



Dirección General de Educación
Superior Tecnológica

Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez

**“REDISEÑO DE UN BIORREACTOR PARA
TRATAMIENTO
DE AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES
DEL BENEFICIO HÚMEDO DEL CAFÉ”**

**REPORTE TÉCNICO DE RESIDENCIA
PROFESIONAL**

Presenta:
Eliam Zurisadai Escobar Ramírez

Número de control:
08270323

Carrera:
Ingeniería Bioquímica

Asesor interno:
M.C. José Humberto Castañón González

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas; Enero 2013

INDICE

Introducción.....	4
CAPÍTULO I. Generalidades	6
1.1 Justificación.....	6
1.2 Objetivo general	7
1.3 Caracterización del área en que participó	8
1.3.1 Historia del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez	8
1.3.2 Misión.....	9
1.3.3 Visión	9
1.3.4 Datos generales de la institución	9
1.4 Problemas a resolver	12
1.5 Alcances y limitaciones	12
CAPÍTULO II. Fundamento teórico.....	13
2.1 Generalidades del café (coffea arabica).....	13
2.2 Componentes del café.....	13
2.3 Etapas de transformación.....	15
2.4 Aguas residuales del beneficio húmedo del café	16
2.4.1 Características físicas de las aguas residuales.....	16
2.4.2 Compuestos orgánicos agregados del agua residual	18
2.4.2.1 Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	19
2.4.2.2 Demanda Química de oxígeno (DQO)	19
2.4.2.3 Carbono Orgánico Total (COT).....	20
2.4.3 Relaciones entre DBO, DQO y COT	20
2.5 Tratamiento de aguas residuales	21
2.5.1 Tratamientos para la eliminación de materia en suspensión	22
2.5.2 Tratamientos para la eliminación de materia disuelta	22
2.5.3 Tratamientos biológicos	23

2.5.3.1 Tratamiento anaerobio.....	24
2.5.3.1.1 Microbiología y bioquímica del proceso.....	24
CAPÍTULO III. Procedimiento y descripción de las actividades realizadas	28
3.1 Diseño y construcción de sedimentador, filtro y reactor.....	28
3.1.1 Sedimentador.....	28
3.1.2 Filtro	33
3.1.3 Reactor	34
3.2 Recolección de las aguas residuales del beneficio húmedo del café.....	35
3.3 Estabilización de lodos.....	36
3.4 Caracterización del agua residual del beneficio húmedo del café.....	37
CAPITULO IV. Resultados preliminares.....	38
4.1 Caracterización del agua residual de beneficio húmedo del café.....	38
4.2 Curvas de adsorción y variación de ph usando carbón activado.....	39
4.3 Estabilización del inóculo	41
4.4 Sedimentación.....	42
CAPITULO V. Conclusiones y recomendaciones	43
CAPITULO VI. Referencias bibliográficas	45

INTRODUCCIÓN

Chiapas es un estado sustentado históricamente en la agricultura, y dentro de esta se encuentra el café que ha sido el cultivo de mayor importancia social y económica. La calidad del café chiapaneco ha sido apreciada y reconocida por los consumidores de café en el mundo como una de las mejores dentro de los cafés Arábica, dicho café es generalmente procesado por vía húmeda, lo que le otorga características moderadas en amargo y cuerpo y acidez y aroma pronunciado. Sin embargo dichos beneficios se contraponen a los costos ambientales.

La industria cafetalera está considerada como una de las más sucias del mundo con alteraciones ambientales negativas, debido a que la parte aprovechable para el proceso representa sólo el 20% del volumen total de la fruta, de manera tal que, el procesamiento de extracción del fruto (beneficio) genera un 80% del volumen procesado en calidad de desechos (Orozco *et al.*, 2005). Esta problemática es similar en los países productores de café donde se utiliza como proceso de beneficio la vía húmeda, y no se cuenta con un sistema de tratamiento eficiente en todos los casos. Esta situación se agrava si tenemos en cuenta que los centros de despulpe de café se encuentran ubicados en zonas de montañas donde están los ecosistemas más frágiles, y que el proceso de beneficio se realiza en los meses de sequía, durante los cuales los ríos disminuyen el caudal aumentando la concentración de las sustancias contaminantes.

El proceso del café por la vía húmeda consiste en que el fruto después de ser cosechado se eliminan los componentes externos, después los frutos son depositados en despulpadoras para eliminar el epicarpio o pulpa, seguidamente se utilizan tanques de fermentación para obtener la hidrólisis del mucílago mediante la acción de enzimas propias del grano y de microorganismos en el agua en donde el tiempo de fermentación es variable (Cervantes, 1998; Bello *et al.*, 1993). El mucílago está fuertemente adherido a la cáscara del grano de café; desde el punto de vista físico, el mucílago es un sistema coloidal líquido y liofílico o hidrogel, contiene agua, pectinas, azúcares y ácidos orgánicos, durante la maduración del grano de café el pectato de calcio (localizado en la laminilla media) y la protopectina de la pared celular son convertidos en pectinas (Braham y Bressani, 1978; Elías, 1972; Brezan *et al* 1972).

Las aguas residuales que se generan en el proceso de despulpado y lavado del café, comúnmente conocida como *agua miel* se consideran como una de las mayores contaminaciones orgánicas en el sector cafetalero, debido a que la

oxidación de la materia orgánica, que es llevada a cabo por la microflora bacteriana contenida en ellas, consumen todo el oxígeno disuelto en el agua, creando así una situación de ausencia de oxígeno que perjudica la restante flora y fauna acuática (Hernández *et al.*, 2000). A manera de hacer un dimensionamiento del problema basta mencionar que el proceso de despulpado y lavado de 1 kg de café genera una cantidad de agua y material contaminante equivalente a aquella producida por 6 personas en un día (Pujol *et al.*, 2001; Hernández *et al.*, 2000).

Para poder reutilizar o devolver a los efluentes las aguas residuales provenientes del beneficio húmedo del café se debe cumplir con ciertos límites de contaminantes marcados por la NOM-003-SEMARNAT-1997 que regula SEMARNAT; para disminuir la contaminación es necesario llevar a cabo un proceso de tratamiento.

En un trabajo previo realizado por Tacias (2012) en el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez se diseñó un sistema para tratar aguas residuales de esta índole, logrando una remoción del 70% de contaminantes, pero se observó que no se alcanzaba la fase metanogénica, por lo que la finalidad del presente proyecto es rediseñar el sistema mencionado anteriormente, de manera que se pueda alcanzar dicha fase, mediante el mejoramiento del sedimentador y filtro, esto debido a que fueron las operaciones unitarias que lograron una mayor remoción de contaminantes.

El rediseño del sistema consiste en la construcción de un reactor a pequeña escala de prueba, un sedimentador con deflectores inclinados, así como un filtro para determinar la calidad del agua al finalizar todo el proceso de tratamiento de las mismas, evaluando también el efecto de la variación de flujo sobre la calidad del agua.

El volumen del sistema continuo que simulará todo el proceso, está basado en el tiempo de retención hidráulico (TRH) por cada etapa, así como la forma del reactor para poder controlar los problemas hidráulicos que existen frecuentemente en la construcción de cualquier sistema de procesos, lo cual mejorará el sistema de transporte de las aguas de una operación unitaria a otra, propiciando la homogeneidad del proceso.

CAPÍTULO I. GENERALIDADES

1.1 JUSTIFICACIÓN

El beneficio húmedo del café contribuye considerablemente a la contaminación del medio ambiente ya que genera grandes volúmenes de aguas residuales, provenientes principalmente del despulpado y lavado de los granos, además representa un riesgo a la salud para las personas que habitan en zonas cercanas a los sitios de descarga del agua residual (Haddis y Devi, 2008). La cafecultura trae grandes beneficios económicos al estado de Chiapas; sin embargo esta actividad se ve opacada por sus efectos adversos al medio ambiente, por lo tanto, lo que se necesita es lograr que la cafecultura sea una actividad sustentable.

Los sistemas de tratamiento utilizados actualmente resultan insuficientes, y en muchos casos inapropiados para este tipo de residual de naturaleza química compleja, por lo que se hace necesaria la búsqueda de otros sistemas más integrales y eficientes que permitan tratar la alta carga orgánica que anualmente es descargada en nuestras cuencas.

Dada esta problemática, se ha planteado revertir este hecho a partir de un sistema de tratamiento de las aguas generadas basado en un proceso biológico, principalmente a partir de la digestión anaerobia, aunada a etapas de sedimentación y filtración, esto con el fin de cumplir como un proceso de bajos costos de operación, monitoreo e instalación, así también conseguir un elevada eficiencia en la remoción de los contaminantes presentes. Otros beneficios que pudieran conseguirse con este sistema son: la posibilidad de obtener lodos activados que puedan ser empleados como fertilizantes, obtención de gas que contiene metano como combustible, así como el uso de las aguas tratadas para sistemas de riego en las plantaciones de café. Los beneficios adquiridos a partir del sistema de tratamiento permitirán darle un valor agregado al proceso orgánico actual del café Chiapaneco.

Cabe mencionar que, la información generada en esta investigación podrá ser utilizada en el desarrollo de nuevos sistemas de tratamientos aplicados a las aguas residuales en cuestión.

1.2 OBJETIVO GENERAL

Rediseñar un sistema de tratamiento de aguas residuales provenientes del beneficio húmedo del café.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar un sedimentador basado en tecnología de baffles inclinados para incrementar la eficiencia.
- Diseñar un filtro percolador que tenga capacidad de disminuir la carga orgánica y a la vez disminuir la acidez del agua residual, llevándola de ser posible a la neutralidad.
- Diseñar un sistema de flujo pistón vertical, para tratamiento de aguas residuales que hayan sido tratadas en el sedimentador y biofiltro.

1.3 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA EN QUE PARTICIPÓ

La parte experimental de este proyecto, que corresponde al tratamiento del agua residual del beneficio húmedo del café, fue realizada en el laboratorio de Biotecnología ubicado en el edificio J del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.

1.3.1 Historia del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez

En la década de los 70's, se incorpora el estado de Chiapas al movimiento educativo nacional extensión educativa, por intervención del Gobierno del Estado de Chiapas ante la federación.

Esta gestión dio origen a la creación del Instituto Tecnológico Regional de Tuxtla Gutiérrez (ITRTG) hoy Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez (ITTG).

El día 23 de agosto de 1971 el Gobernador del Estado, Dr. Manuel Velasco Suárez, colocó la primera piedra de lo que muy pronto sería el Centro Educativo de nivel medio superior más importante de la entidad.

El día 22 de octubre de 1972, con una infraestructura de 2 edificios con 8 aulas, 2 laboratorios y un edificio para talleres abre sus puertas el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez con las carreras de Técnico en Máquinas de Combustión Interna, Electricidad, Laboratorista Químico y Máquinas y Herramientas.

