



Tratamiento de lodos

Control de la operación de los sistemas de
tratamiento de aguas residuales

Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA

Tratamiento de lodos

Los lodos se componen de un porcentaje de agua y de un porcentaje de sólidos que se acumulan en las unidades de tratamiento de aguas residuales, estos posteriormente serán tratados en la línea de lodos adecuada para eliminar el porcentaje de agua que contenga y estabilizar el lodo para su posterior disposición o aprovechamiento.

1. Tipos de lodos y clasificaciones

De acuerdo con el Decreto 1076 de 2015 el lodo es la suspensión de un sólido en un líquido proveniente del tratamiento de aguas residuales. El lodo es usualmente una mezcla homogénea entre una fracción de sólidos y agua.

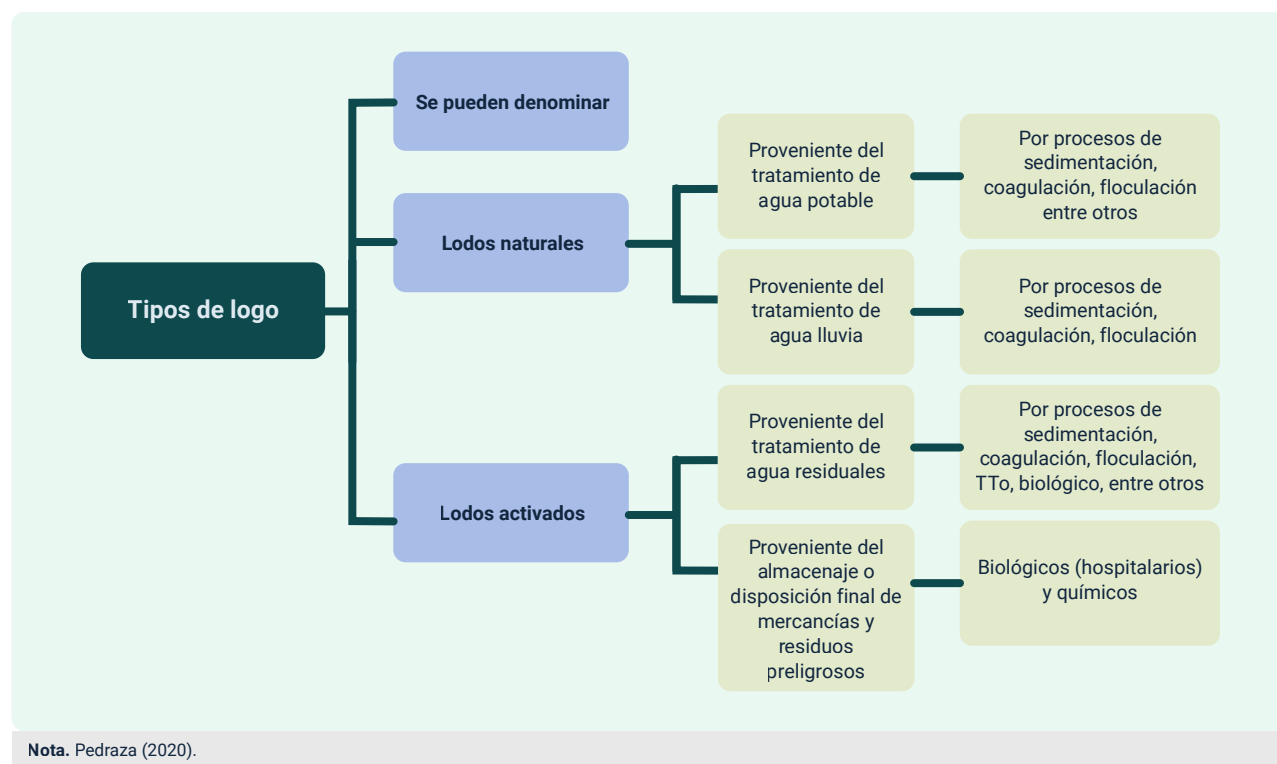
¿Por qué es importante el manejo de los lodos en una PTAR?

Básicamente, todos los lodos crudos tienen un contenido bajo de sólidos (1 - 6 %); sin embargo, poder hacer la disposición y manejo adecuado del lodo implica un problema y es el gran volumen de lodo por el contenido de agua, luego concentrar los sólidos mediante la máxima remoción posible de agua y reducir su contenido orgánico es elemental.

¿De dónde provienen los lodos?

De manera general se pueden decir que existen dos lodos de acuerdo con su lugar de procedencia:

Figura 60 Tipos de lodos de acuerdo con el tratamiento de agua



Sin embargo, existen otros tipos de clasificación que se describen a continuación:

1.1 Clasificación según el origen del efluente

Considerada la clasificación más sencilla y poco descriptiva respecto al lodo generado, es la que los clasifica teniendo en cuenta el origen:

- **Lodos urbanos:** provenientes de aguas residuales domésticas o urbanas, producidas por actividades comerciales, humanas e industriales (que tienen su propia PTAR) que no generan grandes concentraciones de elementos contaminantes.
- **Lodos industriales:** se generan a partir de aguas residuales procedentes de actividades industriales, como, por ejemplo, industrias alimenticias, papeleras, industrias de procesamiento y extracción de metales, entre otras; generalmente, este tipo de aguas presenta concentraciones de sustancias tóxicas, elementos pesados, iones metálicos, productos químicos, hidrocarburos y detergentes, los cuales producen que el recurso se encuentre más contaminado en comparación con las aguas residuales de origen doméstico.

1.2 Clasificación según contenido de agua

De acuerdo con la cantidad de agua que se encuentre en el lodo se puede clasificar en:

- **Lodos líquidos:** cuyo contenido en agua es superior al 80%.
- **Lodos plásticos o paleables:** su contenido en agua es inferior al 80%, por lo que pueden ser manejados mediante pala y transportados en camiones de caja abierta.
- **Lodos sólidos:** cuyo contenido en agua es inferior al 60%

1.3 Clasificación según sus compuestos químicos

De acuerdo con las características propias del lodo y las variables que lo componen se podría hablar de lodos tipo:

- **Orgánicos:** alto contenido de compuestos orgánicos
- **Inorgánicos:** alto contenido compuestos inorgánicos
- **Lodos tóxicos y peligrosos:** lodos que tienen características de peligrosidad

1.4 Tipos de lodos según fase de tratamiento de agua residual

Teniendo en cuenta las unidades de proceso y los diferentes equipos que son usados en las PTAR se puede hacer una aproximación a los tipos de lodos que pueden generarse en la misma:

- **Lodo crudo:** es aquel lodo generado en PTAR que no ha sido tratado ni estabilizado y produce olor.
- **Lodo primario:** proveniente de la sedimentación de aguas residuales (tratamientos primario), la cantidad generada suele depender del tiempo de retención y de la carga superficial ya que proviene de sólidos sedimentables, son de color gris, presentan olor desagradable, dentro de los cuales se encuentran la arena fina, los inorgánicos y el sólido orgánico, su humedad es variable entre 93 y 99%, de consistencia limosa, altamente fermentables y putrescibles, con concentración aproximadas de sólidos totales de 4 a 10% y de sólidos volátiles de 60 a 80%.
- **Lodo secundario:** proveniente del tratamiento biológico de aguas residuales (tratamiento secundarios o biológicos que convierten residuos en biomasa también incluye la materia particulada que permanece en el agua después de la sedimentación primaria y que e incorpora en la biomasa), sino de color pardo o amarillo, inodoros, suelen contener mucha agua por lo cual son de difícil deshidratación, contienen una humedad alta entre 98,5 y 99,5 %, con una concentración de sólidos totales de 0,5 a 2 % y una concentración de sólidos volátiles de 70 a 80 %.
- **Lodo digeridos o mixtos:** provenientes de los dos anteriores, separados o mezclados
- **Lodo terciario:** provenientes de tratamientos terciarios de aguas residuales

1.5 Tipología según tratamiento en la línea de lodos

- **Lodos tratados:** este tipo de lodos procede de estaciones depuradoras residuales de origen industrial con presencia de componentes similares a los que presentan las aguas residuales domésticas y con bajas concentraciones de elementos contaminantes; el tratamiento de los lodos tratados incluye tanto tratamientos biológicos, físicos y químicos, como tratamientos térmicos, para posteriormente ser almacenados a largo plazo, de manera que se pueda reducir de forma significativa.
- **Lodos deshidratados y lodos secados:** los lodos deshidratados y los secados, son dos tipos de lodos que son sometidos antes de su uso a procesos de pérdida de agua mediante técnicas ya sean físico – químicas o térmicas. El contenido de humedad que este tipo de lodo para poder ser clasificado como lodo deshidratado, debe ser inferior a ochenta por ciento (80%), mientras que el contenido de humedad para los lodos secados debe ser inferior al setenta por ciento (70%).
- **Lodos compostados:** este tipo de lodos, ideales para actividades agrícolas donde son empleados como abono para plantas, son sometidos a procesos de transformación biológica aerobia para posteriormente ser fermentados mediante compostaje, con el objetivo de obtener un producto estable y no fitotóxico apto para su uso.

