



## INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ

### DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE LODOS PRODUCIDOS EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES "REAL DEL BOSQUE"

REPORTE FINAL DE RESIDENCIA PROFESIONAL QUE PRESENTA:

Roberto Alejandro Rosales Maldonado

Como requisito para acreditar la Residencia Profesional  
de la Licenciatura en:

### INGENIERÍA QUÍMICA

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas  
12 de enero de 2024



Carretera Panamericana Km. 1080, C.P. 29050, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas |

[tuxtla.tecnm.mx](http://tuxtla.tecnm.mx)

Tel. (961) 615 0461, 615 0138, 615 4808



2023  
AÑO DE  
**Francisco  
VILLA**  
EL REVOLUCIONARIO DEL PUEBLO



## Agradecimientos

Le agradezco a Dios por darme vida, por permitirme pasar por cada una de las diferentes experiencias a lo largo de mi existencia y por no haberme abandonado en los momentos más difíciles; por llenarme de bendiciones y sabiduría para poder realizar este proyecto y sobre todo salud.

A mis padres Fernando Rosales Maldonado y Yuribet Maldonado Gálvez por apoyarme en todo momento, brindarme su amor y cariño para fortalecerme, además de motivarme para poder cumplir con todas las metas que me he propuesto; por corregirme y guiarme hacia un buen camino y nunca dejarme solo; por haberme forjado como la persona que soy actualmente y que muchas de las cosas que he logrado han sido gracias a ellos.

A mi tío Roberto Manuel Rosales Maldonado por ser como un segundo padre para mí, aconsejándome cuando más lo necesito; así como también estar pendiente de mí y de mis hermanos siempre.

A mis hermanos por apoyarme y ser una de las razones de mi felicidad.

Agradezco al Sistema Municipal de Agua Potable y Alcantarillado (SMAPA), así como también, a la Ing. Martina Hernández Vázquez por darme la oportunidad de poder realizar mi Residencia Profesional en la PTAR “Real del Bosque” y tenerme paciencia durante estos 5 meses e incluso ayudarme en lo necesario para que este proyecto se haya realizado. También quiero agradecer a cada uno de los trabajadores de la planta por brindarme su apoyo, amabilidad y sobre todo su buena atención hacia mi persona, haciéndome sentir en un ambiente más cómodo y en confianza.

Al Ing. Roberto David Vázquez Solís por apoyarme en la realización de este proyecto durante este periodo de Residencia Profesional.

Finalmente quiero agradecer a familiares, amigos y a conocidos por ser parte de cada una de las etapas de mi vida, por creer en mí y en mis sueños.

¡Gracias a todos!





## Resumen

El presente documento se hizo con el propósito de diseñar un tren de tratamiento de lodos, como una alternativa para eficientar la producción de los biosólidos y que cumplan con la NOM-004-SEMARNAT-2002, en la PTAR “Real del Bosque”, que se encuentra ubicada en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. La PTAR cuenta con 2 módulos de tratamiento, el primero con una capacidad de 28 L/s y el segundo con una capacidad de 40 L/s. Primeramente, se realizaron muestreos del agua residual y de lodos en los diferentes procesos de tratamiento de cada módulo, como son, las rejillas, el canal desarenador, en las líneas de recirculación de lodos del reactor aerobio, en las líneas de purgas del clarificador secundario y en el Tanque de Cloración, con la finalidad de conocer los parámetros fisicoquímicos, tales como, temperatura, pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, DQO, nitrógeno total, fósforo total, alcalinidad, densidad, porcentaje de humedad, sólidos totales, sólidos totales volátiles, sólidos suspendidos totales, sólidos suspendidos volátiles, sólidos disueltos totales, sólidos sedimentables e índice volumétrico de lodos. Posteriormente se calculó y cuantificó la cantidad de lodo que se produce diariamente en la planta, y se realizó un balance general de masa. Se revisaron las diferentes tecnologías para el tratamiento de lodos, y se seleccionó una alternativa considerando el área disponible en la PTAR, así como una tecnología asequible. Finalmente, se diseñó el siguiente tren de tratamiento, un espesador por gravedad, un digestor anaerobio y un lecho de secado, para cada una de las plantas.

**Palabras clave:** tren de lodos, lodos residuales, espesador, biodigestor, lecho de secado.



Carretera Panamericana Km. 1080, C.P. 29050, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas |

[tuxtla.tecnm.mx](http://tuxtla.tecnm.mx)

Tel. (961) 615 0461, 615 0138, 615 4808





## Índice

Agradecimientos.....	2
Resumen .....	3
Índice de tablas.....	6
Índice de figuras .....	7
Descripción de la empresa.....	10
Problemas a resolver.....	11
Objetivos .....	12
Objetivo general.....	12
Objetivos específicos .....	12
Justificación.....	13
Marco teórico .....	14
1. Plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) .....	14
1.1 PTAR con aireación extendida.....	14
1.2 Generación de lodos residuales .....	15
2. Lodos .....	15
2.1 Clasificación de lodos .....	15
2.2 Métodos de muestreo de lodos y biosólidos .....	17
2.3 Características de los lodos.....	17
2.3.1 Parámetros fisicoquímicos relevantes .....	17
2.3.2 Parámetros biológicos relevantes .....	19
2.4 Normatividad para lodos residuales en México.....	20
2.4.1 Normas Oficiales Mexicanas para establecer la no-peligrosidad del lodo residual.....	20
2.4.2 Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002 .....	21
3. Tecnologías para el tratamiento de lodos .....	23
3.1 Espesamiento.....	23
3.1.1 Acondicionamiento de lodos .....	24
3.1.2 Espesamiento por gravedad .....	26
3.1.3 Espesamiento por flotación .....	27
3.1.4 Espesamiento por centrífuga.....	28





- 3.1.5 **Espesamiento por gravedad con bandas**..... 28
- 3.2 **Estabilización** ..... 29
  - 3.2.1 **Estabilización aerobia**..... 29
  - 3.2.2 **Estabilización anaerobia** ..... 30
  - 3.2.3 **Estabilización alcalina** ..... 31
  - 3.2.4 **Estabilización por composteo**..... 32
  - 3.2.5 **Estabilización por vermicomposteo** ..... 32
- 3.3 **Deshidratación** ..... 32
  - 3.3.1 **Lechos de secado** ..... 32
  - 3.3.2 **Filtro prensa de bandas** ..... 33
  - 3.3.3 **Filtro prensa de placas** ..... 33
  - 3.3.4 **Centrifuga** ..... 33
  - 3.3.5 **Secado solar**..... 34
- 4. **Aprovechamiento y disposición final de los lodos**..... 34
  - 4.1 **Agricultura**..... 35
  - 4.2 **Producción de energía**..... 35
  - 4.3 **Disposición de lodos en rellenos sanitarios** ..... 36
- Procedimiento y descripción de las actividades realizadas**..... 37
- Resultados** ..... 38
- Conclusión** ..... 81
- Competencias desarrolladas y/o aplicadas** ..... 82
- Fuentes de información** ..... 83
- Anexos**..... 86





## Índice de tablas

Tabla 1. Composición fisicoquímica típica de los lodos. (Reproducida). (Limón Macías, 2013) ..... 19

Tabla 2. Límites máximos permisibles para metales pesados en biosólidos. (Reproducida). (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2002) ..... 21

Tabla 3. Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos. (Reproducida). (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2002) ..... 22

Tabla 4. Aprovechamiento de biosólidos. (Reproducida). (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2002) ..... 22

Tabla 5. Frecuencia de muestreo y análisis para lodos y biosólidos. (Reproducida). (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2002) ..... 23

Tabla 6. Reducción del volumen del lodo mediante tratamientos físicos. (Reproducida). (CONAGUA, 2015) ..... 24

Tabla 7. Técnicas para el muestreo y la determinación de parámetros fisicoquímicos. (Elaboración propia) ..... 37

Tabla 8. Resultados de los análisis del afluente de agua cruda. (Elaboración propia). ..... 39

Tabla 9. Resultados de los análisis del efluente final de agua tratada. (Elaboración propia). ..... 39

Tabla 10. Resultados de los análisis de los lodos activados provenientes del reactor de oxidación total. (Elaboración propia) ..... 39

Tabla 11. Resultados de los análisis del lodo de la purga del sedimentador secundario. (Elaboración propia) ..... 40

Tabla 12. Datos obtenidos de la caracterización para el balance de materia de la planta de 28 L/s. (Elaboración propia) ..... 43

Tabla 13. Parámetros cinéticos y estequiométricos y relaciones básicas para el cálculo de la remoción de DBO en el sistema de lodos activados. (Reproducida). (von Sperling & de Lemos Chernicharo, 2005) ..... 43

Tabla 14. Datos obtenidos de la caracterización para el balance de materia de la planta de 28 L/s. (Elaboración propia) ..... 54

Tabla 15. Parámetros cinéticos y estequiométricos y relaciones básicas para el cálculo de la remoción de DBO en el sistema de lodos activados. (Reproducida). (von Sperling & de Lemos Chernicharo, 2005) ..... 54







## Índice de figuras

Figura 1. Diagrama de proceso de una PTAR con aireación extendida. (Reproducida). (Universal Water, 2021)..... 14

Figura 2. Generación de lodos de los tratamientos primario y secundario. (Reproducida). (Limón Macías, 2013)..... 15

Figura 3. Tecnologías para el tratamiento de lodos residuales. (Reproducida). (CONAGUA, 2015)..... 23

Figura 4. Parámetros básicos para la evaluación de un sistema de acondicionamiento de lodos. (Reproducida). (CONAGUA, 2015)..... 25

Figura 5. Perfil de concentraciones típicas de los lodos de aguas residuales municipales en un espesador de gravedad en operación continua. (Reproducida). (CONAGUA, 2015) . 26

Figura 6. Espesador estático gravitacional de lodo con sistema de varilla. (Reproducida). (CONAGUA, 2015)..... 27

Figura 7. Unidad típica de espesamiento por flotación con aire disuelto para lodos activados residuales. (Reproducida). (CONAGUA, 2015)..... 27

Figura 8. Esquema de una centrífuga para el espesamiento de lodos. (Reproducida). (CONAGUA, 2015)..... 28

Figura 9. Diagrama de flujo de un sistema de espesamiento por gravedad en bandas. (Reproducida). (CONAGUA, 2015)..... 29

Figura 10. Diagrama de flujo del proceso de estabilización convencional continua. (Reproducida). (CONAGUA, 2015)..... 29

Figura 11. Proceso simplificado de la estabilización anaerobia. (Reproducida). (CONAGUA, 2015)..... 30

Figura 12. Formas típicas de reactores anaerobios. (Reproducida). (CONAGUA, 2015) 31

Figura 13. Digestor anaerobio de fase única, tanque de agitado continuo. (Reproducida). (González, Ríos Bolívar, & Gómez, 2008)..... 31

Figura 14. Tratamientos para obtener lodos clase A, B y C. (Reproducida). (CONAGUA, 2015)..... 35

Figura 15. Zonas de muestreo para la caracterización de agua y lodos. (Elaboración propia). ..... 38

Figura 16. Purga de lodos del sedimentador secundario de la planta de 28 L/s. (Elaboración propia). ..... 40

Figura 17. Puesta de lodos residuales en los conos Imhoff. (Elaboración propia)..... 40

Figura 18. Determinación de sólidos sedimentables. (Elaboración propia). ..... 41

Figura 19. Bomba de vacío como equipo de filtración para determinar SST. (Elaboración propia). ..... 41

Figura 20. Purga de lodos del sedimentador secundario de la planta de 40 L/s. (Elaboración propia). ..... 41

Figura 21. Viales con reactivo para determinar DQO. (Elaboración propia). ..... 42





Figura 22. Proceso a considerar para el balance de materia. (Elaboración propia)..... 42

Figura 23. Plano del espesador por gravedad de la planta de 28 L/s. (Elaboración propia).  
..... 67

Figura 24. Plano del espesador por gravedad de la planta de 40 L/s. (Elaboración propia).  
..... 75

Figura 25. Diagrama de proceso de las plantas con el tren de tratamiento de lodos diseñado.  
(Elaboración propia)..... 80







## Introducción

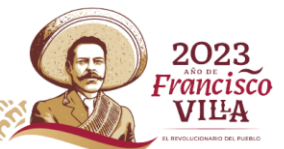
Un tren de tratamiento de lodos, se puede entender como el uso de diferentes tecnologías para el espesado, la estabilización y la deshidratación de los lodos residuales, que son uno de los productos de las plantas de tratamiento de aguas residuales; para que estos puedan ser aprovechados o se les dé una disposición final. Cada una de estas tecnologías tienen como finalidad asegurar el cumplimiento de los parámetros de calidad marcadas en su respectiva normatividad.

La producción específica de lodos es significativamente diferente entre los países. Los países desarrollados tienen mayor producción de lodo ya que sus sistemas de tratamiento consideran la remoción de nutrientes por métodos biológicos o químicos y el tratamiento terciario del agua. La producción promedio de lodo para estos países es de 21.9 kg por población equivalente y por año (21.9 kg per cápita/año); en contraste con los países menos desarrollados que tienen una producción promedio de 11.5 kg por población equivalente y por año (11.5 kg per cápita/año). La producción de lodos per cápita, se relaciona también con el número de habitantes que están conectados a un sistema de tratamiento de aguas residuales, la tecnología utilizada y el aporte de descargas industriales (Kelessidis & Stasinakis, 2012).

Considerando la cantidad y el tipo de agua residual tratada, el agua residual municipal es la principal generadora de lodo. Una gran cantidad de lodo se produce en los drenajes durante la estación de secas como resultado de la sedimentación durante el transporte del agua residual, ya que la velocidad disminuye. La producción de lodos de aguas residuales municipales se estima en 640 millones de toneladas por año en base seca (CONAGUA, 2015).

La mayor parte del lodo residual generado en las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales se dispone en el suelo. Aunque México dispone con una legislación para la aplicación del lodo al suelo, NOM-004-SEMARNAT-2002, no se lleva un control o una vigilancia estricta en su aplicación (CONAGUA, 2015).

Es por ello que en el presente trabajo se pretende hacer el diseño de un tren de tratamiento de lodos para la planta de tratamiento de aguas residuales “Real del Bosque” ubicada en el municipio de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas; como una alternativa para darle una disposición final con la tecnología adecuada a los lodos generados y que cumplan con la NOM-004-SEMARNAT-2002.





## Descripción de la empresa

SMAPA es el Sistema Municipal de Agua Potable y Alcantarillado del municipio de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, sus principales funciones son la de proveer de agua potable al municipio, instalar y dar mantenimiento a las redes de alcantarillado y distribución de agua potable, disminuir el grado de contaminación por las aguas negras generadas del municipio (Romero Aguilar, 2019).

### Misión

Ofrecer a los usuarios un servicio de calidad en el suministro de agua potable y alcantarillado sanitario, concientizando a la población del uso y la preservación del agua como elemento indispensable en la vida (SMAPA, 2024).

### Visión

Consolidarse como uno de los mejores organismos a nivel nacional, con base en la ética de trabajo en equipo y tecnología de vanguardia, capaz de satisfacer las necesidades actuales y futuras de la comunidad (SMAPA, 2024).

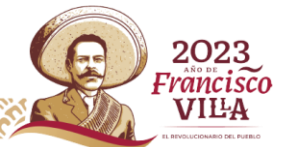
### Planta de tratamiento de aguas residuales “Real del Bosque”

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) “Real del Bosque” es un sistema que recibe agua residual de aproximadamente 29.000 habitantes del fraccionamiento del mismo nombre. La PTAR tiene una eficiencia de hasta el 98% en la eliminación de contaminantes.

El Sistema Municipal de Agua Potable y Alcantarillado (SMAPA) asegura que la PTAR de Real del Bosque ha reducido completamente la emisión de aguas negras al río Suchiapa. El 23 de septiembre de 2020, el SMAPA abrió una nueva sucursal en el fraccionamiento Real del Bosque. La planta de tratamiento de aguas residuales “Real del Bosque” se encuentra ubicada en el municipio de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, específicamente en la zona suroeste del municipio, en la colonia Real del Bosque.

### Laboratorio de la PTAR “Real del Bosque”

En este se realizan los análisis para el control de calidad del agua durante el proceso de tratamiento, en donde se tiene como base la NOM-001-SEMARNAT-2021, que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores. El laboratorio cuenta con los materiales e instrumentos para realizar las determinaciones necesarias, que posteriormente son registradas en una bitácora.





### Problemas a resolver

La PTAR “Real del Bosque” que, como cualquier otra planta de tratamiento de aguas residuales, cuenta con la generación de lodos durante el proceso de tratamiento del agua; dichos lodos tienen un impacto en la contaminación del suelo, por lo cual se necesita darles un tratamiento para poder aprovecharlos y darles una disposición final.

Hoy en día la planta de tratamiento de aguas residuales “Real del Bosque” cuenta solamente con un digestor aerobio para la estabilización y lechos de secado como tecnologías de tratamiento del lodo, y se desconoce si es el volumen y área adecuada, respectivamente.

Es por eso que se requiere diseñar un tren de tratamiento de lodos para la optimización del proceso, con los datos de la caracterización del agua y lodos obtenidos en la PTAR.





## Objetivos

### Objetivo general

Diseñar un Sistema de Tratamiento de Lodos con la tecnología apropiada y de bajo costo para convertir el lodo en biosólidos que cumplan con la NOM-004-SEMARNAT-2002.

### Objetivos específicos

- ✓ Realizar un análisis fisicoquímico del lodo generado en la PTAR “Real del Bosque”.
- ✓ Cuantificar el lodo que se genera en la PTAR “Real del Bosque”.





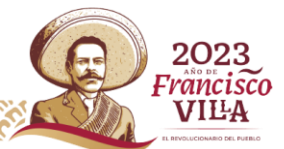
## Justificación

El diseño de un tren de tratamiento de lodos residuales emerge como una práctica imprescindible para abordar los desafíos ambientales contemporáneos. Esta justificación se sustenta en diversos aspectos que van desde la prevención de la contaminación hasta la promoción de la sostenibilidad y la protección de la salud pública.

Uno de los aspectos fundamentales es la reducción de la contaminación ambiental. Los lodos residuales, provenientes de plantas de tratamiento de aguas, suelen contener una variedad de contaminantes, incluyendo compuestos orgánicos e inorgánicos. Sin un tratamiento adecuado, estos contaminantes pueden infiltrarse en el suelo y cuerpos de agua, comprometiendo la calidad del agua y afectando negativamente la biodiversidad. El tratamiento de lodos se convierte, por tanto, en un escudo protector para nuestros ecosistemas, asegurando que las sustancias perjudiciales no impacten negativamente en la flora y fauna.

Del mismo modo, la aplicación de biosólidos tratados como fertilizantes en la agricultura se traduce en la recuperación de nutrientes esenciales, cerrando así el ciclo de nutrientes y reduciendo la dependencia de fertilizantes químicos.

En la planta de tratamiento de aguas residuales “Real del Bosque” se requiere diseñar un tren de tratamiento de lodos para la optimización del proceso, con los datos reales del proceso, que permitan mejorar los parámetros de calidad de los biosólidos, de acuerdo a especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final, establecida en la NOM-004-SEMARNAT-2002.



## Marco teórico

### 1. Plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR)

Una planta de tratamiento de aguas residuales cuenta con sistemas especialmente diseñados para retirar los contaminantes que llegan a ser vertidos en el agua. De esta forma se puede limpiar el agua y puede pasar nuevamente a la incorporación a un cuerpo lacustre natural, es decir, mar, ríos o lagos. También después de este proceso pueden ser reutilizadas en otras actividades, con una pequeña excepción, el consumo humano. Una planta de tratamiento de aguas residuales trabaja con las aguas negras o residuales de empresas, bodegas, fabricas, comunidades.

#### 1.1 PTAR con aireación extendida

También conocida como oxidación total, las PTAR mediante aireación extendida utilizan un proceso biológico convencional de lodos activados, allí se desarrollan bacterias endógenas, que a través del proceso aeróbicos reducen la materia orgánica, absorbe el fósforo y nitrógeno, produciendo lodos que pueden ser decantados y espesados.

El proceso comprende la estabilización de la materia orgánica en condiciones aerobias y la eliminación de los productos finales gaseosos en el aire. El efluente contiene materia en suspensión finamente dividida y materia soluble. En este proceso, las aguas residuales entran en el estanque aireación de un sistema de tratamiento de aguas residuales, donde los contenidos son mezclados y aireados con grandes volúmenes de aire inyectados al interior del estanque. En la medida que el aire burbujea hacia la superficie transfiere oxígeno a los líquidos del estanque.

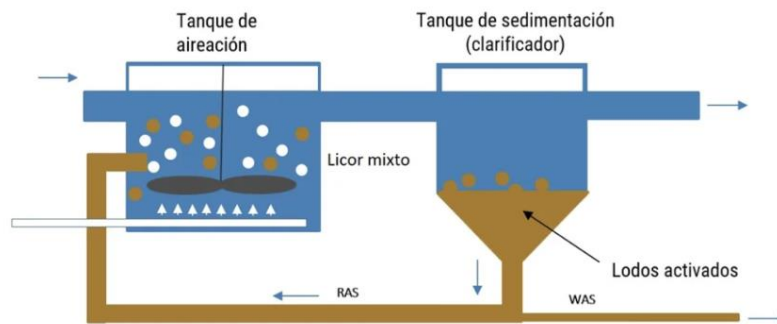


Figura 1. Diagrama de proceso de una PTAR con aireación extendida. (Reproducida). (Universal Water, 2021)



## 1.2 Generación de lodos residuales

Los lodos se producen en el tratamiento de aguas residuales y dependen del tipo de planta de tratamiento y de la operación de ésta. En una planta de aguas residuales domésticas, los lodos se generan principalmente en las etapas de tratamiento primario y tratamiento secundario.

Los lodos primarios se producen en la sedimentación primaria, en la cual se remueven sólidos sedimentables. La cantidad depende de la carga superficial o tiempo hidráulico de retención. En la sedimentación primaria con químicos se produce más lodo, producto de una mayor remoción y de la precipitación química de la materia coloidal.

Los lodos secundarios se producen en procesos de tratamiento biológicos que convierten residuos o sustratos 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. La cantidad producida depende de varios factores: eficiencia del tratamiento primario, relación de SST a DBO, cantidad de sustrato soluble, remoción de nutrientes y criterios de diseño del tratamiento. Los lodos secundarios se producen en los reactores biológicos y se sedimentan o separan del agua en los sedimentadores secundarios. Estos sedimentadores tienen en su base una tolva para almacenar y concentrar los lodos sedimentados. La extracción del lodo sedimentado se efectúa por carga hidráulica y por el accionamiento mecánico de las rastras que “barren” el fondo del tanque, empujando los lodos sedimentados a la tolva para su extracción.

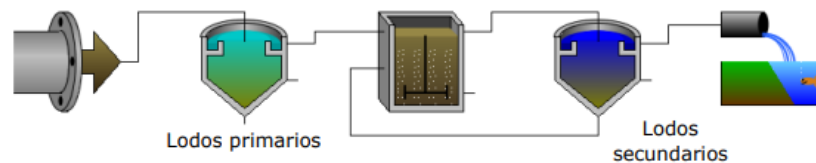


Figura 2. Generación de lodos de los tratamientos primario y secundario. (Reproducida). (Limón Macías, 2013)

## 2. Lodos

Los lodos son subproductos generados en el tratamiento de aguas residuales. Estos lodos contienen, tanto materia orgánica como inorgánica, y pueden incluir compuestos tóxicos y contaminantes patógenos.