En el año 1974 dio inicio la modalidad en el nivel superior, ofreciendo las carreras de Ingeniería Industrial en Producción y Bioquímica en Productos Naturales.

En 1980 se amplió la oferta educativa al incorporarse las carreras de Ingeniería Industrial Eléctrica e Ingeniería Industrial Química.

En 1987 se abre la carrera de Ingeniería en Electrónica y se liquidan en 1989 las carreras del sistema abierto del nivel medio superior y en el nivel superior se reorientó la oferta en la carrera de Ingeniería Industrial Eléctrica y se inicia también Ingeniería Mecánica.

En 1991 surge la licenciatura en Ingeniería en Sistemas Computacionales.

Desde 1997 el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez ofrece la Especialización en Ingeniería Ambiental como primer programa de postgrado.

En 1998 se estableció el programa interinstitucional de postgrado con la Universidad Autónoma de Chiapas para impartir en el Instituto Tecnológico la Maestría en Biotecnología.

En el año 1999 se inició el programa de Maestría en Administración como respuesta a la demanda del sector industrial y de servicios de la región.

A partir de 2000 se abrió también la Especialización en Biotecnología Vegetal y un año después dio inicio el programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Bioquímica y la Licenciatura en Informática.

1.3.2 Misión

La misión del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez es formar de manera integral profesionales de excelencia en el campo de la ciencia y la tecnología con actitud emprendedora, respeto al medio ambiente y apego a los valores éticos.

1.3.3 Visión

Ser una Institución de excelencia en la educación superior tecnológica, comprometida con el desarrollo socioeconómico, sostenido y sustentable de la región.

1.3.4 Datos generales de la institución

Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez
Carretera Panamericana Km. 1080
C.P. 29000, Apartado Postal 599
Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México
Teléfonos: (961) 61-5-03-80 Ext. 319 y (961) 61-5-04-61
Fax: (961) 61-5-16-87



Figura 1.1 Ubicación de la Institución en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas



Figura 1.2 Instalaciones del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez

Edificio J

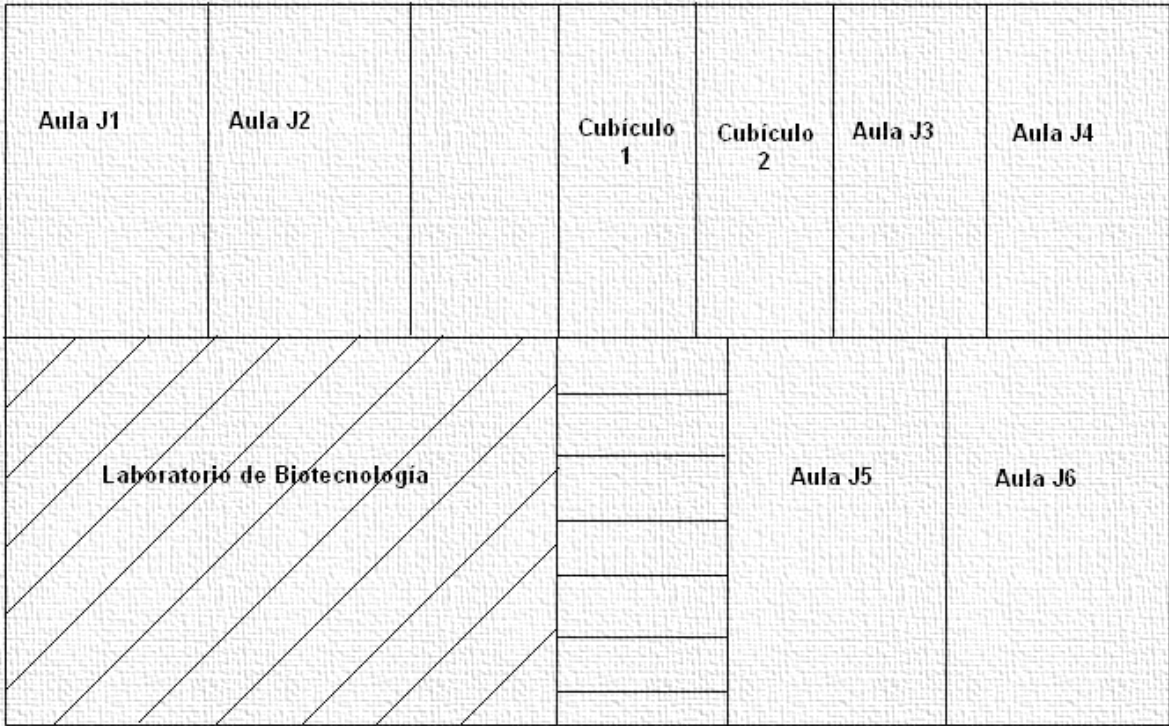


Figura 1.3 Ubicación del laboratorio de Biotecnología dentro del edificio

1.4 PROBLEMAS A RESOLVER

- Mediante la realización de este estudio se busca mitigar el impacto negativo al medio ambiente que se origina debido a las aguas residuales del beneficio húmedo del café
- Diseñar un sistema que sea eficiente en la remoción de la carga orgánica de las aguas residuales del beneficio húmedo del café y que al mismo tiempo cumpla con los requisitos de ser de bajo costo de construcción, monitoreo e instalación.

1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES

El presente proyecto está enfocado al tratamiento de las aguas residuales que se generan en el beneficio húmedo del café debido a que se consideran como las de mayor contaminación orgánica, incluso cabe mencionar que el agua negra urbana está en promedio diez veces menos contaminada que el agua de desecho de un beneficio (Aguirre, 1999), por lo tanto si se diseña un sistema que sea eficaz en la disminución de la carga orgánica en las ARBHC, sería también capaz de tratar aguas residuales domésticas, ya que el índice de biodegradabilidad en este tipo de aguas es mayor de 0.5, por lo que se consideran aptas para ser tratadas por métodos biológicos. Sin embargo debido a lo mencionado anteriormente las aguas residuales de otra índole como por ejemplo aguas con grandes cantidades de compuestos inorgánicos este sistema no sería apropiado para su tratamiento.

Los metales pesados, generalmente, no se eliminan por procesos naturales debido a que no son biodegradables (Förstner y Wittmann, 1979), es por esta razón que no se considera la biodegradación de metales porque no pueden ser reducidos en componentes y sólo están presentes en trazas.

CAPÍTULO II. FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1 GENERALIDADES DEL CAFÉ (*coffea arabica*)

Cafeto es el nombre común de un género de árboles de la familia de las Rubiáceas y también de sus semillas y de la bebida que con ellas se prepara. De la treintena de especies que comprende el género *Coffea* sólo son importantes tres: *arabica*, *canephora* y *liberica*.

El arbusto o arbolillo, de 4.6 a 6 m de altura en la madurez tiene hojas aovadas, lustrosas, verdes, que se mantienen durante 3 a 5 años y flores blancas, fragantes, que sólo permanecen abiertas durante unos pocos días. El fruto se desarrolla en el curso de los seis o siete meses siguientes a la aparición de la flor; cambia desde el verde claro al rojo y, cuando está totalmente maduro y listo para la recolección, al carmesí.

El fruto maduro, que se parece a la cereza, se forma en racimos unidos a las ramas por tallos muy cortos, suele encerrar dos semillas rodeadas de una pulpa dulce. Al fruto se le dice cereza, uva o capulín y está recubierto en una instancia de una película o cascarilla muy delgada que se llama pergamino.

La semilla del café contiene una compleja mezcla de componentes químicos como la cafeína, aldehídos, cetonas, ésteres, aminas y unos compuestos de azufre llamados mercaptanos (SIAP, 2012).

2.2 COMPONENTES DEL CAFÉ

Las partes que componen al fruto del cafeto son las siguientes:

- **Epicarpio o piel:** Los colores que va tomando desde su etapa juvenil hasta su maduración, son los siguientes: verde, amarillo, rosado y rojo (algunas veces amarillo) sucesivamente. Tomando una coloración castaño oscuro cuando el grano empieza a secarse.
- **Mesocarpio:** Es la parte carnosa del grano, la cual está compuesta por sustancias pectinas y azúcares, comúnmente se les denomina mucílago o baba.

- **Endocarpio o pergamino:** Esta es la capa protectora de la semilla, compuesta por material celulósico, cuando el proceso ha sido el correcto para la cereza, este es de color amarillo pajizo.
- **Perisperma o película plateada:** Es un tejido delgado que cubre a la semilla, su color es gris plateado, rojizo o negro.
- **Endospermo o semilla:** Es el grano desprovisto de todas sus capas (cubiertas); es denominada café verde u oro cuando éste ya ha sido procesado.
- **Embrión o germen:** Es la planta en estado latente la cual se encuentra alojada en una de las extremidades de la semilla.

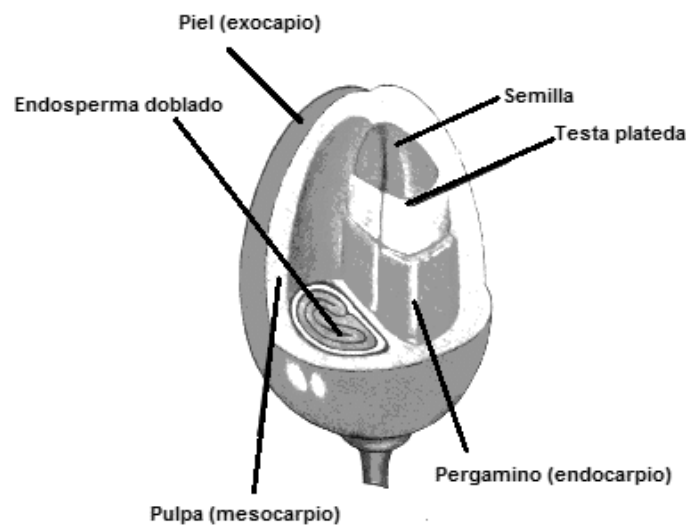


Figura 2.1 Conformación del grano de café (von Enden *et.al.*, 2004).

Es importante mencionar que, el café maduro presenta una composición en la cual el grano, que es la parte aprovechable para el proceso, representa el 20% del volumen total de la fruta, de manera tal que, el procesamiento de extracción del fruto (beneficiado) genera un 80% del volumen procesado en calidad de desechos, cada uno en un grado diferente constituyendo un riesgo para el medio ambiente si no se reutiliza de una manera inteligente para otros propósitos utilizando los principios de producción más limpia (Orozco *et al*, 2005).

2.3 ETAPAS DE TRANSFORMACIÓN

Las etapas de transformación son un proceso de beneficiado del café, el cual se podría definir como el proceso mediante el cual se transforma el fruto (café en fruta) en producto comercial (café oro).

Dichas etapas se dividen en tres fases (Ortega, 2010):

1. Beneficio húmedo: Consiste en la transformación del café cereza en café pergamino.

Hay dos métodos para beneficiar el café la vía seca y la vía húmeda:

- En la vía seca: no se utiliza agua, consiste en secar los frutos maduros o cerezas al sol para obtener el café bola o capulín.
- En la vía húmeda: el café cereza es despulpado, fermentado, oreado y secado, hasta obtener café pergamino, con 12% de humedad, que se pueda almacenar.