Este tipo de lodos que ya tiene otro tipo de características si no son peligrosos se denominan o son conocidos técnicamente como biosólidos.

2. Biosólidos

Son 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. No son biosólidos las escorias y cenizas producto de la oxidación o reducción térmica de lodos, así como los residuos que se retiran de los equipos e instalaciones de la fase preliminar del tratamiento de aguas residuales, ni los provenientes de dragados o de limpieza de sumideros.

La base normativa que brinda los criterios para el uso de los biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales es el decreto 1287 (2014), el cual se dispone para su análisis en el siguiente enlace:

Decreto 1287. [Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio]. Julio 10 de 2014.
<http://parquearvi.org/wp-content/uploads/2016/11/Decreto-1287-de-2014.pdf>

2.1 Caracterización de los biosólidos

Para garantizar que un lodo tiene las características y puede considerarse biosólido debe pasar por un proceso de caracterización donde se determine los elementos que lo compone de acuerdo al decreto 1287 (2014), los parámetros a caracterizar en un biosólido son:

Tabla 6 Parámetros de caracterización de los biosólidos

Variable	Parámetro
Químico (metales)	Arsénico (As) Cadmio (Cd) Cobre (Cu) Cromo (Cr) Mercurio (Hg) Molibdeno (Mb) Níquel (Ni) Plomo (Pb) Selenio (Se) (Zinc (Zn)
Microbiológicos	Coliformes Fecales Huevos de Helmintos Viables Salmonella sp. Virus Entéricos

Nota. Adaptado del Decreto 1287. (2014). Criterios para el uso de los biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales. [Tabla]. p.4. <http://parquearvi.org/wp-content/uploads/2016/11/Decreto-1287-de-2014.pdf>

2.2 Categorización de los biosólido

Es importante aclarar que una vez se identifique que es un biosólido, se puede categorizar como categoría A o categoría B, esta categorización depende de las variables y sus valores máximo-permisibles los cuales se describen en el artículo 5 del decreto 1287, 2014.

Variables químicas:

Tabla 7 Valores máximos permisibles

Variable	Categoría A	Categoría B	Unidad de medida
Arsénico (As)	20	40	mg/ Kg de biosólido (base seca).
Cadmio (Cd)	8	40	
Cobre (Cu)	1.000	1750	
Cromo (Cr)	1.000	1500	
Mercurio (Hg)	10	20	
Molibdeno (Mb)	18	75	
Níquel (Ni)	80	420	
Plomo (Pb)	300	400	
Selenio (Se)	36	100	
Zinc (Zn)	2.000	2.800	

Nota. Adaptado del Decreto 1287. (2014). Criterios para el uso de los biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales. [Tabla]. p.4. <http://parquearvi.org/wp-content/uploads/2016/11/Decreto-1287-de-2014.pdf>

Variables microbiológicas:

Tabla 8 Valores máximos permisibles microbiológicos

Variable	Categoría A	Categoría B	Unidad de medida
Coliformes fecales	< 1, 000 E (+3)	< 2, 000 E (+6)	Unidades formadoras de colonias UFC / g de biosólido (base seca).
Huevos de Helminthos viables	< 1, 0	10, 0	Huevos de Helminthos viables / 4 g de biosólido (base seca)
Salmonella sp.	Ausencia	< 1, 00 E (+3)	Unidades formadoras de colonias UFC / en 25 g de biosólido (base seca)
Virus Entéricos	< 1, 0	-	Unidades formadoras de placas UFP / 4 g de biosólido (base seca).

Nota. Adaptado del Decreto 1287. (2014). Criterios para el uso de los biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales. [Tabla]. p.4. <http://parquearvi.org/wp-content/uploads/2016/11/Decreto-1287-de-2014.pdf>

2.3 Uso de los biosólidos

Una vez clasificado la base normativa brinda las alternativas de uso y las restricciones que deben considerarse para el uso de los biosólidos A y B, dentro de las cuales se puede resaltar:

Categoría A:

- 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.

Categoría B:

- 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 re vegetalización y paisajismo de escombreras.
- j. En procesos de valorización energética.

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

- En la operación de rellenos sanitarios como cobertura diaria.
- En la disposición conjunta con residuos sólidos municipales en rellenos sanitarios y de manera independiente en sitios autorizados.
- En procesos de valorización energética. Los biosólidos que no se usen de acuerdo con lo aquí dispuesto, deberán disponerse o ser tratados hasta cumplir con los valores establecidos en las categorías A y S para viabilizar su uso.

2.4 Tasa anual de aplicación de biosólidos (TAAB)

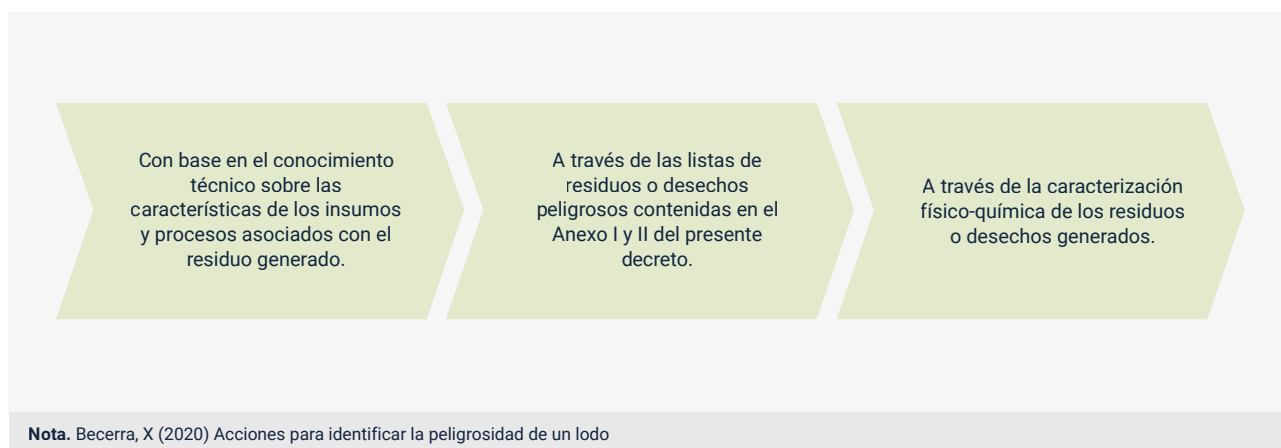
Con el fin de no saturar la capacidad de absorción de metales en los suelos, se establece una tasa anual de aplicación de biosólidos la cual tiene en cuenta la concentración de metales, microorganismos, cantidades generales y la tasa máxima anual de aplicación establecida en el artículo 6.

2.5 Lodo peligroso

Un lodo que se considera peligroso es aquel en el cual se identifican alguna de las características de peligrosidad descritas en el decreto 4741 (2005), compilado en el decreto único reglamentario 1076 (2015), en el cual se entiende por residuo peligroso: aquel residuo o desecho que, por sus características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables, infecciosas o radiactivas, puede causar riesgos, daños o efectos no deseados, directos e indirectos, a la salud humana y el ambiente.

Para saber si el lodo que se va a manejar tiene características de peligrosidad se puede realizar alguna de las siguientes acciones:

Tabla 61 Acciones para identificar la peligrosidad de un lodo



Luego su clasificación, caracterización, identificación y presentación de los residuos o desechos peligrosos debe ser bajo el marco normativo.

