



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ

“Construcción de un reactor de flujo pistón acoplado a membranas para el tratamiento de aguas residuales del beneficio húmedo del café”.

INFORME FINAL DE RESIDENCIA

CARRASCO CABALLERO ELIZABETH

ASESOR:

M.C. JOSÉ HUMBERTO CASTAÑÓN GONZÁLEZ

ING. BIOQUÍMICA

TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS A 8 DE JUNIO DE 2011

ÍNDICE

	Pág.
Índice de cuadros.....	iv
Índice de figuras.....	v
I.- Introducción.....	1
II.- Justificación.....	3
III.- Objetivo general.....	5
III.1 Objetivos específicos.....	5
IV.- Caracterización del área en que participó.....	5
V.- Problemas a resolver, priorizándolos.....	6
VI.- Alcances y limitaciones.....	7
VII.- Fundamento teórico.....	8
VII.1 Café (<i>Coffea arabica</i>).....	8
VII.1.2 Beneficio Húmedo y seco.....	9
VII.1.3 Estadísticas de producción.....	12
VII.2 Tratamiento de aguas residuales (métodos convencionales).....	14
VII.2.1 Tratamientos para la eliminación de materia en suspensión.....	15
VII.2.2 Tratamientos para la eliminación de materia disuelta.....	17
VII.2.3 Tratamientos biológicos.....	19
VII.2.3.1 Procesos biológicos aerobios.....	19

VII.2.3.1.1 Lodos activados.....	20
VII.2.3.1.2 Procesos aerobios con biomasa soportada.....	21
VII.2.3.2 Procesos biológicos anaerobios.....	22
VII.2.3.2.1 Reactores utilizados.....	24
VII.3 El agua residual del café y el proceso anaerobio.....	26
VII.4 Agua Residual Del Beneficio Húmedo.....	28
VIII.- Procedimiento y descripción de las actividades realizadas.....	29
VIII.1 Diseño y construcción del reactor.....	29
VIII.2 Preparación del agua residual sintética.....	31
VIII.3 Prueba de biodegradabilidad del agua residual sintética.....	32
VIII.4 Cuantificación de DQO de Sacarosa grado alimenticio.....	32
VIII.5 Determinaciones a realizar.....	33
VIII.5.1 Determinación de turbidez.....	33
VIII.5.2 Determinación de pH.....	33
VIII.5.3 Demanda química de oxígeno (DQO).....	33
VIII.6 Curva de calibración de DQO.....	34
VIII.7 Recolección de Lodos.....	36
VIII.8 Operación de los reactores.....	39
VIII.9 Análisis del agua tratada en el reactor.....	40
IX.- Resultados.....	41

IX.1 Diseño del reactor.....	41
IX.1.1 Sedimentador.....	42
IX.1.2 Filtro.....	44
IX.1.3 Baffles.....	44
IX.2 Esquemas del reactor.....	45
IX.3 Prueba de biodegradabilidad del agua sintética.....	51
IX.4 Cuantificación de DQO de sacarosa grado alimenticio.....	51
IX.5 Curva Patrón DQO.....	52
IX.6 Resultados del primer experimento con los reactores.....	54
IX.7 Resultados del segundo experimento con los reactores.....	57
IX.8 Sugerencias para el rediseño del reactor.....	59
X.- Conclusiones y recomendaciones.....	60
XI.- Referencias bibliográficas y virtuales.....	62

Índice de cuadros

	Pág.
Cuadro 1. Principales países exportadores de café.....	13
Cuadro 2. Resumen nacional de producción de café por estados.....	13
Cuadro 3. Avance de siembras y cosechas en el estado de Chiapas.....	14
Cuadro 4. Características del agua residual del beneficio húmedo del café.....	28
Cuadro 5. Estratificación de productores por superficie.....	29
Cuadro 6. Composición del agua residual sintética.....	32
Cuadro 7. Reactor alimentado con lodos residuales y agua residual sintética, operado con un flujo volumétrico de 1.4 mL/min y un tiempo de retención hidráulica de 24 h. pH de ingreso 4.2.....	54
Cuadro 8. Reactor alimentado con lodos residuales y agua residual sintética, operado con un flujo volumétrico de 1.6 mL/min y un tiempo de retención hidráulica de 20 h. pH de ingreso 4.2.....	54
Cuadro 9. Reactor alimentado con lodos residuales y agua residual sintética, operado con un flujo volumétrico de 1.4 mL/min y un tiempo de retención hidráulica de 24 h. pH de ingreso 6.9.....	57