### 2.1 Clasificación de lodos

Según (Chipana Pari, 2022) los lodos se pueden clasificar de la siguiente manera:





a) Por el nivel de tratamiento del agua residual:

- Lodo crudo: Se le denomina lodo crudo, a aquel que no ha sido tratado ni estabilizado que se pueda extraer de las plantas que se encargan del tratamiento de aguas residuales. Se tiene a producir la acidificación en el olor y digestión.
- Lodos primarios: Se denomina lodo primario aquellos que se extraen de la sedimentación primaria en donde se remueven los sólidos sedimentables, el cual consiste primordialmente en la arena fina, solido inorgánico y solido orgánico.
- Lodos activos: Estos lodos son el resultado del tratamiento biológico de las aguas residuales, el cual se caracteriza por la interacción de diferentes tipos de microorganismos.
- Lodos secundarios: Los lodos se generan en el tratamiento secundario biológico de las aguas residuales los cuales se convierten en residuos y substratos solubles de biomasa, el cual incluye la materia articulada que permanece en el agua posterior a la sedimentación primaria y que se agrega a la biomasa.
- Lodos digeridos: Los lodos digeridos se producen en los procesos de digestión aeróbica, de color negro, contienen cantidades relativamente grandes de gas, si está bien digerido prácticamente no produce olor o produce un olor relativamente débil que no es desagradable.

b) Por su manejo y disposición:

- Aprovechables: La mayoría de los lodos provenientes de los procesos de tratamientos aerobios y anaerobios provenientes de las plantas de tratamiento de aguas residuales, una vez estabilizados, pueden ser utilizados con compostaje (como abonos y acondicionadores, así como restauradores de suelo).
- No aprovechables: En esta categoría, son lodos que son generados en los sistemas de sedimentación primaria, los retenidos por cribado grueso y fino de las PTAR, sustancias relativamente inertes que debido a los altos costos que implica su recuperación no pueden ser reutilizados.
- Lodos peligrosos: Son aquellos que contienen compuestos que pueden afectar a la salud humana o al medio ambiente y deben eliminarse en zonas especiales con las debidas precauciones de seguridad. Los términos lodo y biosólido se intercambian con frecuencia. La principal distinción es que los biosólidos son lodos que han sido previamente estabilizados, es decir, que han sido tratados para reducir la capacidad de fermentación, la atracción de





vectores y la patogenicidad, reduciendo la cantidad de peligro y el grado de restricción de su uso.

## 2.2 Métodos de muestreo de lodos y biosólidos

Las presentes recomendaciones para el muestreo de lodos y biosólidos se encuentran descritas en la Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, donde se presentan las especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. El muestreo consiste en obtener una porción del volumen generado de lodo, la cual debe conservar la integridad de todos sus constituyentes desde el momento en que se toma la muestra (parte representativa de un universo o población finita obtenida para conocer sus características), hasta el final de su análisis o determinación en el laboratorio. El tiempo en que éstas permanecen estables dependerá de sus características y método de preservación utilizado.

El muestreo constituye una parte integral y fundamental para evaluar la calidad de los lodos y biosólidos, para su depósito final.

## 2.3 Características de los lodos

Las características de los lodos dependen principalmente de su origen, su tiempo de retención en las etapas de la PTAR y el tipo de tratamiento que han recibido.

### 2.3.1 Parámetros fisicoquímicos relevantes

- pH: El término pH es utilizado universalmente para determinar si una solución es ácida o básica, es la forma de medir la concentración de iones hidronio de una disolución. La escala de pH contiene una serie de números que varían de 0 a 14, estos valores miden el grado de acidez o basicidad de una disolución. Los valores inferiores a 7 y próximos a 0 indican aumento de acidez, los que son mayores de 7 y próximos a 14 indican aumento de basicidad, mientras que cuando el valor es 7 indica neutralidad.
- Alcalinidad: La alcalinidad es una medida de la capacidad de una muestra de neutralizar ácidos. La alcalinidad puede generarse por hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos de elementos como el calcio, magnesio, sodio, potasio o de amonio, siendo la causa más común los bicarbonatos de calcio y magnesio.
- Acidez: La acidez de un agua es su capacidad cuantitativa de neutralizar una base fuerte. La titulación con Hidróxido de Sodio NaOH mide la concentración de ácidos minerales como el ácido sulfúrico, el dióxido de carbono disuelto y de sales de hidrólisis ácida. La acidez se origina en la disolución de Dióxido de Carbono





atmosférico, en la oxidación biológica de la materia orgánica o en la descarga de aguas residuales industriales.

- **Humedad:** El agua es el único ingrediente que está prácticamente presente en casi todas las materias conocidas, tales como orgánicas e inorgánicas y su cantidad, estado físico y dispersión en estas afectan su aspecto, olor, sabor y textura.
- **Cenizas:** La incineración para destruir toda la materia orgánica de una muestra cambia su naturaleza; las sales metálicas de los ácidos orgánicos se convierten en óxidos o carbonatos o reaccionan durante la incineración para formar fosfatos, sulfatos o haluros y algunos elementos, como el azufre y los halógenos, pueden no ser completamente retenidos en las cenizas perdiéndose por volatilización.
- **Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO):** La Demanda Bioquímica de Oxígeno es la capacidad de oxígeno que requieren los microorganismos para oxidar la materia orgánica biodegradable en condiciones aerobias. En condiciones normales, esta demanda se cuantifica a 20°C, el ensayo estándar se realiza a cinco días de incubación y se conoce convencionalmente como DBO/5 se expresa en unidades de mg/L.
- **Demanda Química de Oxígeno (DQO):** La Demanda Química de Oxígeno se usa para medir el equivalente a la materia orgánica oxidable químicamente mediante un agente químico oxidante fuerte, por lo general Dicromato de Potasio, en un medio ácido y a alta temperatura. Para la oxidación de ciertos compuestos orgánicos recientes, se requiere la ayuda de un catalizador como el Sulfato de plata.
- **Sólidos totales:** Es el residuo que permanece en una cápsula después de evaporar y secar una muestra a una temperatura de 105 °C ± 2 °C.
- **Sólidos suspendidos totales:** Es el material constituido por los sólidos sedimentables, los sólidos suspendidos y coloidales que son retenidos por un filtro de fibra de vidrio con poro de 1.5 µm secado y llevado a masa constante con una temperatura de 105 °C ± 2 °C.
- **Sólidos totales volátiles:** Cantidad de materia orgánica e inorgánica que se volatiliza por el efecto de la calcinación a 550 °C ± 50 °C.
- **Sólidos disueltos totales:** Es el material soluble constituido por materia orgánica e inorgánica que permanece como residuo después de evaporar y secar una muestra previamente filtrada a través de un filtro de fibra de vidrio con poro de 1.5 µm a una temperatura de 105 °C ± 2 °C.
- **Sólidos fijos totales:** Son los que permanecen después de una calcinación a 550 °C ± 50 °C.
- **Sólidos sedimentables:** Son capaces de flotar o decantar con el agua en reposo, son eliminados fácilmente mediante procesos físicos o mecánicos.
- **Índice Volumétrico de Lodos (IVL):** Volumen del lodo sedimentado en una probeta de 1 L, después de 30 minutos (mL/L) dividido por la concentración de SSTLM y este resultado multiplicado por 1,000.



La composición fisicoquímica típica de los lodos producidos y tratados se puede presentar como:

Propiedad fisicoquímica	Lodo primario	Lodo secundario	Lodo primario digerido
Concentración de sólidos totales (%)	5-9	0.8-1.2	2-5
Sólidos volátiles (% de sólidos totales)	60-80	59-88	30-60
pH	5-8	6.5-8	6.5-7.5
Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	500-1,500	580-1,100	2,500-3,500
Nitrógeno (% de sólidos totales)	1.5-4	2.4-5	1.6-3
Fósforo P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (% de sólidos totales)	0.8-2.8	2.8-11	1.5-4
Óxido de potasio K <sub>2</sub> O (% de sólidos totales)	0-1	0.5-0.7	0-3
Óxido de silicio SiO <sub>2</sub> (% de sólidos totales)	15-20	-	10-20
Hierro (% de sólidos totales)	2-4	-	3-8
Ácidos orgánicos mg HAc/L	200-2,000	1,100-1,700	100-600
Celulosa (% de sólidos totales)	8-15	-	8-15
Proteína (% de sólidos totales)	20-30	32-41	15-20
Contenido energético (KJ de sólidos totales/Kg)	23,000-29,000	19,000-23,000	9,000-14,000

Tabla 1. Composición fisicoquímica típica de los lodos. (Reproducida). (Limón Macías, 2013)

### 2.3.2 Parámetros biológicos relevantes

- Coliformes totales y fecales: Los coliformes son bacilos cortos que se han definido como bacterias aerobias o anaerobias facultativas que fermentan la lactosa con producción de gas. Las principales especies de bacterias coliformes son el E. Coli y Enterobacter Aerogenes; no obstante, las especies que es posible que se ajusten a estos criterios, son más de veinte. El grupo de coliformes fecales incluye a los coliformes capaces de crecer a temperatura elevada 44.5 o 45 °C.
- Salmonella spp: La salmonella es un microorganismo que se adapta muy bien a los animales y a las personas. Cuando llega a los alimentos es capaz de multiplicarse en cualquier producto fresco a una velocidad muy elevada, ya que puede duplicar







su número cada 15 ó 20 minutos si la temperatura es elevada (superior a 20° C). Sin embargo, posee una escasa capacidad de multiplicación si no existe oxígeno.

- Huevos de Helmintos: Estos se emplean como un indicador de contaminación agregándolos a los análisis bacteriológicos, ya que las bacterias son más fáciles de eliminar en el sistema de tratamiento, a diferencia de estos parásitos, que son muy resistentes y en ocasiones no se eliminan; solamente cambian de estrato, ya que pasan del agua al sedimento. El helminto es un parásito que puede infectar tanto a humanos como a animales. Los daños que ocasionan estos organismos son considerables; un solo huevo es capaz de producir enfermedades intestinales e incluso cardíacas.

## 2.4 Normatividad para lodos residuales en México

La normatividad mexicana en materia de lodos residuales se ha ido transformando e incrementando debido a la creciente necesidad de dar solución a la problemática de su manejo. El gobierno federal ha emprendido diversas acciones, una de las más interesantes es la relativa a la formulación de una normatividad, enfocada a rescatar a los lodos residuales municipales de la clasificación de residuos peligrosos y darles una nueva definición, la de biosólidos, con la que se pretende dar aprovechamiento a estos residuos (CONAGUA, 2015).

### 2.4.1 Normas Oficiales Mexicanas para establecer la no-peligrosidad del lodo residual

Los lodos residuales de las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales no se encuentran considerados dentro de esta norma, sin embargo, la autoridad exige a los generadores de este residuo que den constancia de no peligrosidad. Para establecer la no peligrosidad del lodo residual se aplican las siguientes normas (CONAGUA, 2015):

- NOM-052-SEMARNAT-2005: Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos. Los residuos peligrosos, en cualquier estado físico, por sus características corrosivas, reactivas, explosivas, inflamables, tóxicas, y biológico-infecciosas, y por su forma de manejo pueden representar un riesgo para el equilibrio ecológico, el ambiente y la salud de la población en general, por lo que es necesario determinar los criterios, procedimientos, características y listados que los identifiquen (Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2005).
- NOM-053-SEMARNAT-1993: Que establece el procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente (Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 1993).







### 2.4.2 Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002

La NOM-004-SEMARNAT-2002 para Lodos y Biosólidos con las Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2002).

Incluye no sólo los lodos residuales generados en las plantas de tratamiento, sino también los provenientes de los desazolves de los sistemas de alcantarillado urbano o municipal y de las plantas potabilizadoras. El primer paso en la aplicación de esta norma es que los generadores de lodos deben de deshidratar el lodo. En segundo lugar, deben controlar la atracción de vectores, lo cual se logra con una reducción de sólidos volátiles por lo menos de 38 por ciento, demostrando su efectividad para lo cual se menciona en el Anexo I de dicha norma varias alternativas de tratamiento para alcanzar este propósito. Para efectos de esta Norma Oficial Mexicana los biosólidos se clasifican en tipo: excelente y bueno en función de su contenido de metales pesados; y en clase: A, B y C en función de su contenido de patógenos y parásitos. Para llevar a cabo esta clasificación se establecen en esta norma los límites máximos permisibles de metales pesados, patógenos y parásitos (CONAGUA, 2015).

Contaminante (determinados en forma total)	Excelentes (mg/Kg en base seca)	Buenos (mg/Kg en base seca)
Arsénico	41	75
Cadmio	39	85
Cromo	1,200	3,000
Cobre	1,500	4,300
Plomo	300	840
Mercurio	17	57
Níquel	420	420
Zinc	2,800	7,500

Tabla 2. Límites máximos permisibles para metales pesados en biosólidos. (Reproducida). (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2002)

Clase	Indicador bacteriológico de contaminación	Patógenos	Parásitos



	Coliformes fecales NMP/g en base seca	Salmonella spp. NMP/g en base seca	Huevos de Helmintos/g en base seca
A	Menor de 1,000	Menor de 3	Menor de 1(a)
B	Menor de 1,000	Menor de 3	Menor de 10
C	Menor de 2,000,000	Menor de 300	Menor de 35

Tabla 3. Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos. (Reproducida). (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2002)

El aprovechamiento de los biosólidos, se establece en función del tipo y clase, como se especifica en la siguiente tabla y su contenido de humedad hasta el 85% (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2002):

Tipo	Clase	Aprovechamiento
Excelente	A	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Usos urbanos con contacto público directo durante su aplicación.</li> <li>• Los establecidos para clase B y C.</li> </ul>
Excelente o bueno	B	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Usos urbanos sin contacto público directo durante su aplicación.</li> <li>• Los establecidos para clase C.</li> </ul>
Excelente o bueno	C	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Usos forestales.</li> <li>• Mejoramiento de suelos.</li> <li>• Usos agrícolas.</li> </ul>

Tabla 4. Aprovechamiento de biosólidos. (Reproducida). (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2002)

Para el muestreo y análisis de lodos y biosólidos se debe realizar en laboratorios acreditados para demostrar el cumplimiento de la presente Norma Oficial Mexicana y deberá conservar los registros por los menos los siguientes cinco años posteriores a su realización (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2002).

La frecuencia de muestreo y análisis para los lodos y biosólidos se realizará en función del volumen de lodos generados como se establece a continuación:

Volumen generado por año (Ton/Año) en base seca	Frecuencia de muestreo y análisis	Parámetros a determinar
Hasta 1,500	Una vez al año	Metales pesados, indicador bacteriológico de

		contaminación, patógenos y parásitos.
Mayor de 1,500 hasta 15,000	Una vez por semestre	Metales pesados, indicador bacteriológico de contaminación, patógenos y parásitos.
Mayor de 15,000	Una vez por trimestre	Metales pesados, indicador bacteriológico de contaminación, patógenos y parásitos.

Tabla 5. Frecuencia de muestreo y análisis para lodos y biosólidos. (Reproducida). (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2002)

### 3. Tecnologías para el tratamiento de lodos

Los objetivos del tratamiento de lodos están dirigidos a lograr su estabilización para garantizar una degradación controlada de las sustancias orgánicas que contienen, y eliminar el olor, disminuir el volumen e inactivar organismos patogénicos para su posible utilización posterior o disposición final.

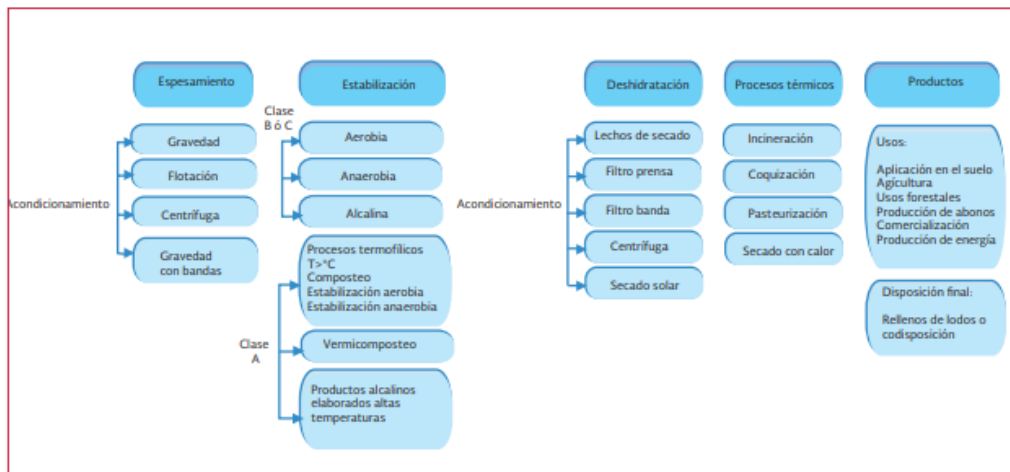


Figura 3. Tecnologías para el tratamiento de lodos residuales. (Reproducida). (CONAGUA, 2015)

#### 3.1 Espesamiento

Los lodos que se generan en el tratamiento del agua tienen un alto contenido de agua que hace su volumen muy grande y causa dificultades en su manejo. El objetivo del espesamiento de lodos es reducir su volumen eliminando agua y aumentando así la



concentración en sólidos. Otro objetivo del espesamiento es reducir los costos de inversión y operación de los sistemas de tratamiento de lodos.

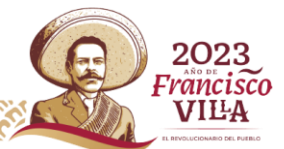
Reducción del volumen del lodo	Proceso	Fuerzas físicas aplicadas	Contenido de agua en el lodo espesado
Hasta 35% del inicial	Espesamiento	Gravedad, filtración, flotación, aceleración centrífuga.	85-95%
35-15% del volumen inicial	Deshidratación	Sobrepresión o vacío, filtración, campos de gravedad reforzados artificialmente.	60-85%
15-5% del volumen inicial	Secado	Para lodo tratado biológicamente: evaporación natural, calentamiento ligero.	40-60% 0-60%

Tabla 6. Reducción del volumen del lodo mediante tratamientos físicos. (Reproducida). (CONAGUA, 2015)

Dependiendo de las fuerzas físicas utilizadas en el proceso de espesamiento se han desarrollado diferentes métodos para realizarlo: espesamiento por gravedad en tanques fijos, espesamiento por gravedad en bandas, espesamiento por flotación con aire disuelto, centrífugas y los menos comunes espesamiento rotatorio y espesamiento por membranas.

### 3.1.1 Acondicionamiento de lodos

El acondicionamiento tiene un efecto sobre la eficiencia del proceso de espesamiento o deshidratación. Una evaluación del proceso de acondicionamiento, por lo tanto, tiene en cuenta los costos de inversión y los costos de operación y mantenimiento de todo el sistema; el impacto de la corriente en otros procesos de la planta, en los efluentes y en la calidad del aire resultante.



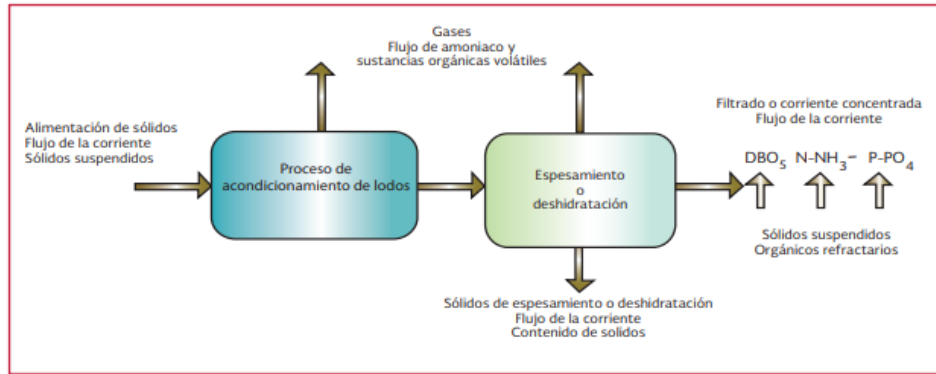


Figura 4. Parámetros básicos para la evaluación de un sistema de acondicionamiento de lodos. (Reproducida). (CONAGUA, 2015)

El tipo y dosis del agente químico necesario para el acondicionamiento depende de las características del lodo residual; manejo de los sólidos; de los procesos antes y después del acondicionamiento y del proceso de mezclado después de la adición del agente. Las propiedades de los lodos que deben considerarse son: el tipo u origen del lodo, la concentración de los sólidos, la edad de los lodos, el pH y la alcalinidad. El lodo primario, el lodo residual del proceso de lodos activados y los biosólidos estabilizados son buenos indicadores de la dosis de acondicionador requerida. La concentración de sólidos afecta la dosis y la dispersión del agente acondicionador. El pH y la alcalinidad afectan el desempeño de los agentes acondicionadores, cuando se utilizan acondicionadores inorgánicos.

La dosis requerida para algunos lodos se determina en el laboratorio. Las técnicas utilizadas para la selección de la dosis del reactivo químico son: la prueba del embudo Buchner para determinar la resistencia específica del lodo, la prueba para determinar el tiempo de succión capilar (TSC), la prueba estándar de jarras.

El acondicionamiento requiere una mezcla completa del lodo con el coagulante. El mezclado no debe romper los flóculos formados y el tiempo de retención debe ser mínimo, de modo que llegue a la unidad de deshidratación tan pronto como sea posible. El equipo de mezclado varía dependiendo del método de deshidratación. El filtro de bandas requiere de un tanque de mezcla y floculación separados. En un filtro prensa de placas el acondicionador se agrega directamente en la línea de alimentación de lodos y para la centrífuga se utiliza un mezclado en línea. La forma de mezclado se determina durante el diseño para considerar al menos dos ubicaciones para la adición de los acondicionadores químicos.

El acondicionador más utilizado en la práctica es el cloruro férrico solo o en combinación con cal, aunque el sulfato ferroso y las sales de aluminio también se utilizan.



### 3.1.2 Espesamiento por gravedad

Este mecanismo funciona con la fuerza de la gravedad. Para ello, el diseño del tanque es de forma cónica en la base a fin de sedimentar los lodos y algunas veces también se requiere de la ayuda de floculantes para elevar el peso específico. En ese sentido, en la base, se ubicará la válvula de salida de lodos. Cabe anotar que el diseño debe considerar el tiempo de salida de los lodos a fin de no generar olores o descomposición anaeróbica. El espesamiento por gravedad en tanques fijos consiste en la separación del agua de los lodos en una fase superior líquida y otra inferior sólida, bajo la influencia de la gravedad. Para mezclas de lodo primario y secundario se utiliza frecuentemente el espesamiento por gravedad. Se obtiene un lodo con un contenido de agua de 94 a 96 por ciento.