Decreto 1076. Presidente de la república de Colombia. Bogotá. Colombia. 26 de mayo 2015. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=78153>

3. Variables a considerar en el manejo de lodos

Conocer las características del lodo a tratar es algo importante para definir la forma de manipulación, acondicionamiento, almacenamiento y tratamiento, dentro de las variables a medir que son las más importantes se encuentran los balances de masa, porcentaje de humedad, densidad, entre otros.

3.1 Balance de masa del lodo

· Teniendo en cuenta que el lodo se encuentra compuesto de una parte de sólidos y de otra de agua, se puede inferir que la masa de lodo será igual a la sumatoria de la masa de los sólidos y la masa del agua.

Luego la fórmula es:

$$m_l = m_s + m_a$$

m_l = masa del lodo
 m_s = masa del sólido
 m_a = masa del agua

$$\frac{M \text{ lodo}}{M \text{ Lodo}} = \frac{M \text{ Agua}}{M \text{ Lodo}} + \frac{M \text{ Sólidos}}{M \text{ Lodo}}$$

· Dejando la expresión como:

$$1 = X_{\text{Agua}} + X_{\text{Sólidos}}$$

Encontrando el primer condicionante: el total del lodo estará compuesto de una fracción o porcentaje de humedad + fracción o porcentaje del sólido.

3.2 Balance de masa del sólido

Es importante aclarar que esa porción de sólido que se encuentra en el lodo tiene unas características importantes y es que está compuesto por sólidos fijos y volátiles.

De acuerdo con la ecuación de masa de sólido:

$$m_s = m_{sf} + m_{sv}$$

m_s = Masa del sólido
 m_{sf} = Masa de sólidos fijos
 m_{sv} = Masa de sólidos volátiles

Fórmula que se despeja de la siguiente manera:

$$\frac{M_{\text{Sólido}}}{M_{\text{Sólido}}} = \frac{M_{sf}}{M_{\text{Sólido}}} + \frac{M_{sv}}{M_{\text{Sólido}}}$$

Quedando reducida la expresión a:

$$1 = X_{\text{Sólidos fijos}} + X_{\text{Sólidos volátiles}}$$

Considera el segundo condicionante: el total de los sólidos estará compuesto de una fracción o porcentaje de sólidos fijos más la fracción o porcentaje de sólidos volátiles.

3.3 Humedad de los lodos

Determinar la humedad en lodos es de vital importancia ya que permite establecer propiedades que estos pueden llegar a tener para de esta forma establecer estrategias para el transporte o para el almacenamiento.

La humedad en los lodos se mide a través de una técnica llamada gravimetría el cual consiste en medir la masa del cuerpo cuando está húmedo, luego iniciar un proceso de secado y finalmente la diferencia entre el peso inicial y el final será la cantidad de agua que tenía.

La fórmula para calcular el % de humedad es:

$$\%H = \frac{m_{\text{Lodo}} - m_{\text{Sólido}}}{m_{\text{Lodo}}} \times 100$$

Sin embargo, cuando este porcentaje es hallado según pruebas de laboratorio la fórmula a aplicar es:

$$\%H = \frac{(P_{mh} - P_c) - (P_{ms} - P_c)}{(P_{ms} - P_c)} \times 100$$

Donde:

Pmh = Peso masa húmeda y crisol

Pc = peso crisol

Pms= peso masa seca y crisol

3.4 Determinación del volumen del lodo

Las características de los lodos varían mucho dependiendo de su origen, de su edad, del tipo de proceso del cual provienen y de la fuente original de los mismos, sin embargo, el volumen del lodo es una variable que debe conocerse o estimarse para cuantificar los diferentes componentes del sistema de tratamiento y disposición del lodo.

Existen diferentes alternativas en la medición y determinación del volumen de lodo producida por una PTAR en su operación convencional, el primero, que es un método experimental, se conoce el volumen de un recipiente ya que este se encuentra marcado a través de diferentes niveles lo que permite conocer el volumen en un determinado instante, luego a través de alguna variable como el tiempo de operación, el caudal o el volumen de agua tratada se puede hacer una relación con el lodo generado.

Cuando se conoce la masa del lodo, se puede determinar el volumen de los lodos generados por el tratamiento de las aguas residuales en la PTAR a partir de su densidad, sin embargo, para poder determinar la densidad del lodo se deben tener varios aspectos en cuenta tanto de la fracción líquida como de la fracción sólida entre los cuales se encuentran:

- Humedad del lodo
- Densidad relativa de los sólidos fijos
- Densidad relativa de los sólidos volátiles

Para calcular la densidad relativa del lodo se tiene la ecuación:

$$\frac{1}{S_{\text{Lodo}}} = \frac{X_{\text{Agua}}}{S_{\text{Agua}}} + \frac{X_{\text{Sólidos}}}{S_{\text{Sólidos}}}$$

Donde,

S_{Lodo} es la densidad relativa del lodo

S_{Agua} es la densidad relativa del agua

$S_{\text{Sólidos}}$ es la densidad relativa de los sólidos

X_{Agua} es la fracción de agua presente en el lodo

$X_{\text{Sólidos}}$ es la fracción de sólidos presentes en el lodo

Sin embargo, para conocer la densidad relativa de los sólidos como un global se debe conocer la densidad relativa tanto de los sólidos fijos como de los sólidos volátiles y se tiene así la ecuación:

$$\frac{1}{S_{\text{Sólidos}}} = \frac{X_{\text{Sólido Fijos}}}{S_{\text{Sólidos Fijos}}} + \frac{X_{\text{Sólidos volátiles}}}{S_{\text{Sólidos volátiles}}}$$

Donde,

$S_{\text{Sólidos}}$ es la densidad relativa de los sólidos

$S_{\text{Sólido Fijos}}$ es la densidad relativa de los sólidos fijos

$S_{\text{Sólidos volátiles}}$ es la densidad relativa de los sólidos volátiles

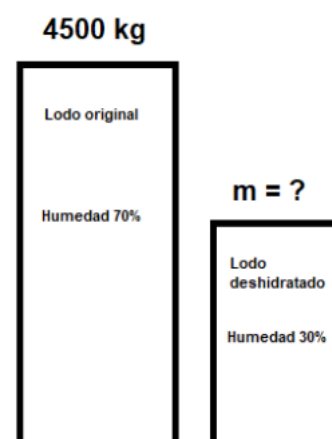
$X_{\text{Sólidos Fijos}}$ es la fracción de sólidos fijos presentes en la fracción sólida

$X_{\text{Sólidos volátiles}}$ es la fracción de sólidos volátiles presentes en la fracción sólida

De este modo se puede calcular el volumen del lodo así:

Se tienen 4500 kg de lodo con una humedad del 70%, luego de realizar los ensayos correspondientes se determinó que la densidad relativa de los sólidos fijos es de 2 y de los sólidos volátiles es de 1,5, si el porcentaje de sólidos fijos es del 70% ¿cuál es el volumen del lodo? ¿Cuál sería la densidad, la masa y el volumen si se redujese la humedad por la acción de un filtro prensa hasta el 30%?

