficiente para uso y aprovechamiento de los lodos, no deben ser vistos, como solo una alternativa de manejo y sostenibilidad sino como una respuesta a las problemáticas ambientales mundiales, en las cuales, el país puede y debe aportar, tal como lo indica Arnell, (2016) se debe considerar además de la eliminación efectiva de contaminantes de las aguas residuales influyentes, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, ahorro energético y la posibilidad de reutilizar la parte de recursos como el uso agrícola de lodos de depuradora, también debe ser tenido en cuenta, en otras palabras, una modernización de las PTAR debe limitar todo tipo de emisiones a la medio ambiente para protegerlo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Aldana Tique, A., & Pérez Rojas, R (2017) Propuesta para el tratamiento y aprovechamiento de lodos en una PTAP convencional. caso de estudio: planta de tratamiento de agua potable del espinal – Tolima. Universidad de la salle. Colombia
2. Araujo, L., Molina, S., & Noguera, L (2018). Aprovechamiento de los lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales como materia prima en la industria de la construcción: revisión bibliográfica. Revista Agunkuya - Uniandina. Colombia.
3. Arnell M (2016). Performance Assessment of Wastewater Treatment Plants. Multi-Objective Analysis Using Plant-Wide Models. University, Lund, Sweden. Suecia.
4. Bermeo Barreto, A., & Idrovo Heredia, E (2014) Aprovechamiento de lodos deshidratados generados en plantas de tratamiento de agua potable y residual como agregado para materiales de construcción. Universidad de cuenca. Ecuador.
5. Bes Mia, M., & Mendoza Roca, J (2013) Diseño de los procesos de concentración en la línea de lodos de una EDAR. Universidad politécnica de valencia. España.
6. Cardona Mejía, D., & Orozco Alzate, N (2018) Valorización de los lodos provenientes de las plantas de tratamiento de aguas residuales. Universidad católica de Manizales. Colombia.
7. Cardona Mejía, D., & Orozco Álzate, N (2018) Valorización de los lodos provenientes de las plantas de tratamiento de aguas residuales. Universidad católica de Manizales. Colombia.
8. Carranza Noriega, R (2017). Tratamiento de lodos residuales. Universidad nacional del callao. Facultad de ingeniería química. Perú.
9. Castañeda Pedraza, D (2018). Viabilidad del aprovechamiento de biosólido proveniente de la PTAR el salitre como enmienda para producción de un fertilizante orgánico – minera. Universidad Santo Tomás. Colombia.
10. Castells, X (2012). Tratamiento y valorización energética de residuos. Fundación universitaria iberoamericana. España.
11. Crites, R., & Tchobanoglous, G (2010). Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones. Mcgrawhill interamericana. España.

12. Cruz Ruiz, A (2014) Desarrollo de un biodigestor casero como alternativa para la generación de biogás empelando estiércol bovino. Universidad autónoma agraria Antonio narro. Mexico.
13. Daguer Guarin, G (2003). Biosólidos y su gestión en Colombia. Revista ACODAL. Colombia.
14. Danso Boateng, E (2017). Sewage Sludge: Assessment, Treatment and Environmental Impact. Nova Science Publishers, New York.
15. De Andrés Almeida, J (2010). Gasificación de lodos de estaciones depuradoras de aguas residuales urbanas (EDAR). Universidad Politécnica de Madrid. España.
16. Diaz, A., Lorenzo, E., & Venta, M (2015) Tratamiento de lodos, generalidades y aplicaciones. Centro Nacional de Investigaciones Científicas. Cuba
17. Diocaretz Vergara, M (2010). Aspectos técnicos y económicos de procesos de higienización de lodos provenientes del tratamiento de aguas servidas. Universidad de Concepcion. Chile.
18. Donado Hoyos, R (2013). Plan de gestión para lodos generados en las PTAR de los municipios de cumaral y san martín de los llanos en el departamento del meta. Universidad Javeriana. Colombia.
19. Espinosa Rodríguez, L (2015) Estudios de tratabilidad de agua residual industrial utilizando tecnología de membranas. Universidad Nacional de Colombia. Colombia.
20. Farfan Castro, E., & Vargaz Muñoz, R (2014) Tratamiento de residuos sólidos por el proceso de pirolisis. Universidad autónoma Gabriel Rene Moreno. Bolivia.
21. Fuentes Silva, J (2015) Estudio de las propiedades de los lodos de una planta procesadora de harina y aceite de pescado: Tratamiento y Valorización. Universidad Austral de Chile. Chile.
22. Fytili, D., & Zabaniotou, A (2008). Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews.
23. Galarza Espinoza, T., & Quezada Tirira, A (2012). Diseño de un sistema de enfriamiento para agua residual del proceso de café. Universidad de Guayaquil. Ecuador.
24. Gálvez Durand, C (2016). Análisis emergético para la reutilización de los lodos residuales de la planta de tratamiento de aguas residuales de Santa Clara-Lima, Perú. Revista Ingenium. Peru.