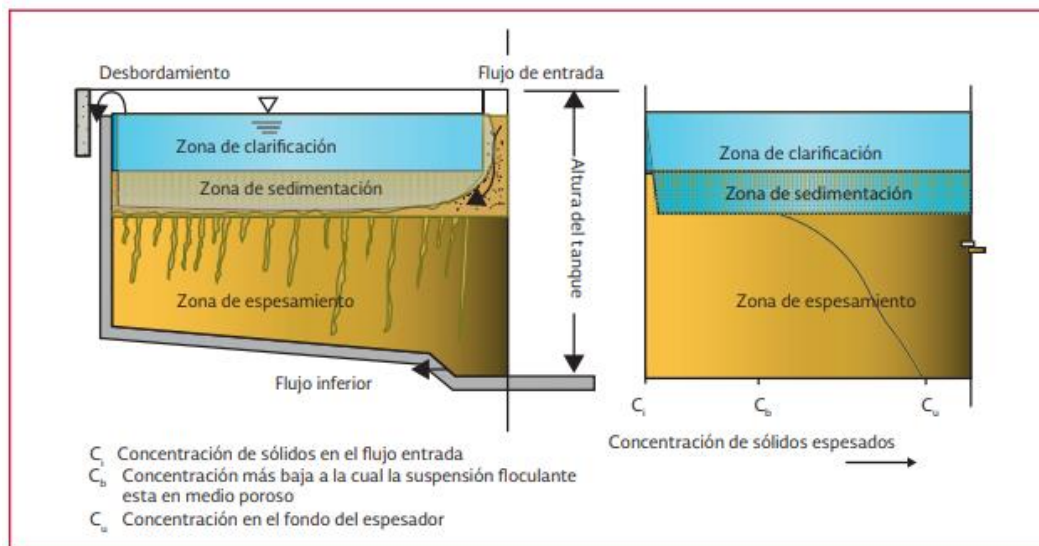


Figura 5. Perfil de concentraciones típicas de los lodos de aguas residuales municipales en un espesador de gravedad en operación continua. (Reproducida). (CONAGUA, 2015)



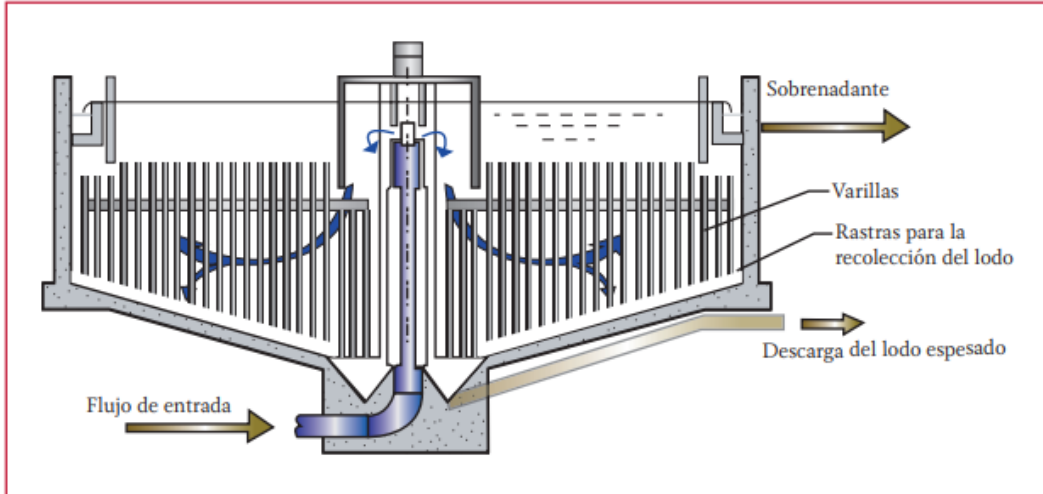


Figura 6. Espesador estático gravitacional de lodo con sistema de varilla. (Reproducida). (CONAGUA, 2015)

### 3.1.3 Espesamiento por flotación

La flotación es un procedimiento para separar partículas sólidas de una fase líquida. La flotación de los sólidos se crea normalmente por la introducción de aire en el sistema. Las burbujas finas se adhieren o son absorbidas por los sólidos que se levantan a la superficie. Las partículas con mayor densidad que la de los líquidos se pueden separar por flotación. Existen tres versiones diferentes del proceso de flotación: flotación con aire disuelto, flotación al vacío y flotación con dispersión de aire. Solamente se utiliza la flotación con aire disuelto para el espesamiento de lodos.

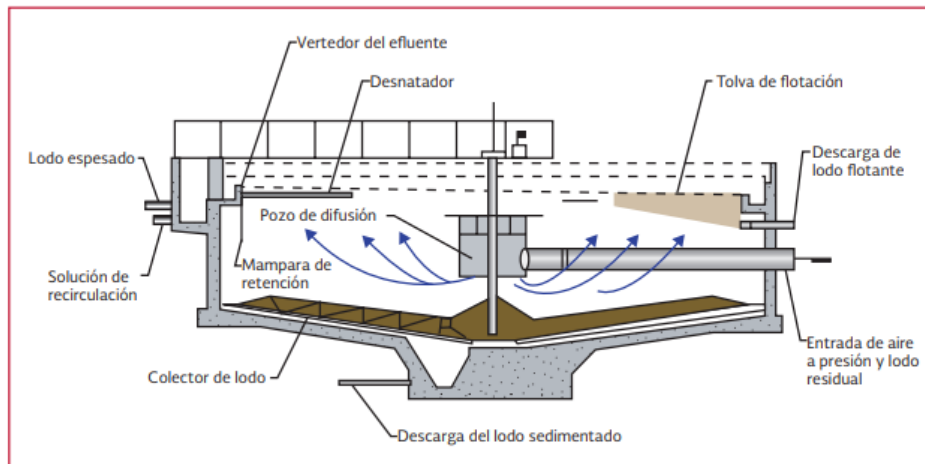


Figura 7. Unidad típica de espesamiento por flotación con aire disuelto para lodos activados residuales. (Reproducida). (CONAGUA, 2015)

### 3.1.4 Espesamiento por centrifuga

La centrifugación es una aceleración de la sedimentación a través del uso de la fuerza centrífuga. En un tanque de sedimentación, los sólidos caen hacia el fondo y el líquido se mantiene en la parte superior. Las centrifugas se utilizan para espesamiento y deshidratación. El uso de las centrifugas en el proceso de espesamiento es limitado, normalmente se utiliza para lodo residual del sistema de lodos activados. Las centrifugas más utilizadas para el espesamiento de lodo son las de tazón sólido o de tornillo.

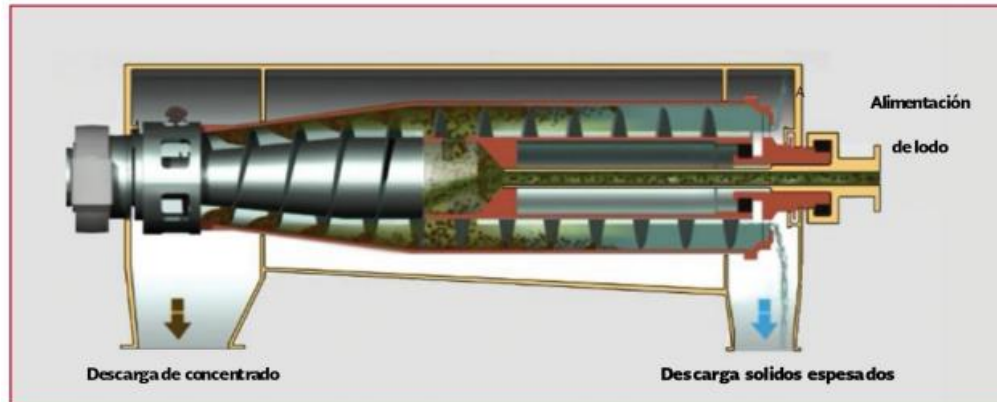


Figura 8. Esquema de una centrifuga para el espesamiento de lodos. (Reproducida). (CONAGUA, 2015)

### 3.1.5 Espesamiento por gravedad con bandas

El espesamiento por gravedad en bandas es un desarrollo relativamente reciente del proceso de espesamiento. El lodo se concentra al liberar agua drenándola por gravedad a través de una banda horizontal. Se requiere que el lodo se acondicione químicamente utilizando polímero. Los espesadores por gravedad en bandas son apropiados para el espesamiento de lodos activados y de lodos estabilizados para reducir el volumen antes de su transportación al sitio de disposición final. Ocasionalmente se utilizan para concentrar lodos primarios y algunos lodos químicos que particularmente sean difíciles de espesar.

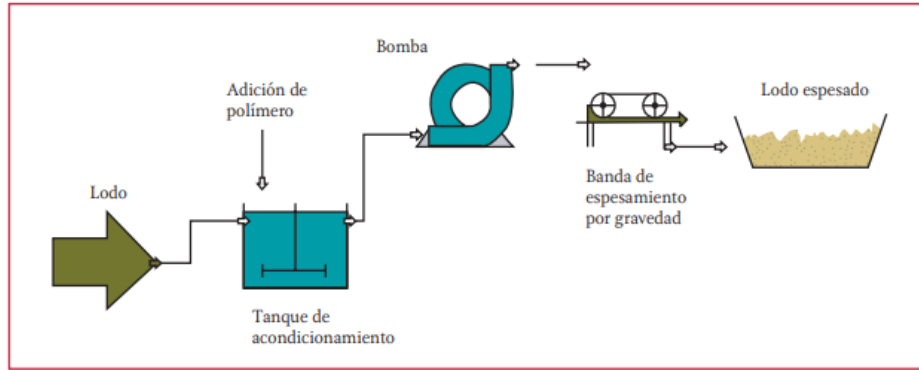


Figura 9. Diagrama de flujo de un sistema de espesamiento por gravedad en bandas. (Reproducida). (CONAGUA, 2015)

### 3.2 Estabilización

Debe entenderse que el proceso de estabilización de los lodos permite la reducción del contenido de materia orgánica con el fin de reducir los patógenos, eliminar los olores, y reducir

o eliminar la capacidad de fermentación de la misma. Bajo este considerando de inestabilidad, los lodos son aún atracción para los vectores y liberación de olores (Chipana Pari, 2022).

#### 3.2.1 Estabilización aerobia

Este proceso está orientado al tratamiento de los lodos mediante la aplicación de aire para eliminar los patógenos de la parte fermentable. Para ello, generalmente, se puede usar turbinas mecánicas sumergidas. Mediante este método, habrá tanta oxidación directa de la materia orgánica como la respiración endógena de la biomasa.

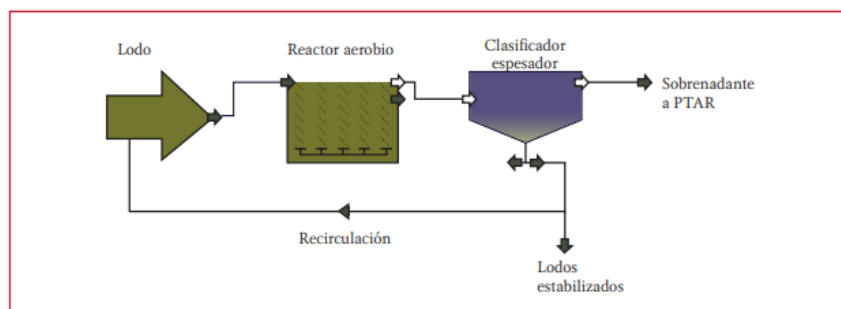


Figura 10. Diagrama de flujo del proceso de estabilización convencional continua. (Reproducida). (CONAGUA, 2015)

### 3.2.2 Estabilización anaerobia

La digestión anaerobia está basada en un proceso biológico, donde la materia orgánica constituye un insumo básico para el proceso de biodegradación. De la misma forma, la ausencia de oxígeno es necesaria para activar las bacterias anaeróbicas, entre otros elementos. Los lodos de las aguas residuales domésticas de las empresas mineras, luego de pasar por los tratamientos primarios y/o secundarios constituyen un insumo perfecto para ser sometido a la digestión anaerobia.

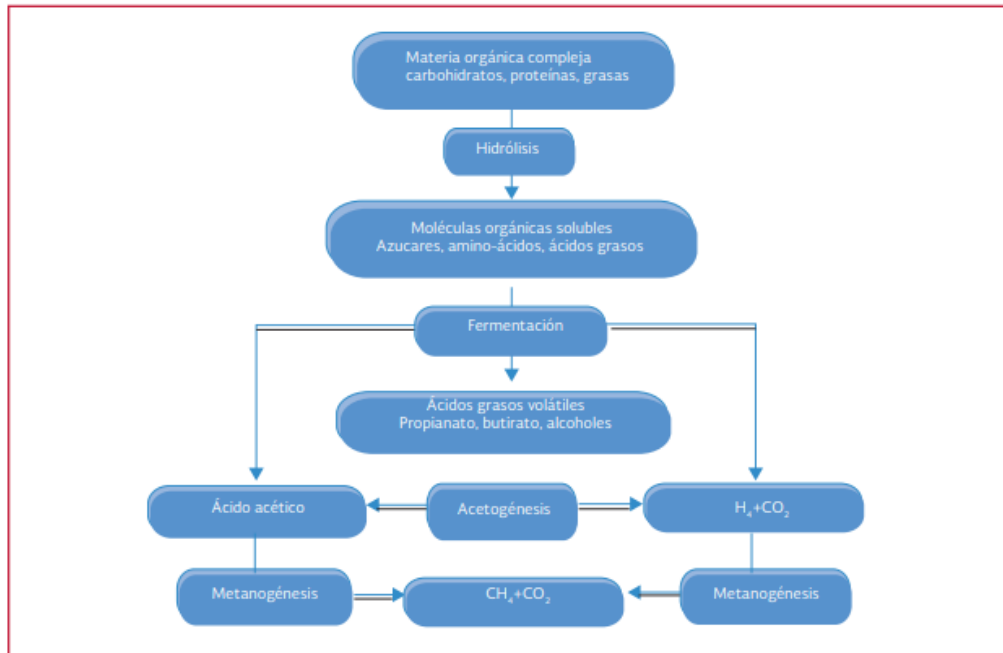


Figura 11. Proceso simplificado de la estabilización anaerobia. (Reproducida). (CONAGUA, 2015)

En un sistema de estabilización de una etapa, la fase de reacción anaerobia toma lugar en un solo tanque. La forma y la configuración de los reactores afectan su rendimiento. Las consideraciones de diseño, incluyen la forma en conjunto, tipo de cubierta, la pendiente del fondo, la configuración del domo de gas, alimentación del lodo, y los sistemas de extracción de lodo. El sellado y revestimiento del reactor es otra consideración importante del diseño porque afecta el mantenimiento y la duración del reactor.

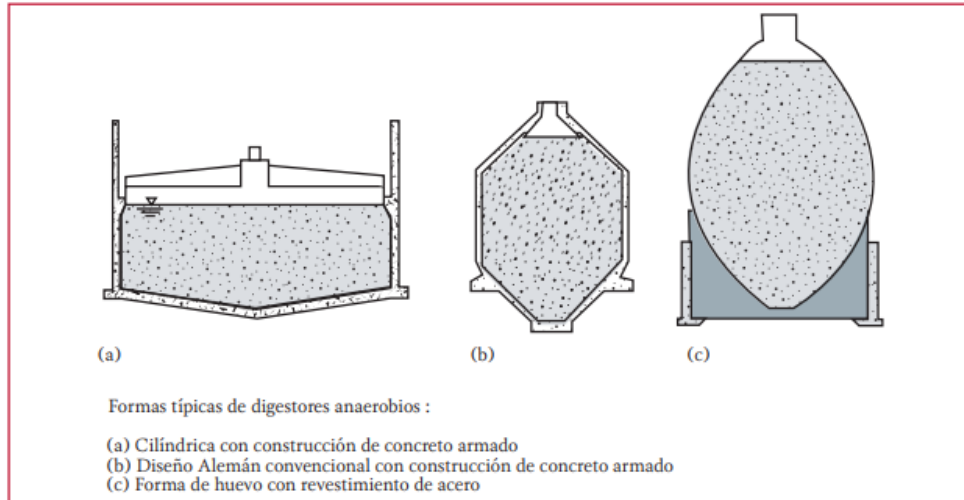


Figura 12. Formas típicas de reactores anaerobios. (Reproducida). (CONAGUA, 2015)

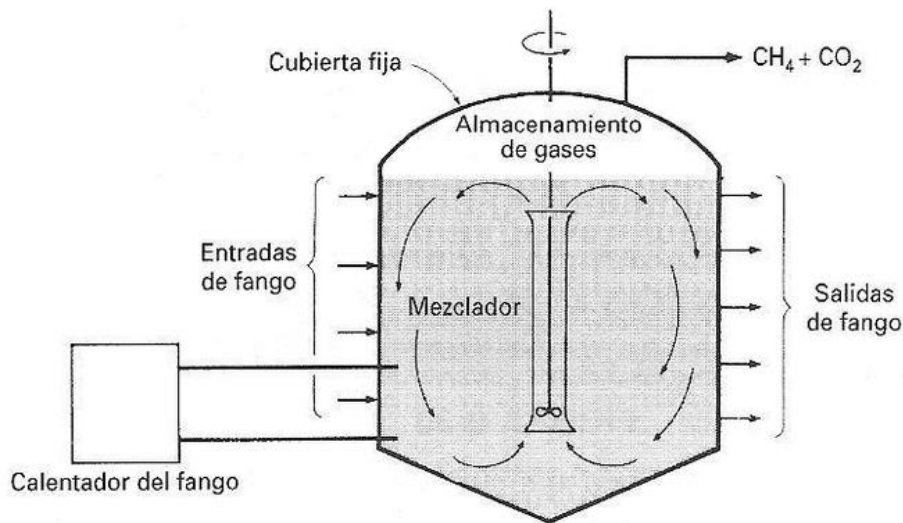


Figura 13. Digestor anaerobio de fase única, tanque de agitado continuo. (Reproducida). (González, Ríos Bolívar, & Gómez, 2008)

### 3.2.3 Estabilización alcalina

El proceso de estabilización alcalina consiste en adicionar cal u otro material alcalino al lodo para elevar el pH y requiere un tiempo de contacto específico. A un pH superior a 12 y con suficiente tiempo de contacto, los patógenos y microorganismos pueden ser inactivados o destruidos. Las características físicas y químicas del lodo también se alteran por las





reacciones que ocurren. Durante el contacto del lodo con la cal las moléculas complejas se transforman por medio de reacciones de hidrólisis y saponificación.

### 3.2.4 Estabilización por composteo

El composteo es un proceso de estabilización biológica de la materia orgánica en presencia de oxígeno y bajo condiciones controladas. Durante el composteo moléculas orgánicas complejas se transforman en compuestos simples, a través de la actividad y crecimiento de las bacterias, actinomicetos y hongos. Durante el proceso los microorganismos utilizan una porción del carbono y nitrógeno para la síntesis de materiales celulares, y durante su actividad y desarrollo generan calor incrementando la temperatura llegando a predominar en el proceso los microorganismos termofílicos.

### 3.2.5 Estabilización por vermicomposteo

El vermicomposteo consiste en la estabilización de la materia orgánica por medio de lombrices y microorganismos, mediante este proceso se generan biosólidos estabilizados con gran valor como acondicionadores de suelo, que contienen nutrientes y micro nutrimentos. El objetivo de esta tecnología es alcanzar la reducción de patógenos y producir un biosólido con calidad agrícola para ser usado como abono orgánico.

## 3.3 Deshidratación

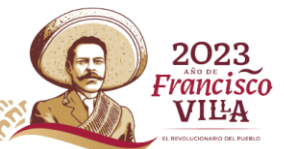
La deshidratación es la eliminación del agua de los lodos de las PTAR para lograr una reducción de mayor volumen que el conseguido por el espesamiento. La deshidratación se realiza principalmente para reducir los costos de inversión y de operación que implica el manejo del lodo después de la estabilización.

### 3.3.1 Lechos de secado

Cuando se dispone de terreno, la deshidratación de lodos por medios naturales puede ser muy atractiva, tanto desde el punto de vista de costos de inversión y operación. Teniendo en cuenta el aumento de los costos de la energía eléctrica, este método es aún más atractivo. Dos tipos de sistemas de secado se clasifican como naturales: lechos de secado y secado en lagunas.

Los lechos de secado se toman por una pared de 0.3 a 1.0 m de alto y un sistema de filtración

o drenaje poroso. El sistema de drenaje puede estar formado por varias capas intercaladas de arena y grava, combinaciones de arena y grava con cemento, rejillas de metal ranuradas, o de un medio poroso permanente. Entre los equipos y accesorios requeridos se







encuentran: tuberías de alimentación de lodos, medidores de flujo, tanques para reactivos químicos, tuberías, bombas dosificadoras, drenaje de lixiviados, líneas de recirculación, equipo mecánico para la recolección de lodos y en algunos casos una cubierta o techo.

### 3.3.2 Filtro prensa de bandas

El filtro prensa de bandas que se usa para la deshidratación de lodos tiene dos o tres bandas de movimiento y una serie de rodillos. Generalmente el lodo se acondiciona antes de ingresar al filtro prensa de bandas. El agua se remueve de los lodos a través de la banda o de la estructura de filtración mediante una combinación de drenado por gravedad y compresión. Después de la deshidratación, la torta del lodo se descarga por medio de la una banda transportadora o tolva.

### 3.3.3 Filtro prensa de placas

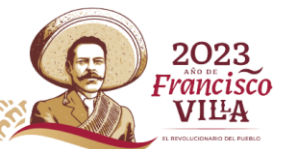
La principal ventaja de los filtros prensa de placas es que produce una torta más seca que la producida por otros sistemas de deshidratación. Si el contenido de sólidos de la torta debe ser mayor que 35 por ciento, entonces este filtro prensa puede ser una buena opción. El filtro prensa de placas puede adaptarse a un amplio rango de características de los lodos y produce un filtrado limpio para recircularse a la planta de tratamiento.

Las principales desventajas de estos filtros son: altos costos de capital, mayor cantidad de químicos para el acondicionamiento, en algunos casos se requiere un recubrimiento especial, la remoción manual de la torta por adherencia y altos costos de operación y mantenimiento.

Varios tipos de filtros prensa de placas se han utilizado para la deshidratación de lodos. Los dos principales tipos de filtros prensa de placas son el de volumen fijo y el de volumen variable.

### 3.3.4 Centrifuga

Los equipos de centrifugación de canastilla sólida utilizados para el espesamiento de lodos también pueden usarse para la deshidratación de lodos y biosólidos. Los dos tipos de centrifugas utilizadas para la deshidratación de lodos son la de tazón sólido y de alto torque. El proceso de centrifugación es similar al que ocurre en un sedimentador o espesador. La centrifuga gira a alta velocidad, esto crea una gran aceleración, que genera la separación. Tradicionalmente la aceleración está referida a una “fuerza g”. La “fuerza g”, se mide en función de la aceleración de la tierra, es la gravedad  $9.81 \text{ m}^*\text{s}^{-2}$ . (1 fuerza g =  $9.81 \text{ m}^*\text{s}^{-2}$ ). La mayoría de las centrifugas operan entre 153 a 306  $\text{m s}^{-2}$ . (1500 a 300 g).





### 3.3.5 Secado solar

El secado de lodos es un método que tradicionalmente se utiliza para disminuir el volumen del lodo en las plantas de tratamiento. La radiación solar calienta la superficie de lodo. La elevación de la temperatura propicia el proceso de transferencia del agua del lodo al aire. Sin embargo, la superficie del lodo se seca y las capas interiores del lodo permanecen húmedas, es lo que ocurre en los lechos de secado.