Tabla 62 Ejemplificación del volumen del lodo



Nota. Becerra, X. (2020) Ejemplificación del volumen del lodo

En este caso lo primero que se debe realizar es calcular la densidad relativa de los sólidos como conjunto, para ello se tiene que:

$$\frac{1}{S_{\text{Sólidos}}} = \frac{X_{\text{Sólido Fijos}}}{S_{\text{Sólidos Fijos}}} + \frac{X_{\text{Sólidos volátiles}}}{S_{\text{Sólidos volátiles}}}$$

$$\frac{1}{S_{\text{Sólidos}}} = \frac{0,7}{2} + \frac{0,3}{1,5}$$

$$\frac{1}{S_{\text{Sólidos}}} = 0,35 + 0,2$$

$$\frac{1}{S_{\text{Sólidos}}} = 0,55$$

$$S_{\text{Sólidos}} = \frac{1}{0,55}$$

$$S_{\text{Sólidos}} = 1,82$$

Una vez se conoce la densidad relativa del conjunto de sólidos, se procede a calcular la densidad relativa del lodo mediante la ecuación:

$$\frac{1}{S_{\text{Lodo}}} = \frac{X_{\text{Agua}}}{S_{\text{Agua}}} + \frac{X_{\text{Sólidos}}}{S_{\text{Sólidos}}}$$

$$\frac{1}{S_{\text{Lodo}}} = \frac{0,7}{1} + \frac{0,3}{1,82}$$

$$\frac{1}{S_{\text{Lodo}}} = 0,7 + 0,165$$

$$\frac{1}{S_{\text{Sólidos}}} = 0,865$$

$$S_{\text{Sólidos}} = \frac{1}{0,865}$$

$$S_{\text{Sólidos}} = 1,1560$$

Conociendo la densidad relativa del lodo se puede calcular la densidad real a través de la ecuación:

$$\text{Densidad real} = \text{Densidad relativa} \times \text{Densidad del agua}$$

$$\text{Densidad real} = 1,1560 \times 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Densidad real} = 1156,0 \text{ kg/m}^3$$

De este modo conociendo la densidad del lodo y su masa se puede establecer el volumen a través de la ecuación:

$$\text{Densidad} = \frac{\text{Masa}}{\text{Volumen}}$$

$$\text{Volumen} = \frac{\text{Masa}}{\text{Densidad}}$$

$$\text{Volumen} = \frac{4500 \text{ kg}}{1156,0 \text{ kg/m}^3}$$

$$\text{Volumen} = 3,89 \text{ m}^3$$

Cuando el lodo se deshidrata las propiedades que tienen los sólidos son las mismas, el cambio surge en el porcentaje de agua que este tiene quedando así:

$$\frac{1}{S_{\text{Lodo}}} = \frac{X_{\text{Agua}}}{S_{\text{Agua}}} + \frac{X_{\text{Sólidos}}}{S_{\text{Sólidos}}}$$

$$\frac{1}{S_{\text{Lodo}}} = \frac{0,3}{1} + \frac{0,7}{1,82}$$

$$\frac{1}{S_{\text{Lodo}}} = 0,3 + 0,165$$

$$\frac{1}{S_{\text{Sólidos}}} = 0,465$$

$$S_{\text{Sólidos}} = \frac{1}{0,465}$$

$$S_{\text{Sólidos}} = 2,15$$

Conociendo la densidad relativa del lodo se puede calcular la densidad real a través de la ecuación:

$$\text{Densidad real} = \text{Densidad relativa} \times \text{Densidad del agua}$$

$$\text{Densidad real} = 2,15 \times 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Densidad real} = 2150,0 \text{ kg/m}^3$$

Del lodo original se conoce que la masa es 4500 kg y el porcentaje de humedad inicial era del 70% significa que el porcentaje de sólidos es de 30% entonces:

$$\text{Masa de sólidos} = \text{Masa de lodo} \times \text{Fracción de sólidos}$$

$$\text{Masa de sólidos} = 4500 \text{ kg} \times 0,3$$

$$\text{Masa de sólidos} = 1350 \text{ kg}$$

Al deshidratar el lodo la masa de sólidos no cambia, lo único que varía es la masa de agua, por lo que las fracciones serán diferentes en el lodo deshidratado, para este caso, 70% es sólido y 30% agua, siendo así el lodo después de deshidratarse tendrá una masa de:

$$\text{Fracción sólidos} = \frac{\text{Masa sólidos}}{\text{Masa lodo}}$$

$$0,7 = \frac{1350 \text{ kg}}{\text{Masa lodo}}$$

$$\text{Masa lodo} = \frac{1350 \text{ kg}}{0,7}$$

$$\text{Masa lodo} = 1928,57 \text{ kg}$$

3.5 Características de humedad y densidad relativa del lodo

La cantidad de lodo producido en una planta de tratamiento suele ser muy variado, dependiendo del proceso de tratamiento usado y de la concentración de aguas residuales, en la siguiente tabla se puede resumir los valores típicos de las cantidades y características de los lodos producidos por diferentes procesos de tratamiento para aguas residuales.

Tabla 11 Características típicas de los lodos

Proceso	% Humedad		Densidad Relativa	
	Intervalo	Típico	Sólido	Lodo
Sedimentación primaria	88 - 96	95	1,4	1,02
Filtro percolador	91 - 95	93	1,5	1,025
Precipitación química	-	93	1,7	1,03
Lodos activados	90 - 93	92	1,3	1,005
Tanques sépticos	-	93	1,7	1,03
Tanques Imhof	90 - 95	90	1,6	1,04
Aireación prolongada	88 - 92	90	1,3	1,015
Lodo primario digerido anaeróbico	90 - 95	93	1,4	1,02
Laguna aireada	88 - 92	90	1,3	1,01
Lodo primario digerido aeróbicamente	93 - 97	96	1,4	1,012

Nota. Romero, J. (2010). Tratamiento de aguas residuales. Editorial escuela colombiana de ingeniería. ISBN: 958-8060-13-3. [Tabla]. p.759.

3.6 Producción de lodos

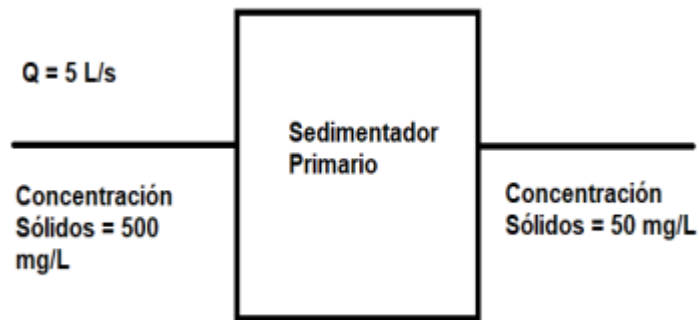
Cuando se realiza tratamiento a las aguas residuales es importante conocer la cantidad de lodos que se van a generar para así mismo dimensionar los equipos, establecer costos y definir espacios para la gestión de los mismos.

Existen principalmente dos factores que determinan la cantidad de lodos a generar, el primero de ellos es la carga contaminante de sólidos (influenciada por el caudal y la concentración de sólidos) y el segundo es la generación de lodos por procesos de reproducción biológica en casos donde se cuente con equipos de tratamiento secundario.

3.6.1 Producción de lodos por remoción de sólidos

Los lodos generados por remoción de sólidos se obtienen principalmente cuando el agua residual es tratada en un equipo que utilice el diferencial de densidad para la separación de la fase sólida, o cuando se utilicen medios filtrantes para retener los sólidos por tamaño de partícula.

Para ello es necesario conocer la concentración inicial de sólidos, antes de que el agua ingrese al equipo, la concentración una vez el agua sale, el caudal y la humedad típica del lodo generado en cada uno de los equipos que se puede observar en la tabla. Características típicas de los lodos.

Tabla 63 Ejemplificación de afluente y efluente de un sedimentador primario


Nota. Becerra, X. (2020) Ejemplificación de afluente y efluente de un sedimentador primario

Por ejemplo, se tiene un sedimentador primario el cual recibe agua residual a razón de 5 litros por segundo con una concentración de sólidos de 500 mg/L y luego de ser tratada el agua efluente tiene una concentración de 50 mg/L ¿cuánto lodo se genera en el proceso si se opera durante 8 horas este sedimentador?

El primer paso es calcular la carga contaminante a la entrada del sedimentador.

Carga contaminante afluente = Caudal x Concentración
Carga contaminante afluente = 5 L/s x 500 mg/L
Carga contaminante afluente = 2500 mg/s

El segundo paso es calcular la carga contaminante a la salida del sedimentador.

Carga contaminante efluente = Caudal x Concentración
Carga contaminante efluente = 5 L/s x 50 mg/L
Carga contaminante efluente = 250 mg/s

Restando la carga contaminante a la entrada y a la salida se puede encontrar la cantidad de sólidos que retiene el sedimentador por segundo.