Índice de figuras	Pág.
Figura 1. Proceso de lodos activados.....	20
Figura 2. Esquema de la ruta de degradación anaerobia.....	23
Figura 3. Estratificación de productores por superficie.....	30
Figura 4. Filtro del reactor.....	31
Figura 5. Rio Sabinal.....	36
Figura 6. Zona de recolección de lodos anaerobios.....	37
Figura 7. Presencia de bacterias anaerobias (burbujas).....	37
Figura 8. Muestreo.....	38
Figura 9. pH del rio (7.5)	38
Figura 10. pH del lodo (7.0).....	39
Figura 11. Inoculación de lodos en reactor.....	40
Figura 12. Reactores contruidos.....	50
Figura 13. Curva patrón DQO.....	53
Figura 14. Comportamiento de DQO TRH 24h, pH ARS 4.2.....	55
Figura 15. Comportamiento de DQO TRH 20h, pH ARS 4.2.....	55
Figura 16. Porcentaje de remoción en TRH 24h, pH ARS 4.2.....	56
Figura 17. Porcentaje de remoción en TRH 20h, pH ARS 4.2.....	56
Figura 18. Comportamiento de DQO en TRH 24h, pH ARS 6.9.....	58
Figura 19. Porcentaje de remoción en TRH 24h, pH ARS 6.9.....	58

I.- INTRODUCCIÓN

En nuestra sociedad actual es un imperativo restaurar la calidad del agua usada y descargada por las industrias, para la protección del medio ambiente. Todas las posibilidades para encontrar tratamientos económicos y prácticos deben ser consideradas, en particular los tratamientos biológicos, por la capacidad de biodegradar los compuestos contaminantes a intermediarios sencillos. Dentro de ellos, el tratamiento anaerobio es el más ventajoso.

Debido a su capacidad de degradar ciertos compuestos tóxicos, así como contaminantes orgánicos comunes en aguas residuales industriales, la biotecnología anaerobia ha avanzado a niveles elevados de aplicación y se ha establecido como una opción viable en el tratamiento y restauración de muchos efluentes de las industrias. El tratamiento anaerobio de aguas residuales con niveles de contaminación medianos y altos, es en el presente aceptada como una tecnología probada (Wheatley, 1990)

El café lavado de buena calidad alcanza los precios más altos en los Estados Unidos de América, la mayoría del grano de café se lava antes de su embarque, es decir, el grano de café maduro se recoge y se muele mediante un proceso que requiere agua. Este proceso se diferencia del correspondiente al café "seco" en que el fruto se recoge del cafetal y se le quita la cascara por molienda en seco. La cantidad de agua necesaria para el lavado es de unos 2170 L por cada Kg de café acabado, de forma que, especialmente, si el lavado se hace en la misma

instalación que la mezcla y el tueste, puede existir un serio problema de contaminación (Nemerow, 1998)

Estos problemas (conocidos a escala mundial), aunados a la presión cada vez mayor de diversas instancias que velan por la conservación de los recursos naturales, motivan a la comunidad científica a emprender la búsqueda de soluciones que permitan un desarrollo sostenible de las actividades de cafecultura.

El beneficio húmedo es el método de procesamiento de café más utilizado en Centroamérica, México y Colombia. Luego de la cosecha de la cereza 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.

Una Finca Cafetalera generalmente no está sola, en ocasiones en una cuenca hidrológica vierten sus aguas varias agro-industrias o una sucesión de fincas cafetaleras; en el mismo río se juntan también las aguas negras de localidades cercanas. La importancia de tratar las aguas de los beneficios radica en que la oxidación de la materia orgánica contenida en el agua se efectúa por medio de la microflora de bacterias que se alimentan de la materia consumiendo el oxígeno disuelto en el agua. En caso de descarga importante de materia como es el caso del vertido del agua miel, se agota el oxígeno (anaerobiosis), y se destruye por asfixia la fauna y flora acuática.

En el presente trabajo se planteó la construcción y evaluación de la eficacia de un reactor anaerobio de flujo pistón, como una opción en el tratamiento de las aguas residuales producto del beneficio húmedo del café, proponiendo el uso de membranas como un medio filtrante que mejore la calidad del agua tratada, de tal forma que ayude a disminuir el impacto ambiental, originado por esa actividad ampliamente realizada en el Estado de Chiapas y demás regiones cafecultoras.