El término secado solar de lodos se aplica al utilizar la radiación solar para propiciar el secado de lodos, adicionando el volteo con el fin de obtener un secado homogéneo en toda la superficie del lodo y un producto granular que de acuerdo a sus características se podría utilizar.

Entre más caliente sea el aire, más vapor de agua puede transportarse. Sin embargo, la presión parcial de vapor en el aire eleva la cantidad de agua disuelta en el aire y disminuye el gradiente disponible para el secado. El secado siempre ocurre, aunque se tenga poco sol. Los días muy húmedos son los que más interfieren con el proceso de secado.

## 4. Aprovechamiento y disposición final de los lodos

La evaluación de alternativas para el tratamiento y disposición final de lodos de depuradora suele ser compleja, debido a la interacción de aspectos técnicos, económicos, ambientales y legales. Aunque compleja y costosa, la eliminación final de lodos a menudo se descuida en la concepción y diseño de sistemas de tratamiento de aguas residuales. A veces los operadores necesitan encargarse de la eliminación final de los lodos de forma urgente, con toda la carga de altos costos, dificultades operativas e impactos ambientales indeseables que podrían socavar los beneficios del sistema de tratamiento de aguas residuales (von Sperling & de Lemos Chernicharo, 2005).

La generación de lodos de una planta de tratamiento de aguas residuales trae beneficios ambientales y también de ingreso económico, entre los usos que se le puede dar se encuentra la generación de energía y el aprovechamiento en la agricultura, luego de pasar por el proceso de compostaje o vermiestabilización (Chipana Pari, 2022).



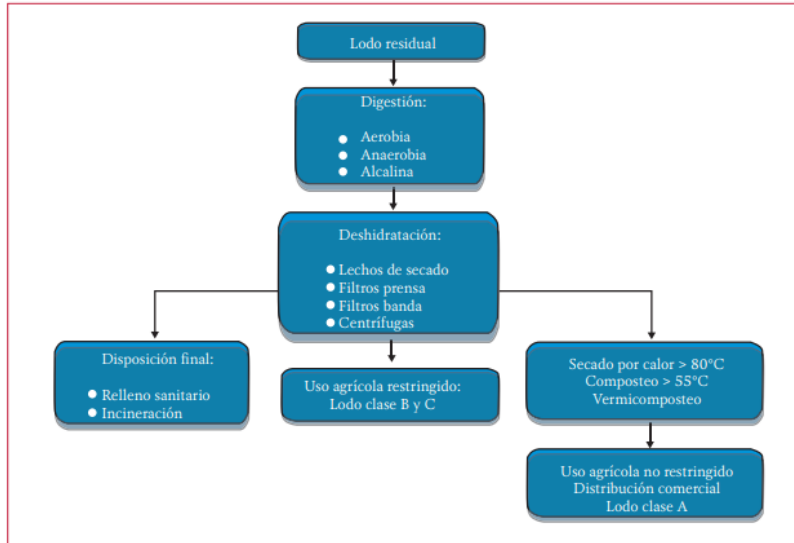


Figura 14. Tratamientos para obtener lodos clase A, B y C. (Reproducida). (CONAGUA, 2015)

#### 4.1 Agricultura

El uso del lodo en el suelo y en la agricultura es importante debido a que los lodos municipales tienen un gran contenido de nutrimentos (nitrógeno y fósforo) y materia orgánica, por otra parte la problemática del campo en México acerca del empobrecimiento del suelo por el uso agrícola intensivo, muestra al lodo como una alternativa para su uso en el acondicionamiento de suelo, sin embargo es necesario el control de las aplicaciones de lodo mediante una normatividad que incluya no sólo los límites máximos, sino también prácticas agronómicas adecuadas.

Esta forma de uso del lodo es muy frecuente en las plantas de tratamiento de aguas residuales en México. Existen factores en el suelo que ayudan a controlar el efecto contaminante de los patógenos, metales pesados y tóxicos orgánicos contenidos en el lodo residual cuando son aplicados al suelo. Estos aspectos deben ser analizados en los sitios de disposición para poder tomar medidas de control y adecuar las dosis necesarias.

#### 4.2 Producción de energía

El biogás es generado a partir de sustratos que contienen materia orgánica, proteínas, grasas, celulosas y hemicelulosas como principalmente componentes. Su degradación se lleva a cabo mediante procesos como son: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. El biogás es un subproducto de la estabilización anaerobia de las aguas y lodos residuales. Los lodos residuales generados en las plantas en plantas de tratamiento producen biogás en la estabilización anaerobia de lodos (gas de reactores), y en los rellenos

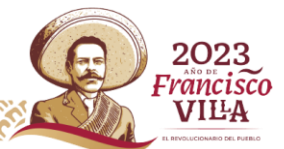


de lodos, si se utiliza esta tecnología como método de disposición final. Otra forma de producir energía a partir de lodos residuales es durante la combustión del lodo. El gas de reactores es un combustible rico en metano producido como un subproducto de la descomposición microbiana de la materia orgánica durante los procesos de estabilización anaerobia. Los principales componentes del gas de reactores son el metano y el dióxido de carbono.

### 4.3 Disposición de lodos en rellenos sanitarios

Cuando las características de lodo no son adecuadas para su uso o aplicación en suelo una alternativa de disposición final son los rellenos de lodos. Los rellenos de lodo son instalaciones de disposición que permiten el almacenamiento de los residuos cubiertos por una capa de suelo que debe ser de por lo menos 20 a 30 cm de espesor, aislados del ambiente. El diseño debe tener como meta principal reducir la generación del lixiviado, así como prevenir su ingreso, sin tratamiento, al medio ambiente.

Los lixiviados son líquidos con sustancias contaminantes que se generan por la disposición de los lodos con alto contenido de humedad, por reacciones químicas dentro del mismo y por el ingreso de aguas de escurrimiento. Otra fuente de contaminación ambiental es el gas que se genera dentro del relleno como producto de la descomposición del material orgánico o por emisiones de sustancias volátiles, sin embargo, este último puede utilizarse como una fuente de energía para producir electricidad o calor. También al relleno se pueden llevar cenizas, arenas y otros desechos sólidos que se generen en la planta de tratamiento.





### Procedimiento y descripción de las actividades realizadas

Para este proyecto, se realizaron las siguientes actividades:

- Muestreo y caracterización del lodo residual y de ciertos cuerpos de agua del proceso de tratamiento.
- Cálculo para la cuantificación de lodo generado.
- Cálculo y diseño de los espesadores y biodigestores para ambas plantas.

A continuación, se presentan las técnicas para el proceso de muestreo y caracterización:

Proceso o determinación	Técnica	No. anexo
Muestreo	NOM-004-SEMARNAT-2002	1
Temperatura, pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto y sólidos disueltos totales	-----	2
DQO	Manual de instrucciones HANNA HI839800 y HANNA HI83314	3
Nitrógeno total	Manual de instrucciones HANNA HI839800 y HANNA HI83314	4
Fósforo total	Manual de instrucciones HANNA HI839800 y HANNA HI83314	5
Alcalinidad total	NMX-AA-036-SCFI-2001	6
ST, STV, SST y SSV	NMX-AA-034-SCFI-2015	7
Sólidos sedimentables	NMX-AA-004-SCFI-2013	8
Densidad y porcentaje de humedad	-----	9
Índice volumétrico de lodos	-----	10

Tabla 7. Técnicas para el muestreo y la determinación de parámetros fisicoquímicos. (Elaboración propia).

### Cálculo para la cuantificación de lodo generado y diseño del tren de tratamiento de lodos

Para esto se utilizó el software Excel y de acuerdo con las ecuaciones del capítulo 31, 34, 47, 49 y 50 del libro (von Sperling & de Lemos Chernicharo, 2005) se pudieron realizar los cálculos para la cuantificación de los lodos generados y el diseño de los espesadores, los biodigestores y los lechos de secado para ambas plantas.



## Resultados

### Caracterización

Para la caracterización se realizaron muestreos en los siguientes puntos de ambas plantas (28 L/s y 40 L/s):

- Afluente de agua cruda hacia la zona de rejillas y desarenado.
- Efluente final de agua tratada.
- Lodos activados provenientes del reactor de oxidación total.
- Lodo residual de la purga del sedimentador secundario.

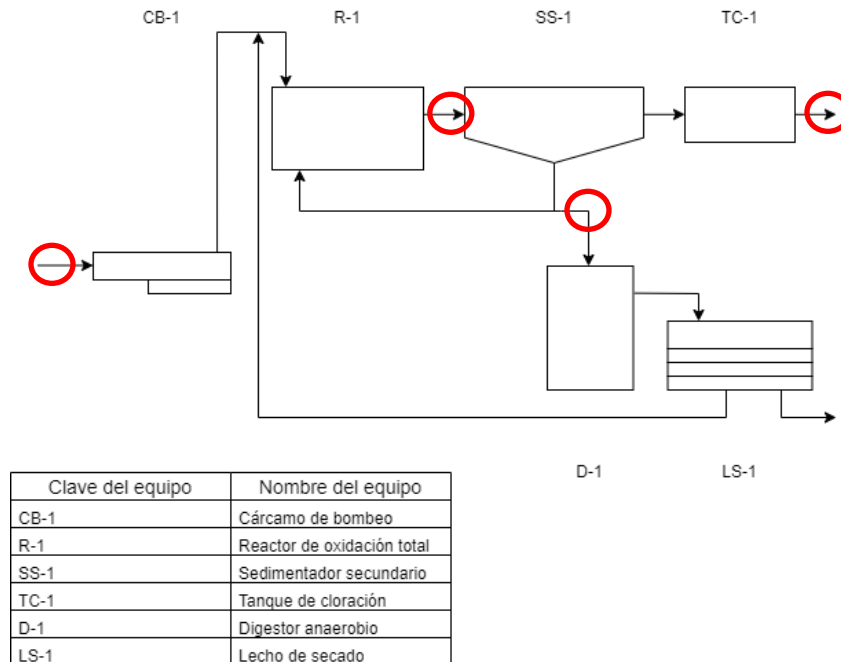


Figura 15. Zonas de muestreo para la caracterización de agua y lodos. (Elaboración propia).

A continuación, se presentan los resultados de los análisis de cada una de las zonas de muestreo:

- Afluente de agua cruda hacia la zona de rejillas y desarenado:

Parámetro	Planta con capacidad de 28 L/s	Planta con capacidad de 40 L/s
-----------	--------------------------------	--------------------------------





Sólidos suspendidos totales (mg/L)	353	353
DQO (mg/L)	865	865

Tabla 8. Resultados de los análisis del afluente de agua cruda. (Elaboración propia).

- Efluente final de agua tratada.

Parámetro	Planta con capacidad de 28 L/s	Planta con capacidad de 40 L/s
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	18.41	19.56
DQO (mg/L)	65	67

Tabla 9. Resultados de los análisis del efluente final de agua tratada. (Elaboración propia).

- Lodos activados provenientes del reactor de oxidación total.

Parámetro	Planta con capacidad de 28 L/s	Planta con capacidad de 40 L/s
Sólidos suspendidos del licor mezclado (mg/L)	2,880	3,300
Sólidos suspendidos volátiles del licor mezclado (mg/L)	2,340	2,500
DQO (mg/L)	4,987	5,422

Tabla 10. Resultados de los análisis de los lodos activados provenientes del reactor de oxidación total. (Elaboración propia).

- Lodo residual de la purga del sedimentador secundario:

Parámetro	Planta con capacidad de 28 L/s	Planta con capacidad de 40 L/s
Temperatura (°C)	30.65	30.95
pH	7.09	7.01
Conductividad eléctrica (µS/cm)	1,370	1,330
Oxígeno disuelto (mg/L)	0.91	0.69
DQO (mg/L)	5,042	5,606
Nitrógeno total (mg/L)	924	948
Fósforo total (mg/L)	65.2	27.6
Alcalinidad total (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	193	193
Densidad (g/mL)	0.9779	0.9864

Sólidos totales (mg/L)	5,433	5,613
Sólidos totales volátiles (mg/L)	3,740	4,164
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	4,777.7	4,858
Sólidos suspendidos volátiles (mg/L)	3,780	3,962
Sólidos disueltos totales (mg/L)	802	725
Sólidos sedimentables (mL/L)	550	840
Índice volumétrico de lodos (mL/mg)	0.1151	0.1728
Porcentaje de humedad (%)	99.4221	99.4082

Tabla 11. Resultados de los análisis del lodo de la purga del sedimentador secundario. (Elaboración propia).



Figura 16. Purga de lodos del sedimentador secundario de la planta de 28 L/s. (Elaboración propia).



Figura 17. Puesta de lodos residuales en los conos Imhoff. (Elaboración propia).

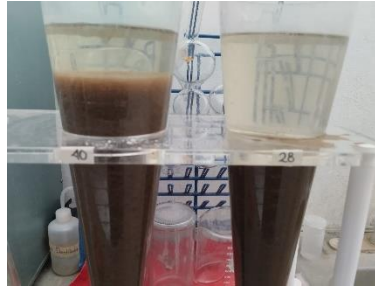


Figura 18. Determinación de sólidos sedimentables. (Elaboración propia).



Figura 19. Bomba de vacío como equipo de filtración para determinar SST. (Elaboración propia).



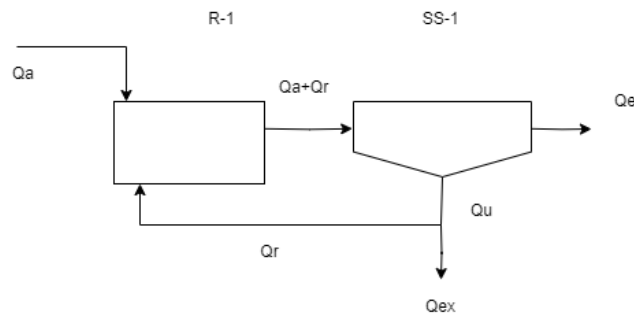
Figura 20. Purga de lodos del sedimentador secundario de la planta de 40 L/s. (Elaboración propia).



Figura 21. Viales con reactivo para determinar DQO. (Elaboración propia).

### Cuantificación del lodo generado

El método para la cuantificación del lodo que se produce, fue la realización de un balance de materia para ambas plantas tomando únicamente en cuenta el reactor de oxidación total y el sedimentador secundario, ya que solo interesa conocer la cantidad de lodo a generarse:



Clave del equipo	Nombre del equipo
R-1	Reactor de oxidación total
SS-1	Sedimentador secundario

Figura 22. Proceso a considerar para el balance de materia. (Elaboración propia).

- Balance de materia para la planta con capacidad de 28 L/s:

Tomando en cuenta los datos obtenidos de la caracterización y determinado el flujo de entrada a la planta, se tiene que:

Parámetro	Cantidad
<b>Afluente</b>	
Q (m <sup>3</sup> /d)	475.2
SST (mg/L)	353



SSV (mg/L)	273
DQO (mg/L)	865
<b>Efluente</b>	
SST (mg/L)	18.41
DQO (mg/L)	65
<b>Lodos activados</b>	
SSLM (mg/L)	2,880
SSVLM (mg/L)	2,340
DQO (mg/L)	4,987

Tabla 12. Datos obtenidos de la caracterización para el balance de materia de la planta de 28 L/s. (Elaboración propia).

Además, se tiene que la fracción biodegradable del lodo es de 0.55, esto previamente deducido.

Según el capítulo 34 y el ejemplo 47.4 del capítulo 47 del libro (von Sperling & de Lemos Chernicharo, 2005) se pueden adoptar los siguientes parámetros cinéticos y estequiométricos:

Parámetro	Valor
Coefficiente de rendimiento (producción celular) $Y_{obs}$ (gSSV/gDBO)	0.76
Coefficiente de respiración endógena $K_d$ ( $d^{-1}$ )	0.08

Tabla 13. Parámetros cinéticos y estequiométricos y relaciones básicas para el cálculo de la remoción de DBO en el sistema de lodos activados. (Reproducida). (von Sperling & de Lemos Chernicharo, 2005)

### ➔ Afluente al reactor de oxidación total

Primeramente, se realiza el cálculo de las cargas de SST y DBO a la entrada del reactor de oxidación total:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{SST_{AFLUENTE}} &= Conc_{SST_{AFLUENTE}} \cdot Q \\ \dot{m}_{SST_{AFLUENTE}} &= \left(353 \frac{mg}{L}\right) \left(\frac{1 Kg}{1,000,000 mg}\right) \left(\frac{1,000 L}{1 m^3}\right) \left(475.2 \frac{m^3}{d}\right) \\ \dot{m}_{SST_{AFLUENTE}} &= 167.7456 \frac{Kg}{d} \end{aligned}$$

Las concentraciones de DBO se pueden obtener mediante la siguiente relación (fracción biodegradable del lodo):





$$\frac{DBO}{DQO} = 0.55$$

$$DBO = 0.55 \cdot DQO$$

$$Conc_{DBO_{AFLUENTE}} = (0.55) \left( 865 \frac{mg}{L} \right) = 475.75 \frac{mg}{L}$$

$$Conc_{DBO_{EFLUENTE}} = (0.55) \left( 65 \frac{mg}{L} \right) = 35.75 \frac{mg}{L}$$

Entonces se puede calcular la carga de DBO en el afluente:

$$\dot{m}_{DBO_{AFLUENTE}} = Conc_{DBO_{AFLUENTE}} \cdot Q$$

$$\dot{m}_{DBO_{AFLUENTE}} = \left( 475.75 \frac{mg}{L} \right) \left( \frac{1 \text{ Kg}}{1,000,000 \text{ mg}} \right) \left( \frac{1,000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} \right) \left( 475.2 \frac{\text{m}^3}{d} \right)$$

$$\dot{m}_{DBO_{AFLUENTE}} = 226.0764 \frac{\text{Kg}}{d}$$

Relación SSV/SST en el afluente:

$$\frac{Conc_{SSV_{AFLUENTE}}}{Conc_{SST_{AFLUENTE}} = \frac{273 \frac{mg}{L}}{353 \frac{mg}{L}} = 0.7733$$

Sólidos suspendidos biológicos (SS<sub>b</sub>) en el afluente:

$$SS_b = SST_{AFLUENTE} \cdot 0.55$$

$$SS_b = \left( 353 \frac{mg}{L} \right) (0.55)$$

$$SS_b = 194.15 \frac{mg}{L}$$

Relación SS<sub>b</sub>/SSV:

$$\frac{Conc_{SS_b_{AFLUENTE}}}{Conc_{SSV_{AFLUENTE}} = \frac{194.15 \frac{mg}{L}}{273 \frac{mg}{L}} = 0.7111$$





Se determina la carga de SSV en el afluente:

$$\dot{m}_{SSV_{AFLUENTE}} = \left(273 \frac{mg}{L}\right) \left(\frac{1 Kg}{1,000,000 mg}\right) \left(\frac{1,000 L}{1 m^3}\right) \left(475.2 \frac{m^3}{d}\right)$$

$$\dot{m}_{SSV_{AFLUENTE}} = 129.7296 \frac{Kg}{d}$$

A partir de la relación  $SS_b/SSV$  y de la carga de SSV se obtiene la carga de sólidos volátiles biodegradables:

$$\dot{m}_{SSV_b_{AFLUENTE}} = \left(129.7296 \frac{Kg}{d}\right) (0.7111)$$

$$\dot{m}_{SSV_b_{AFLUENTE}} = 92.2507 \frac{Kg}{d}$$

Carga de SSV no biodegradables:

$$\dot{m}_{SSV_{nb_{AFLUENTE}}} = \dot{m}_{SSV_{AFLUENTE}} - \dot{m}_{SSV_b_{AFLUENTE}}$$

$$\dot{m}_{SSV_{nb_{AFLUENTE}}} = 129.7296 \frac{Kg}{d} - 92.2507 \frac{Kg}{d} = 37.4789 \frac{Kg}{d}$$

Carga de SS inorgánicos no volátiles (fijos):

$$\dot{m}_{SSF_{AFLUENTE}} = \dot{m}_{SST_{AFLUENTE}} - \dot{m}_{SSV_{AFLUENTE}}$$

$$\dot{m}_{SSF_{AFLUENTE}} = 167.7456 \frac{Kg}{d} - 129.7296 \frac{Kg}{d} = 38.016 \frac{Kg}{d}$$

➔ Sólidos generados en el reactor de oxidación total

Se determina la carga de DBO eliminada del proceso biológico ( $S_r$ ):

$$S_r = Q \cdot (Conc_{DBO_{AFLUENTE}} - Conc_{DBO_{EFLUENTE}})$$

$$S_r = \left(475.2 \frac{m^3}{d}\right) \left(475.75 \frac{mg}{L} - 35.75 \frac{mg}{L}\right) \left(\frac{1 Kg}{1,000,000 mg}\right) \left(\frac{1,000 L}{1 m^3}\right)$$



$$S_r = 209.088 \frac{Kg}{d}$$

Con este valor se puede calcular la cantidad de SSV que se producen en el reactor utilizando el parámetro cinético  $Y_{obs}$ :

$$\dot{m}_{SSV_{PROD}} = S_r \cdot Y_{obs}$$

$$\dot{m}_{SSV_{PROD}} = \left( 209.088 \frac{Kg}{d} \right) (0.76) = 158.9069 \frac{Kg}{d}$$

Fracción volátil de los SSLM en el reactor de lodos activados:

$$Fracc. vol. = \frac{Conc_{SSVLM}}{Conc_{SSLM}} = \frac{2,340 \frac{mg}{L}}{2,880 \frac{mg}{L}}$$

$$Fracc. vol. = 0.8125$$

Se determinan los SS que se producen en el reactor mediante la fracción volátil y la carga de SSV producidos:

$$\dot{m}_{SST_{PROD}} = \frac{\dot{m}_{SSV_{PROD}}}{Fracc. vol.}$$

$$\dot{m}_{SST_{PROD}} = \frac{158.9069 \frac{Kg}{d}}{0.8125} = 195.5778 \frac{Kg}{d}$$

SSF producidos:

$$\dot{m}_{SSF_{PROD}} = \dot{m}_{SST_{PROD}} - \dot{m}_{SSV_{PROD}}$$

$$\dot{m}_{SSF_{PROD}} = 195.5778 \frac{Kg}{d} - 158.9069 \frac{Kg}{d} = 36.6709 \frac{Kg}{d}$$

De momento no se pueden calcular los SS biodegradables producidos, por lo que se procede a determinar el tiempo medio de retención celular TMRC (o edad de los lodos  $\theta_c$ ) y el coeficiente  $f_b$ .