Carga contaminante removida = Carga contaminante afluente - Carga contaminante efluente
Carga contaminante removida = 2500 mg/s - 250 mg/s
Carga contaminante removida = 2250 mg/s

Luego se puede calcular la cantidad de sólido removido durante las 8 horas de operación del equipo

Carga contaminante removida jornada laboral = 2250 mg/s x 3600 s/hora x 8 horas
Carga contaminante removida jornada laboral = 64'800.000 mg
Carga contaminante removida jornada laboral = 64,8 kg

Esta sería la masa de los sólidos que se retienen en una jornada laboral de 8 horas en el sedimentador, sin embargo, los lodos no salen secos del equipo por lo que se hace necesario aumentar la cantidad en masa de agua que pueden llegar a contener, de acuerdo con la información contenida en la tabla. Características típicas de los lodos donde se establece que una humedad promedio del lodo obtenido del sedimentador puede ser del 92%, en este caso los sólidos representan solo el 8% por lo que la masa de lodo será equivalente a:

Fracción sólido = Masa de sólido/Masa de lodo

Masa de lodo = Masa de sólido/Fracción de sólido

Masa de lodo = 64,8 kg/0,08

Masa de lodo = 810 kg

De este modo, contemplando la cantidad de agua presente en el lodo, se puede calcular que el sedimentador genera en un turno de 8 horas un total de 810 kg de lodo.

3.6.2 Producción de lodos por reproducción biológica

Cuando se trabaja con lodos activados estos utilizan microorganismos que permiten la degradación de los contaminantes orgánicos presentes en el agua, debido a que los microorganismos se alimentan y se reproducen, se genera un lodo que debe ser cuantificado mediante la siguiente ecuación:

$$P_X = Q \left(\left(\frac{Y(S_0 - S_e)}{1 + k_d + \theta_c} \right) + SS_f + SS_{VNB} \right) \times 10^{-3}$$

Donde,

P_X es la masa de sólidos totales desechados, kg/d

Q es el caudal de aguas residuales en m³ / d

Y es el coeficiente máximo de producción de biomasa, generalmente su valor oscila entre 0,4 y 0,8 con un valor típico de 0,6 kg SSV/ kg DBOR o 0,25 a 0,4 kg SSV/kg DQOR

S₀ es el DBO soluble del afluente, mg/L

S_e es el DBO soluble del efluente, mg/L

θ_c es la edad del lodo en días.

k_d es la constante de declinación endógena, generalmente entre 0,04 y 0,075 d⁻¹

SS_f son los sólidos suspendidos fijos del afluente, mg/L

SS_{VNB} son los sólidos suspendidos volátiles no biodegradables del afluente, mg/L

También cuando se trabaja con torres biológicas se debe tener en cuenta la producción de biomasa mediante la ecuación:

$$PX = P + SS_f + SS_e$$

Donde,

PX es la producción de lodos en el filtro percolador, kg SST/día

SS_f son los sólidos suspendidos fijos aplicados al proceso, kg SSF/día

SS_e son los sólidos suspendidos del efluente, SS/día

P es la biomasa neta producida, kg SSV/día

4. Índice Volumétrico de Lodos (IVL)

Es el nombre técnico para hablar de las características de sedimentabilidad que posee el lodo, este índice debe determinarse por lo menos una vez al día después de periodos de decantación de aproximadamente media hora.

El mismo se calcula mediante el cociente entre el resultado del ensayo del Cono Imhoff (tiempo de 30 minutos, en ml/l) y los sólidos suspendidos totales (SST) de los reactores en gramos por litro (g/l).

$$IVL = \frac{\text{Resultado cono imhoff (ml/L)}}{sst_{React} (g/L)}$$

El índice se expresa en ml/g, y la calidad del lodo se evalúa de acuerdo con la siguiente escala:

Tabla 12 Escala de sedimentabilidad

Escala	Concepto
IVL < 90 ml/g	Excelente sedimentabilidad
90 < IVL < 150 ml/g	Buena sedimentabilidad
IVL > 150 ml/g	Malas condiciones de sedimentabilidad
Nota. Becerra, X. (2020) Escala de sedimentabilidad	

Suponga que tiene unos lodos producidos en una planta de tratamiento, al caracterizar el mismo encontró que los sólidos suspendidos son aproximadamente 3.000 mg/L, luego toma la muestra y realiza el ensayo del cono imhoff dando como resultado 120 ml/L.

Lo primero que debe hacer es realizar la conversión de los SST a g/L

$$\text{SST}_{\text{Reac}} = 3.000 \text{ mg/L} = 3.0 \text{ g/L}$$

Se opera la formuló la fórmula de IVL

$$\begin{aligned} \text{IVL} &= \frac{\text{Resultado cono imhoff (ml/L)}}{\text{sst}_{\text{React}} \text{ (g/L)}} \\ \text{IVL} &= \frac{120 \text{ (ml/L)}}{3,0 \text{ (g/L)}} \\ \text{IVL} &= 40 \text{ ml/g} \end{aligned}$$

De acuerdo con el dato encontrado se puede inferir que el lodo generado tiene excelentes características de sedimentabilidad.

5. Tiempo de retención de sólidos

Esta variable representa el periodo de tiempo medio en el cual la biomasa o lodo permanece en el sistema su ecuación es:

$$\text{TRS} = \frac{V \times \text{SSVLM}_R}{Q_p \times \text{SSVLM}_P + Q_{\text{EF}} \times \text{SSVLM}_{\text{EF}}}$$

V = es el volumen del reactor

SSVLM_R = es la concentración de Sólidos Suspendidos Volátiles en la Mezcla (SSVLM) en el reactor Q_p = es el caudal volumétrico de purga de lodos SSVLM_P = es la concentración de SSVLM en la corriente de purga, Q_{EF} = es el caudal volumétrico del efluente

SSVLM_{EF} = es la concentración de SSVLM en el efluente El TRS es un parámetro muy importante a tener en cuenta, tanto en el diseño como en la operación de los sistemas de lodos activos.

En condiciones satisfactorias de operación, cuando el licor mezcla presenta una buena floculación y sedimentación, el valor de SSVLM en el efluente suele ser bajo (con valores típicos inferiores a 15 mg/l) y por tanto el TRS se controla mediante la purga de lodos.

6. Tasa de purga de lodos

Esta es una variable operacional de gran importancia en las plantas de tratamiento de lodos activos, se fundamenta en mantener la TRS del sistema mediante la eliminación del exceso de lodo producido en el mismo.

Es importante porque la cantidad de lodos activados purgados afectará a la calidad del efluente, la velocidad del crecimiento de microorganismos, la sedimentabilidad de la mezcla, el consumo de oxígeno, los nutrientes requeridos y la posibilidad de que se presente nitrificación.

El objetivo de esta estrategia es que la cantidad de lodos activados en el proceso permanezca lo más constante posible, usando la condición conocida como estado estacionario, que es lo más deseable para la operación de la planta de tratamiento.

La purga de los lodos activos se puede realizar en el reactor aerobio, pero usualmente se realiza es en la línea de recirculación de lodos para controlar mejor el volumen involucrado, lo que se hace es el lodo purgado se bombea a los espesadores o algún proceso de eliminación de agua y luego a un digestor anaerobio.

7. Indicadores visuales de los lodos

Algo importante para resaltar es que aparte de las mediciones de variables fisicoquímicas, el operador o la persona encargada de una planta de tratamiento debe estar atento a diferentes indicadores que pueden ser observados en el proceso.

Las plantas de tratamiento se consideran un ecosistema completo que ofrece respuestas a diferentes condiciones, en este caso los que reflejaran esos indicadores son los microorganismos presentes en el lodo activado, dentro de los indicadores visuales más comunes se encuentran:

- **Color:** el cual puede indicar la edad de los lodos, cuando son lodos activados en buen estado suele presentar color café claro, si se ve oscuro o negro puede indicar que hay condiciones de septicidad, si se ve otro color indica la presencia de desechos industriales.
- **Espuma:** su presencia indica que los niveles de sólidos del lodo no están en el intervalo recomendado o que son lodos jóvenes o viejos, si es blanca indica altas concentraciones de sólidos, si es café oscuro que el lodo es viejo.
- **Algas:** su presencia en paredes, canaletas y vertederos significa que el agua contiene muchos nutrientes (nitrógeno y fósforo), por lo cual requerirá un control de exceso de nutrientes por medio de compuestos como cloruro férrico entre otros.

- **Material flotante:** usualmente se visualizan en los sedimentadores secundarios y es un indicador de altos niveles de grasas y aceites en el influente de la planta, esa capa de nata significa que se está inyectando demasiado aire y que las micro burbujas arrastran a los flóculos fuera del mando de los lodos.