II.- JUSTIFICACIÓN

El beneficiado húmedo se denomina así porque se requiere agua para realizar las operaciones de transporte, clasificación del grano maduro, remoción del mucílago, despulpado y sobre todo en el lavado, presenta el problema de que ya ésta agua no es limpia, puesto que contiene pulpa, mucílago u otras sustancias que afectan el resto de agua del río; dándole un color marrón, mal sabor y olor, además de provocar la muerte de peces por falta de oxígeno. Esta afectación de la calidad del agua, es lo que se conoce como contaminación. Actualmente, la magnitud del problema de contaminación ambiental que genera la actividad cafetalera en las zonas de mayor importancia socioeconómica, obliga a todos los sectores involucrados a investigar a fondo sus consecuencias, y a implementar métodos eficientes y rentables de control (Cléves, 1995).

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales pueden llegar a controlar la contaminación hasta en un 95%. Nunca se eliminaría absolutamente toda la contaminación, sin embargo, ésta tiene que ser eficiente para que las fuentes

receptoras de agua no se vean afectadas, en conjunto con los hábitats que alberga.

El proceso anaerobio ha resultado ser eficiente para minimizar la contaminación de aguas residuales por lo cual es importante evaluar algunos aspectos que puedan contribuir en el mejoramiento de este sistema para pulir la calidad del efluente, y disminuir el impacto ambiental que pueda significar el vertido de aguas residuales en los cuerpos receptores.

La información generada en esta investigación podrá ser utilizada en el desarrollo de nuevos sistemas de tratamientos aplicados a las aguas residuales en cuestión, centrados en la filosofía de la ciencia, tecnología, sociedad más innovación.

Por ser tecnología reciente, es necesario el estudio del comportamiento de estos sistemas para que sirvan de base y ejemplo de la adaptación de nuevas tecnologías en el país.

El estudio de esta nueva tecnología, brindará apoyo a nivel nacional en el control de la contaminación del agua, en un sector agroindustrial importante como lo es el cafetalero

De especial interés es el desarrollo de sistemas de tratamiento de aguas residuales del beneficio húmedo del café, en el estado de Chiapas, ya que en ninguna de las regiones cafetaleras del estado se cuenta con un sistema de tratamiento (Chacón-Lázaro, 2010).

III.- OBJETIVO GENERAL

Diseñar y construir un reactor que opere a flujo pistón y que incluya membranas como medio de filtración, para ser utilizado en el tratamiento de aguas residuales, generadas en el beneficio húmedo del café.

III.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1.- Diseñar un reactor de flujo pistón horizontal a nivel laboratorio.
2. Construir un reactor en disposición horizontal, con capacidad de monitoreo de la reacción a lo largo de su longitud total.
3. Evaluar la eficacia del reactor mediante el monitoreo de la calidad del agua.
4. Rediseñar el reactor para mejorar su funcionamiento
5. Verificar si el uso de la membrana mejora el proceso de tratamiento de aguas.

IV.- CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA EN QUE PARTICIPÓ

Se trabajó en el área de biotecnología ambiental y las actividades que se reportan en el siguiente informe se llevaron a cabo en el laboratorio de biotecnología (Edificio J) y en el laboratorio de investigación dentro del Instituto tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.

V.- PROBLEMAS A RESOLVER, PRIORIZÁNDOLOS

Actividad	Semana																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Revisión bibliográfica	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Diseño del reactor	■	■	■															
Construcción del reactor				■	■	■	■											
Recolección de lodos anaerobios								■										
Operación del reactor									■	■	■	■	■					
Análisis de resultados														■	■	■		
Rediseño del reactor a partir de los resultados obtenidos.																■	■	■

La revisión bibliográfica se realizó durante todo el periodo que abarca la residencia para entender los resultados.

El diseño del reactor fue realizado junto con Veymar Guadalupe Tacias Pascacio estudiante de maestría en ciencias de Ingeniería bioquímica, ésta fue la parte principal del proyecto ya que consideraron varios criterios para la elaboración de

éste, se establecieron los flujos de operación, tiempos de retención y especificaciones físicas.

La construcción del reactor fue la parte más dificultosa que se presentó ya que las especificaciones de tamaño hicieron esta labor minuciosa pero finalmente se materializó con éxito.

La recolección de lodos fue concretada por la residente, Veymar y Yair González Baldizon en el rio Sabinal de ésta ciudad.

El rediseño surgió después del análisis de resultados y de los problemas que se presentaron durante la puesta en marcha del reactor.

VI.- ALCANCES Y LIMITACIONES

Alcances: Este estudio brindará información importante para la continuación del presente proyecto, es decir, con estos resultados se concretará el estudio completo del sistema Reactor-membrana en donde los principales beneficiarios será la comunidad científica aplicada a trabajos de biotecnología ambiental específicamente a quienes trabajen con tratamiento de aguas residuales, y en un futuro la sociedad.