Para obtener la edad de los lodos se necesita conocer la cantidad de SSV en el reactor de oxidación total, la carga de SSV en el lodo desechado y la carga de SSV en el efluente:

$$SSV_{Reactor} = Conc_{SSVLM} \cdot Vol_{Reactor}$$



Se tienen las siguientes dimensiones calcular el volumen del reactor:

- Largo: 19 m
- Ancho: 16.2 m
- Altura: 4.5 m

Por lo tanto:

$$Vol_{Reactor} = L \cdot A \cdot H$$

$$Vol_{Reactor} = (19 \text{ m})(16.2 \text{ m})(4.5 \text{ m}) = 1,385.1 \text{ m}^3$$

Conociendo el volumen se puede calcular la cantidad de SSV en el reactor:

$$SSV_{Reactor} = Conc_{SSVLM} \cdot Vol_{Reactor}$$

$$SSV_{Reactor} = \left(2,340 \frac{mg}{L}\right) \left(\frac{1 \text{ Kg}}{1,000,000 \text{ mg}}\right) \left(\frac{1,000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3}\right) (1,385.1 \text{ m}^3)$$

$$SSV_{Reactor} = 3,241.134 \text{ Kg}$$

Carga de SSV en el efluente:

$$\dot{m}_{SSV_{EFLUENTE}} = Conc_{SSV_{EFLUENTE}} \cdot Q$$

$$\dot{m}_{SSV_{EFLUENTE}} = (Conc_{SST_{EFLUENTE}} \cdot Fracc. \text{ biodegradable de lodo}) \cdot Q$$

$$\dot{m}_{SSV_{EFLUENTE}} = \left[\left(18.41 \frac{mg}{L}\right) \left(\frac{1 \text{ Kg}}{1,000,000 \text{ mg}}\right) \left(\frac{1,000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3}\right) (0.81)\right] \left(475.2 \frac{\text{m}^3}{d}\right) = 7.0862 \frac{\text{Kg}}{d}$$

Se procede a determinar la edad de los lodos:

$$\theta_c = \frac{SSV_{Reactor}}{\dot{m}_{SSV_{PROD}} + \dot{m}_{SSV_{EFLUENTE}}}$$

$$\theta_c = \frac{3,241.134 \text{ Kg}}{158.9069 \frac{\text{Kg}}{d} + 7.0862 \frac{\text{Kg}}{d}} = 19.5257 \text{ d}$$



Coeficiente  $f_b$ :

$$f_b = \frac{f'_b}{1 + (1 - f'_b) \cdot Kd \cdot \theta_c}$$

$$f'_b = \frac{SS_b}{SSV} = 0.7111$$

$$f_b = \frac{0.7111 \frac{gSS_b}{gSSV}}{1 + \left(1 - 0.7111 \frac{gSS_b}{gSSV}\right) (0.08 d^{-1})(19.5257 d)}$$

$$f_b = 0.49$$

Una vez obtenido el coeficiente  $f_b$  se calculan los SS biodegradables producidos:

$$\dot{m}_{SS_{bPROD}} = f_b \cdot \dot{m}_{SSV_{PROD}} = (0.49) \left(158.9069 \frac{Kg}{d}\right)$$

$$\dot{m}_{SS_{bPROD}} = 77.8643 \frac{Kg}{d}$$

SS no biodegradables producidos:

$$\dot{m}_{SS_{nbPROD}} = \dot{m}_{SSV_{PROD}} - \dot{m}_{SS_{bPROD}}$$

$$\dot{m}_{SS_{nbPROD}} = 158.9069 \frac{Kg}{d} - 77.8643 \frac{Kg}{d} = 81.0426 \frac{Kg}{d}$$

SS biodegradables eliminados en la respiración endógena:

$$\dot{m}_{SS_{bELIM}} = \dot{m}_{SS_{bPROD}} \cdot \frac{Kd \cdot \theta_c}{1 + (f_b \cdot Kd \cdot \theta_c)}$$

$$\dot{m}_{SS_{bELIM}} = \left(77.8643 \frac{Kg}{d}\right) \left[ \frac{(0.08 d^{-1})(19.5257 d)}{1 + [(0.49)(0.08 d^{-1})(19.5257 d)]} \right]$$

$$\dot{m}_{SS_{bELIM}} = 68.8954 \frac{Kg}{d}$$

Restos de SS biodegradables (producción neta):



$$\dot{m}_{SSbPRODneta} = \dot{m}_{SSbPROD} - \dot{m}_{SSbELIM} = 77.8643 \frac{Kg}{d} - 68.8954 \frac{Kg}{d}$$

$$\dot{m}_{SSbPRODneta} = 8.9689 \frac{Kg}{d}$$

Restos de SSV (producción neta):

$$\dot{m}_{SSVPRODneta} = \dot{m}_{SSbPRODneta} + \dot{m}_{SSnbPROD}$$

$$\dot{m}_{SSVPRODneta} = 8.9689 \frac{Kg}{d} + 81.0426 \frac{Kg}{d} = 90.0115 \frac{Kg}{d}$$

➔ Resumen del reactor:

SS inorgánicos:

$$\dot{m}_{SSF} = \dot{m}_{SSFPROD} + \dot{m}_{SSFAFLUENTE}$$

$$\dot{m}_{SSF} = 36.6709 \frac{Kg}{d} + 38.016 \frac{Kg}{d} = 74.6869 \frac{Kg}{d}$$

SS no biodegradables:

$$\dot{m}_{SSTnb} = \dot{m}_{SSnbPROD} + \dot{m}_{SSVnbAFLUENTE}$$

$$\dot{m}_{SSTnb} = 81.0426 \frac{Kg}{d} + 37.4789 \frac{Kg}{d} = 118.5215 \frac{Kg}{d}$$

SS biodegradables:

$$\dot{m}_{SSTb} = 0 + \dot{m}_{SSbPRODneta}$$

$$\dot{m}_{SSTb} = 0 + 8.9689 \frac{Kg}{d} = 8.9689 \frac{Kg}{d}$$

SSV:

$$\dot{m}_{SSV} = \dot{m}_{SSTnb} + \dot{m}_{SSTb}$$



$$\dot{m}_{SSV} = 8.9689 \frac{Kg}{d} + 118.5215 \frac{Kg}{d} = 127.4904 \frac{Kg}{d}$$

SST:

$$\dot{m}_{SST} = \dot{m}_{SSV} + \dot{m}_{SSF}$$

$$\dot{m}_{SST} = 127.4904 \frac{Kg}{d} + 74.6869 \frac{Kg}{d} = 202.1773 \frac{Kg}{d}$$

Relación SSV/SST resultante:

$$\frac{\dot{m}_{SSV}}{\dot{m}_{SST}} = \frac{127.4904 \frac{Kg}{d}}{202.1773 \frac{Kg}{d}} = 0.6305$$

Relación SS producidos por DBO eliminada:

$$\frac{\dot{m}_{SST}}{S_r} = \frac{202.1773 \frac{Kg}{d}}{209.088 \frac{Kg}{d}} = 0.9669 \frac{Kg_{SST}}{Kg_{DBO}}$$

→ Eliminación de exceso de lodos

Carga de SST en el efluente:

$$\dot{m}_{SST_{EFLUENTE}} = Conc_{SST_{EFLUENTE}} \cdot Q$$

$$\dot{m}_{SST_{EFLUENTE}} = \left(18.41 \frac{mg}{L}\right) \left(\frac{1 Kg}{1,000,000 mg}\right) \left(\frac{1,000 L}{1 m^3}\right) \left(475.2 \frac{m^3}{d}\right) = 8.7484 \frac{Kg}{d}$$

SS a eliminar del sistema:

$$\dot{m}_{SST_{ELIM}} = \dot{m}_{SST} - \dot{m}_{SST_{EFLUENTE}}$$

$$\dot{m}_{SST_{ELIM}} = 202.1773 \frac{Kg}{d} - 8.7484 \frac{Kg}{d} = 193.4289 \frac{Kg}{d}$$

Concentración RASS (recirculación de lodos):

$$Conc_{RASS} = Conc_{SSLM} \cdot \left(1 + \frac{1}{R}\right) = \left(2,880 \frac{mg}{L}\right) \left(1 + \frac{1}{1}\right)$$





$$Conc_{RASS} = 5,760 \frac{mg}{L}$$

Volumen de lodo a eliminar por día:

$$\dot{m}_{SST_{ELIM}} = Conc_{RASS} \cdot Q$$

$$Q = \frac{\dot{m}_{SST_{ELIM}}}{Conc_{RASS}} = \frac{193.4289 \frac{Kg}{d}}{\left(\frac{1 Kg}{1,000,000 mg}\right) \left(\frac{1,000 L}{1 m^3}\right) \left(5,760 \frac{mg}{L}\right)} = 33.5814 \frac{m^3}{d}$$

Conociendo el flujo de entrada, el flujo de lodos a desechar y el flujo de recirculación, se pueden calcular los flujos faltantes del proceso:

$$Qa = Qe + Qex$$

$$Qe = Qa - Qex$$

$$Qe = 475.2 \frac{m^3}{d} - 33.5814 \frac{m^3}{d} = 441.6186 \frac{m^3}{d}$$

Sabiendo que  $R = 1$ , se puede deducir que la misma cantidad de lodo que sale a desecho es la misma que recircula al reactor de oxidación total:

$$Qu = Qr + Qex$$

$$Qu = 33.5814 \frac{m^3}{d} + 33.5814 \frac{m^3}{d} = 67.1628 \frac{m^3}{d}$$

Por lo tanto:

$$Q_1 = Qa + Qr$$

$$Q_1 = 475.2 \frac{m^3}{d} + 33.5814 \frac{m^3}{d} = 508.7814 \frac{m^3}{d}$$

Para comprobar que el balance sea correcto, la resta de  $Q_1 - Qu = Qe$ , debe de dar el mismo resultado que la resta de  $Qe = Qa - Qex$ :





Tenemos que:

$$Q_e = Q_a - Q_{ex} = 441.6186 \frac{m^3}{d}$$

Se hace la comprobación:

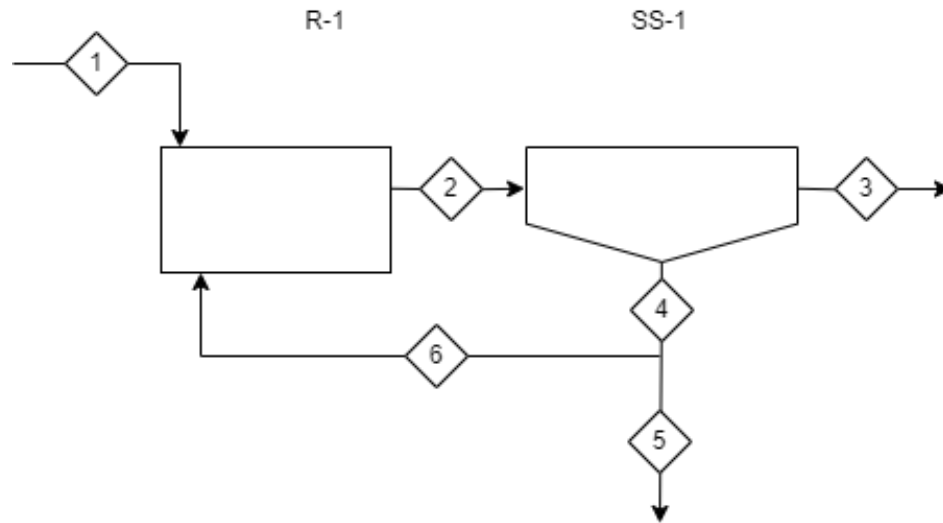
$$Q_1 - Q_u = Q_e$$

$$Q_e = Q_1 - Q_u$$

$$Q_e = 508.7814 \frac{m^3}{d} - 67.1628 \frac{m^3}{d} = 441.6186 \frac{m^3}{d}$$

En ambas ecuaciones se obtuvo el mismo resultado por lo que se puede decir que el balance de materia es correcto.





Clave del equipo	Nombre del equipo
R-1	Reactor de oxidación total
SS-1	Sedimentador secundario

No. Corriente	1	2	3	4	5	6
Condiciones						
Estado físico	L	L	L	L	L	L
Caudal (m <sup>3</sup> /d)	475.2	508.7814	441.6186	67.1628	33.5814	33.5814
SST (mg/L)	353	2,880	18.41	5,760	5,760	5,760

<p>Tecnológico Nacional de México Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez</p>	<b>DIAGRAMA DE PROCESO DE LA PTAR "REAL DEL BOSQUE" MÓDULO DE 28 L/s</b>		<b>NOMBRE DEL PROYECTO</b>	
	Residencia Profesional agosto-diciembre 2023			DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE LODOS PRODUCIDOS EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE LODOS RESIDUALES "REAL DEL BOSQUE"
	Nombre del residente:	Roberto Alejandro Rosales Maldonado		
	Asesor interno:	Mtro. Roberto David Vázquez Solís		
Asesor externo:	Ing. Martina Hernández Vázquez			



- Balance de materia para la planta con capacidad de 40 L/s:

Tomando en cuenta los datos obtenidos de la caracterización y determinado el flujo de entrada a la planta, se tiene que:

Parámetro	Cantidad
<b>Afluyente</b>	
Q (m <sup>3</sup> /d)	729.2
SST (mg/L)	353
SSV (mg/L)	273
DQO (mg/L)	865
<b>Efluente</b>	
SST (mg/L)	19.56
DQO (mg/L)	67
<b>Lodos activados</b>	
SSLM (mg/L)	3,300
SSVLM (mg/L)	2,500
DQO (mg/L)	5,422

Tabla 14. Datos obtenidos de la caracterización para el balance de materia de la planta de 28 L/s. (Elaboración propia).

Además, se tiene que la fracción biodegradable del lodo es de 0.55, esto previamente deducido.

Según el capítulo 34 y el ejemplo 47.4 del capítulo 47 del libro (von Sperling & de Lemos Chernicharo, 2005) se pueden adoptar los siguientes parámetros cinéticos y estequiométricos:

Parámetro	Valor
Coefficiente de rendimiento (producción celular) $Y_{obs}$ (gSSV/gDBO)	0.76
Coefficiente de respiración endógena $K_d$ (d <sup>-1</sup> )	0.08

Tabla 15. Parámetros cinéticos y estequiométricos y relaciones básicas para el cálculo de la remoción de DBO en el sistema de lodos activados. (Reproducida). (von Sperling & de Lemos Chernicharo, 2005)

➔ Afluyente al reactor de oxidación total

Primeramente, se realiza el cálculo de las cargas de SST y DBO a la entrada del reactor de oxidación total:



$$\begin{aligned}\dot{m}_{SST_{AFLUENTE}} &= Conc_{SST_{AFLUENTE}} \cdot Q \\ \dot{m}_{SST_{AFLUENTE}} &= \left(353 \frac{mg}{L}\right) \left(\frac{1 Kg}{1,000,000 mg}\right) \left(\frac{1,000 L}{1 m^3}\right) \left(729.2 \frac{m^3}{d}\right) \\ \dot{m}_{SST_{AFLUENTE}} &= 257.4076 \frac{Kg}{d}\end{aligned}$$

Las concentraciones de DBO se pueden obtener mediante la siguiente relación (fracción biodegradable del lodo):

$$\begin{aligned}\frac{DBO}{DQO} &= 0.55 \\ DBO &= 0.55 \cdot DQO \\ Conc_{DBO_{AFLUENTE}} &= (0.55) \left(865 \frac{mg}{L}\right) = 475.75 \frac{mg}{L} \\ Conc_{DBO_{EFLUENTE}} &= (0.55) \left(67 \frac{mg}{L}\right) = 36.85 \frac{mg}{L}\end{aligned}$$

Entonces se puede calcular la carga de DBO en el afluente:

$$\begin{aligned}\dot{m}_{DBO_{AFLUENTE}} &= Conc_{DBO_{AFLUENTE}} \cdot Q \\ \dot{m}_{DBO_{AFLUENTE}} &= \left(475.75 \frac{mg}{L}\right) \left(\frac{1 Kg}{1,000,000 mg}\right) \left(\frac{1,000 L}{1 m^3}\right) \left(729.2 \frac{m^3}{d}\right) \\ \dot{m}_{DBO_{AFLUENTE}} &= 346.9169 \frac{Kg}{d}\end{aligned}$$

Relación SSV/SST en el afluente:

$$\frac{Conc_{SSV_{AFLUENTE}}}{Conc_{SST_{AFLUENTE}}} = \frac{273 \frac{mg}{L}}{353 \frac{mg}{L}} = 0.7733$$

Sólidos suspendidos biológicos (SS<sub>b</sub>) en el afluente:

$$SS_b = SST_{AFLUENTE} \cdot 0.55$$



$$SS_b = \left(353 \frac{mg}{L}\right) (0.55)$$

$$SS_b = 194.15 \frac{mg}{L}$$

Relación  $SS_b/SSV$ :

$$\frac{Conc_{SS_b AFLUENTE}}{Conc_{SSV AFLUENTE}} = \frac{194.15 \frac{mg}{L}}{273 \frac{mg}{L}} = 0.7111$$

Se determina la carga de SSV en el afluente:

$$\dot{m}_{SSV AFLUENTE} = \left(273 \frac{mg}{L}\right) \left(\frac{1 Kg}{1,000,000 mg}\right) \left(\frac{1,000 L}{1 m^3}\right) \left(729.2 \frac{m^3}{d}\right)$$

$$\dot{m}_{SSV AFLUENTE} = 199.0716 \frac{Kg}{d}$$

A partir de la relación  $SS_b/SSV$  y de la carga de SSV se obtiene la carga de sólidos volátiles biodegradables:

$$\dot{m}_{SSV_b AFLUENTE} = \left(199.0716 \frac{Kg}{d}\right) (0.7111)$$

$$\dot{m}_{SSV_b AFLUENTE} = 141.5598 \frac{Kg}{d}$$

Carga de SSV no biodegradables:

$$\dot{m}_{SSV_{nb} AFLUENTE} = \dot{m}_{SSV AFLUENTE} - \dot{m}_{SSV_b AFLUENTE}$$

$$\dot{m}_{SSV_{nb} AFLUENTE} = 199.0716 \frac{Kg}{d} - 141.5598 \frac{Kg}{d} = 57.5118 \frac{Kg}{d}$$

Carga de SS inorgánicos no volátiles (fijos):

$$\dot{m}_{SSF AFLUENTE} = \dot{m}_{SST AFLUENTE} - \dot{m}_{SSV AFLUENTE}$$

$$\dot{m}_{SSF AFLUENTE} = 257.4076 \frac{Kg}{d} - 199.0716 \frac{Kg}{d} = 58.336 \frac{Kg}{d}$$





➔ Sólidos generados en el reactor de oxidación total

Se determina la carga de DBO eliminada del proceso biológico ( $S_r$ ):

$$S_r = Q \cdot (Conc_{DBO_{AFLUENTE}} - Conc_{DBO_{EFLUENTE}})$$

$$S_r = \left(729.2 \frac{m^3}{d}\right) \left(475.75 \frac{mg}{L} - 36.85 \frac{mg}{L}\right) \left(\frac{1 \text{ Kg}}{1,000,000 \text{ mg}}\right) \left(\frac{1,000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3}\right)$$

$$S_r = 320.0459 \frac{Kg}{d}$$

Con este valor se puede calcular la cantidad de SSV que se producen en el reactor utilizando el parámetro cinético  $Y_{obs}$ :

$$\dot{m}_{SSV_{PROD}} = S_r \cdot Y_{obs}$$

$$\dot{m}_{SSV_{PROD}} = \left(320.0459 \frac{Kg}{d}\right) (0.76) = 243.2349 \frac{Kg}{d}$$

Fracción volátil de los SSLM en el reactor de lodos activados:

$$Fracc. \text{ vol.} = \frac{Conc_{SSVLM}}{Conc_{SSLM}} = \frac{2,500 \frac{mg}{L}}{3,300 \frac{mg}{L}}$$

$$Fracc. \text{ vol.} = 0.7576$$

Se determinan los SS que se producen en el reactor mediante la fracción volátil y la carga de SSV producidos:

$$\dot{m}_{SST_{PROD}} = \frac{\dot{m}_{SSV_{PROD}}}{Fracc. \text{ vol.}}$$

$$\dot{m}_{SST_{PROD}} = \frac{243.2349 \frac{Kg}{d}}{0.7576} = 321.0598 \frac{Kg}{d}$$

SSF producidos:

$$\dot{m}_{SSF_{PROD}} = \dot{m}_{SST_{PROD}} - \dot{m}_{SSV_{PROD}}$$

$$\dot{m}_{SSF_{PROD}} = 321.0598 \frac{Kg}{d} - 243.2349 \frac{Kg}{d} = 77.8249 \frac{Kg}{d}$$

De momento no se pueden calcular los SS biodegradables producidos, por lo que se procede a determinar el tiempo medio de retención celular TMRC (o edad de los lodos  $\theta_c$ ) y el coeficiente  $f_b$ .