25. García Figuerelo, C (2016). Procesos PP-WAO para el tratamiento de aguas residuales industriales. Universidad Autónoma de Madrid. España.
26. Garcia Gutiérrez, S (2008) Restauración de canteras de caliza con lodos de depuradora: efectos en los lixiviados. Escola superior de agricultura de barcelona upc. España.
27. Gil Lalaguna, N (2014). Estudio de la gasificación de lodos de EDAR en lecho fluidizado: Efecto de la atmósfera reactiva, evaluación energética y limpieza del gas producto. Universidad de zaragoza. España.
28. González Granados, I (2016). Generación, caracterización y tratamiento de lodos de EDAR. Universidad de córdoba. Argentina.
29. González Sáez, L., Oteló Cabelo, M., Junco Horta, J., & Pardini, G (2009) Aprovechamiento de lodos de depuradoras urbanas como adsorbente. Efecto del método de activación. Revista Tecnología Química. Universidad de Oriente. Cuba.
30. Heras, M (2009). Producción y características de los lodos. Sistemas de espesamiento (Tema 15). XXVII Curso sobre tratamiento de aguas residuales y explotación de estaciones depuradoras. Gobierno de España, Ministerio de Fomento, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. España.
31. López Longueira, D., & Lojo Fernández, J (2012) Obras de Abastecimiento y Saneamiento. IIS (laboratorio de ingeniería sostenible). Coruña – España.
32. Mancipe Arias, L., & Triviño Restrepo, M (2018) Valoración de lodos de plata de tratamiento de aguas residuales (PTAR) como materia prima para la extracción de lípidos en la obtención de biodiesel. Revista ION. universidad industrial de Santander. Colombia.
33. Marín Montoya, J., & Correa Ramírez, J (2010). Evaluación de la remoción de contaminantes en aguas residuales en humedales artificiales utilizando la guadua angustifolia kunth. Universidad Tecnológica de Pereira. Colombia.
34. Melo Cerón, A., Rodríguez González, A., & González Guzmán, J (2017) Manejo de biosólidos y su posible aplicación al suelo, caso Colombia y Uruguay. Dialnet. Revista de Investigación Agraria y Ambiental. Colombia.
35. Młyński, D., Chmielowski, K., & Młyńska, A (2016). The assesment of the efficiency and stability of work sewage treatment plant in Zabajka. Magazine Inżynieria Ekologiczna. Polonia.

36. Mosquera Calle, J., & Martínez, B (2017). Evaluación de la digestión anaerobia como alternativa de estabilización de biosólidos producidos en la planta de tratamiento de aguas residuales de la universidad tecnológica de Pereira. Universidad tecnológica de Pereira. Colombia.
37. Murcia Navarro, F (2013). Lodos de depuradora: una visión integral para su posible aplicación a suelos desde una perspectiva agrícola. Universidad de Murcia. España.
38. Orellana León, X (2015) Uso de los lodos, producto del tratamiento de aguas residuales, para la fabricación de ladrillos. Universidad católica de Santiago de Guayaquil. Ecuador.
39. Pérez Zúñiga, M (2016) Tratamiento de lodos residuales procedentes de plantas de tratamiento de aguas residuales mediante procesos electroquímicos para la disminución de metales pesados (pb). Universidad politécnica salesiana. Ecuador.
40. Pliego Bravo, Y., García Reyes, M., Urrea García, G., & Vergara Hernández, M (2014) Simulación del proceso termoquímico sugerido para el aprovechamiento de los lodos residuales como fuente de energía alterna. Revista Mexicana de Ingeniería Química. Instituto Tecnológico de Orizaba. Mexico.
41. Rey Garcia, L (2016) Modelización de la gasificación de lodos de depuradoras urbanas. Universidad politécnica de madrid. España.
42. Rodríguez Torres, J (2015). Propuesta metodológica para tratamiento de lodos provenientes de plantas de potabilización en la sabana de Bogotá (estudio de caso madrid, cundinamarca). Universidad libre. Colombia.
43. Rubi Juarez, H (2016). Tratamiento combinado electrocoagulación – electrooxidación de aguas residuales oleosas provenientes de servicios de lavado y engrasado. Universidad Autónoma del estado de México. Mexico
44. Sánchez Cuervo, J., & Hernández Torres, D (2015). Diseño de una planta de tratamiento de agua residual para el Municipio de San Marcos Departamento de Sucre. Universidad Católica de Colombia. Colombia.
45. Santiago Díaz, I (2017) Tratamiento y vertido de aguas residuales por buques en zonas especiales: gestión de lodos generados por el proceso. Universidad de Cantabria. España.
46. Sanz Ataz, J., Guerrero Gallego, L., & Ortega Díaz, J (2015) Tratamiento de lodos de aguas residuales urbanas por oxidación húmeda. proceso Athos. VEOLIA Water Systems Ibérica.