La población beneficiada serán los dueños de las fincas cafetaleras puesto que si el agua del beneficio húmedo del café resulta de ser de una calidad aceptable muy probablemente se use para irrigar otros cultivos.

Limitaciones: Las debilidades restrictivas en este caso fueron:

a) El agua residual del beneficio húmedo del café, ya que el periodo del beneficio es de Enero-Marzo y durante ese tiempo la institución en donde se realizó la parte experimental se encontraba en huelga por lo cual el agua no se podía tratar inmediatamente, situación que nos condujo a la elaboración de agua residual sintética, es decir se elaboró agua con características similares a las del agua del beneficio húmedo del café, tomando en cuenta valores de DQO, pH y sales minerales por lo cual los resultados con dicha agua se pueden considerar como si fueran del agua residual del beneficio húmedo del café.

b) Falta de una bomba capaz de generar un amplio rango de variación, dicha bomba sería utilizada para generar las presiones adecuadas en el funcionamiento de la membrana, por lo cual solo se utilizó el reactor y se enfocó en su rediseño, postergando para investigaciones futuras el uso de la membrana en el agua efluente del reactor.

VII.- FUNDAMENTO TEÓRICO

VII.1 Café (*Coffea arabica*)

Cafeto es el nombre común del género de árboles de la familia Rubiáceas y también de sus semillas y de la bebida que con ellas se prepara. El arbusto mide, 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 cafeto

requiere para su cultivo un clima cálido pero con alto nivel de humedad; el sol no debe llegar directamente a la planta, por ello se ven plantados junto a los cafetos, árboles de diferente especie cuyas hojas protegen y dan sombra; su altitud debe ser entre los 1,000 a 1,300 msnm (SAGARPA, 2010).

El beneficio de café se puede definir como el proceso mediante el cual se transforma el fruto (café en fruta) en producto comercial (café oro). Existen dos técnicas básicas para beneficiar café con características distintas: las llamadas “vía húmeda” y la “vía seca” (Selvamurugan *et al.*, 2010).

VII.1.2 Beneficio húmedo y seco

Beneficio seco: El beneficiado seco del café consiste básicamente en la limpieza del café pergamino, mediante la separación de palos, piedras, ramas, hojas, basuras, etc., para proceder al morteo o trillado y una serie de procesos de selección de los granos de café, por su forma, tamaño, peso, densidad y color. Esta selección es realizada mediante maquinaria especializada, maquinaria de pre limpia, morteadoras o trilladoras de café, máquinas seleccionadoras de café, maquinas catadoras de café, maquinas vibradoras o vibro neumáticas y equipos o maquinas electrónicas seleccionadoras por color.

Beneficio húmedo: El beneficiado húmedo es el método de procesamiento de café más utilizado en Centroamérica, México y Colombia. El método surgió como una alternativa para solucionar el problema de la fermentación inmediata y excesiva del café en zonas tropicales. Luego de la cosecha de la cereza 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 (Orozco *et al.*, 2005).

En Centroamérica, pero también en Colombia y en México, utilizan ampliamente el llamado beneficiado húmedo, que consiste en la remoción del mucílago de café mediante el uso del agua. Esta agua de lavado ya no es limpia, contiene pulpa y mucílago que provoca deterioro en la calidad del agua en cuanto a olor y sabor.

El procesamiento del café mediante beneficiado húmedo es fundamental para mantener y destacar la excelente calidad del café (Vásquez, 1997). No obstante, dicha importancia se contrapone a los costos ambientales que tradicionalmente ha traído consigo el beneficiado de café, en términos de contaminación de los ecosistemas, alto consumo de agua y uso ineficiente de los insumos energéticos. Otra fuente del problema es el despulpado que se realiza por medio de máquinas que consumen un gran volumen de agua.

Los principales factores de los que depende la contaminación generada en los beneficios, se centra básicamente en la forma en que se realice tanto el lavado como el despulpado, de la cantidad de agua que se utilice, la adecuada separación de la pulpa y el agua, en el destino de las aguas con mucílago, y finalmente de la existencia o no de un sistema de tratamiento.

Con el proceso de beneficio húmedo convencional, se presenta una contaminación unitaria equivalente a 115 gramos de DQO por kilogramo de café en cereza, de los cuales el 73.7% se origina durante las operaciones de

despulpado y transporte de pulpa y 26.3% durante las operaciones de lavado y clasificación (Zambrano, 1989). Según Veenstra (1995) la contaminación unitaria producida diariamente por un habitante corresponde en promedio a 100 g de DQO, lo que significa que la pulpa y el mucílago procedentes del beneficio húmedo convencional de 1 Kg. de café en cereza, produce una contaminación similar a la ocasionada por una persona durante el día. Teniendo en cuenta lo anterior, una carga de café pergamino seco obtenido del beneficio convencional produce una contaminación equivalente a 690 habitantes / día.