- **Burbujeo:** indica que el mando de los lodos es demasiado profundo y el lodo permanece ahí mucho tiempo y que está entrando en condiciones de anaerobiosis con la consecuente producción de metano, dióxido de carbono y ácido sulfúrico (formadores de burbujas), el problema es que estas burbujas arrastran sólidos en su ascenso lo que interfiere con el buen funcionamiento de equipos como el sedimentador, por lo que si pasa se debe aumentar la recirculación o la purga.

- **Acumulación de sólidos:** en esquinas y en espacios como entre los difusores, indica un mezclado deficiente en el tanque de aeración, o que los desarenadores y sedimentadores no están funcionando correctamente.

- **Olor:** esté en lodos activados cuando el sistema opera bien suele dar una percepción de olor a humedad, pero si se generan malos olores es un indicador de problemas operativos, falta de aireación en un reactor o se están acumulando demasiado tiempo en el sedimentador.

8. Flujo de lodos

Una actividad preliminar al tratamiento de los lodos es aquella que se reconoce como flujo de lodos, esta contempla las acciones que se deben considerar para hacer un transporte del lodo desde el proceso que lo genera hasta su posterior tratamiento y disposición.

Para ello el elemento que es usado con mayor rigurosidad son las bombas que pueden ser de diferentes tipos:

- **Bombas de émbolo:** usualmente con capacidades de 2,5 a 3,8 L/s por émbolo, con velocidades entre 40 y 50 RPM, son de uso frecuente y su función es hacer una succión del lodo de hasta 3 m.

- **Bombas de cavidad progresiva:** también muy usadas en el bombeo de lodos, tienen cabezas de succión de hasta 8,5 m, con caudales de hasta 75 L/s, sin embargo, se considera costos el mantenimiento.

- **Bombas centrífugas no atascantes:** son de uso común, requieren de una selección cuidadosa para que operen óptimamente, ya que los cambios en las características de lodos hacen variable la cabeza de bombeo y el caudal, luego debe tener capacidad suficiente para el bombeo del lodo debido al gran volumen de agua existente.

- **Bombas de flujo rotativo que poseen un impulsor rotativo:** este tipo, genera por medio del impulso un vórtice dentro del lodo, haciendo que la fuerza impulsora principal sea el mismo líquido. Es importante mencionar que el diseño debe ser muy cuidadoso ya que usualmente las bombas operan en un intervalo muy estrecho de cabeza de bombeo para una velocidad determinada de rotación.
- **Bombas de diafragma:** utilizan una membrana flexible para contraer y agrandar una cavidad cerrada, a través de la cual se dirige el flujo mediante válvulas de retención, su capacidad es baja hasta 14 L /s.
- **Bombas de pistón:** son elegidas para sistemas de presión alta, porque permiten el bombeo a presiones hasta de 13,8 Mpa, pero el problema es que son muy costosas.

9. Uso de válvulas

Las válvulas son un dispositivo instalado en una tubería para controlar la magnitud y/o la dirección del flujo.

- **Estructura:** Consiste esencialmente en un cuerpo y un disco o tapón ajustado a dicho cuerpo.
- **Selección:** una válvula para usarse en un sistema de tuberías depende de su aplicación y de razones económicas.
- **Dimensiones:** regularmente, las válvulas se dimensionan ligeramente más pequeñas que el diámetro de la tubería y se instalan con un reductor a ambos lados. En la práctica de las obras hidráulicas, es preferible mantener la base de la válvula al mismo nivel de la base de la tubería para evitar que se atrape aire; pero en el transporte de aguas residuales y sólidos, las invertidas deberán estar alineadas.

Algunos tipos de válvulas:

- **Aislantes:** se instalan frecuentemente a intervalos de 1 a 5 Km, siendo el espaciamiento una función de la economía y de los problemas de operación, podría ser necesario aislar secciones de la tubería para reparar filtraciones y el volumen de agua que tendría que ser drenada para desecharse sería una función del espaciamiento de las válvulas aisladoras. Dentro de estas se encuentran las válvulas de compuerta y mariposa.
- **De arrastre:** son instaladas en el fondo de cada inclinación mayor en el perfil de la línea, algunas veces, es prudente instalar válvulas de desvío de diámetro pequeño alrededor de las válvulas en línea, para igualar las presiones a través de la compuerta y así facilitar su apertura (la cual puede ser manual o por medio de un activador eléctrico o mecánico).

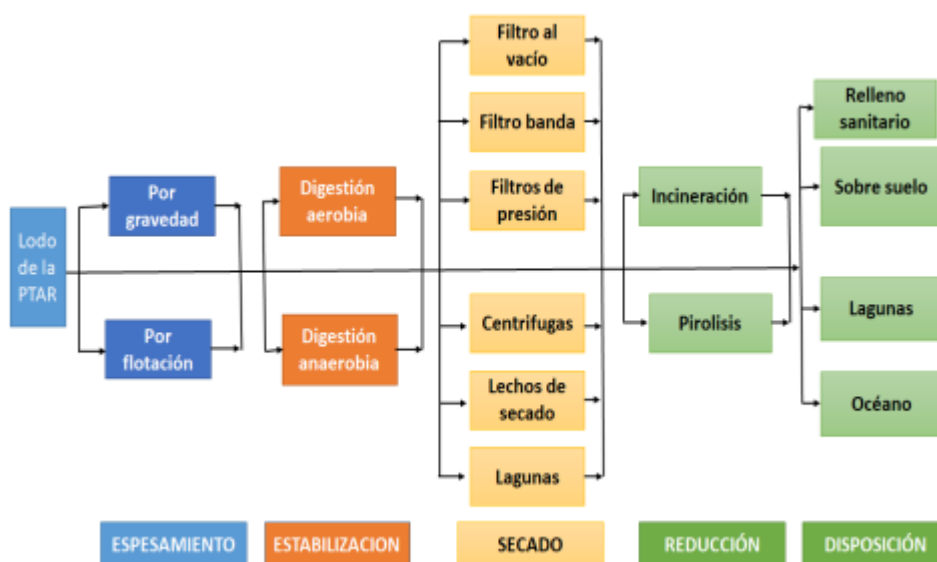
• **De aguja y control:** Tienen una acción gradual de cerrado, mientras que las de compuerta y las de mariposa ofrecen poca resistencia al flujo hasta que prácticamente lo cortan y podrían sufrir daños por cavitación. Las válvulas de aguja podrían usarse con pesos de contra balance, resortes, acumuladores, o actuadores para mantener condiciones de presión constante tanto aguas arriba como aguas abajo de la válvula, o para mantener un flujo constante.

• **Anti retorno:** válvula que posee un disco unido al cuerpo por bisagras en su extremo, de forma tal que se abra en la dirección normal del flujo y se cierre cuando éste se invierte.

10. Tratamiento de los lodos

Existen diferentes procedimientos para hacer un tratamiento adecuado de los lodos, su uso depende de condiciones técnicas y espacio. A continuación, se presenta un diagrama con algunos de los procesos más representativos:

Tabla 64 Principales procesos por fase tratamiento de lodo.



Nota. Adaptado de Romero, J. (2010). Tratamiento de aguas residuales. Editorial escuela colombiana de ingeniería. ISBN: 958-8060-13-3. [Figura]. p.777.

Todos los niveles de complejidad de manejo de los lodos de aguas residuales van enfocado a hacer un tratamiento eficiente, para ello siempre se aconseja conocer las siguientes variables antes de establecer el sistema o procesos a usar:

- Balance de masa de los procesos de tratamiento de agua
- Balance de masa del tren de lodos

Además de eso tener en cuenta siempre las consideraciones pertinentes:

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

Es importante aclarar que, aunque cada tratamiento establecido para los lodos se realiza de acuerdo a las características del mismo, el proceso convencional lleva a cabo las siguientes etapas:

11. Concentración o espesamiento

Esta etapa busca la separación de las fases líquida y sólida utilizando la diferencia de densidades, también se le conoce como fase de espesamiento, se puede hacer de diferentes formas, la primera de ellas es a través de diferentes equipos entre los cuales se encuentran:

- **Desarenador:** es una estructura hidráulica que permite la acumulación de material sólido en determinados puntos al tiempo que da paso a la fase líquida una vez los sólidos son removidos.
- **Sedimentador:** es un equipo que permite el ingreso del agua a baja velocidad para permitir que las partículas sedimentables se hundan por la acción de la gravedad, mientras que los componentes que tienen una densidad menor tienden a ir hacia la superficie de este modo efectúa la separación de las fases concentrando la fase sólida.
- **Espesadores mecánicos:** son sedimentadores que se les incluye unas aspas cuya función es actuar como barredora de lodos y así producir una fase sólida más concentrada, el accionamiento mecánico permite que las partículas se dirijan con mayor eficiencia hacia un punto de la estructura hidráulica por lo que los tiempos de concentración en estos equipos son menores que en los de acción gravimétrica.
- **Espesadores por flotación:** se utiliza principalmente cuando los sólidos tienen una baja densidad, se pueden ver como lodos gelatinosos, a través de este método se inyecta aire presurizado por la parte inferior de las estructuras hidráulicas lo que facilita el ascenso de las partículas livianas concentrando así la fase sólida en la superficie del lodo.