Para obtener la edad de los lodos se necesita conocer la cantidad de SSV en el reactor de oxidación total, la carga de SSV en el lodo desechado y la carga de SSV en el efluente:

$$SSV_{Reactor} = Conc_{SSVLM} \cdot Vol_{Reactor}$$

Se tienen las siguientes dimensiones calcular el volumen del reactor:

- Largo: 24.2 m
- Ancho: 16.4 m
- Altura: 4.8 m

Por lo tanto:

$$Vol_{Reactor} = L \cdot A \cdot H$$

$$Vol_{Reactor} = (24.2 \text{ m})(16.4 \text{ m})(4.8 \text{ m}) = 1,905.024 \text{ m}^3$$

Conociendo el volumen se puede calcular la cantidad de SSV en el reactor:

$$SSV_{Reactor} = Conc_{SSVLM} \cdot Vol_{Reactor}$$

$$SSV_{Reactor} = \left(2,500 \frac{mg}{L}\right) \left(\frac{1 \text{ Kg}}{1,000,000 \text{ mg}}\right) \left(\frac{1,000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3}\right) (1,905.024 \text{ m}^3)$$

$$SSV_{Reactor} = 4,762.56 \text{ Kg}$$

Carga de SSV en el efluente:

$$\dot{m}_{SSV_{EFLUENTE}} = Conc_{SSV_{EFLUENTE}} \cdot Q$$

$$\dot{m}_{SSV_{EFLUENTE}} = (Conc_{SST_{EFLUENTE}} \cdot Fracc. \text{ biodegradable de lodo}) \cdot Q$$

$$\dot{m}_{SSV_{EFLUENTE}} = \left[\left(19.56 \frac{mg}{L}\right) \left(\frac{1 \text{ Kg}}{1,000,000 \text{ mg}}\right) \left(\frac{1,000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3}\right) (0.81)\right] \left(729.2 \frac{\text{m}^3}{d}\right) = 14.2631 \frac{\text{Kg}}{d}$$



Se procede a determinar la edad de los lodos:

$$\theta_c = \frac{SSV_{Reactor}}{\dot{m}_{SSV_{PROD}} + \dot{m}_{SSV_{EFLUENTE}}}$$

$$\theta_c = \frac{4,762.56 \text{ Kg}}{243.2349 \frac{\text{Kg}}{d} + 14.2631 \frac{\text{Kg}}{d}} = 18.4955 d$$

Coefficiente  $f_b$ :

$$f_b = \frac{f'_b}{1 + (1 - f'_b) \cdot Kd \cdot \theta_c}$$

$$f'_b = \frac{SS_b}{SSV} = 0.7111$$

$$f_b = \frac{0.7111 \frac{gSS_b}{gSSV}}{1 + \left(1 - 0.7111 \frac{gSS_b}{gSSV}\right) (0.08 d^{-1})(18.4955 d)}$$

$$f_b = 0.4981$$

Una vez obtenido el coeficiente  $f_b$  se calculan los SS biodegradables producidos:

$$\dot{m}_{SS_{bPROD}} = f_b \cdot \dot{m}_{SSV_{PROD}} = (0.4981) \left(243.2349 \frac{\text{Kg}}{d}\right)$$

$$\dot{m}_{SS_{bPROD}} = 121.1553 \frac{\text{Kg}}{d}$$

SS no biodegradables producidos:

$$\dot{m}_{SS_{nbPROD}} = \dot{m}_{SSV_{PROD}} - \dot{m}_{SS_{bPROD}}$$

$$\dot{m}_{SS_{nbPROD}} = 243.2349 \frac{\text{Kg}}{d} - 121.1553 \frac{\text{Kg}}{d} = 122.0796 \frac{\text{Kg}}{d}$$

SS biodegradables eliminados en la respiración endógena:

$$\dot{m}_{SS_{bELIM}} = \dot{m}_{SS_{bPROD}} \cdot \frac{Kd \cdot \theta_c}{1 + (f_b \cdot Kd \cdot \theta_c)}$$



$$\dot{m}_{SS_{bELIM}} = \left( 121.1553 \frac{Kg}{d} \right) \left[ \frac{(0.08 d^{-1})(18.4955 d)}{1 + [(0.4981)(0.08 d^{-1})(18.4955 d)]} \right]$$

$$\dot{m}_{SS_{bELIM}} = 103.2039 \frac{Kg}{d}$$

Restos de SS biodegradables (producción neta):

$$\dot{m}_{SS_{bPRODneta}} = \dot{m}_{SS_{bPROD}} - \dot{m}_{SS_{bELIM}} = 121.1553 \frac{Kg}{d} - 103.2039 \frac{Kg}{d}$$

$$\dot{m}_{SS_{bPRODneta}} = 17.9514 \frac{Kg}{d}$$

Restos de SSV (producción neta):

$$\dot{m}_{SSV_{PRODneta}} = \dot{m}_{SS_{bPRODneta}} + \dot{m}_{SS_{nbPROD}}$$

$$\dot{m}_{SSV_{PRODneta}} = 17.9514 \frac{Kg}{d} + 122.0796 \frac{Kg}{d} = 140.031 \frac{Kg}{d}$$

➔ Resumen del reactor:

SS inorgánicos:

$$\dot{m}_{SSF} = \dot{m}_{SSF_{PROD}} + \dot{m}_{SSF_{AFLUENTE}}$$

$$\dot{m}_{SSF} = 77.8249 \frac{Kg}{d} + 58.336 \frac{Kg}{d} = 136.1609 \frac{Kg}{d}$$

SS no biodegradables:

$$\dot{m}_{SST_{nb}} = \dot{m}_{SS_{nbPROD}} + \dot{m}_{SSV_{nbAFLUENTE}}$$

$$\dot{m}_{SST_{nb}} = 122.0796 \frac{Kg}{d} + 57.5118 \frac{Kg}{d} = 179.5914 \frac{Kg}{d}$$

SS biodegradables:

$$\dot{m}_{SST_b} = 0 + \dot{m}_{SS_{bPRODneta}}$$



$$\dot{m}_{SST_b} = 0 + 17.9514 \frac{Kg}{d} = 17.9514 \frac{Kg}{d}$$

SSV:

$$\dot{m}_{SSV} = \dot{m}_{SST_{nb}} + \dot{m}_{SST_b}$$

$$\dot{m}_{SSV} = 179.5914 \frac{Kg}{d} + 17.9514 \frac{Kg}{d} = 197.5428 \frac{Kg}{d}$$

SST:

$$\dot{m}_{SST} = \dot{m}_{SSV} + \dot{m}_{SSF}$$

$$\dot{m}_{SST} = 197.5428 \frac{Kg}{d} + 136.1609 \frac{Kg}{d} = 333.7037 \frac{Kg}{d}$$

Relación SSV/SST resultante:

$$\frac{\dot{m}_{SSV}}{\dot{m}_{SST}} = \frac{197.5428 \frac{Kg}{d}}{333.7037 \frac{Kg}{d}} = 0.592$$

Relación SS producidos por DBO eliminada:

$$\frac{\dot{m}_{SST}}{S_r} = \frac{333.7037 \frac{Kg}{d}}{320.0459 \frac{Kg}{d}} = 1.0426 \frac{Kg_{SST}}{Kg_{DBO}}$$

➔ Eliminación de exceso de lodos

Carga de SST en el efluente:

$$\dot{m}_{SST_{EFLUENTE}} = Conc_{SST_{EFLUENTE}} \cdot Q$$

$$\dot{m}_{SST_{EFLUENTE}} = \left(19.56 \frac{mg}{L}\right) \left(\frac{1 Kg}{1,000,000 mg}\right) \left(\frac{1,000 L}{1 m^3}\right) \left(729.2 \frac{m^3}{d}\right) = 14.2631 \frac{Kg}{d}$$

SS a eliminar del sistema:

$$\dot{m}_{SST_{ELIM}} = \dot{m}_{SST} - \dot{m}_{SST_{EFLUENTE}}$$



$$\dot{m}_{SST_{ELIM}} = 333.7037 \frac{Kg}{d} - 14.2631 \frac{Kg}{d} = 319.4406 \frac{Kg}{d}$$

Concentración RASS (recirculación de lodos):

$$Conc_{RASS} = Conc_{SSLM} \cdot \left(1 + \frac{1}{R}\right) = \left(3,300 \frac{mg}{L}\right) \left(1 + \frac{1}{1}\right)$$

$$Conc_{RASS} = 6,600 \frac{mg}{L}$$

Volumen de lodo a eliminar por día:

$$\dot{m}_{SST_{ELIM}} = Conc_{RASS} \cdot Q$$

$$Q = \frac{\dot{m}_{SST_{ELIM}}}{Conc_{RASS}} = \frac{319.4406 \frac{Kg}{d}}{\left(\frac{1 Kg}{1,000,000 mg}\right) \left(\frac{1,000 L}{1 m^3}\right) \left(6,600 \frac{mg}{L}\right)} = 48.4001 \frac{m^3}{d}$$

Conociendo el flujo de entrada, el flujo de lodos a desechar y el flujo de recirculación, se pueden calcular los flujos faltantes del proceso:

$$Q_a = Q_e + Q_{ex}$$

$$Q_e = Q_a - Q_{ex}$$

$$Q_e = 729.2 \frac{m^3}{d} - 48.4001 \frac{m^3}{d} = 680.7999 \frac{m^3}{d}$$

Sabiendo que  $R = 1$ , se puede deducir que la misma cantidad de lodo que sale a desecho es la misma que recircula al reactor de oxidación total:

$$Q_u = Q_r + Q_{ex}$$

$$Q_u = 48.4001 \frac{m^3}{d} + 48.4001 \frac{m^3}{d} = 96.8002 \frac{m^3}{d}$$

Por lo tanto:

$$Q_1 = Q_a + Q_r$$







$$Q_1 = 729.2 \frac{m^3}{d} + 48.4001 \frac{m^3}{d} = 777.6001 \frac{m^3}{d}$$

Para comprobar que el balance sea correcto, la resta de  $Q_1 - Qu = Qe$ , debe de dar el mismo resultado que la resta de  $Qe = Qa - Qex$ :

Tenemos que:

$$Qe = Qa - Qex = 680.7999 \frac{m^3}{d}$$

Se hace la comprobación:

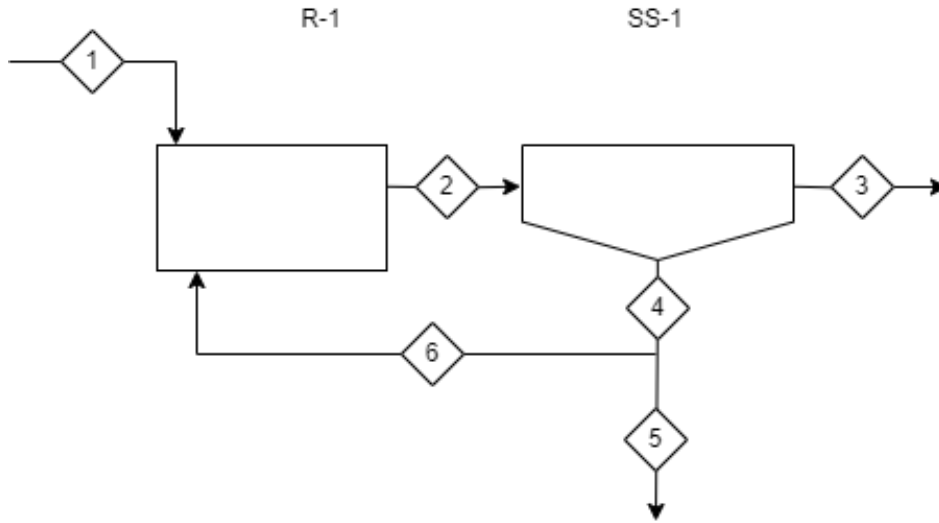
$$Q_1 - Qu = Qe$$

$$Qe = Q_1 - Qu$$

$$Qe = 777.6001 \frac{m^3}{d} - 96.8002 \frac{m^3}{d} = 680.7999 \frac{m^3}{d}$$

En ambas ecuaciones se obtuvo el mismo resultado por lo que se puede decir que el balance de materia es correcto.





Clave del equipo	Nombre del equipo
R-1	Reactor de oxidación total
SS-1	Sedimentador secundario

No. Corriente	1	2	3	4	5	6
Condiciones						
Estado físico	L	L	L	L	L	L
Caudal (m <sup>3</sup> /d)	729.2	777.6001	680.7999	96.8002	48.4001	48.4001
SST (mg/L)	353	3,300	19.56	6,600	6,600	6,600

<p>Tecnológico Nacional de México Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez</p>	<b>DIAGRAMA DE PROCESO DE LA PTAR “REAL DEL BOSQUE” MÓDULO DE 40 L/s</b>		<b>NOMBRE DEL PROYECTO</b> DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE LODOS PRODUCIDOS EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE LODOS RESIDUALES “REAL DEL BOSQUE”
	Residencia Profesional agosto-diciembre 2023		
	Nombre del residente:	Roberto Alejandro Rosales Maldonado	
	Asesor interno:	Mtro. Roberto David Vázquez Solís	
	Asesor externo:	Ing. Martina Hernández Vázquez	



## Diseño de los equipos para el tren de lodos

- Planta con capacidad de 28 L/s.

Diseño del espesador por gravedad:

El espesador a diseñar será uno por gravedad; teniendo los datos del flujo los lodos de desecho y la carga de SS se puede calcular como sigue:

Área de la superficie requerida basada en la carga superficial de sólidos:

$$\text{Área superficial} = \frac{\text{Carga de SS}}{\text{Carga superficial de sólidos}}$$

Según la tabla 50.1 del capítulo 50 del libro (von Sperling & de Lemos Chernicharo, 2005), la carga superficial de sólidos para un tipo de lodo activado proveniente del proceso de aireación extendida es de 25-40 Kg SS/m<sup>2</sup>\*d.

Entonces se pretende utilizar una carga superficial de sólidos de 30 Kg SS/m<sup>2</sup>\*d, y gracias al balance de materia se sabe que la carga de SS es de 193.4289 Kg/d:

$$\text{Área superficial} = \frac{193.4289 \frac{\text{KgSS}}{\text{d}}}{30 \frac{\text{KgSS}}{\text{m}^2 \cdot \text{d}}} = 6.44763 \text{ m}^2$$

Carga hidráulica:

$$\text{Carga hidráulica} = \frac{Q}{\text{Área superficial}}$$

$$\text{Carga hidráulica} = \frac{33.5814 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}}{6.44763 \text{ m}^2} = 5.2083 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{d}}$$

Según el libro (von Sperling & de Lemos Chernicharo, 2005), este valor de carga hidráulica es muy bajo para el rango comprendido de 20-30 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>\*d, recomendado para evitar condiciones sépticas en el espesador. Suponiendo una carga hidráulica de 20 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>\*d, se necesita el siguiente caudal:

$$\text{Carga hidráulica} = \frac{Q}{\text{Área superficial}}$$

$$Q = \text{Carga hidráulica} \cdot \text{Área superficial}$$



$$Q = \left( 20 \frac{m^3}{m^2 \cdot d} \right) (6.44763 m^2) = 128.9526 \frac{m^3}{d}$$

Como el flujo de lodo disponible es de  $33.5814 \frac{m^3}{d}$ , se requieren  $\left( 128.9526 \frac{m^3}{d} - 33.5814 \frac{m^3}{d} = 95.3712 \frac{m^3}{d} \right)$   $95.3712 \frac{m^3}{d}$  adicionales de flujo reciclado del efluente final para aumentar la carga hidráulica.

Diámetro:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot \frac{\text{Área superficial}}{\text{No. espesadores}}}{\pi}}$$

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot \frac{6.44763 m^2}{1}}{3.1416}} = 2.8652 m$$

Volumen:

Para esto se supone una altura de 5 metros:

$$V = \text{Área superficial} \cdot H$$

$$V = (6.44763 m^2)(5 m) = 32.23815 m^3$$

Tiempo de retención hidráulica (HRT):

Sin recirculación de efluentes:

$$HRT = \frac{V}{Q}$$

$$HRT = \frac{32.23815 m^3}{33.5814 \frac{m^3}{d}} = 0.96 d = (0.96 d) \left( \frac{24 h}{1 d} \right) = 23.04 h$$

El resultado de 23.04 horas es menor que las 24 horas del día, por lo tanto, es correcto.



Con recirculación de efluentes:

$$HRT = \frac{V}{Q}$$

$$HRT = \frac{32.23815 \text{ m}^3}{128.9526 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}} = 0.25 \text{ d} = (0.25 \text{ d}) \left( \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ d}} \right) = 6 \text{ h}$$

El resultado de 6 horas es menor que las 24 horas del día, por lo tanto, es correcto.

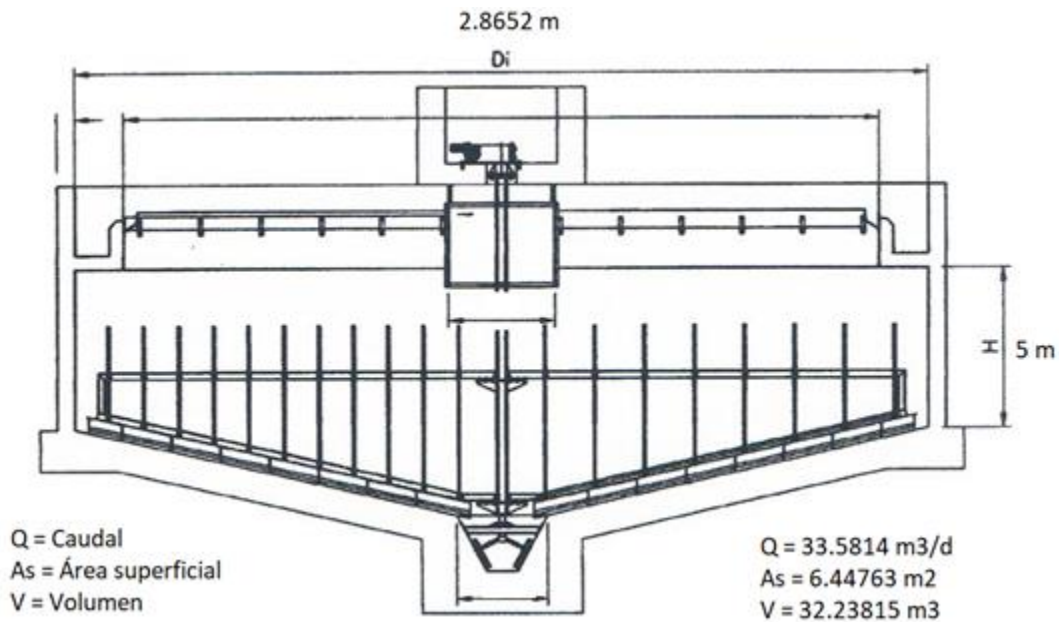


Figura 23. Plano del espesador por gravedad de la planta de 28 L/s. (Elaboración propia).

Balance de materia en el espesador:

Según la tabla 47.5 del capítulo 47 del libro (von Sperling & de Lemos Chernicharo, 2005), un espesador por gravedad tiene un porcentaje de captura de sólidos entre 75-85% para lodos secundarios.

Entonces, suponiendo una captura de sólidos del 80%:

$$\text{Carga de SS en el afluente} = 193.4289 \frac{\text{KgSS}}{\text{d}}$$

$$\text{Carga de SS en el efluente} = \text{Carga de SS en el afluente} \cdot \% \text{ captura de sólidos}$$

$$\text{Carga de SS en el efluente} = \left(193.4289 \frac{\text{KgSS}}{\text{d}}\right) (0.8) = 154.74312 \frac{\text{KgSS}}{\text{d}}$$

Según la tabla 47.2 del capítulo 47 del libro (von Sperling & de Lemos Chernicharo, 2005) los lodos activados por aireación extendida tienen un contenido de sólidos secos entre el 2 y 3% y una densidad entre 1,020 y 1,030 Kg/m<sup>3</sup>.

Por lo tanto, suponiendo un contenido de sólidos secos del 2.5% y una densidad de 1,025 Kg/m<sup>3</sup>:

$$\text{Flujo de lodo} = \frac{\text{Carga de SS en el efluente}}{\% \text{ contenido de sólidos secos} \cdot \rho}$$

$$\text{Flujo de lodo} = \frac{154.74312 \frac{\text{Kg}}{\text{d}}}{(0.025) \left(1,025 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}\right)} = 6.0388 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}$$

Sobrenadante del espesante (recirculado a la cabecera de la planta):

*Carga de SS del sobrenadante del espesante*

*= Carga de SS en el afluyente – Carga de SS en el efluente*

$$\text{Carga de SS del sobrenadante del espesante} = 193.4289 \frac{\text{KgSS}}{\text{d}} - 154.74312 \frac{\text{KgSS}}{\text{d}}$$

$$\text{Carga de SS del sobrenadante del espesante} = 38.68578 \frac{\text{KgSS}}{\text{d}}$$

*Flujo del sobrenadante del espesante = Q<sub>EFLUENTE</sub> – Q<sub>LODO</sub>*

$$\text{Flujo del sobrenadante del espesante} = 33.5814 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} - 6.0388 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} = 27.5426 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}$$

$$\text{Conc. del sobrenadante del espesante} = \frac{\text{Carga de SS del sobrenadante del espesante}}{\text{Flujo del sobrenadante del espesante}}$$





$$\text{Conc. del sobrenadante del espesante} = \frac{38.68578 \frac{KgSS}{d}}{27.5426 \frac{m^3}{d}} = 1.4045 \frac{KgSS}{m^3}$$

$$\text{Conc. del sobrenadante del espesante} = \left(1.4045 \frac{KgSS}{m^3}\right) \left(\frac{1,000,000 \text{ mg}}{1 \text{ Kg}}\right) \left(\frac{1 \text{ m}^3}{1,000 \text{ L}}\right)$$

$$\text{Conc. del sobrenadante del espesante} = 1,404.5 \frac{mgSS}{L}$$

Diseño del digestor anaerobio:

Para el diseño de digestor se tiene un flujo de lodos de  $6.0388 \frac{m^3}{d}$  y una carga de SS de  $154.74312 \frac{KgSS}{d}$ , incluso se sabe que la relación SV/SS para un digestor anaerobio está entre 0.7 y 0.8 según la tabla 49.5 del capítulo 49 del libro (von Sperling & de Lemos Chernicharo, 2005).

Se determina la cantidad de SV en el afluente considerando una fracción SV/SS de 0.75:

$$\text{Carga de SV} = \text{Carga de SS} \cdot \text{Fracc} \frac{SV}{SS}$$

$$\text{Carga de SV} = \left(154.74312 \frac{Kg}{d}\right) (0.75) = 116.05734 \frac{Kg}{d}$$

En la tabla 49.5 también se menciona la carga orgánica volumétrica típica está entre 0.8-1.6 KgSV/m<sup>3</sup>\*d, por lo que se supone un valor de 0.95 KgSV/m<sup>3</sup>\*d para calcular el volumen del digestor:

$$V = \frac{\text{Carga de SV}}{\text{Carga orgánica volumétrica}} = \frac{116.05734 \frac{Kg}{d}}{0.95 \frac{KgSV}{m^3 \cdot d}} = 122.1657 \text{ m}^3$$

Se estima que se tendrá un 15% del volumen del digestor reservado para la generación de biogás y que se dé la digestión:

$$V \text{ reservado para ac. de biogás} = V_{\text{DIGESTOR}} \cdot 15\%$$





$$V \text{ reservado para ac. de biogás} = (122.1657 \text{ m}^3)(0.15) = 18.3249 \text{ m}^3$$

Por lo tanto, el volumen total del digestor será:

$$V_{TOTAL} = V_{DIGESTOR} + V \text{ reservado para ac. de biogás}$$

$$V_{TOTAL} = 122.1657 \text{ m}^3 + 18.3249 \text{ m}^3 = 140.4906 \text{ m}^3$$

Tiempo de retención hidráulica:

$$HRT = \frac{V}{Q}$$

$$HRT = \frac{122.1657 \text{ m}^3}{6.0388 \frac{\text{m}^3}{d}} = 20 \text{ d}$$

Balance de materia del digestor:

$$SS \text{ en el afluente: } 154.74312 \frac{KgSS}{d}$$

$$SV \text{ en el afluente: } 116.05734 \frac{Kg}{d}$$

$$SF \text{ en el afluente: } 154.74312 \frac{KgSS}{d} - 116.05734 \frac{Kg}{d} = 38.68578 \frac{Kg}{d}$$

La eficiencia de eliminación de SV según la tabla 49.5 del capítulo 49 del libro (von Sperling & de Lemos Chernicharo, 2005) está entre el 40 y 55%, suponiendo una eficiencia de eliminación de SV del 50%, se tiene que:

$$SF \text{ en el efluente} = SF \text{ en el afluente} = 38.68578 \frac{Kg}{d}$$

$$SV \text{ en el efluente} = \left(116.05734 \frac{Kg}{d}\right)(1 - 0.5) = 58.02867 \frac{Kg}{d}$$

$$SS \text{ en el efluente} = SF \text{ en el efluente} + SV \text{ en el efluente}$$

$$SS \text{ en el efluente} = 38.68578 \frac{Kg}{d} + 58.02867 \frac{Kg}{d} = 96.71445 \frac{Kg}{d}$$



El flujo de entrada es el mismo que el flujo de salida para el digestor anaerobio  $\left(6.0388 \frac{m^3}{d}\right)$ .

La concentración de SS del efluente será:

$$Conc_{SS_{EFLUENTE}} = \frac{\text{Carga de SS en el efluente}}{Q}$$

$$Conc_{SS_{EFLUENTE}} = \frac{96.71445 \frac{Kg}{d}}{6.0388 \frac{m^3}{d}} = 16.0155 \frac{Kg}{m^3}$$

$$Conc_{SS_{EFLUENTE}} = \left(16.0155 \frac{Kg}{m^3}\right) \left(\frac{1,000,000 \text{ mg}}{1 \text{ Kg}}\right) \left(\frac{1 \text{ m}^3}{1,000 \text{ L}}\right) = 16,015.5 \frac{mg}{L}$$

Diseño del lecho de secado:

Se pretende diseñar un sistema de lechos de secado, usando el criterio de la tasa de carga. Como primer paso se determina el tiempo del ciclo de operación, en base a la siguiente ecuación:

$$T = T_d + T_c$$

Donde:

$T_d$ : tiempo de secado, en días.

$T_c$ : tiempo de limpieza, en días.