Estos problemas, aunados a la presión cada vez mayor de diversas organizaciones que velan por la conservación de los recursos naturales, motivaron al sector cafetalero a emprender la búsqueda de soluciones que permitan el desarrollo sostenible de su actividad, sin afectar negativamente su productividad y la calidad final del grano (Blanco, 1999). Existe una permanente búsqueda de fuentes de agua limpia, y una preocupación por la disposición adecuada de las aguas residuales y desechos de toda actividad humana (Vásquez, 1997).

La pulpa y el mucílago del café no son elementos tóxicos o venenosos; por el contrario, son productos orgánicos que debidamente manejados pueden representar un alto valor agregado para el cafeticultor. La contaminación que la pulpa y el mucílago producen se debe a que gran parte de su materia orgánica se disuelve o queda en suspensión en las aguas, en las diferentes etapas del transporte y beneficio. El material orgánico disuelto puede retirar o consumir muy rápidamente el oxígeno del agua que lo contiene, en un proceso natural de oxidación. La pulpa y el mucílago contenidos en un Kg de café cereza pueden retirarle todo el oxígeno a 7400 litros de agua pura (Zambrano, 1989).

La situación actual de competitividad obliga a conformar empresas cafetaleras tecnificadas, capaces de tener una participación dinámica en el mercado del café, tanto dentro como fuera del país. El proceso de beneficiado y tratamiento de aguas residuales, es un campo que debe fortalecerse y mejorarse para colocar a la empresa en lugar de prestigio y diferenciarla de otras compañías que se enfocan muy poco en este aspecto de la producción. (Cléves, 1995).

VII.1.3 Estadísticas de producción

Por ser México uno de los principales productores de café en el mundo (cuadro 1), también se enfrenta a la problemática ambiental derivada del beneficio húmedo del café (principalmente), por lo que es necesario enfrentar dicha problemática para reducir sus efectos al medio ambiente (Cámara de diputados, 2001) .

En México, el estado con mayor producción de café es Chiapas (cuadro 2 y 3), por tanto, es el que más aguas residuales genera durante el beneficio del mismo (SAGARPA, 2010).

Cuadro 1. Principales países exportadores de café (ICO, 2010).

Producción total de los principales países exportadores				
Cultivos comenzando por año:		2007	a	2009
(000 sacos)		Años de cultivo		
País	Meses de cultivo	2007	2008	2009
Brasil	Abril-Marzo	36 070	45 992	39 470
Colombia	Oct-Sep	12 504	8 664	9 000
Etiopía	Oct-Sep	4 906	4 350	4 500
Guatemala	Oct-Sep	4 100	3 785	3 500
Honduras	Oct-Sep	3 842	3 450	3 527
India	Oct-Sep	4 460	4 371	4 827
Indonesia	Abril-Marzo	7 777	9 350	10 632
México	Oct-Sep	4 150	4 651	4 200
Perú	Abril-Marzo	3 063	3 872	3 315
Uganda	Oct-Sep	3 250	3 200	3 000
Vietnam	Oct-Sep	16 467	18 500	18 000

Cuadro 2. Resumen nacional de producción de café por estados

Resumen nacional por estados (perennes 2010, riego + temporal)					
Situación al 31 de agosto de 2010					Café cereza
	Superficie (ha)			Producción (ton)	Rendimiento (ton/ha)
Estado	Sembrada	Cosechada	Siniestrada	Obtenida	Obtenido
Colima	2 634	2 526		2 557	1.012
Chiapas	255 285	253 601		544 635	2.148
Guerrero	54 327	53 524		38 057	0.711
Hidalgo	26 333	25 949	384	29 219	1.126
Jalisco	4 497	4 467		5 703	1.277
México	388	368		1 455	3.956
Michoacán	14	14		49	3.5
Morelos	96	96		350	3.648
Nayarit	20 097	19 837	260	26 935	1.358
Oaxaca	184 503	150 163	174	154 019	1.026
Puebla	75 045	45 918	20 895	131 902	2.873
Querétaro	300	298	2	268	0.9
San Luís Potosí	22 404	22 404		15 492	0.692
Tabasco	1 040	1 040		635	0.61

Veracruz	153 233	148 584	1 234	363 585	2.447
-----------------	---------	---------	-------	---------	-------

Fuente: elaborado por el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), con información de las Delegaciones de la SAGARPA (datos preliminares).