12. Digestión

Los lodos producidos en el tratamiento de aguas residuales están compuestos en gran medida de materia orgánica que puede empezar procesos de descomposición, debido a esto se debe realizar a través de procesos de oxidación la obtención de compuestos más estables al tiempo que se eliminan los microorganismos patógenos que pueda presentar el lodo crudo, existen principalmente tres tratamientos para realizar la digestión entre los que se encuentran:

- **Digestión anaeróbica:** se utilizan microorganismos en ausencia de oxígeno para la reducción de sólidos volátiles, normalmente después de la digestión anaeróbica estos sólidos se reducen en un 70%, los remanentes quedan con una naturaleza homogénea, estables, con olor a alquitrán, normalmente esta digestión se realiza en dos etapas, la primera con calentamiento y mezcla donde se produce la mayor cantidad de metano y la segunda donde se da un asentamiento tranquilo utilizada principalmente como almacenamiento del lodo digerido.

- **Digestión aeróbica:** este proceso es utilizado principalmente en plantas de tratamiento de aguas residuales que tienen caudales menores a 220 L/s, el objetivo es el mismo, estabilizar la materia orgánica presente en el lodo crudo, los microorganismos utilizan oxígeno para el proceso por lo que es más fácil de operar, no genera malos olores y reduce de mejor forma

el contenido de patógenos, sin embargo este proceso no genera metano por lo que no se puede hacer un aprovechamiento energético del mismo.

- **Oxidación húmeda:** es un procedimiento el cual utiliza cal para lograr la estabilización, elimina los agentes patógenos y olores ofensivos mediante la creación de un pH igual a 12, cuando se realiza este tipo de procedimiento se debe asegurar que el lodo tenga el suficiente contacto con la cal por lo que se recomienda que estos se mantengan en reposo por al menos dos horas.

13. Acondicionamiento

En esta etapa se busca el espesado y desaguado del lodo para obtener una mejor concentración de la fase sólida, con mejor consistencia y más homogénea, se puede realizar de diferentes maneras como lo son:

- **Acondicionamiento químico:** existen diferentes sustancias que permiten realizar el espesado de los lodos, los más utilizados convencionalmente son los polímeros catiónicos si el lodo ya ha sido digerido o los polímeros aniónicos si es un lodo primario, Sin embargo, el acondicionamiento se puede hacer también con sulfato ferroso, alumbre, cloruro de aluminio, cloruro férrico entre otros. Finalmente, aunque no es tan común el uso cuando se encuentran pequeñas cantidades de lodo se puede hacer el acondicionamiento con permanganato de potasio ya que es un fuerte oxidante.

- **Acondicionamiento con calor:** es una práctica que requiere de grandes cantidades de energía por lo que se utiliza en plantas de tratamiento con bajo caudal o en aquellas donde se ha realizado una digestión anaeróbica con el fin de aprovechar el gas metano generado, el lodo es expuesto a altas temperaturas con el fin de provocar la evaporación del agua y así concentrar la fase sólida.

- **Acondicionamiento con congelamiento:** es una técnica poco utilizada mediante la cual se disminuye la temperatura del lodo con el fin de aumentar la densidad del líquido presente, requiere un alto gasto energético y elevados costos en el mantenimiento de maquinaria por lo que no se utiliza a niveles industriales

14. Deseccación

En estos procesos se busca reducir el porcentaje de agua presente en el lodo con el fin de reducir su volumen y facilitar así su transporte, existen diferentes métodos para realizar este primer paso de deshidratación entre los cuales se encuentran:

- **Filtro prensa:** son equipos que emplean una correa doble para generar una compresión en el lodo con la ayuda de membranas que permiten la separación de la fracción acuosa de la sólida, posteriormente el agua retirada cae por la acción de la gravedad y el sólido queda acumulado en la membrana donde recibe el nombre de torta.
- **Filtros al vacío:** para realizar la separación del agua se utiliza un diferencial de presión y un medio poroso, puede ser una membrana, película o tamiz que retiene los sólidos cuando el fluido se desplaza por la acción del diferencial de presión. Una vez se concentran los sólidos en el medio poroso este se retira del filtro y con él los sólidos concentrados.
- **Centrifugación:** en este proceso se aplica fuerza centrífuga para mover las partículas sólidas a la pared del equipo, una vez estas tienen contacto por acción de la fricción reducen su movilidad mientras que se van acumulando mientras se genera un centro clarificado.
- **Rejillas vibratorias**

15. Secado

Este procedimiento tiene como objetivo retirar la mayor cantidad de agua posible del lodo

Lechos de secado de arena: es el método más utilizado para plantas pequeñas, de menos de 100 L/s, el lodo se aplica en capas de 20 a 30 cm de altura y se deja secar mediante la acción del sol, al tiempo que se evapora una fracción de agua la otra parte drena hacia las capas inferiores donde posteriormente se remueve a través de tuberías.

Calor: se somete el lodo a altas temperaturas (más de 105°C) hasta que el agua se evapora, es un procedimiento que consume mucha energía por lo que no es tan utilizado.

16. Incineración

Es una técnica que se utiliza cuando no hay espacio suficiente para la disposición de los lodos, es muy restrictivo debido a que destruye diferentes compuestos orgánicos que pueden ser emitidos a la atmósfera y se pueden presentar incumplimientos teniendo en cuenta la normatividad ambiental vigente.

Normalmente los lodos que son incinerados son crudos desaguados sin estabilizarse, no tiene sentido incinerar los lodos que han sido sometidos a procesos de digestión debido a que estos tienen una concentración baja de sólidos volátiles que son precisamente los que suelen dar un mayor poder calorífico.

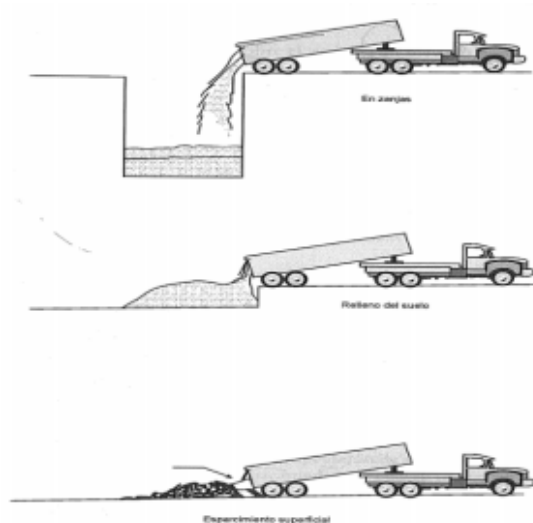
La incineración es un proceso de combustión completa, sin embargo, también se pueden aplicar técnicas tales como la pirólisis donde la materia orgánica se craquea a altas temperaturas en ausencia de oxígeno.

17. Disposición

Esta técnica consiste en el almacenamiento final de los lodos para la incorporación a procesos biológicos, o el aislamiento total en caso de que estos sean peligrosos.

Aplicación sobre suelo: este es uno de los métodos practicados hace muchos años, sin embargo, es solo para bio sólidos y no para lodos peligrosos, ya que los primeros suelen contener gran cantidad de materia orgánica, nitrógeno y fósforo, que permite su uso en agricultura y cultivos paisajísticos por sus propiedades de acondicionador y fertilizante.