Una vez que se ha efectuado el corte del café, con una madurez idealmente homogénea, se procede a separar los granos defectuosos de los “buenos”.

Posteriormente se procede a efectuar el beneficio húmedo, donde la cereza se coloca en tolvas “sifones” llenas de agua, con el fin de evitar fermentaciones prematuras o mermas en el peso.

El café colocado en las tolvas se hace pasar a una máquina en el cual el grano es liberado de la cáscara y pulpa que lo cubre. Esta práctica consiste en friccionar el fruto entre dos discos de metal para separar la cáscara y la pulpa del grano, usando agua para facilitar la tarea, a esta operación se le conoce con el nombre de despulpado y debe realizarse inmediatamente después de la recepción de la cereza, para evitar que ésta se fermente.

Resultado del beneficiado húmedo es el café pergamino, nombre que se le da por la película o mucílago que todavía lo envuelve y que no es soluble en agua, por lo que debe fermentarse durante 24 horas en tanques de agua.

En seguida se somete al grano a un oreador o presecado, el cual se puede hacer en patios de cemento en los que se tiende el café por un período de cinco días aproximadamente,

Una vez que el grano se ha secado, se realiza el:

2. Beneficio seco: Es la transformación del café pergamino en oro. Inicia cuando el café pergamino es molido, y consiste en quitar el mucílago seco por medio de máquinas trilladoras, de donde se obtiene el café oro o verde. Consiguiendo un porcentaje de humedad del 12%, el cual es indicado para su almacenamiento, evitando así que se formen hongos y decoloraciones en el grano para poder continuar con el proceso.

Una vez que el café haya sido molido se procede a clasificarlo. La finalidad de clasificación es separar y seleccionar los granos buenos de los malos, los que tienen algún defecto o han sido mordidos o quebrados en alguna de las operaciones anteriores; además de que un café clasificado alcanza un mayor precio en el mercado; incluso, si el grano va a ser vendido como café pergamino, puede hacerse una clasificación para que esta presentación alcance un precio mucho más alto.

3. Industrialización: Consiste en el tostado y molido del grano

2.4 AGUAS RESIDUALES DEL BENEFICIO HÚMEDO DEL CAFÉ

El beneficiado húmedo del café Arábica (*Coffea arabica*) produce una calidad superior y recibe precios más altos en el mercado mundial en comparación con el café elaborado mediante el método seco. Sin embargo, el procesamiento del café húmedo produce grandes cantidades de efluentes, que tienen el potencial de dañar el medio ambiente.

En el estado de Chiapas, para beneficiar un quintal de café (245 kg de café cereza) se gastan aproximadamente 1400-1500 L de agua (COMCAFE, 2010). Esto quiere decir que si en la cosecha 2011-2012, se produjeron 528,932 toneladas de café cereza, durante su beneficio se generaron 3'130,414 m³ de agua residual, que fueron descargadas a los cuerpos de aguas superficiales sin recibir un tratamiento previo.

2.4.1 Características físicas de las aguas residuales

Los constituyentes encontrados en las aguas residuales pueden ser clasificados como físicos, químicos y biológicos. Las principales características físicas de un agua residual, son su contenido de sólidos, distribución de partículas por tamaño, turbiedad, color, transmitancia/absorbancia, olor, temperatura, densidad y conductividad (Crites y Tchobanoglus, 2000)

El agua residual contiene una variedad de materiales sólidos que varían desde hilachas hasta materiales coloidales. La clasificación de los diferentes sólidos identificados es la siguiente (Crites y Tchobanoglous, 2000).

- Sólidos Totales (ST). Residuo remanente de que la muestra ha sido evaporada y secada a una temperatura específica (103-105 °C).
- Sólidos volátiles totales (SVT) . Sólidos que pueden ser volatilizados e incinerados cuando los ST son calcinados (500 ± 50 °C)
- Sólidos fijos totales (SFT). Residuo que permanece después de incinerar los ST (500 ± 50 °C)
- Sólidos suspendidos totales (SST). Fracción de ST retenido sobre un filtro con un tamaño de poro específico medido después de que ha sido secado a una temperatura específica. El filtro más utilizado para la determinación de SST en el filtro Whatman de la fibra de vidrio que tiene un tamaño nominal de poros de aproximadamente 1.58 µm
- Sólidos suspendidos volátiles (SSV). Estos sólidos pueden ser volatilizados e incinerados cuando los SST son calcinados (500 ± 50 °C)
- Sólidos suspendidos fijos (SSF). Residuo remanente después de calcinar SST (500 ± 50 °C)
- Sólidos disueltos totales (SDT) (ST-SST). Sólidos que pasan a través del filtro y luego son evaporados y secados a una temperatura específica. La medida de SDT comprende coloides y sólidos disueltos. Los coloides son de tamaño 0.001 a 1 µm.
- Sólidos disueltos volátiles. Sólidos que pueden ser volatilizados o incinerados cuando los SDT son calcinados (500 ± 50 °C).
- Sólidos disueltos fijos (SDF). Residuo remanente después de calcinar los SDT (500 ± 50 °C)
- Sólidos sedimentables. Sólidos suspendidos, expresados como mililitros por litros, que se sedimentarán por fuera de la suspensión dentro de un periodo de tiempo específico.

La medida del tamaño de partícula es un análisis que permite establecer la distribución de partículas según su tamaño. La información del tamaño de partículas orgánicas biodegradables es de importancia desde el punto de vista de tratamiento, debido a que la velocidad de degradación biológica de estas partículas depende de su tamaño.

El color en aguas residuales es causado por sólidos suspendidos, material coloidal y sustancias en solución. El color acusado por sólidos suspendidos se llama color aparente, mientras que el color debido a sustancias disueltas y coloidales se denomina color verdadero. El color verdadero se obtiene sobre una muestra filtrada. Dado que la medida depende del tamaño del poro del filtro, se debe especificar el tipo de filtro usado y tamaño del poro. Cualitativamente, el color puede ser usado para estimar la condición general del agua residual. Si el color es café claro, el agua residual lleva aproximadamente seis horas después de su descarga. Un color gris claro es característico de aguas que han sufrido algún grado de descomposición o que han permanecido un tiempo corto en los sistemas de recolección. Si el color es gris oscuro o negro, se trata en general de aguas sépticas que han sufrido una fuerte descomposición bacteriana bajo condiciones anaerobias (Crites y Tchobanoglous, 2000).

El olor del agua residual fresca es en general inofensivo, pero una gran variedad de compuestos malolientes son liberados cuando se produce la degradación biológica, bajo condiciones anaerobias, de las aguas residuales. El principal compuesto de olor indeseable es el sulfuro de hidrógeno. Otros compuestos como indol, eskatol y mercaptanos, formados bajo condiciones anaerobias, pueden causar olores mucho más inofensivos que el sulfuro de hidrógeno.

La densidad es una característica física de gran importancia a la hora de establecer la formación potencial de corrientes de densidad en sedimentadores, humedales artificiales y otras unidades de tratamiento. La densidad del agua residual doméstica que no contiene cantidades significativas de desecho es prácticamente igual a la del agua a una misma temperatura (Crites y Tchobanoglous, 2000).

2.4.2 Compuestos orgánicos agregados del agua residual

Durante todo el proceso de recolección de aguas residuales, estas adquieren muchísimos componentes extras. Los compuestos orgánicos agregados al agua residual son muy variados.

El principal contaminante en el agua del café proviene de los residuos del conjunto de materia orgánica libre durante la fabricación de la pasta, cuando el mesocarpio es removido y la textura del mucílago que rodea el pergamino está parcialmente desintegrada (von Enden et. al., 2004).

El agua que contiene la pulpa, consiste principalmente en azúcares que son fermentados rápidamente, así como los componentes de mucílago. La pulpa y mucílago contienen una cantidad elevada de proteínas y azúcares, y el mucílago en particular de pectinas (carbohidratos polisacáridos).

La diferencia que existe entre un agua residual tratada y otra no tratada, es la cantidad de compuestos orgánicos agregados presentes en las muestras. Este parámetro es de mucha ayuda cuando se trata de analizar el desempeño de los procesos de tratamiento y estudiar su comportamiento en las fuentes receptoras.

Hoy en día existen distintos métodos para el cálculo de dicho parámetro.

Estos son:

- a) Demanda Bioquímica de Oxígeno a los 5 días (DBO₅).
- b) Demanda Química de Oxígeno (DQO).
- c) Carbono Orgánico Total (COT).

2.4.2.1 Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)

Es la cantidad de oxígeno que utilizan los microorganismos para llevar a cabo la reducción de la materia orgánica. En la prueba estándar de DBO se vierte una pequeña muestra de agua residual en una botella (300 ml. de volumen). Dicha botella se completa a volumen usando agua saturada con oxígeno y con los nutrientes requeridos para crecimiento biológico.

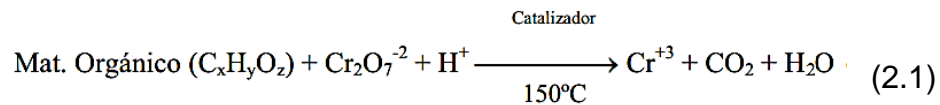
Antes de tapar la botella se mide la concentración de oxígeno. La botella se incuba durante 5 días a 20 °C para posteriormente volver a medir la concentración de oxígeno disuelto, expresado en miligramos por litro, dividido por la fracción decimal del volumen de muestra usada.

2.4.2.2 Demanda Química de oxígeno (DQO)

La Demanda Química de Oxígeno ó DQO, es la cantidad de oxígeno que se requiere para oxidar químicamente el material orgánico. Difiere de la DBO en que en esta última prueba solo se detecta el material orgánico degradado

biológicamente o que es biodegradable. En la determinación de DQO todo el material orgánico - biodegradable y no biodegradable - es químicamente oxidado por el dicromato de potasio en medio ácido en la presencia de un catalizador.

Para esto se emplea una mezcla de ácido sulfúrico y dicromato de potasio ($\text{Cr}_2\text{O}_7\text{K}_2$) con iones plata como catalizador. En estas condiciones, en un tiempo de dos horas de digestión, a una temperatura de 150°C , el Cromo (VI) pasa al estado de oxidación Cromo (III) oxidando la materia orgánica.



Parte de los materiales orgánicos no se pueden degradar biológicamente porque resultan ser tóxicos a los microorganismos o porque su reducción llega a ser tan lenta que son considerados como no biodegradables. Estos materiales son los pesticidas, insecticidas y herbicidas. Para conocer la cantidad de este tipo de materiales orgánicos no biodegradables se hace la prueba de Demanda Química de Oxígeno (DQO).