Cuadro 3. Avance de siembras y cosechas en el estado de Chiapas

Avance de siembras y cosechas						
Chiapas, Perennes 2010 (riego+temporal)						
Situación al 31 de agosto de 2010						Café Cereza
		Superficie (ha)			Producción (ton)	Rendimiento (ton/ha)
Estado	Distrito	Sembrada	Cosechada	Siniestrada	Obtenida	Obtenido
Chiapas	Comitán	19 327	18 307		15 247	0.833
	Motozintla	34 467	34 467		117 624	3.413
	Palenque	43 251	43 251		72 961	1.687
	Pichucalco	27 382	27 143		50 698	1.868
	San Cristóbal	19 988	19 988		55 540	2.779
	Selva Lacandona	2 654	2 654		1 600	0.603
	Tapachula	72 307	72 307		148 456	2.053
	Tonalá	1 211	1 211		2 604	2.15
	Tuxtla Gutiérrez	9 942	9 908		14 657	1.479
	Villa Flores	24 756	24 365		65 248	2.678
Total		255 285	253 601		544 635	2.148

Datos Preliminares.

Fuente: Elaborado por el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), con información de las Delegaciones de la SAGARPA.

Hay que introducir que en el Estado de Chiapas, hay un desecho promedio de 241, 876 HA. \times 3000 kg de pulpa = 72, 562.8 toneladas de producto con potencial de contaminación (Orozco, 2005; COMCAFE, 2010).

VII.2 Tratamiento de aguas residuales (métodos convencionales)

En general, las aguas residuales consisten de dos componentes, un efluente líquido y un constituyente sólido, conocido como lodo. 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). Una forma de intentar aunar ambas formas de clasificación puede ser considerar que los contaminantes en el agua pueden estar como materia en suspensión, materia coloidal o materia disuelta (Rodríguez *et al.*, 2006).

VII.2.1 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). Las operaciones para eliminar este tipo de contaminación de aguas suelen ser las primeras en efectuarse. 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. A continuación se describen las operaciones unitarias más habituales (Rodríguez *et al.*, 2006):

- **Desbaste:** Operación en la que se trata de eliminar sólidos de mayor tamaño que el que habitualmente tienen las partículas que arrastran las aguas. Suele ser un tratamiento previo a cualquier otro.
- **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. Es una operación muy utilizada en el tratamiento de aguas potables, así como en el tratamiento de aguas para reutilización, para eliminar la materia en suspensión que no se ha eliminado en anteriores operaciones (sedimentación).
- **Flotación:** Operación física que consiste en generar pequeñas burbujas de gas (aire), que se asociarán a las partículas presentes en el agua y serán elevadas hasta la superficie, de donde son arrastradas y sacadas del sistema.
- **Coagulación-Floculación:** En muchos casos parte de la materia en suspensión puede estar formada por partículas de muy pequeño tamaño (10^{-6} – 10^{-9} m), lo que conforma una suspensión coloidal. Estas suspensiones coloidales suelen ser muy estables, por tanto tienen una

velocidad de sedimentación extremadamente lenta, por lo que haría inviable un tratamiento mecánico clásico. Una forma de mejorar la eficacia de todos los sistemas de eliminación de materia en suspensión es la adición de ciertos reactivos químicos que, en primer lugar, desestabilicen la suspensión coloidal (coagulación) y a continuación favorezcan la floculación de las mismas para obtener partículas fácilmente sedimentables.

VII.2.2 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. Algunos de estos tratamientos están siendo desplazados por otros más avanzados y emergentes, como son los procesos de oxidación avanzada y las operaciones con membrana, y especialmente en el caso de las aguas industriales.

Los métodos más comunes son los siguientes (Rodríguez *et al*, 2006):

- **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.
- **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. Hay dos formas clásicas de utilización de carbón activo, con propiedades diferentes y utilizado en diferentes aplicaciones:

Carbón activado granular (GAC). Se suele utilizar una columna como medio de contacto entre el agua a tratar y el carbón activado, en la que el agua entra por la parte inferior y asciende hacia la superior. El tamaño de partícula en este caso es mayor que en el otro. Se suele utilizar para eliminar elementos traza, especialmente orgánicos, que pueden estar presentes en el agua, y que habitualmente han resistido un tratamiento biológico. Son elementos, que a pesar de su pequeña concentración, en muchas ocasiones proporcionan mal olor, color o sabor al agua.