Tabla 63 Aplicación de lodo sobre suelo



Nota. Romero, J. (2010). Tratamiento de aguas residuales. Editorial escuela colombiana de ingeniería. ISBN: 958-8060-13-3. [Figura]. p.850

De acuerdo con Romero (2010) se debe tener cuidado con las siguientes variables si se considera usar esta práctica:

- Contenido orgánico y de patógenos
- Mezcla de patógenos, parásitos y semillas de los cultivos.
- Contenido de nutrientes
- Manejo de olores y humedad
- Contenido de metales pesados y compuestos orgánicos tóxicos
- Determinación de la cantidad apropiada de aplicación del lodo (p.848).

Relleno sanitario: la disposición en relleno de lodos se puede definir como el enterramiento del lodo, que es el proceso de aplicar el mismo sobre el suelo y se entierra mediante la colocación de una capa de suelo sobre él. Esta alternativa es apropiada cuando se cuenta con el terreno adecuado para tal fin, sin embargo, es bueno aclarar que en algunos rellenos sanitario el lodo compostado y el lodo tratado químicamente, se ha usado como material de cobertura, para definir esta alternativa se debe considerar de acuerdo a Romero (2010) los siguientes parámetros:

- Capacidad del relleno
- Método de construcción
- Preparación del sitio
- Uso del sitio
- Sistema de cobertura
- Cobertura diaria, intermedia y final
- Sistema de recolección de lixiviados
- Control de gas
- Control de agua superficial
- Necesidades de transporte
- Cierre del relleno y uso final del sitio.

18. Controles operacionales

Algunos procesos utilizados para el tratamiento de los lodos tienen como consecuencia la generación de aspectos ambientales como el gas y la producción de olor.

Gases

En fases de digestión anaerobia del lodo, suele producir gases con una composición volumétrica de aproximadamente 65 - 70 % metano (CH_4), 25 a 30% dióxido de carbono (CO_2) y muy pequeñas cantidades de nitrógeno, hidrógeno, sulfuro de hidrógeno y algunos otros gases.

Por ello, se debe establecer un programa de control y manejo de estos gases que contemple todas las actividades requeridas para hacer una gestión de este subproducto, una opción viable es usarlo como combustible para calderas y motores de combustión interna, que son útiles para el bombeo de agua residual, la generación de electricidad, entre otros.

Olores

El contenido orgánico y de patógenos en el lodo puede originar problemas de olores y atraer vectores (moscas, mosquitos y roedores) a los lugares de aplicación o de almacenamiento. Los patógenos (bacterias, virus, protozoos y huevos de gusanos parásitos) se concentran en el lodo y pueden propagar enfermedades, en el caso que exista contacto con el hombre. Para cumplir los límites planteados por la EPA (PART 503 de 1994), el contenido en materia orgánica y patógena se debe reducir considerablemente, mediante procesos de tratamiento.

Para ello se debe incluir también un programa de manejo ambiental de vectores, al igual que establecer controles operacionales durante la ejecución de los tratamientos al lodo que garantice que se logra estabilizar el contenido orgánico y de patógenos en el mismo.

La importancia del manejo ambiental de los olores producidos es dada para dar cumplimiento a la base normativa, en este caso la resolución 1541 (2013) o la que la modifique o derogue, la cual establece niveles permisibles de calidad de aire o de inmisión, el procedimiento para la evaluación de actividades que generan olores ofensivos.

Resolución 1541.

Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. Bogotá. Colombia. 12 de noviembre 2013.
<http://parquearvi.org/wp-content/uploads/2016/11/Resolucion-1541-de-2013.pdf>

19. Ensayos de laboratorio

Un elemento importante para caracterizar los lodos son los ensayos de laboratorio los cuales permiten caracterizar sus propiedades para poder identificar cual es la mejor estrategia para acondicionarlos y tratarlos de acuerdo con lo establecido en el Estándar Methods.

Estas prácticas o ensayos suelen tomar más de 10 horas de elaboración, luego es importante siempre tener el tiempo suficiente y los elementos necesarios para garantizar la veracidad de los resultados.

19.1 Muestreo de lodos

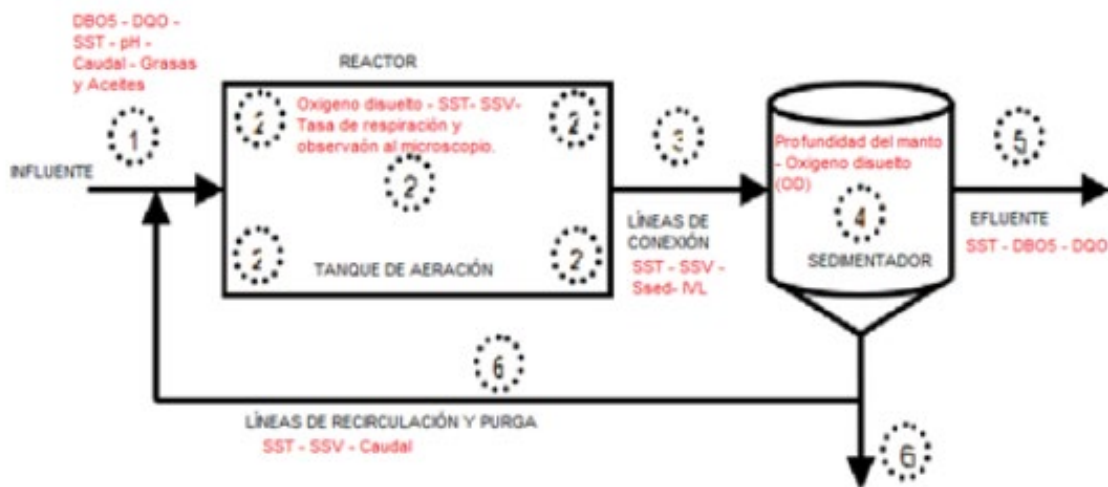
La base normativa que brinda las orientaciones para realizar el muestreo es la Norma Técnica Colombiana (NTC) 5667 - 13 que se denomina guía para el muestreo de lodos de aguas residuales y plantas de tratamiento de aguas, a manera general se puede resaltar las siguientes acciones en el muestreo de lodos:

- Antes de realizar el muestreo se debe revisar muy detalladamente el acceso al punto de muestreo.
- El sentido práctico de instalar y mantener equipo automático, si es apropiado.
- Definir el tipo de muestra (Compuesta o aleatoria).
- Establecer el tipo de muestreo (Continuo, intermitente, relacionado con el flujo).
- Identificar el tamaño de la muestra (si son lodos líquidos o una torta de lodos).
- Establecer el almacenamiento, preservación y manipulación: los métodos de muestreo pueden depender del tiempo en términos de la técnica analítica por usar (por ejemplo, cambio de pH con el tiempo), luego la veracidad de los dependerá de las tres variables mencionadas, las cuales incluyen temas relacionados con:

- **Recipientes y preservación de muestras**
- **Almacenamiento**
- **Reducción del tamaño de la muestra (Cuarteo de la muestra)**
- **Seguridad**
- **Presentación de informes**

En el caso de un plan de lodos activados, para realizar un seguimiento cotidiano del desempeño de la misma se recomienda realizar muestreos en diferentes puntos para identificar indicadores analíticos y así tomar decisiones de operación de acuerdo a Calderón, C, (2004), en su documento operación de plantas de lodos activados se recomiendan los siguientes puntos de muestreo en una planta usual de lodos activados.

Tabla 65 Puntos de muestreo y parámetros a medir



Nota. Adaptado de Calderón, C. (2004). Operación de plantas de lodos activados. [Figura]. <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/018834/-MEMORIAS2004/CapituloII/7OperaciondeplantasdelodosactivadosCesarCalderon.pdf>

19.2 Caracterización de los lodos

En los ensayos de laboratorio se debe buscar la caracterización de los siguientes parámetros en los lodos como mínimo:

- **Sólidos suspendidos (SST)**
- **Sólidos suspendidos volátiles (SSV)**
- **Sólidos totales (ST)**
- **Oxígeno disuelto (OD)**
- **Nitrógeno total Kjeldahl**
- **Fósforo**
- **Metales**

Referencias bibliográficas

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2011). Plan de gestión del riesgo para el manejo de vertimientos. https://www.cornare.gov.co/Tramites-Ambientales/TR/TR-manejo_vertimientos.pdf

Romero, J. (2010). Tratamiento de aguas residuales. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.