Junto con la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) se puede calcular la cantidad de orgánicos biodegradables presentes en el agua. Esto se puede lograr restando el valor de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) al valor de la Demanda Química de Oxígeno (DQO).

2.4.2.3 Carbono Orgánico Total (COT)

Esta prueba es usada para la medición de carbono orgánico total presente en una muestra acuosa. Los métodos para la prueba del COT utilizan oxígeno y calor, radiación ultravioleta, oxidantes químicos o alguna combinación de éstos para convertir el carbono orgánico en dióxido de carbono, el cual es medido con un analizador infrarrojo o por otros medios. El COT del agua residual puede ser utilizado para medir el nivel de polución en el agua y, además, ha sido posible relacionar este parámetro con la DBO y la DQO. Por otro lado, este ensayo toma de 5 a 10 minutos para ser completado, lo que le da una ventaja a su favor.

2.4.3 Relaciones entre DBO, DQO y COT

Dependiendo de la relación existente entre estos tres parámetros se puede hacer un análisis del tipo de tratamiento que se ha llevado a cabo en el agua residual. Así, por ejemplo tenemos que si la relación DBO/DQO para aguas no

tratadas es mayor que 0.5, los residuos se consideran fácilmente tratables mediante procesos biológicos. Si la relación DBO/DQO es menor de 0.3, el residuo puede contener constituyentes tóxicos o se pueden requerir microorganismos aclimatados para su estabilización. A continuación se muestra una tabla de las relaciones anteriormente mencionadas:

Tabla 2.1 Comparación de varios parámetros utilizados para caracterizar aguas residuales.

TIPO DE AGUA RESIDUAL	DBO/DQO	DBO/COT
No tratada.	0.3-0.8	1.2-2.0
Después de Sedimentación primaria.	0.4-0.6	0.8-1.2
Efluente final.	0.1-0.3	0.2-0.5

Fuente: Ron Crites y George Tchobanoglous, "Tratamiento de aguas Residuales", USA 2000.

2.5 TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Los pasos básicos para el tratamiento de aguas residuales incluyen (Rodríguez *et al.*, 2006):

- 1. Pretratamiento:** remoción física de objetos grandes.
- 2. Deposición primaria:** sedimentación por gravedad de las partículas sólidas y contaminantes adheridos.
- 3. Tratamiento secundario:** digestión biológica usando lodos activados o filtros de goteo que fomentan el crecimiento de microorganismos.
- 4. Tratamiento terciario:** tratamiento químico (por ejemplo, precipitación, desinfección).

Una de las formas más utilizadas para clasificar los tratamientos unitarios más convencionales para el tratamiento de aguas residuales, es en función de los contaminantes presentes en la misma, o también en función del fundamento del tratamiento (químico, físico o biológico).

2.5.1 Tratamientos para la eliminación de materia en suspensión

La materia en suspensión puede ser de muy diversa índole, desde partículas de varios centímetros y muy densas (normalmente inorgánicas), hasta suspensiones coloidales muy estables y con tamaños de partícula de hasta unos pocos nanómetros (normalmente de naturaleza orgánica).

La eliminación de esta materia en suspensión se suele hacer mediante operaciones mecánicas, aunque, en muchos casos se utilizan aditivos químicos, denominándose en este caso tratamientos químico-físicos.

Algunas de las operaciones unitarias más habituales (Rodríguez *et al.*, 2006), son desbaste, sedimentación, filtración, flotación y coagulación-floculación, sin embargo las más relevantes para esta investigación son las siguientes:

- **Sedimentación:** Operación física en la que se aprovecha la fuerza de la gravedad que hace que una partícula más densa que el agua tenga una trayectoria descendente, depositándose en el fondo del sedimentador.
- **Filtración:** Operación en la que se hace pasar el agua a través de un medio poroso, con el objetivo de retener la mayor cantidad posible de materia en suspensión. El medio poroso tradicionalmente utilizado es un lecho de arena, de altura variable, dispuesta en distintas capas de distinto tamaño de partícula, siendo la superior la más pequeña y de entre 0.15 y 0.3 mm.

2.5.2 Tratamientos para la eliminación de materia disuelta

La materia disuelta puede tener características y concentraciones muy diversas: desde grandes cantidades de sales inorgánicas disueltas (salmueras) orgánicas (materia orgánica biodegradable en industria de alimentación) hasta extremadamente pequeñas cantidades de inorgánicos (metales pesados) y orgánicos (pesticidas) pero necesaria su eliminación dado su carácter peligroso.

Los métodos más comunes para eliminación de materia disuelta (Rodríguez *et al.*, 2006) son los siguientes: precipitación, procesos electroquímicos, intercambio iónico, adsorción y desinfección.

- **Precipitación:** Consiste en la eliminación de una sustancia disuelta indeseable, por adición de un reactivo que forme un compuesto insoluble con el mismo, facilitando así su eliminación por cualquiera de los métodos

descritos en la eliminación de la materia en suspensión. Un reactivo de muy frecuente uso en este tipo de operaciones es el Ca^{2+} .

- **Procesos Electroquímicos:** Basados en la utilización de técnicas electroquímicas, haciendo pasar una corriente eléctrica a través del agua (que necesariamente ha de contener un electrolito) y provocando reacciones de oxidación-reducción tanto en el cátodo como en el ánodo.
- **Intercambio Iónico:** Es una operación en la que se utiliza un material, habitualmente denominado resinas de intercambio iónico, que es capaz de retener selectivamente sobre su superficie los iones disueltos en el agua, los mantiene temporalmente unidos a la superficie, y los cede frente a una disolución con un fuerte regenerante.
- **Adsorción:** Consiste en la captación de sustancias solubles en la superficie de un sólido. Un parámetro fundamental en este caso será la superficie específica del sólido, dado que el compuesto soluble a eliminar se ha de concentrar en la superficie del mismo. La necesidad de una mayor calidad de las aguas está haciendo que este tratamiento esté en auge. El sólido universalmente utilizado en el tratamiento de aguas es el carbón activado.

2.5.3 Tratamientos biológicos

Todos los procesos biológicos de tratamiento aprovechan la notable capacidad de las bacterias para utilizar diversos componentes de aguas residuales para proporcionar la energía necesaria para el metabolismo microbiano y los bloques de construcción para la síntesis celular. Esta actividad metabólica puede eliminar los contaminantes que son tan variados como las materias primas, subproductos y productos generados en los diversos procesos y/o industrias.

Las principales ventajas sobre el tratamiento químico son (de Mes *et. al*, 2003; Schultz, 2005):

- Bajo capital y bajos costos operativos en comparación con los procesos de oxidación química.
- Destrucción de compuestos orgánicos, frente a la separación de fase simple en el proceso químico.
- La oxidación de una amplia variedad de compuestos orgánicos.

- Remoción y reducción de los compuestos inorgánicos, tales como sulfuros y amoníaco, y la eliminación de nitrógeno total posible a través de desnitrificación.
- Flexibilidad operativa para manejar una amplia gama de caudales así como diversas aguas residuales con diferentes características.
- Reducción de la toxicidad acuática

2.5.3.1 Tratamiento anaerobio.

En el tratamiento anaerobio, el sustrato contenido en las aguas residuales se mezcla con grandes cantidades de microorganismos, pero aquí, el aire no forma parte del proceso. Bajo estas condiciones los microorganismos que crecen son aquellos capaces de convertir los desechos orgánicos a dióxido de carbono (CO_2) y gas metano (CH_4).

La oxidación anaeróbica para la conversión a gas metano, representa poca energía para los microorganismos, por lo tanto, su tasa de crecimiento es lenta y sólo una pequeña porción de los residuos se convierte en nuevas células, la mayor parte de los residuos son degradados a gas metano. Dicha conversión a gas metano representa un medio de estabilización, ya que este gas es insoluble y se escapa en cada etapa.

El proceso no es completamente operacional hasta que todos los grupos formadores de metano son finalmente establecidos. Esto puede tomar varias semanas si el proceso se comenzó sin el beneficio "semilla" de lodo que contiene los formadores de metano requeridos para por la presencia de ácidos específicos (McCarty, 1964). Estos procesos pueden ser extremadamente eficientes debido a su bajo consumo de energía y menor producción de lodos en comparación con los procesos aerobios.

2.5.3.1.1 Microbiología y bioquímica del proceso

El proceso principal dentro del tratamiento de aguas residuales es la digestión anaerobia. La cual se lleva dentro de un reactor que se basa en el proceso de biodegradación llamado metanogénesis.

La metanogénesis, consta de cuatro reacciones principales: La hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis, que se describe a detalle en la Figura 2.1.

Los pasos principales de las reacciones, se describen a continuación:

1.- La hidrólisis por medio del sistema enzima-mediador de carbohidratos, proteínas, y/o lípidos, resultando en compuestos monómeros tales como aminoácidos, azúcares, y ácidos grasos.

2.- La fermentación de ácidos orgánicos por bacterias asistidas, a través del cual de pueden obtener los ácidos orgánicos (acético, propiónico, y butírico), se denomina como el paso acidogénico.

3.- La conversión asistida por bacterias de ácidos orgánicos que contienen más de tres átomos de carbono a ácido acético e hidrógeno, se denomina paso acetogénico.

4.- La conversión de ácido acético en metano y la reducción de dióxido de carbono con hidrógeno en metano se llama paso metanogénico.

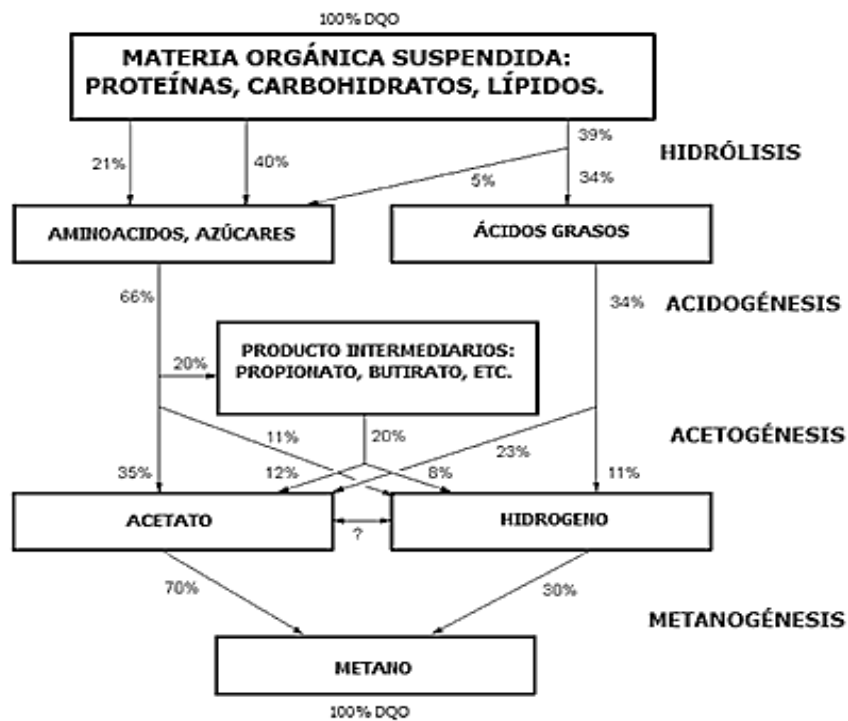


Figura 2.1 Diagrama general de la metanogénesis llevada a cabo en el reactor anaerobio con deflectores (ABR).