Carbón activo en polvo (CAP). Este tipo de carbón se suele utilizar en procesos biológicos, cuando el agua contiene elementos orgánicos que pueden resultar tóxicos. También se suele añadir al agua a tratar, y pasado un tiempo de contacto, normalmente con agitación, se deja sedimentar las partículas para su separación previa. Suelen ser operaciones llevadas a cabo en discontinuo.

- **Desinfección:** La desinfección pretende la destrucción o inactivación de los microorganismos que puedan causarnos enfermedades, dado que el agua es uno de los principales medios por el que se transmiten. Los organismos causantes de enfermedades pueden ser bacterias, virus, protozoos y algunos otros.

VII.2.3 Tratamientos biológicos

Constituyen una serie de importantes procesos de tratamiento que tienen en común la utilización de microorganismos (entre las que destacan las bacterias) para llevar a cabo la eliminación de componentes indeseables del agua, aprovechando la actividad metabólica de los mismos sobre esos componentes. La aplicación tradicional consiste en la eliminación de materia orgánica biodegradable, tanto soluble como coloidal, así como la eliminación de compuestos que contienen elementos nutrientes (N y P).

VII.2.3.1 Procesos biológicos aerobios

Son muchas las posibilidades de tratamiento:

- Cultivos en suspensión: Proceso de fangos activados (lodos activados), y modificaciones en la forma de operar: aireación prolongada, contacto-estabilización, reactor discontinuo secuencial (SBR).
- Cultivos fijos: Los microorganismos se pueden inmovilizar en la superficie de sólidos (biomasa soportada), destacando los filtros percoladores (también conocido como lechos bacterianos o filtros biológicos).

VII.2.3.1.1 Lodos activados

Consiste en poner en contacto en un medio aerobio, normalmente en una balsa aireada, el agua residual con flóculos biológicos previamente formados, en los que se adsorbe la materia orgánica y donde es degradada por las bacterias presentes. Junto con el proceso de degradación, y para separar los flóculos del agua, se ha de llevar a cabo una sedimentación, donde se realiza un recirculación de parte de los lodos, para mantener una elevada concentración de microorganismos en el interior de reactor, además de una purga equivalente a la cantidad crecida de organismos.

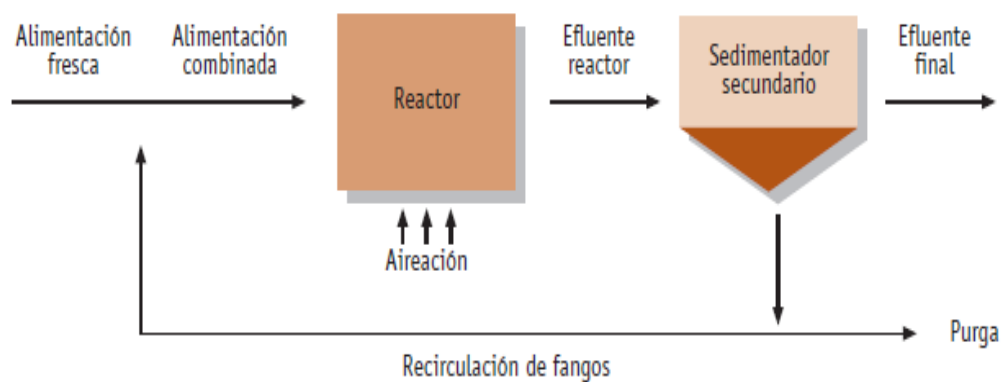


Figura 1. Proceso de lodos activados

Dentro de los parámetros básicos de funcionamiento, un parámetro muy importante es la aireación. Otro parámetro clave en el proceso se refiere al parámetro A/M, algunas veces denominada I, intensidad de carga. Se refiere a la relación entre la carga orgánica alimentada y la cantidad de microorganismos disponibles en el sistema, con unidades kg DBO5 (o DQO) / kg SSV·día. Es un parámetro de diseño fundamental, teniendo un valor óptimo entre 0.3-0.6 para las condiciones más convencionales de funcionamiento. Además tiene una influencia determinante en la buena sedimentación posterior. La denominada “edad celular” también es un parámetro importante. Se refiere al tiempo medio que permanecen los lodos (flóculos, microorganismos) en el interior del sistema. Esta magnitud suele tener un valor de 5-8 días en condiciones convencionales de operación (Rodríguez *et al.*, 2006).

VII.2.3.1.2 Procesos aerobios con biomasa soportada

Otra de las formas para conseguir concentraciones suficientes de microorganismos, sin necesidad de recirculación, es favoreciendo su crecimiento en la superficie de sólidos. Se evitan de esta forma los posibles problemas en la sedimentación y recirculación de fangos, frecuente en los procesos clásicos de fangos activados. Sin embargo el aporte de oxígeno será de nuevo un factor importante, consiguiéndose en este caso bien en la distribución del líquido, bien por movimiento del sistema (Rodríguez *et al.*, 2006).