47. Sastoque Perilla, J (2015) Estrategias para el reusó de los lodos en la zona dos de la Empresa de Acueducto y alcantarillado de Bogotá y plantas de tratamiento de aguas potables y residuales. Universidad Militar Nueva Granada. Colombia.
48. Senent Aparicio, J (2012). Predicción de lixiviados en vertederos de residuos sólidos urbanos en ambientes semiáridos. aplicación del modelo HELP en el vertedero de fuente álamo (murcia). Universidad de murcia. España.
49. Silva Leal, J., Bedoya, D., & Torres Lozada, B (2013) Evaluación del potencial de aplicación de biosólidos higienizados en el cultivo de rábano. Acta Agronómica. Scielo Colombia. Colombia
50. Suárez López, J., Jácome Burgos, A., & Ures Rodríguez, P (2015). Tecnologías de deshidratación de lodos. Universidad De Coruña. España.
51. Torres Carranza, E (2016). Reutilización de aguas y lodos residuales. Curso Internacional Gestión Integral del Tratamiento de Aguas Residuales. Universidad Nacional del Callao. Perú.
52. Torres Cortés, M (2017). Propuesta para el aprovechamiento de los lodos generados en la PTAR de la empresa regional aguas del Tequendama. Fundación universidad de américa. Colombia.
53. Valderrama Pedraza, M (2013) Factibilidad de aprovechamiento de los lodos de la PTAR del municipio de Chinavita (Boyacá). Universidad de Manizales. Colombia.
54. Valderrama Pedraza, M (2013). Factibilidad de aprovechamiento de los lodos de la PTAR del municipio de chinavita (Boyacá). Universidad de Manizales. Colombia.
55. Vargas, M., & Silva Cancino, N (2015). Metodología para el dimensionamiento de la unidad de espesamiento de lodos en las plantas de tratamiento de agua potable. Pontificia universidad javeriana. Colombia.
56. Vásquez Núñez, (2013). Panorama del tratamiento de aguas residuales con tecnología anaerobia en la Costa Atlántica Colombiana. Universidad Nacional de Colombia. Colombia.
57. Villa Manosalvas, G (2011) Fundamentos teóricos para el espesamiento de lodos por gravedad. Escuela superior politecnica del litoral. Ecuador.

58. WWAP (2017). Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas. Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017. Aguas residuales: El recurso desaprovechado. Francia.
59. Yang, X (2010). Potential of Activated Sludge Utilization. Nova Science Publishers. New York.
60. Hierro Guilmain, J (2013) Los Residuos Urbanos y Asimilables. Consejería del medio ambiente. Comunidad Europea. España
61. Turbo Aroquipa, R (2019) Sistemas de Tratamiento. Universidad privada San Carlos SAC. Peru.
62. Griffa, C., & Schierano, M (2015) Tratamiento de fangos. Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Rafaela. Argentina.
63. Encarnación Melo, R (2007) Formulación y diseño del proyecto de saneamiento unipampa - zona 1 tratamiento de lodos de aguas residuales universidad nacional de ingeniería. Peru.
64. Chunga Zapata, E (2017). Propuesta de compostaje de los lodos removidos de las lagunas de estabilización de la Universidad de Piura. Universidad de Piura. Peru.
65. Hoyos Lopez, M (2017).
66. Rivero Rojas, G (2017) Tratamiento de lodos. Santa cruz de la sierra. Bolivia.
67. Tejero, I., Suárez, J., Jacóme, A., & Temprano, J. (2011). Tratamientos y evacuación de fangos. Universidad de Coruña. España.
68. EAAB-ESP (2010). 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. EAAB-ESP. Colombia.
69. Gutiérrez Rosero, J (2014). Tratamiento de lodos generados en el proceso convencional de potabilización de agua. Revista Ingenierías Universidad de Medellín. Colombia.
70. Torres Navarro, A (2016). Evaluación del abastecimiento del recurso hídrico y formulación de alternativas para el mejoramiento de la continuidad del servicio de agua potable en el casco urbano del municipio de aguachica, Cesar. Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña. Colombia.