Como se mencionó con anterioridad, la etapa metanogénica es llevada a cabo en un reactor, que puede ser de tipo UASB por sus siglas en inglés (Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente), ABR por sus siglas en inglés (Reactor Anaerobio con deflectores), Lecho fluidizado etc.

Para fines de esta investigación el reactor continuo ABR (Anaerobic Baffled Reactor) (Figura 2.2), será analizado. Lo anterior ha sido determinado dado que las bombas para la inyección de las aguas son de bajo flujo, los cuáles en un reactor UASB o Lecho fluidizado sería complicado poder utilizarlo para romper la presión extra que ejerce el líquido por razón de la altura, dado que estos reactores son verticales. A diferencia un reactor ABR es un reactor horizontal, con el cuál no debe tener este tipo de complicaciones hidráulicas para su operación. Así también el proyecto está pensado a futuro para ser implantado en una finca cafetalera, lo cual representaría un mayor costo de operación, instalación y monitoreo es un reactor vertical.

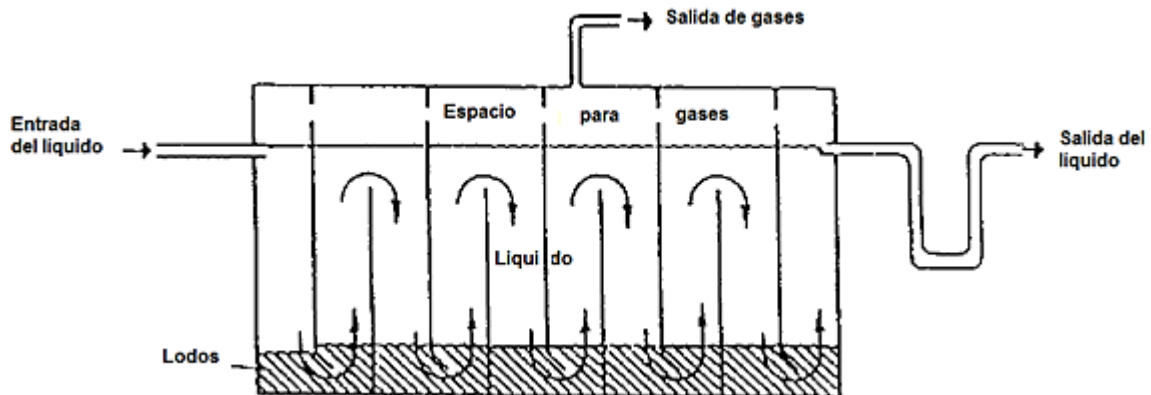


Figura 2.2 Esquema de un reactor ABR para la digestión anaeróbica (Kennedy *et. al.*, 2007).

El consorcio de microorganismos anaerobios que trabajan juntos para llevar a cabo la conversión los residuos a partir de los lodos orgánicos se pueden agrupar de la siguiente forma:

- Organismos responsables de la hidrólisis de polímeros orgánicos y lípidos a las estructuras fundamentales, como monosacáridos, aminoácidos, y compuestos relacionados. Es llevada a cabo por enzimas extracelulares, por ejemplo, Clostridium, que degrada compuestos que contienen celulosa y almidón, y Bacillus que se encarga de la degradación de proteínas y grasas.

- Bacterias anaerobias que fermentan a los productos degradados a ácidos orgánicos simples, el más común en un digester anaeróbico es el ácido acético a través de microorganismos acidogénicos o formadores de ácidos. Estas bacterias se describen como no metanogénicas y pueden ser *Clostridium* spp., *Peptococcus anaerobus*, *Bifidobacterium* spp., *Desulphovibrio* spp., *Corynebacterium* spp., *Lactobacillus*, *Actinomyces*, *Aureus* y *Escherichia coli*.
- Organismos que convierte el ácido acético e hidrógeno formado por los formadores de ácido en gas metano y dióxido de carbono, designados como metanogénicos. Los microorganismos más importantes que han sido identificados son *Methanobacterium*, *Methanobacillus*, *Methanococcus* y *Methanosarcina* (Gavrilescu, 2002).

CAPÍTULO III. PROCEDIMIENTO Y DESCRIPCIÓN DE LAS ACTIVIDADES REALIZADAS

El presente proyecto de investigación denominado: Rediseño de un biorreactor para el tratamiento de aguas residuales provenientes del beneficio húmedo del café se llevó a cabo en el laboratorio de Biotecnología del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, en el Estado de Chiapas.

3.1 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE SEDIMENTADOR, FILTRO Y REACTOR.

3.1.1 SEDIMENTADOR

Dado que se buscaba optimizar el sistema desarrollado por Tacias (2012) que reportó la remoción en un sedimentador del 50%, se propuso el rediseño empleando baffles inclinados, esto debido a que, Cheng *et. al.* (2009) reportaron un porcentaje de remoción de entre 50-70% a una separación entre platos de 50-50 mm a 100-100 mm con una inclinación de 60°. El espacio entre las placas inclinadas afecta la eficiencia de remoción de sólidos suspendidos. Cuanto menor sea el espacio entre placas, menor será la distancia de sedimentación de sólidos en suspensión, y la remoción de partículas suspendidas podría ser mejor (Cheng *et. al.*, 2009). Los deflectores inclinados aumentan el porcentaje de eliminación de sólidos en suspensión. Para la eliminación de estos, las placas inclinadas podría acortar la distancia de la sedimentación e incrementar la velocidad de sedimentación (Yaksic *et. al.*, 2005)

El sedimentador tiene una capacidad de 0.0046 m³, con unas dimensiones finales de 43 cm de largo x 8.9 cm de ancho x 12 cm de alto (Figura 3.2).

Para la elaboración del sedimentador se utilizó una placa doble de acrílico (6 mm de espesor) pegada con resina para acrílico.

Dicho sedimentador se evaluó a partir de:

- Variación de flujos: 0.34 L/h, 0.23 L/h y 0.17 L/h, para cumplir con los tiempos de retención hidráulica (TRH) de 10, 15 y 20 h.
- Ángulo de inclinación de los deflectores: 55°
- Distancia de la separación entre deflectores: 10 cm

- El sedimentador tiene por objeto separar del agua cruda partículas inferiores a 0.2 mm y superiores a 0.05 mm, es decir que nos encontramos en régimen laminar, tal y como se refleja en la Figura 3.1 y la ecuación que lo gobierna es la Ley de Stokes (3.1).

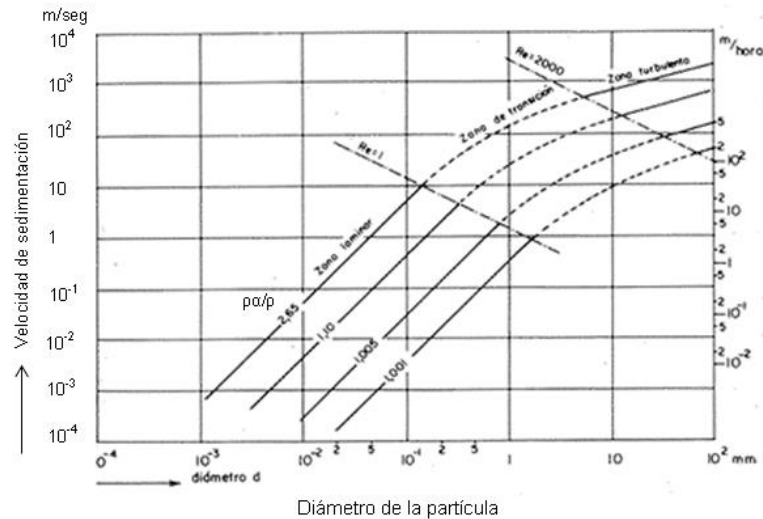


Figura 3.1. Gráfica de sedimentación de acuerdo al tamaño de partícula (Kubesch et. al., 2009)

$$V_s = \frac{1}{18} \cdot g \cdot \left(\frac{\rho_s - 1}{\eta} \right) \cdot d^2 \quad (3.1)$$

Donde:

V_s : velocidad de sedimentación (m/s)

g : gravedad (m/s²)

ρ_s : Densidad de la partícula (kg/m³)

η : viscosidad de la partícula (kg/m*s)

d : diámetro de la partícula (m)

En base a la Tabla 3.1 se determinó una velocidad de sedimentación (V_s) de 40 m/h, así también se tomó en cuenta el flujo de alimentación más elevado propuesto.

Tabla 3.1. Relación del diámetro de partícula con la velocidad de

Diámetro partícula (mm)	Velocidad de sedimentación (m/h)
0.15	40-50
0.20	65-75
0.25	85-95
0.30	105-120

En base al flujo de alimentación del sistema, así como el volumen ocupado por el fluido se llevó a cabo el cálculo del área superficial:

$$A_s = \frac{Q}{V_s} \quad (3.2)$$

Donde Q es el caudal en m³/s.

Con lo anterior se procedió al cálculo del área superficial resultando:

$$A_s = \frac{4.167 \times 10^{-4} (\text{m}^3/\text{s})}{0.0111 (\text{m}/\text{s})} = 0.0375 \text{ m}^2$$

Con el área superficial se propone el ancho del sedimentador (B), y con esto se establecen las relaciones:

$$3 < \frac{L}{B} < 6 \qquad 5 < \frac{L}{H} < 20$$

para obtener la longitud (L) y altura del sistema (H).

Con el área superficial se propuso un ancho del sedimentador (B) de 20.3 cm, y en base a las relaciones L/B = 4, dando como resultado una longitud (L) de 81.2 cm. Con la longitud anterior se calculó la altura (H) en base a la relación L/H= 5, obteniéndose una altura de 16.24 cm. Lo cual se ajusta a una longitud de 82 cm, altura de 17 cm y ancho de 21 cm.

Con lo anterior se puede calcular el volumen total ocupado por las aguas (V):

$$V = L * H * B \quad (3.3)$$

Esto representa las tres cuartas partes del volumen total del sistema (V_T) de acuerdo a reglas heurísticas.

El volumen total ocupado por las aguas residuales (V) es de 0.029 m³ de acuerdo a la ecuación 3.3. En base a las reglas heurísticas, el cálculo del volumen total da como resultado 0.039 m³.

Las dimensiones finales del sedimentador son de 83.2 cm longitud x 23.3 cm ancho x 20.1 cm altura. Lo cuál cumple con las reglas heurísticas antes mencionadas.