El periodo de secado se ha estimado para 15 días, basado en un lecho de secado existente, además, el lodo seco se retira 5 días después.

Por lo tanto:

$$T = 15 \text{ dias} + 5 \text{ dias} = 20 \text{ dias}$$

Se determina el volumen de lodo deshidratado por ciclo:

$$V_L = Q_L \cdot T$$



$$V_L = \left( 6.0388 \frac{m^3}{d} \right) (20 \text{ dias}) = 120.776 m^3$$

Se calcula el área del lecho de secado:

$$A = \frac{M_L \cdot T}{Carga}$$

Para este ejemplo se considera una carga de 15 Kg SS/m<sup>2</sup>, en el cual está dentro del rango especificado según (von Sperling & de Lemos Chernicharo, 2005).

$$A = \frac{\left( 96.71445 \frac{KgSS}{d} \right) (20 d)}{15 \frac{KgSS}{m^2}}$$

$$A = 128.9526 m^2$$

Determinación de la altura de la capa de lodo:

$$H = \frac{V}{A}$$

$$H = \frac{120.776 m^3}{128.9526 m^2} = 0.9366 m$$

- Planta con capacidad de 40 L/s.

Diseño del espesador por gravedad:

El espesador a diseñar será uno por gravedad; teniendo los datos del flujo los lodos de desecho y la carga de SS se puede calcular como sigue:

Área de la superficie requerida basada en la carga superficial de sólidos:

$$\text{Área superficial} = \frac{\text{Carga de SS}}{\text{Carga superficial de sólidos}}$$

Según la tabla 50.1 del capítulo 50 del libro (von Sperling & de Lemos Chernicharo, 2005), la carga superficial de sólidos para un tipo de lodo activado proveniente del proceso de aireación extendida es de 25-40 Kg SS/m<sup>2</sup>\*d.



Entonces se pretende utilizar una carga superficial de sólidos de 30 Kg SS/m<sup>2</sup>\*d, y gracias al balance de materia se sabe que la carga de SS es de 319.4406 Kg/d:

$$\text{Área superficial} = \frac{319.4406 \frac{\text{KgSS}}{d}}{30 \frac{\text{KgSS}}{\text{m}^2 \cdot d}} = 10.648 \text{ m}^2$$

Carga hidráulica:

$$\text{Carga hidráulica} = \frac{Q}{\text{Área superficial}}$$

$$\text{Carga hidráulica} = \frac{48.4001 \frac{\text{m}^3}{d}}{10.648 \text{ m}^2} = 4.5454 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot d}$$

Según el libro (von Sperling & de Lemos Chernicharo, 2005), este valor de carga hidráulica es muy bajo para el rango comprendido de 20-30 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>\*d, recomendado para evitar condiciones sépticas en el espesador. Suponiendo una carga hidráulica de 20 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>\*d, se necesita el siguiente caudal:

$$\text{Carga hidráulica} = \frac{Q}{\text{Área superficial}}$$

$$Q = \text{Carga hidráulica} \cdot \text{Área superficial}$$

$$Q = \left(20 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot d}\right) (4.5454 \text{ m}^2) = 90.908 \frac{\text{m}^3}{d}$$

Como el flujo de lodo disponible es de 48.4001 m<sup>3</sup>/d, se requieren  $\left(90.908 \frac{\text{m}^3}{d} - 48.4001 \frac{\text{m}^3}{d} = 42.5079 \frac{\text{m}^3}{d}\right)$  42.5079 m<sup>3</sup>/d adicionales de flujo reciclado del efluente final para aumentar la carga hidráulica.

Diámetro:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot \text{Área superficial}}{\pi \cdot \text{No. espesadores}}}$$





$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot \frac{10.648 \text{ m}^2}{1}}{3.1416}} = 3.682 \text{ m}$$

Volumen:

Para esto se supone una altura de 4 metros:

$$V = \text{Área superficial} \cdot H$$

$$V = (10.648 \text{ m}^2)(4 \text{ m}) = 42.592 \text{ m}^3$$

Tiempo de retención hidráulica (HRT):

Sin recirculación de efluentes:

$$HRT = \frac{V}{Q}$$

$$HRT = \frac{42.592 \text{ m}^3}{48.4001 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}} = 0.88 \text{ d} = (0.88 \text{ d}) \left( \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ d}} \right) = 21.12 \text{ h}$$

El resultado de 21.12 horas es menor que las 24 horas del día, por lo tanto, es correcto.

Con recirculación de efluentes:

$$HRT = \frac{V}{Q}$$

$$HRT = \frac{42.592 \text{ m}^3}{90.908 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}} = 0.4685 \text{ d} = (0.4685 \text{ d}) \left( \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ d}} \right) = 11.244 \text{ h}$$

El resultado de 11.244 horas es menor que las 24 horas del día, por lo tanto, es correcto.





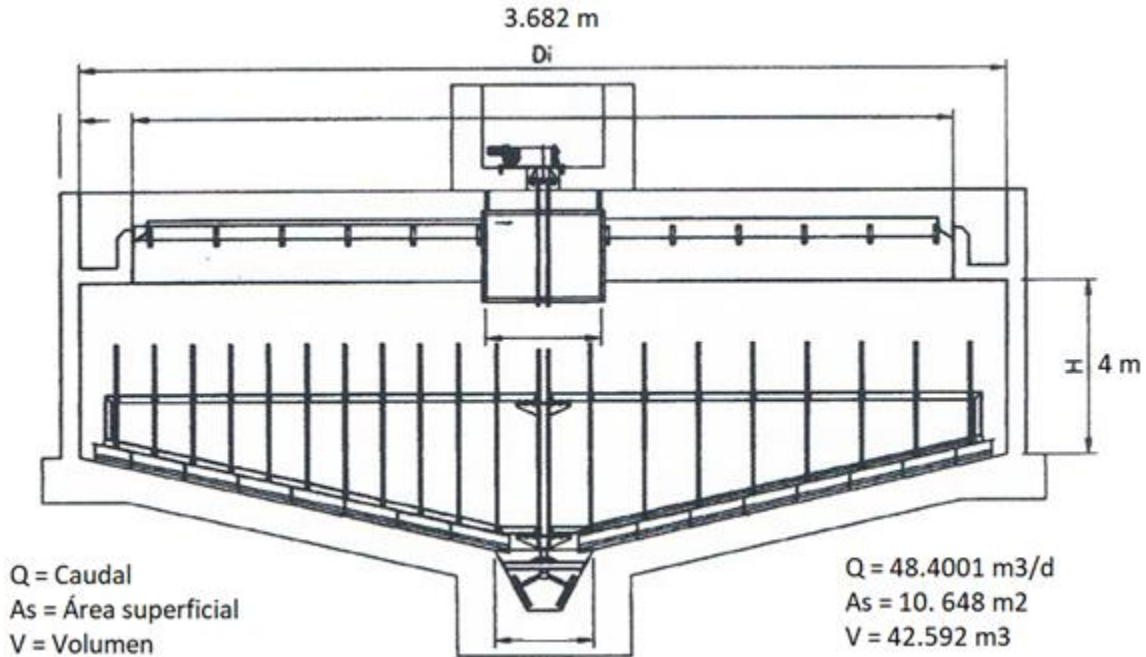


Figura 24. Plano del espesador por gravedad de la planta de 40 L/s. (Elaboración propia).

Balace de materia en el espesador:

Según la tabla 47.5 del capítulo 47 del libro (von Sperling & de Lemos Chernicharo, 2005), un espesador por gravedad tiene un porcentaje de captura de sólidos entre 75-85% para lodos secundarios.

Entonces, suponiendo una captura de sólidos del 80%:

$$\text{Carga de SS en el afluente} = 319.4406 \frac{\text{KgSS}}{d}$$

$$\text{Carga de SS en el efluente} = \text{Carga de SS en el afluente} \cdot \% \text{ captura de sólidos}$$

$$\text{Carga de SS en el efluente} = \left( 319.4406 \frac{\text{KgSS}}{d} \right) (0.8) = 255.55248 \frac{\text{KgSS}}{d}$$

Según la tabla 47.2 del capítulo 47 del libro (von Sperling & de Lemos Chernicharo, 2005) los lodos activados por aireación extendida tienen un contenido de sólidos secos entre el 2 y 3% y una densidad entre 1,020 y 1,030 Kg/m<sup>3</sup>.



Por lo tanto, suponiendo un contenido de sólidos secos del 2.5% y una densidad de 1,025 Kg/m<sup>3</sup>:

$$\text{Flujo de lodo} = \frac{\text{Carga de SS en el efluente}}{\% \text{ contenido de sólidos secos} \cdot \rho}$$

$$\text{Flujo de lodo} = \frac{255.55248 \frac{\text{Kg}}{\text{d}}}{(0.025) \left(1,025 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}\right)} = 9.9727 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}$$

Sobrenadante del espesante (recirculado a la cabecera de la planta):

$$\begin{aligned} \text{Carga de SS del sobrenadante del espesante} \\ = \text{Carga de SS en el afluente} - \text{Carga de SS en el efluente} \end{aligned}$$

$$\text{Carga de SS del sobrenadante del espesante} = 319.4406 \frac{\text{KgSS}}{\text{d}} - 255.55248 \frac{\text{KgSS}}{\text{d}}$$

$$\text{Carga de SS del sobrenadante del espesante} = 63.88812 \frac{\text{Kg}}{\text{d}}$$

$$\text{Flujo del sobrenadante del espesante} = Q_{\text{EFLUENTE}} - Q_{\text{LODO}}$$

$$\text{Flujo del sobrenadante del espesante} = 48.4001 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} - 9.9727 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} = 38.4274 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}$$

$$\text{Conc. del sobrenadante del espesante} = \frac{\text{Carga de SS del sobrenadante del espesante}}{\text{Flujo del sobrenadante del espesante}}$$

$$\text{Conc. del sobrenadante del espesante} = \frac{63.88812 \frac{\text{Kg}}{\text{d}}}{38.4274 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}} = 1.6625 \frac{\text{KgSS}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Conc. del sobrenadante del espesante} = \left(1.6625 \frac{\text{KgSS}}{\text{m}^3}\right) \left(\frac{1,000,000 \text{ mg}}{1 \text{ Kg}}\right) \left(\frac{1 \text{ m}^3}{1,000 \text{ L}}\right)$$

$$\text{Conc. del sobrenadante del espesante} = 1,662.5 \frac{\text{mgSS}}{\text{L}}$$





Diseño del digestor anaerobio:

Para el diseño de digestor se tiene un flujo de lodos de  $9.9727 \frac{m^3}{d}$  y una carga de SS de  $255.55248 \frac{KgSS}{d}$ , incluso se sabe que la relación SV/SS para un digestor anaerobio está entre 0.7 y 0.8 según la tabla 49.5 del capítulo 49 del libro (von Sperling & de Lemos Chernicharo, 2005).

Se determina la cantidad de SV en el afluente considerando una fracción SV/SS de 0.75:

$$Carga\ de\ SV = Carga\ de\ SS \cdot Fracc\ \frac{SV}{SS}$$

$$Carga\ de\ SV = \left(255.55248 \frac{Kg}{d}\right) (0.75) = 191.66436 \frac{Kg}{d}$$

En la tabla 49.5 también se menciona la carga orgánica volumétrica típica está entre 0.8-1.6 KgSV/m<sup>3</sup>\*d, por lo que se supone un valor de 0.95 KgSV/m<sup>3</sup>\*d para calcular el volumen del digestor:

$$V = \frac{Carga\ de\ SV}{Carga\ orgánica\ volumétrica} = \frac{191.66436 \frac{Kg}{d}}{0.95 \frac{KgSV}{m^3 \cdot d}} = 201.7519\ m^3$$

Se estima que se tendrá un 15% del volumen del digestor reservado para la generación de biogás y que se dé la digestión:

$$V\ reservado\ para\ ac.\ de\ biogás = V_{DIGESTOR} \cdot 15\%$$

$$V\ reservado\ para\ ac.\ de\ biogás = (201.7519\ m^3)(0.15) = 30.2627\ m^3$$

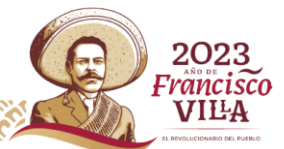
Por lo tanto, el volumen total del digestor será:

$$V_{TOTAL} = V_{DIGESTOR} + V\ reservado\ para\ ac.\ de\ biogás$$

$$V_{TOTAL} = 201.7519\ m^3 + 30.2627\ m^3 = 232.0146\ m^3$$

Tiempo de retención hidráulica:

$$HRT = \frac{V}{Q}$$



$$HRT = \frac{201.7519 \text{ m}^3}{9.9727 \frac{\text{m}^3}{d}} = 20.2304 \text{ d}$$

Balance de materia del digestor:

$$SS \text{ en el afluente: } 255.55248 \frac{\text{KgSS}}{d}$$

$$SV \text{ en el afluente: } 191.66436 \frac{\text{Kg}}{d}$$

$$SF \text{ en el afluente: } 255.55248 \frac{\text{KgSS}}{d} - 191.66436 \frac{\text{Kg}}{d} = 63.88812 \frac{\text{Kg}}{d}$$

La eficiencia de eliminación de SV según la tabla 49.5 del capítulo 49 del libro (von Sperling & de Lemos Chernicharo, 2005) está entre el 40 y 55%, suponiendo una eficiencia de eliminación de SV del 50%, se tiene que:

$$SF \text{ en el efluente} = SF \text{ en el afluente} = 63.88812 \frac{\text{Kg}}{d}$$

$$SV \text{ en el efluente} = \left(191.66436 \frac{\text{Kg}}{d}\right) (1 - 0.5) = 95.83218 \frac{\text{Kg}}{d}$$

$$SS \text{ en el efluente} = SF \text{ en el efluente} + SV \text{ en el efluente}$$

$$SS \text{ en el efluente} = 63.88812 \frac{\text{Kg}}{d} + 95.83218 \frac{\text{Kg}}{d} = 159.7203 \frac{\text{Kg}}{d}$$

El flujo de entrada es el mismo que el flujo de salida para el digestor anaerobio  $\left(9.9727 \frac{\text{m}^3}{d}\right)$ .

La concentración de SS del efluente será:

$$Conc_{SS_{EFLUENTE}} = \frac{\text{Carga de SS en el efluente}}{Q}$$

$$Conc_{SS_{EFLUENTE}} = \frac{159.7203 \frac{\text{Kg}}{d}}{9.9727 \frac{\text{m}^3}{d}} = 16.0157 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$Conc_{SS_{EFLUENTE}} = \left(16.0157 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}\right) \left(\frac{1,000,000 \text{ mg}}{1 \text{ Kg}}\right) \left(\frac{1 \text{ m}^3}{1,000 \text{ L}}\right) = 16,015.7 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$



Diseño del lecho de secado:

Se pretende diseñar un sistema de lechos de secado, usando el criterio de la tasa de carga. Como primer paso se determina el tiempo del ciclo de operación, en base a la siguiente ecuación:

$$T = T_d + T_c$$

Donde:

$T_d$ : tiempo de secado, en días.

$T_c$ : tiempo de limpieza, en días.

El periodo de secado se ha estimado para 15 días, basado en un lecho de secado existente, además, el lodo seco se retira 5 días después.

Por lo tanto:

$$T = 15 \text{ dias} + 5 \text{ dias} = 20 \text{ dias}$$

Se determina el volumen de lodo deshidratado por ciclo:

$$V_L = Q_L \cdot T$$

$$V_L = \left( 9.9727 \frac{m^3}{d} \right) (20 \text{ dias}) = 199.454 m^3$$

Se calcula el área del lecho de secado:

$$A = \frac{M_L \cdot T}{Carga}$$

Para este ejemplo se considera una carga de 15 Kg SS/m<sup>2</sup>, en el cual está dentro del rango especificado según (von Sperling & de Lemos Chernicharo, 2005).

$$A = \frac{(159.7203 \frac{KgSS}{d})(20 d)}{15 \frac{KgSS}{m^2}}$$

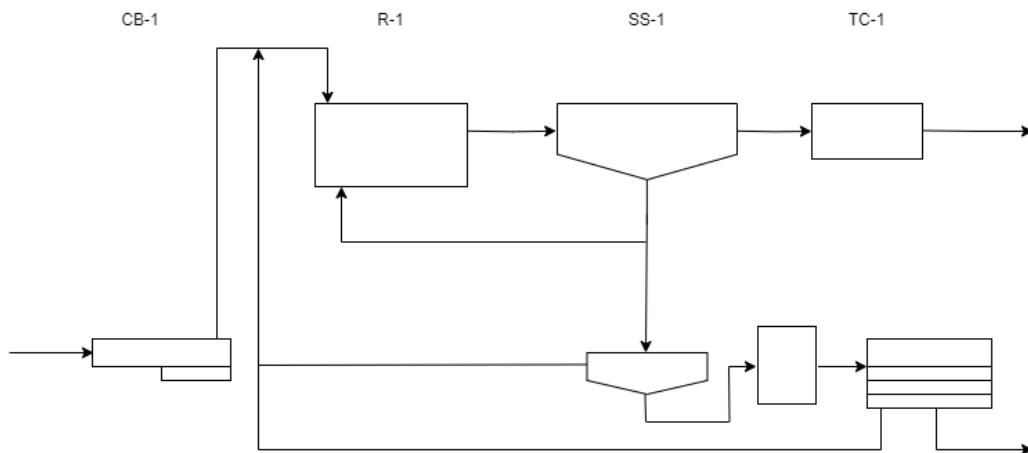
$$A = 212.9604 m^2$$

Determinación de la altura de la capa de lodo:

$$H = \frac{V}{A}$$

$$H = \frac{199.454 m^3}{212.9604 m^2} = 0.9366 m$$

- Diagrama de proceso de las plantas optimizado con el tren de tratamiento de lodos diseñado



Clave del equipo	Nombre del equipo
CB-1	Cárcamo de bombeo
R-1	Reactor de oxidación total
SS-1	Sedimentador secundario
TC-1	Tanque de cloración
E-1	Espesador por gravedad
D-1	Digestor anaerobio
LS-1	Lecho de secado

Figura 25. Diagrama de proceso de las plantas con el tren de tratamiento de lodos diseñado. (Elaboración propia).





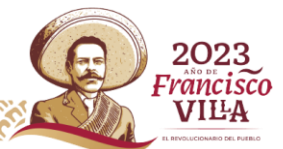


## Conclusión

Mediante diferentes técnicas se llevó a cabo la determinación de las características de los lodos residuales, las cuales se compararon con referencias investigadas (Amador Díaz, Veliz Lorenzo, & Bataller Venta, 2015) y (von Sperling & de Lemos Chernicharo, 2005), en donde la mayoría de los resultados se encuentran dentro del rango típico, y otros parámetros bastante cercanos al valor mínimo como lo son el DQO y los SST, que son los valores más representativos de este proyecto, dando así, valores bastantes satisfactorios.

A partir de estos datos se realizó la cuantificación de los lodos generados en la planta, teniendo como resultado 33.5814 m<sup>3</sup>/d en el módulo de 28 L/s y 48.4001 m<sup>3</sup>/d en el módulo de 40 L/s.

Se diseñó un tren de tratamiento de lodos para la PTAR “Real del Bosque” para cada módulo, el cual consiste en un espesador por gravedad con volumen de 32.2381 m<sup>3</sup> y tiempo de retención hidráulica de 6 h; un digestor anaerobio con volumen de 140.4906 m<sup>3</sup> y tiempo de retención hidráulica de 20 días y un lecho de secado con un área de 128.9526 m<sup>2</sup>, volumen de lodos deshidratados por ciclo de 120.776 m<sup>3</sup>, altura de capa de lodo de 0.9366 m y tiempo de ciclo de operación de 20 días; esto para el módulo con capacidad de 28 L/s. Para el módulo de 40 L/s el espesador por gravedad cuenta con un volumen de 42.592 m<sup>3</sup> y tiempo de retención hidráulica de 11.244 h; un digestor anaerobio con volumen de 232.0146 m<sup>3</sup> y tiempo de retención hidráulica de 20.2304 días y un lecho de secado con un área de 212.9604 m<sup>2</sup>, volumen de lodos deshidratados por ciclo de 199.454 m<sup>3</sup>, altura de capa de lodo de 0.9366 m y tiempo de ciclo de operación de 20 días. Se tomaron en cuenta estas tecnologías para el tratamiento de los lodos debido a su bajo costo en comparación con otras, considerando la operación y mantenimiento, el uso de energía, mano de obra y construcción del equipo.





### Competencias desarrolladas y/o aplicadas

A lo largo de este periodo de Residencia Profesional reforcé y apliqué varios de los conocimientos obtenidos durante la carrera, así como también, aprendí y mejoré varias competencias como lo son la responsabilidad, el trabajo en equipo, adaptabilidad y flexibilidad, gestión del tiempo, pensamiento crítico, iniciativa y autonomía, resolución de problemas y comunicación asertiva para completar mi desarrollo profesional.

Por otra parte, se puede mencionar también que aprendí muchas cosas sobre las PTAR; desde los diferentes procesos que existen para la purificación del agua residual, técnicas de análisis, la importancia de darle un tratamiento al agua residual y a los lodos e incluso la disposición final para su aprovechamiento, reducción de la contaminación y el cuidado de la salud.