Para conocer el tiempo de retención hidráulica del sistema (TRH) se lleva a cabo un análisis sobre la siguiente ecuación:

$$TRH = \frac{V}{Q} \quad (3.4)$$

Donde:

V= Volumen del sedimentador (m³).

Q= Flujo volumétrico (m³/hr)

El tiempo de retención hidráulica para este sistema se calcula en base a la ecuación 3.4, probando con los diferentes flujos propuestos; con lo cuál se obtiene un tiempo de retención de 10 h para el flujo de 2.9 L/h, 15 h para el flujo de 1.93 L/h y 20 h para el flujo de 1.45 L/h.

Con base a la ecuación número 3.5 y los datos de la Tabla 3.2 se puede conocer el porcentaje de remoción aproximado:

$$R = \frac{t}{a + bt} \quad (3.5)$$

Donde:

R: Porcentaje de remoción esperado DBO₅ o STT (%)

t: Tiempo de retención hidráulica (h)

a y b: Constantes empíricas

Tabla 3.2 Constantes empíricas para la ecuación de porcentaje de remoción aproximado.

R	a	b
DBO ₅	0.018	0.020
SST	0.0075	0.014

Se realiza una estimación del porcentaje de la DBO_5 y los sólidos suspendidos totales (STT) que serán removidos en base a la ecuación 3.5, la Tabla 3.2 y los tiempos de retención hidráulica obtenidos con anterioridad.

- TRH 10 hr: $DBO_5 = 45.87 \%$, $SST = 67.80 \%$
- TRH 15 hr: $DBO_5 = 47.16 \%$, $SST = 68.97 \%$
- TRH 20 hr: $DBO_5 = 47.85 \%$, $SST = 69.57 \%$

Dado las dimensiones del sedimentador, se procedió a hacer una escala 2:1.

Se obtuvieron las siguientes dimensiones: longitud: 40.6 cm, ancho: 8.2 cm y altura: 10.2 cm

Se obtuvo un volumen (V) = 0.0034 m³. Que correspondería a un volumen total (VT) = 0.0046 m³. Con unas dimensiones finales de: longitud: 43 cm, ancho: 8.9 cm y altura: 12 cm

Los flujos de alimentación para cada uno de los tiempos de retención hidráulica de 10 h para el flujo de 0.34 L/h, 15 h para el flujo de 0.23 L/h, 20 h 0.17 L/h.

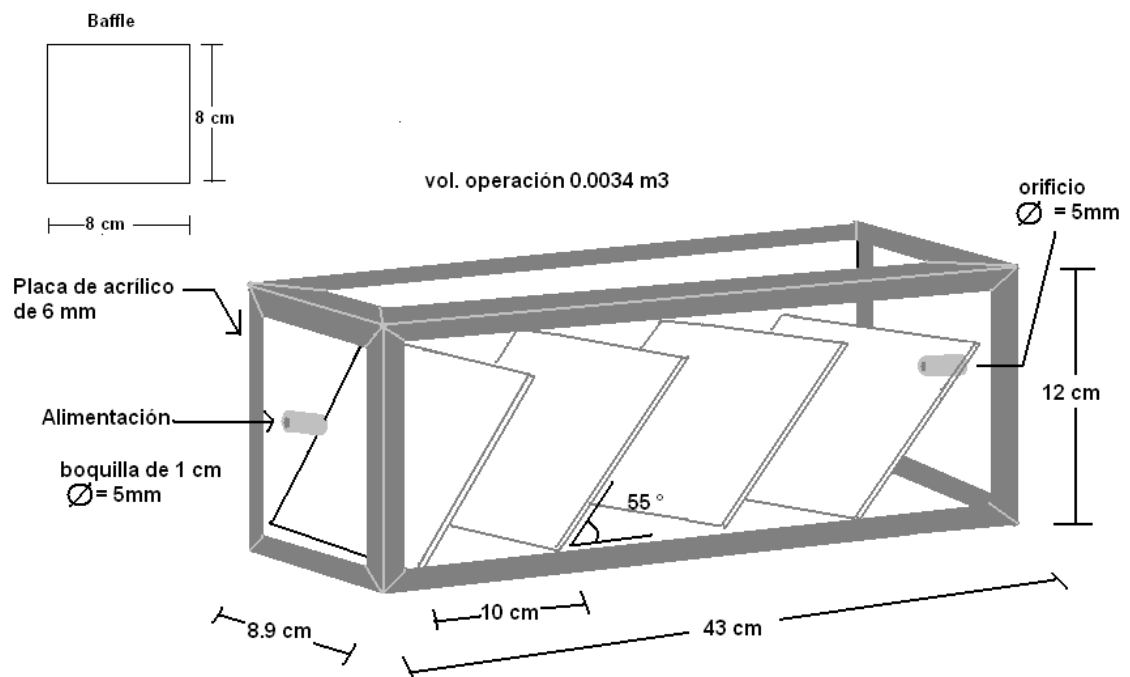


Figura 3.2 Diseño del sedimentador

3.1.2 FILTRO

En lo reportado por Tacias (2012) señala que la remoción en el filtro fue de aproximadamente el 9% ya que el tiempo de residencia era mínimo, tan pequeño que no se tomó en cuenta para el TRH del reactor; además otro de los problemas en el diseño fue el hecho de que la fase metanogénica en los digestores no se alcanzó debido a que a que el pH de las ARBHC era aún muy ácidas cuando llegaban a dichos compartimentos, por lo que es de vital importancia elevar el pH de las aguas antes de que se lleve a cabo la digestión anaerobia. Es por todo esto que en el presente proyecto se planteó colocar un filtro de carbón activado-arena-grava antes de la digestión anaerobia para propiciar condiciones favorables para que se lleve a cabo la metanogénesis y de igual manera remover una mayor cantidad de sólidos suspendidos.

Fasinmirin *et. al.* (2009) reportaron que una mezcla de carbón activado, arena fina y arena gruesa tuvo una reducción drástica de la concentración de 6.4×10^4 a 2.1×10^3 UFC*mL⁻¹ después de la filtración a través de sistema carbón activado-arena en iguales proporciones. Además, el pH fue regulado al ser utilizado el filtro, a llegar a un pH neutro. Los medios de arena se utilizan para filtrar partículas sólidas y más ligeras que están contenidas en las aguas residuales y el carbón activado derivado de madera es utilizado para disolver los productos químicos tales como aceite y otras sustancias oleofílicas que se pegan a su superficie, mientras que el agua pasa durante el proceso de tratamiento.

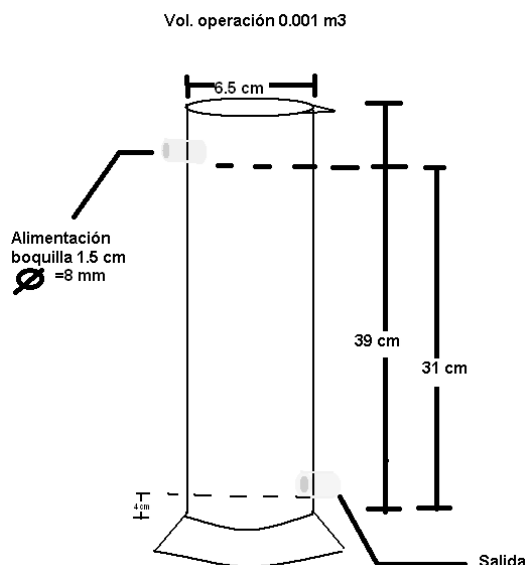


Figura 3.3. Diseño del filtro

El dimensionamiento del filtro (Figura 3.3) se llevó a cabo en base al tiempo de retención hidráulica generado por 45% volumen de grava de río, dado que no altera el pH del sistema, 45% volumen de arena con un diámetro promedio de 0.5 mm, 10% volumen de carbón activado en polvo. El tiempo de retención hidráulica para los tres flujos de alimentación fue de 20 min. La literatura nos reporta dimensionar para 7 veces el volumen de la cama, pero se ha dimensionado para 7.34 veces y ocupar un volumen de 1L, el volumen total del sistema es de 1.3L, con un diámetro de 6.5 cm, altura de 39 cm. La alimentación del sistema se localiza a 31 cm de la base con un tubo de plástico de 8 mm de diámetro interno, la salida del sistema se localiza a 4 cm sobre la base del cilindro con características similares a las del tubo de plástico anterior. El filtro se basa en el aprovechamiento de la fuerza de gravedad para atravesar el total de la cama.

3.1.3 REACTOR

En esta parte de rediseño del sistema propuesto por Tacias (2012) se busca incrementar el porcentaje de remoción alcanzado (aproximadamente 21%) mediante la adición de un paso para promover las 4 fases de la digestión anaerobia. Además de lo mencionado era necesario también incluir un inóculo adaptado a las altas concentraciones de carga orgánica ya que la falta de ella es una de las limitantes en el tratamiento de las aguas residuales del beneficio húmedo del café (Bello y Rivera, 1998).

La capacidad del reactor se hizo en base a la ecuación 3.4. El dimensionamiento del reactor (Figura 3.4) se basó en el flujo de alimentación más rápido (5.6 mL/min) y los tiempos de retención hidráulica obtenidos a partir de la literatura, en donde se ha encontrado que a 36 h de TRH se obtiene un buen desempeño de los microorganismos anaerobios en el sistema. Por lo anterior se han propuesto tres TRH: 12, 24 y 36 h. Así también se consideraron 4 pasos para el sistema, para promover las 4 etapas de la digestión, conservando las ecuaciones de relación longitud, ancho y altura utilizadas en el dimensionamiento del sedimentador. Las dimensiones del sedimentador son de 47.4 cm de largo, 15 cm de ancho y 17 cm de alto, dando un volumen final de 12.1 L, el volumen total del reactor es de 13.5 L, consta de ocho pasos, cada pared se encuentra a 3 cm de distancia una de otra, cada paso cuenta con una pared con un claro de 2.5 cm para mantener el contacto del agua residual con los microorganismos. El material de construcción fue de vidrio pegado con acrílico.

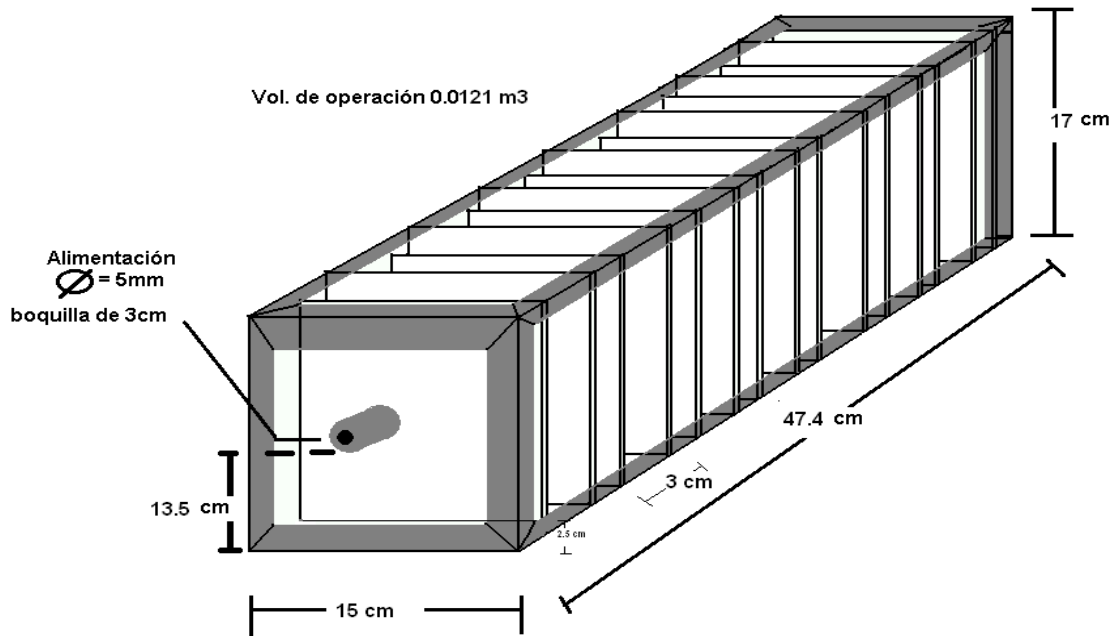


Figura 3.4. Diseño del reactor

3.2 RECOLECCIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES DEL BENEFICIO HÚMEDO DELCAFÉ

Las muestras de agua residual del beneficio húmedo del café (ARBHC), que fueron objeto de estudio en este proyecto fueron obtenidas de un beneficio ubicado en Paredón, municipio de Jitotol, Chiapas (Figura 11). Cuyas coordenadas son las siguientes: Latitud 17°6'37.69" (Norte) Longitud -92°45'41.54" (Oeste).

Se recolectaron 17 garrafones con capacidad de 20 litros cada uno (340 litros en total), los cuales fueron transportados a un cuarto de refrigeración, para ser preservados a una temperatura de 4 °C, hasta su uso.

Es muy importante señalar que las aguas que se recolectaron no son de la misma procedencia que las empleadas por Tacias, por lo que es una variable que debe considerarse más adelante.



Figura 3.5. Ubicación del beneficio

3.3 ESTABILIZACIÓN DE LODOS

Para esta operación se inocularon los lodos con aguas residuales del beneficio húmedo del café previamente neutralizadas con bicarbonato de sodio, en una proporción 1:1 (v/v).

Los pasos a seguir fueron los siguientes:

- Se midió el volumen total de lodos dando como resultado 750 ml
- Se midió el pH de agua residual el cual fue de 3.8
- Se procedió a neutralizar el pH del agua residual; para ello se agregaron 13.3 g de bicarbonato de sodio
- Se mezclaron 750 ml de lodos con 750 ml de agua residual
- Se monitoreó el inóculo cada 3 días midiendo DQO hasta que se observó una variación de $\pm 20\%$

3.4 CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL DEL BENEFICIO HÚMEDO DEL CAFÉ

El influente a tratar en los reactores fue analizado de acuerdo a los parámetros descritos en la norma oficial mexicana NOM-CCA-027-ECOL/1993, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas residuales a cuerpos receptores provenientes de la industria del beneficio del café, determinando (Tabla 4).

Tabla 3.4. Determinaciones hechas a las aguas residuales del beneficio húmedo del

Determinación	Norma
pH	NMX-AA-008-SCFI-2000. Método potenciométrico
Demanda química de oxígeno	NMX-AA-030-SCFI-2001. Método espectrofotométrico
Sólidos sedimentables	NMX-AA-004-SCFI-2000
Sólidos Suspendidos Totales, Sólidos Disueltos Totales y Sólidos Totales	NMX-AA-034-SCFI-2001

CAPITULO IV. RESULTADOS PRELIMINARES

4.1 CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL DE BENEFICIO HÚMEDO DEL CAFÉ

Se observó una coloración café oscuro, la cual es debida a la presencia de pectinas, taninos y sus derivados formados durante el despulpado (Bello y Rivera, 1998; Selvamurugan *et al.*, 2010)

Las características fisicoquímicas promedio de las aguas residuales se presentan en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Características fisicoquímicas del agua residual del beneficio húmedo del café. (La desviación estándar se presenta entre paréntesis)

Parámetro	Concentración
Demanda química de oxígeno (DQO) (mg/L)	44304.31(2934.43)
Sólidos sedimentables (mL/L)	716.33 (25.3)
pH	3.82 (0.16)
Sólidos totales (mg/L)	27.92 (0.15)
Sólidos totales volátiles (mg/L)	23.41 (0.14)
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	6.12 (3.23)
Sólidos disueltos totales (mg/L)	21.8 (3.27)

La alta concentración de DQO es atribuida a la lenta degradación de los componentes presentes en el agua residual (Selvamurugan *et al.* 2010); esto puede ser debido a la presencia, en el agua residual del beneficio húmedo del café, de compuestos como celulosa, hemicelulosa y también lignina. La lignina es altamente recalcitrante y su degradación esta considerada como el paso limitante en la descomposición de los sustratos lignocelulósicos (Neves *et al.*, 2006). Se han reportado DQO de hasta 50,000 mg/L (Rodríguez *et. al.*, 2000), lo cual representa una carga orgánica extremadamente elevada, que conlleva a serios riesgos en cuanto a descargas de las aguas residuales del beneficio se refiere.

Las cantidades de sólidos suspendidos, disueltos y totales son bajas, por lo cual no coincide con la DQO ya que se esperaba que fuera proporcional a esta. Estos resultados pudieron deberse a que el volumen de muestra no era el adecuado ya que de acuerdo a la NMX-AA-034-SCFI-2001 se debe tomar una cantidad de muestra que contenga como mínimo 25 mg/L de sólidos totales, generalmente 100 mL de muestra es un volumen adecuado, pero debido a la dificultad para filtrar la

muestra se decidió tomar un volumen mucho menor. Otra de las razones de estos resultados pudo deberse a que no hubo una correcta homogeneización de la muestra. Generalmente, en este tipo de aguas residuales existe una alta concentración de sólidos suspendidos que puede ser debido a la presencia de pectinas, proteínas y azúcares.

El pH fue de 3.82 ± 0.16 . Los ácidos orgánicos y acético de la fermentación de los azúcares hacen que las aguas residuales sean muy ácidas, alcanzando un pH tan bajo como 3.8 (Murthy *et. al.*, 2003; Orozco *et. al.*, 2005; Sotolongo *et. al.*, 2000).

Haciendo una comparación con los resultados reportados por Tacias (2012) (Tabla 4.2) es importante señalar que el agua residual empleada en el presente proyecto tiene una mayor cantidad de DQO, lo cuál, como se mencionó en otro apartado, es debido a que la recolección se llevó a cabo en diferentes lugares.

Tabla 4.2. Características fisicoquímicas del agua residual del beneficio húmedo del café. (La desviación estándar se presenta entre paréntesis) (Tacias 2012)

Parámetro	Concentración
Demanda química de oxígeno (DQO) (mg/L)	16684.33 (1683)
Sólidos sedimentables (mL/L)	619.28 (291.34)
pH	4.49 (0.16)
Sólidos totales (mg/L)	7754.08 (2321.16)
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	3090 (765.14)
Sólidos disueltos totales (mg/L)	5442.59 (1100.97)

4.2 CURVAS DE ADSORCIÓN Y VARIACIÓN DE PH USANDO CARBÓN ACTIVADO

El carbón activado derivado de madera es utilizado para disolver los productos químicos tales como aceite y otras sustancias oleofílicas que se pegan a su superficie, mientras que el agua pasa durante el proceso de tratamiento. El carbón activado es capaz de eliminar todos los productos hechos por el hombre y las sustancias de origen natural (Fasinmirin *et. al.*, 2009). Se ha demostrado que el uso de carbón activado puede presentar porcentajes de remoción de hasta un 99%, así como el uso de arena que tiene un porcentaje arriba de 80% de remoción (Al-Jlil, 2009). Los resultados preliminares de las pruebas que se llevaron a cabo con carbón activado se presentan a continuación.

En la Figura 4.1 es posible observar una curva en la que se emplearon soluciones de ácido acético en diferentes concentraciones, las cuáles, eran de esperarse, presentaron pHs bajos. Posteriormente dichas soluciones se dejaron reposando con carbón activado y se filtraron, dando como resultado un levantamiento de pH, el cual no alcanzó la neutralidad pero pudo deberse a que eran soluciones más ácidas que las ARBHC.

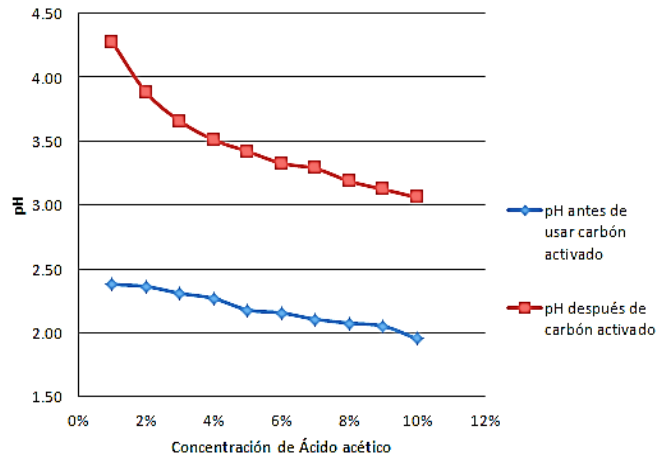


Figura 4.1. Adsorción de ácido acético sobre carbón activado

La Figura 4.2 es una curva de adsorción de las aguas residuales del beneficio húmedo del café sobre carbón activado. Aquí se probaron diferentes cantidades de carbón activado, y se puede observar que, de un pH inicial bajo (3.89) después de reposar y filtrar con 6 g. de carbón activado se logró alcanzar un pH de 6.05, es decir muy cercano a la neutralidad, el cuál a partir de ahí se mantuvo prácticamente constante, esto es importante ya que permitiría llevar a cabo un digestión anaerobia en condiciones favorables.