### Fuentes de información

Amador Díaz, A., Veliz Lorenzo, E., & Bataller Venta, M. (2015). Recuperado el 2023, de <https://www.redalyc.org/pdf/1816/181642434003.pdf>

Chipana Pari, J. V. (2022). Recuperado el 2023, de <https://repositorio.unsa.edu.pe/server/api/core/bitstreams/62c4d3a4-9d4e-4ae8-9e8d-b387cb180b8c/content>

CONAGUA. (2015). [www.conagua.gob.mx](http://www.conagua.gob.mx). Recuperado el 2023, de <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro32.pdf>

Condorchem Enviro Solutions. (s.f.). [condorchem.com](http://condorchem.com). Recuperado el 2023, de <https://condorchem.com/es/blog/tratamiento-de-lodos/>

Galvis Toro, J., & Rivera Guerrero, X. (2013). Recuperado el 2023, de <https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/2157dcb6-205c-44ae-abfc-90b4c65d53e3/content>

González, O., Ríos Bolivar, M., & Gómez, C. (Noviembre de 2008). Recuperado el 2023, de [https://www.researchgate.net/publication/306033975\\_Control\\_Adaptativo\\_por\\_Realimentacion\\_de\\_Salida\\_del\\_Proceso\\_Anaerobio\\_de\\_Tratamiento\\_de\\_Aguas\\_Residuales](https://www.researchgate.net/publication/306033975_Control_Adaptativo_por_Realimentacion_de_Salida_del_Proceso_Anaerobio_de_Tratamiento_de_Aguas_Residuales)

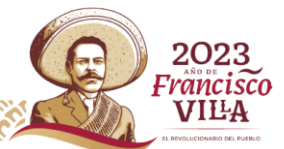
HANNA Instruments. (2023). [hannacolombia.com](http://hannacolombia.com). Recuperado el 2023, de [https://cdn.hannacolombia.com/hannacdn/support/manual/2018/11/Manual\\_83314.pdf](https://cdn.hannacolombia.com/hannacdn/support/manual/2018/11/Manual_83314.pdf)

HANNA Instruments. (2023). [hannacolombia.com](http://hannacolombia.com). Recuperado el 2023, de [https://cdn.hannacolombia.com/hannacdn/support/manual/2019/02/Manual\\_839800.pdf](https://cdn.hannacolombia.com/hannacdn/support/manual/2019/02/Manual_839800.pdf)

Kelessidis, A., & Stasinakis, A. A. (Junio de 2012). Comparative study of the methods used for treatment and final disposal of sewage sludge in European countries. *International Waste Working Group, XXXII(6)*, 1186-1195. doi:<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.01.012>

Limón Macías, J. G. (8 de Julio de 2013). Recuperado el 2023, de [https://sswm.info/sites/default/files/reference\\_attachments/LIM%C3%93N%202013.%20Los%20lodos%20de%20las%20plantas%20de%20tratamiento%20de%20aguas.pdf](https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/LIM%C3%93N%202013.%20Los%20lodos%20de%20las%20plantas%20de%20tratamiento%20de%20aguas.pdf)

Orozco Lab. (s.f.). [orozcolab.com.mx](http://orozcolab.com.mx). Recuperado el 2023, de <https://www.orozolab.com.mx/blog/lodos-y-biosolidos-problema-o-beneficio>





Romero Aguilar, L. E. (18 de Diciembre de 2019). Recuperado el 2023, de <http://repositoriodigital.tuxtla.tecnm.mx/xmlui/bitstream/handle/123456789/1623/M DTTD746R65.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Secretaria de Comercio y Fomento Industrial. (2001). *www.gob.mx*. Recuperado el 2023, de <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166776/NMX-AA-036-SCFI-2001.pdf>

Secretaria de Comercio y Fomento Industrial. (2013). *www.gob.mx*. Recuperado el 2023, de <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166763/NMX-AA-004-SCFI-2013.pdf>

Secretaria de Comercio y Fomento Industrial. (2015). *www.gob.mx*. Recuperado el 2023, de <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166146/nmx-aa-034-scfi-2015.pdf>

Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (22 de Octubre de 1993). Recuperado el 2023, de <https://siga.jalisco.gob.mx/assets/documentos/normatividad/nom053semarnat1993.htm>

Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2002). Recuperado el 2023, de [https://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=691939&fecha=15/08/2003#gsc.tab=0](https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=691939&fecha=15/08/2003#gsc.tab=0)

Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2005). Recuperado el 2023, de <https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/1055/SEMARNA/SEMARNA.htm>

SMAPA. (2024). *smapa.gob.mx*. Recuperado el 2023, de <https://smapa.gob.mx/index.php/conozca/mision-y-vision>

Teamb Alternativa Aplicada Ambiental S.A. de C.V. (4 de Diciembre de 2021). *teamb.com.mx*. Obtenido de <https://teamb.com.mx/como-funciona-una-planta-de-tratamiento-de-aguas-residuales/>

Torrescano España, J. L. (2009). Recuperado el 2023, de [http://seia.guanajuato.gob.mx/document/AquaForum/AF52/AF5204\\_ParametrosOperacion.pdf](http://seia.guanajuato.gob.mx/document/AquaForum/AF52/AF5204_ParametrosOperacion.pdf)

Universal Water. (12 de Julio de 2021). *universalwater.com.mx*. Obtenido de <https://www.universalwater.com.mx/2021/07/12/aireacion-extendida/#:~:text=Tambi%C3%A9n%20conocida%20como%20oxidaci%C3%B3n%20total,lodos%20que%20pueden%20ser%20decantados>





von Sperling, M., & de Lemos Chernicharo, C. A. (2005). *Biological Wastewater Treatment in Warm Climate Regions* (Vol. II). (C. V. Andreoli, & F. Fernandes, Edits.) Londres, Reino Unido: IWA Publishing. Recuperado el 2023



Carretera Panamericana Km. 1080, C.P. 29050, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas |

[tuxtla.tecnm.mx](http://tuxtla.tecnm.mx)

Tel. (961) 615 0461, 615 0138, 615 4808



**2023**  
AÑO DE  
**Francisco**  
**VILLA**  
EL REVOLUCIONARIO DEL PUEBLO

## Anexos

### Anexo 1. Muestreo

Tomando como referencia la NORMA Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002 que indica las técnicas de muestreo para lodos y biosólidos:

Materiales y equipos:

- Cubetas pequeñas con un aproximado de 2 L de capacidad.
- Botellas desechables para almacenamiento.
- Refrigerador.
- Cubre bocas.
- Guantes de carnaza.

Procedimiento:

1. Escoger las áreas en las cuales se va a realizar la toma de muestra.
2. Antes de realizar la toma de muestra utilizar los equipos de protección recomendados (cubre bocas y guantes).
3. Mediante las cubetas se toma la muestra directamente de los cuerpos de agua.
4. En caso de no terminar los análisis correspondientes, almacenar las muestras en botellas desechables y acondicionarlas bajo refrigeración.

### Anexo 2. Temperatura, pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto y sólidos disueltos totales

Materiales y equipos:

- Medidor multiparamétrico (marca HANNA, modelo HI98194).

Procedimiento:

1. Una vez que el medidor multiparamétrico esté calibrado, introducir el sensor dentro de cada una de las cubetas con su respectiva muestra hasta que quede completamente sumergido.
2. Leer en la pantalla los resultados del análisis.





### Anexo 3. DQO

Según los manuales de instrucciones (HANNA Instruments, 2023) y (HANNA Instruments, 2023):

Materiales y equipos:

- Reactor (marca HANNA, modelo HI839800).
- Fotómetro (marca HANNA, modelo HI83314).
- Pipetas graduadas.
- Perilla de succión.

Reactivos:

- Agua desionizada.
- Viales del reactivo DQO, rango alto.

Procedimiento:

1. Tomar una muestra homogénea. Las muestras que tengan sólidos capaces de sedimentarse se deben homogeneizar con un mezclador.
2. Precalear el reactor Hanna HI839800 a 150 °C (302 °F). Se recomienda fuertemente utilizar el escudo de seguridad opcional HI740217. NO USAR UN HORNO O MICROONDAS ya que las muestras que presenten fugas o goteos pueden generar una atmósfera corrosiva y posiblemente explosiva.
3. Retirar la tapa de 2 de los viales para reactivo DQO, rango alto HI93754C-0.
4. Agregar 0.2 mL de agua desionizada al primer vial (#1) y 0.2 mL de muestra al segundo (#2), mientras mantiene los viales en un ángulo de 45 grados. Colocar de nuevo la tapa e invertir varias veces para mezclar. ADVERTENCIA: los viales se calentarán mientras se mezclan, sea cuidadoso al manipularlos.
5. Introducir los viales en el reactor y calentarlos por 2 horas a 150 °C.
6. Al finalizar el proceso de digestión apagar el reactor. Esperar por 20 minutos que los viales se enfríen a aproximadamente 120 °C.
7. Invertir cada vial varias veces mientras estos se encuentren calientes, luego colocarlos en el estante de tubos de ensayo. ADVERTENCIA: los viales están calientes, ser cuidadoso al manipularlos.
8. Dejar los viales en el estante de tubos de ensayo para enfriarlos a temperatura ambiente. No agitar o invertir más, de lo contrario las muestras pueden volverse turbias.
9. Seleccionar el método DQO HR (16) siguiendo el procedimiento que se describe en la selección de método.





10. Insertar el adaptador de vial de 16 mm.
11. Colocar el vial del blanco (#1) en el soporte.
12. Presionar la tecla cero (Zero). Al final de la medición del cero la pantalla muestra el indicador “-0.0-”. El medidor está ahora listo para la medición.
13. Retirar el vial.
14. Colocar el vial de la muestra (#2) en el soporte.
15. Presionar la tecla leer (Read) para comenzar la lectura. El instrumento muestra los resultados en m g/L de oxígeno (O<sub>2</sub>).

#### Anexo 4. Nitrógeno total

Según los manuales de instrucciones (HANNA Instruments, 2023) y (HANNA Instruments, 2023):

Materiales y equipos:

- Reactor (marca HANNA, modelo HI839800).
- Fotómetro (marca HANNA, modelo HI83314).
- Pipetas graduadas.
- Perilla de succión.

Reactivos:

- Agua desionizada.
- Viales de digestión de nitrógeno total, rango alto.
- Reactivo persulfato de potasio.
- Reactivo metabisulfito de sodio.
- Reactivo nitrógeno total.

Procedimiento:

1. Precalentar el reactor Hanna HI839800 a 105 °C (221 °F). Se recomienda fuertemente utilizar el escudo de seguridad opcional HI740217.
2. Retirar la tapa de 2 viales de digestión de nitrógeno total, rango alto HI 93767B-B.
3. Añadir a cada vial 1 paquete de persulfato de potasio PERSULFATE/N.
4. Agregar 0.5 mL de agua desionizada al primer vial (#1, blanco) y 0.5 mL de muestra al segundo vial (#2, muestra), manteniéndolos en un ángulo de 45 grados.
5. Colocar de nuevo la tapa y agitar vigorosamente por 30 segundos hasta que el polvo se disuelva por completo.





6. Introducir los viales en el reactor y calentarlos a una temperatura de 105 °C por 30 minutos.
7. Luego de finalizar el proceso de digestión, colocar los viales en el estante de tubos de ensayo y dejarlos enfriar a temperatura ambiente. ADVERTENCIA: los viales se encuentran calientes, tener cuidado cuando se manipulen.
8. Seleccionar el método Nitrógeno total HR (16).
9. Introducir el adaptador de vial de 16 mm.
10. Para realizar este método, el instrumento proporciona 3 temporizadores de reacción, los cuales se pueden utilizar durante todo el procedimiento.
11. Retirar la tapa y agregar a cada vial el contenido de 1 paquete de metabisulfito de sodio, BISULFITE/N. Colocar de nuevo la tapa y agitar suavemente por 15 segundos.
12. Presionar el temporizador (Timer) y la pantalla mostrará la cuenta regresiva antes de añadir el reactivo nitrógeno total HI93767-0, o esperar 3 minutos.
13. Retirar la tapa de los viales y añadir a cada uno 1 paquete del reactivo nitrógeno total HI93767-0. Colocar de nuevo la tapa y agitar suavemente por 15 segundos.
14. Presionar continuar (Continue) y la pantalla mostrará la cuenta regresiva o esperar 2 minutos.
15. Retirar la tapa de 2 viales de digestión de nitrógeno total, rango alto HI93766V-0HR.
16. Agregar a uno de los viales de reactivo (#1) 2 mL del blanco digerido, y al segundo vial de reactivo (#2) 2 mL de muestra digerida, manteniendo los viales en un ángulo de 45 grados.
17. Colocar de nuevo la tapa fuertemente e invertir 10 veces.
18. Colocar el vial de la muestra (#1) en el soporte.
19. Presionar continuar (Continue) y la pantalla mostrará la cuenta regresiva o esperar 5 minutos.
20. Presionar la tecla cero (Zero). La pantalla muestra el indicador "-0.0-".
21. Retirar el vial de blanco.
22. Colocar el vial de la muestra (#2) en el soporte.
23. Presionar el botón de leer (Read) para comenzar la lectura. El instrumento muestra los resultados en mg/L de nitrógeno (N).

## Anexo 5. Fósforo total

Según los manuales de instrucciones (HANNA Instruments, 2023) y (HANNA Instruments, 2023):

Materiales y equipos:

- Reactor (marca HANNA, modelo HI839800).
- Fotómetro (marca HANNA, modelo HI83314).





- Pipetas graduadas.
- Perilla de succión.

#### Reactivos:

- Agua desionizada.
- Viales reactivo fósforo.
- Solución NaOH 1.54 N.
- Vial de fósforo total, rango alto B.
- Persulfato de potasio.

#### Procedimiento:

1. Precalentar el reactor Hanna HI839800 a 150 °C (302 °F). Se recomienda fuertemente utilizar el escudo de seguridad opcional HI740217.
2. Retirar la tapa de 2 viales reactivo fósforo HI93758V-OHR.
3. Agregar 5 mL de agua desionizada al primer vial (#1) y 5 mL de muestra al segundo vial (#2), mientras se mantienen en un ángulo de 45 grados.
4. Añadir a cada vial 1 paquete de persulfato de potasio PERSULFATE/N. Colocar de nuevo la tapa y agitar suavemente hasta que el polvo se disuelva por completo.
5. Introducir los viales en el reactor y calentarlos a una temperatura de 150 °C por 30 minutos.
6. Luego de finalizar el proceso de digestión, colocar con cuidado los viales en el estante de tubos de ensayo y dejarlos enfriar a temperatura ambiente.
7. Seleccionar el método fósforo total HR (16).
8. Introducir el adaptador de vial de 16 mm.
9. Retirar la tapa de los viales y agregar 2.0 mL de solución NaOH 1.54N HI93758B-0, manteniéndolos en un ángulo de 45 grados. Colocar de nuevo la tapa e invertir el vial varias veces para mezclar.
10. Retirar la tapa de los viales y agregue 0.5 mL de solución reactivo fósforo total, rango alto B HI93763B-0, manteniéndolos en un ángulo de 45 grados. Colocar de nuevo la tapa e invertir varias veces para mezclar.
11. Colocar el vial del blanco (#1) en el soporte.
12. Presionar el temporizador (Timer) y la pantalla mostrará la cuenta regresiva antes de realizar la medición o esperar 7 minutos y presionar el botón Zero. Al final de la medición cero, la pantalla muestra el indicador "-0.0-". El medidor está ahora listo para la medición.
13. Retirar el vial del blanco.
14. Colocar el vial de la muestra (#2) en el soporte.





15. Presionar la tecla cero (Zero). El instrumento muestra los resultados en mg/L de fósforo (P).

### Anexo 6. Alcalinidad total

En base a la Norma Mexicana NMX-AA-036-SCFI-2001 (Secretaria de Comercio y Fomento Industrial, 2001) se hicieron los siguientes análisis:

Materiales y equipos:

- Balanza analítica con precisión de 0.1 mg.
- Bureta de 50 mL.
- Matraces Erlenmeyer de 250 mL.
- Probeta de 100 mL.
- Vidrio de reloj.
- Espátula.

Reactivos:

- Solución indicadora de fenolftaleína.
- Solución indicadora de naranja de metilo.
- Solución de ácido sulfúrico o ácido clorhídrico 0.02 N.
- Carbonato de sodio anhidro patrón primario.

Procedimiento:

1. Valorar el ácido sulfúrico o ácido clorhídrico (0,02 N). Pesar aproximadamente y con precisión 0,0265 g del patrón primario de carbonato de sodio, secado 105°C, añadir 25 mL de agua y unas gotas de la disolución de naranja de metilo, valorar con el ácido hasta el vire del indicador (de canela a amarillo). Calcular la normalidad del ácido con la siguiente fórmula:

$$N = \frac{A}{B \cdot 53} \cdot 1,000$$

Donde:

N: es la normalidad del ácido usado, en equivalentes/L.

A: es la masa del carbonato de sodio, en g.

B: es el volumen de ácido utilizados, en mL.





53: es el carbonato de sodio, en g/equivalentes.

1,000: es el factor para convertir mL a L.

2. Transferir 100 mL de muestra en un matraz Erlenmeyer de 250 mL.
3. Adicionar 2 gotas de disolución indicadora de fenolftaleína.
4. Titular con la disolución valorada de ácido (0,02 N) hasta el vire de la fenolftaleína (de rosa a incoloro), registrar los mililitros gastados (alcalinidad a la fenolftaleína). Adicionar 2 gotas de la disolución indicadora de naranja de metilo.
5. Continuar con la titulación hasta alcanzar el vire del naranja de metilo. (de canela a amarillo), alcalinidad total.
6. Registrar los volúmenes para ambos puntos finales.
7. Calcular la alcalinidad, tomando en cuenta el vire de los indicadores usando la siguiente fórmula:

$$\text{Alcalinidad total} \left( \frac{\text{mg de CaCO}_3}{\text{L}} \right) = \frac{A \cdot X}{100} \cdot 50 \cdot 1,000$$

Donde:

A: es el volumen total gastado de ácido en la titulación al vire del anaranjado de metilo, en mL.

N: es la normalidad de la disolución de ácido.

100: es el volumen de la muestra, en mL.

50: es el factor para convertir equivalentes/L a mg CaCO<sub>3</sub>/L.

1,000: es el factor para convertir mL a L.

## Anexo 7. Sólidos totales (ST) y sólidos totales volátiles (STV)

En base a la Norma Mexicana NMX-AA-034-SCFI-2015 (Secretaria de Comercio y Fomento Industrial, 2015) se hicieron los siguientes análisis:

Materiales y equipos:

- Balanza analítica.
- Cápsulas de porcelana.
- Probeta de 50 mL.
- Parrilla eléctrica.
- Pinzas para cápsula.







- Horno de secado.
- Mufla eléctrica.
- Desecador.

Procedimiento:

Sólidos totales:

1. Previamente las cápsulas deben estar preparadas introduciéndolas al horno a una temperatura de  $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ , 20 min como mínimo. Únicamente en el caso de la medición de sólidos volátiles, las cápsulas posteriormente se introducen a la mufla a una temperatura de  $550\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , durante 20 min como mínimo. Después de este tiempo transferirlas al horno.
2. Trasladar la cápsula al desecador y dejar enfriar por 20 min como mínimo. Pesas las cápsulas y repetir el ciclo horno-desecador hasta obtener una diferencia  $\leq 0,0005$  g en dos pesadas consecutivas. Registrar como  $m_1$  considerando para los cálculos el último valor de la masa. Se recomienda seleccionar el volumen de muestra de tal manera que el residuo seco sobre la cápsula se encuentre en un intervalo de masa de 2,5 mg a 200 mg.
3. Transferir la muestra a la cápsula previamente puesta a masa constante y evaporar a sequedad en el horno de secado a  $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
4. En caso de utilizar placa de calentamiento llevar a casi sequedad sin llegar a ebullición de la muestra y posteriormente pasar al horno de secado a  $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  para su secado total por una hora.
5. Trasladar la cápsula al desecador y dejar enfriar por 20 min como mínimo. Llevar la cápsula a masa constante repitiendo el ciclo horno-desecador, hasta obtener una diferencia  $\leq 0,0005$  g en dos pesadas consecutivas.
6. Registrar como  $m_3$ , la última masa obtenida y calcular los sólidos totales mediante la siguiente fórmula:

$$ST = \frac{m_3 - m_1}{V} \cdot 1,000,000$$

Sólidos totales volátiles:

7. Introducir la cápsula conteniendo el residuo a la mufla a  $550\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 50\text{ }^{\circ}\text{C}$  durante 15 min a 20 min, transferir la cápsula al horno a  $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 20 min como mínimo. Trasladar la cápsula siguiendo el punto 5, y registre el valor como  $m_4$  y hacer los cálculos mediante la siguiente fórmula:



$$STV = \frac{m_3 - m_4}{V} \cdot 1,000,000$$

### Anexo 7 (continuación). Sólidos suspendidos totales (SST) y sólidos suspendidos volátiles (SSV)

En base a la Norma Mexicana NMX-AA-034-SCFI-2015 (Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, 2015) se hicieron los siguientes análisis:

#### Materiales y equipos:

- Balanza analítica.
- Crisoles Gooch.
- Perilla de succión.
- Pipeta graduada.
- Pinzas para crisol.
- Horno de secado.
- Mufla eléctrica.
- Desecador.

#### Reactivos:

- Agua desionizada.

#### Procedimiento:

##### Sólidos suspendidos totales:

1. Previamente se prepara el dispositivo de filtración y/o soportes de secado.
2. Utilizar filtro de fibra de vidrio que adapte al dispositivo de filtración y/o secado y/o charola de aluminio, con la ayuda de unas pinzas colocarlo con la cara rugosa hacia arriba en el dispositivo de secado y/o filtración.
3. El soporte de secado con el filtro se introduce al horno a  $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  durante 20 min como mínimo, después de este tiempo transferirlo a un desecador.
4. Pesar el dispositivo de filtración y/o soportes de secado y repetir el ciclo horno-desecador hasta obtener una diferencia  $\leq 0,0005\text{ g}$  en dos pesadas consecutivas. Registrar como  $m_2$ , considerando para los cálculos el último valor de la masa.
5. Se recomienda seleccionar el volumen de muestra de acuerdo a las características de esta.





6. Homogeneizar la muestra mediante agitación vigorosa del envase, transferir de forma inmediata y en un solo paso un volumen adecuado de muestra a una probeta.
7. Filtrar la muestra a través del filtro colocado en el crisol Gooch o través del filtro que es tomado de la charola de aluminio colocado en el equipo de filtración con ayuda de unas pinzas.
8. Enjuagar la probeta con el volumen suficiente para arrastrar los sólidos y verter en el filtro.
9. Introducir el soporte de secado con el filtro al horno a  $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  durante 1 h como mínimo, en caso de usar un soporte de secado diferente al crisol Gooch retirar con cuidado el filtro del equipo de filtrado usando pinzas. Posteriormente llevar a masa constante y registrar como  $m_6$  la masa obtenida y calcular los sólidos suspendidos totales mediante la siguiente fórmula:

$$SST = \frac{m_6 - m_2}{V} \cdot 1,000,000$$

Sólidos suspendidos volátiles:

10. Introducir el soporte de secado con el filtro que contiene el residuo  $m_6$  a la mufla a una temperatura de  $550\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 50\text{ }^{\circ}\text{C}$  durante 15 min a 20 min.
11. Trasladar el soporte de secado con el filtro al horno a una temperatura de  $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  durante 20 min como mínimo.
12. Transferir el soporte de secado con el filtro al desecador y llevar a masa constante. Registrar como  $m_7$  y calcular los sólidos suspendidos volátiles mediante la siguiente fórmula:

$$SSV = \frac{m_6 - m_7}{V} \cdot 1,000,000$$

### Anexo 8. Sólidos sedimentables

En base a la Norma Mexicana NMX-AA-004-SCFI-2013 (Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, 2013) se hicieron los siguientes análisis:

Materiales y equipos:

- Conos Imhoff de 1 L.

Procedimiento:



1. Llenar el cono Imhoff con la muestra hasta llegar a 1 L de su capacidad y esperar 1 hora a que haya sedimentación.
2. Observar la cantidad sedimentada y anotarlo en mL/L de muestra.

### Anexo 9. Densidad y porcentaje de humedad

Materiales y equipos:

- Cápsulas de porcelana.
- Probeta de 50 mL.
- Parrilla eléctrica.
- Horno de secado.
- Desecador.

Procedimiento:

1. Preparar las cápsulas llevándolas a masa constante y registrar como  $m_1$ .
2. Llenar las cápsulas con 25 mL de la muestra y registrar como  $m_2$ .
3. Llevarlas a evaporación utilizando la parrilla.
4. Trasladarlas al horno y posteriormente al desecador para enfriarse y pesar, registrar como  $m_3$ .
5. Para el cálculo de densidad utilizar la siguiente fórmula:

$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{V}$$

6. Para calcular el porcentaje de humedad se utiliza la siguiente fórmula:

$$\%H = \frac{[(m_2 - m_1) - (m_3 - m_1)]}{m_2 - m_1} \cdot 100$$

### Anexo 10. Índice volumétrico de lodos (IVL)

Para obtener el IVL se realiza el cálculo como se muestra a continuación:

$$IVL = \frac{\text{Sólidos sedimentables} \left(\frac{mL}{L}\right)}{\text{Sólidos suspendidos totales} \left(\frac{mg}{L}\right)}$$