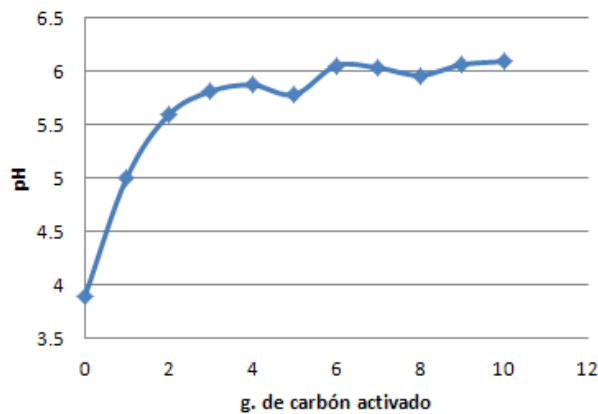


Figura 4.2. Variación del pH de las ARBHC al filtrar con carbón activado

Como se mencionó anteriormente el pH bajo de las ARBHC se debe a la fermentación de los azúcares que dan como resultado ácidos orgánicos, dichos ácidos orgánicos son los que se adsorben en la superficie del carbón activado, razón por la cual el pH se eleva. En la Figura 4.3 se observa que existen otros componentes de origen orgánico se adsorben también sobre el carbón activado dando como resultado un porcentaje de remoción de DQO de aproximadamente 45%. Con ambos resultados se puede corroborar el empleo de carbón activado es una excelente opción para usarlo en el tratamiento de aguas residuales.

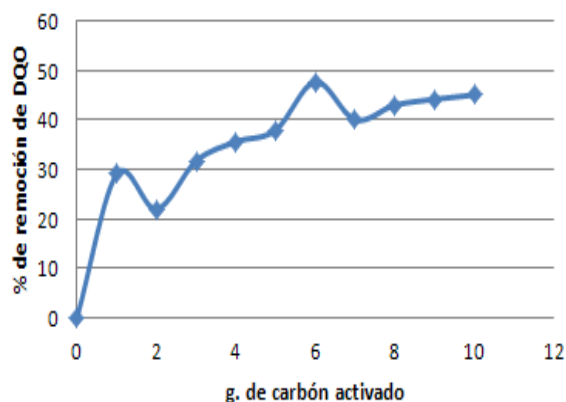


Figura 4.3. Porcentaje de remoción de DQO al filtrar con carbón activado

4.3 ESTABILIZACIÓN DEL INÓCULO

La inoculación de lodos será determinada como óptimos para ser utilizada dentro del reactor al llevar a cabo mediciones al cabo de cada tercer día de la demanda química de oxígeno (DQO) hasta obtener un valor constante del mismo. A continuación se presentan los resultados preliminares.

Tabla 4.3 % de remoción de DQO por el inóculo (la desviación estándar se muestra entre paréntesis)

Día	% de remoción de DQO
0	0
3	38.06 (1.81)
6	32.27 (13.89)
14	47.68 (0.14)

En la Tabla 4.3 es posible observar que hasta el día 14 se tiene una remoción de aproximadamente el 47%, y de acuerdo a la Tabla 4.4 se observa que existe un decremento importante en la cantidad de DQO, sin embargo a pesar de estos

resultados, aún no se puede considerar que se ha alcanzado un estado estable, ya que una característica particular de los microorganismos anaerobios es su baja tasa de crecimiento; por lo tanto, al iniciar el proceso de arranque del reactor se requiere de un periodo de tiempo prolongado.

Tabla 4.4 Degradación de DQO por el inóculo (la desviación estándar se muestra entre paréntesis)

Día	DQO (mg/mL)
0	48963.35 (144.81)
3	30327.16 (904.34)
6	23568.98 (0)
14	25616.91 (144.81)

4.4 SEDIMENTACIÓN

La remoción de la carga orgánica, a diferentes tiempos de residencia hidráulica a 55° de inclinación, presenta una remoción mayor en el tiempo de residencia de 10 h (Figura 4.4). La mayor remoción de DQO es en base a los sólidos sedimentables, ya que aún existe una gran cantidad de sólidos disueltos presentes.

Se esperaba una mayor remoción de DQO a mayor TRH, sin embargo no fue así, es pudo deberse a que el agua contenía componentes menos densos que el agua y al transcurrir más tiempo éstos se resuspendían.

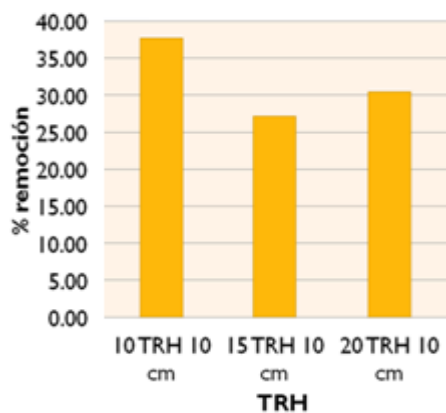


Figura 4.4 Porcentaje de remoción de DQO en el sedimentador a 55° de inclinación

CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Los materiales que se emplearon para la construcción de los equipos no afectaron las características del agua residual ni modificaron las reacciones que se llevaron a cabo en cada uno de ellos
- Se caracterizó el agua residual y se encontró una DQO promedio de 44304.31 ± 2934.43 , este dato es comparable con trabajos previos, como el de Rodríguez et. al., 2000
- Con respecto a las isotermas de adsorción con ácido acético y con las ARBHC se comprobó que es posible incrementar el pH acercándose a la neutralidad
- Es importante adaptar un inóculo que sea capaz de trabajar con altas concentraciones de carga orgánica
- Con respecto a la sedimentación se encontró que para un TRH de 10 horas, ángulo de inclinación de baffles a 55° y separación de 10 cm, fue posible remover hasta un 47% la DQO con respecto a la inicial

Recomendaciones

- Probar la filtración con carbón activado granulado para conocer si de esa manera se facilita más la operación
- Probar con diferentes ángulos de inclinación de baffles para el sedimentador
- Cuantificar ácidos grasos volátiles durante la degradación anaerobia ya que la acumulación de estos puede ser una causa del fracaso de este sistema

CAPITULO VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Aguirre F., "Investigación sobre el café", Cooperativa Tosepan Titataniske
2. Bello Mendoza, R., Castillo Rivera, M., 1998. Start-up of an anaerobic hybrid UASB filter reactor treating wastewater from a coffee processing plant. *J. Anaerobe Environ Microbiol.* 4, 219-225.
3. Bello, R., Calvo, L.A., Sánchez J.E., Lau, G. y Cuevas, R., (1993) diagnóstico de la contaminación en las aguas residuales de los beneficios húmedos de café en el soconusco, Chiapas, México. XVI Congr. Lat. Cafeticultura. 27-29 octubre CONCAFE-PROMECAFE-IICA, Managua, Nicaragua. Pp.123
4. Braham JE, Bressani R. Pulpa de Café: Composición Tecnología y Utilización. Centro
5. Brezan F, Estrada-Jarquín R. Pulpa de café, Composición Química y Contenido de Aminoácidos de la proteína de la pulpa. Turrialba (costa Rica) 1972; 22: 299-304.
6. Cervantes S.M., (1998) citado por Rodolfo Valadez, "Nuevas tendencias de producción en beneficios cafetaleros"; en *El café de México, una producción de altura*; Confederación Mexicana de Productores de Café. Pp. 13.
7. Chacón Lázaro E. Director de COMCAFE, 2010.
8. Cheng, L., Bi, X., Liu, C., Qi, Y., & Zhu, W. (2009). Oilfield Produced Water Treatment by Combination of Coarse Graining and Inclined Plates Sedimentation. *International Conference on Energy and Environment Technology* (pp. 637-640). IEEE Computer Society
9. Crites, R., Tchobanoglous, G., (2000). *Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones*. Mc Graw Hill.
10. De Mes, T., Stams, A., Reith, J., & Zeeman, G. (2003). Methane production by anaerobic digestion of wastewater and solid wastes. In J. Reith, R. Wijffels, & H. Barten, *Bio-methane & Bio-hydrogen* (pp. 58-102). Petten, Holanda: New Energy Conversion Systems and Technologies.

11. Elías GL. Composición química de la pulpa y otros productos: Pulpa de café, composición, Tecnología y Utilización. Bogotá, Colombia. Editorial CIDD. 1972; p.24.
12. Förstner, U., Wittmann, G.T.W (1979). Metal Pollution in the Aquatic Environment. *Springer-Verlag*, Berlin, pp 486.
13. Gavrilescu, M. (2002). Engineering concerns and new developments in anaerobic waste-water treatment. *Clean Technology Environmental Policy* , 346-362.
14. Haddis, A., Devi, R., 2008. Effect of effluent generated from coffee processing plant on the water bodies and human health in its vicinity. *Journal of Hazardous Materials* 152, 259-262.
15. Hernández, J; Hidalgo, G. (2000). Evaluación de 3 metodologías para reducir los niveles de Contaminantes en efluentes de tratamiento primario de las aguas residuales del procesamiento de café en costa rica. Trabajo de Graduación. Universidad EARTH. Guácimo, Costa Rica. Pp. 85.
16. Kennedy, K., & Barriault, M. (2007, Enero). Treatment kinetics of aircraft deicing fluid in an anaerobic baffled reactor. *Environmental Engineering and Science* , 11-17.
17. Kubesch Piñol, M., Bateman Pinzón, A., & Mujal, A. (2009). Plan de manejo/auto gestión de captación y distribución por gravedad de agua para uso doméstico en San Luis (Salta-Argentina). Barcelona: Grupo de Investigación en Transporte de Sedimentos.
18. Neves, L., Oliveira, R., Alves, M., 2006. Anaerobic co-digestion of coffee waste and sewage sludge. *Waste Management* 26, 176-181.
19. Orozco, C., Barrientos, H., Lopezlena, A., Cruz, J., Selvas, C., Osorio, El., Osorio, Ed., Chávez, R., Miranda, J., Arellano, J., y Giesseman, B. (2005). Evaluación de una planta piloto de tratamiento de aguas residuales del procesamiento del café: características químicas. *Higiene y Sanidad Ambiental*, 5: 123-131.

20. Ortega, M.T., Creación de un beneficio de café, en la congregación de El Tronconal, Ver., para comercializarlo en café pergamino, Colección Parcela Digital, 2010.
21. Pujol R, Zamora L, Sanarrusia M, Bonilla F. Estudio de Impacto Ambiental del Cultivo y Procesamiento del Café. Programa de desarrollo urbano sostenible. Sistema Nacional para el Desarrollo sostenible. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica. 1998; p.20.
22. Schultz, Thomas E. (2005) Biological Wastewater Treatment. Chemical Week Associates. Waukesha, WI.
23. Selvamurugan, M., Doraisamy, P., y Nandakumar, N. (2010). High Rate Anaerobic Treatment of coffee Processing Wastewater Using Upflow Anaerobic Hybric Reactor. Journal Environ. Health. Sci. Eng., 7(2) 129-136.
24. Tacias, V. (2012). Diseño y construcción de un reactor de flujo pistón acoplado a membrana para tratamiento de aguas residuales del beneficio húmedo del café. Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.
25. URL://<http://www.siap.gob.mx/> Consultada el 27 de diciembre del 2012
26. von Enden, J. C., & Calvert, K. C. (2004). Review of coffee waste water characteristics and approaches to treatment. Economic and Political Weekly , 1-10.
27. Yaksic, R., & Ramírez, R. (2005). Waste Treatment System for the COPACABANA Coffee Plant. Bolivia: Economic Opportunities Office.