VII.2.3.2 Procesos biológicos anaerobios

El tratamiento anaerobio es un proceso biológico ampliamente utilizado en el tratamiento de aguas residuales. Cuando éstas tienen una alta carga orgánica, se presenta como única alternativa frente al que sería un costoso tratamiento aerobio, debido al suministro de oxígeno. El tratamiento anaerobio se caracteriza por la producción del denominado “biogas”, formado fundamentalmente por metano (60-80%) y dióxido de carbono (40-20%) y susceptible de ser utilizado como combustible para la generación de energía térmica y/o eléctrica. Además, solo una pequeña parte de la DQO tratada (5-10%) se utiliza para formar nuevas bacterias, frente al 50-70% de un proceso aerobio. Sin embargo, la lentitud del proceso anaerobio obliga a trabajar con altos tiempos de residencia, por lo que es necesario diseñar reactores o digestores con una alta concentración de microorganismos.

Realmente, es un complejo proceso en el que intervienen varios grupos de bacterias, tanto anaerobias estrictas como facultativas, en el que, a través de una serie de etapas y en ausencia de oxígeno, se desemboca fundamentalmente en la formación de metano y dióxido de carbono (Rodríguez *et al.*, 2006).

Actualmente se está aceptando ampliamente que la degradación anaerobia sigue una ruta como la detallada en la figura 2:

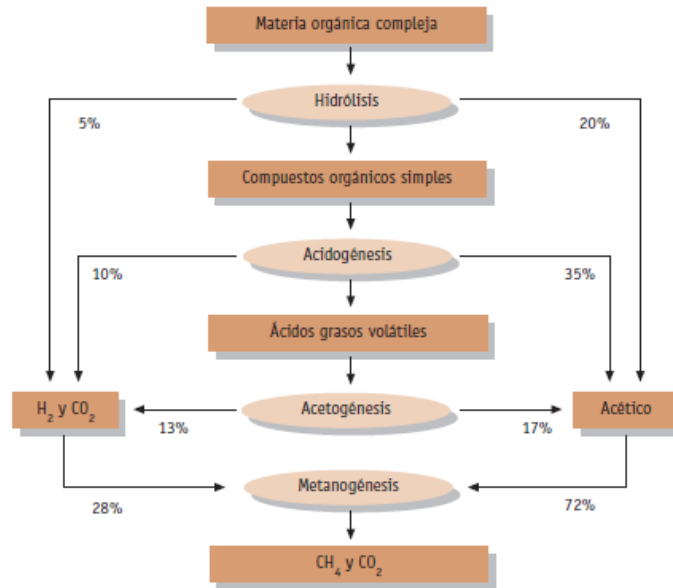


Figura 2. Esquema de la ruta de degradación anaerobia

Entre las ventajas más significativas del tratamiento anaerobio frente al aerobio cabe destacar la alta eficacia de los sistemas, incluso en aguas residuales de alta carga, el bajo consumo de energía, pequeña producción de lodos y por tanto, pequeño requerimiento de nutrientes, así como su eficacia ante alteraciones importantes de carga y posibilidad de grandes periodos de parada sin alteración importante en la población bacteriana. Sin embargo, como desventajas caben destacar la baja efectividad en la eliminación de nutrientes y patógenos, generación de malos olores y la necesidad de un post-tratamiento, generalmente aerobio, para alcanzar los niveles de depuración demandados, así como los generalmente largos periodos de puesta en marcha (Rodríguez *et al.*, 2006).

VII.2.3.2.1 Reactores utilizados

El desarrollo del tratamiento anaerobio ha sido paralelo al desarrollo del tipo de reactor donde llevar a cabo el proceso. Los reactores más utilizados son:

- **Reactor de contacto:** Consiste en un tanque cerrado con un agitador donde tiene una entrada para el agua residual a tratar y dos salidas, una para el biogás generado y otra para la salida del efluente. Este efluente se lleva a un decantador donde es recirculada la biomasa de la parte inferior del decantador al reactor, para evitar la pérdida de la misma. Los principales problemas que presentan radican en la necesidad de recircular los lodos del decantador y de una buena sedimentación de los mismos.
- **Reactor de manto de lodos y flujo ascendente (UASB, *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*):** Estos reactores solucionan el problema de recirculación de lodos al aumentar la concentración de biomasa en el reactor manteniéndola en su interior. Se trata de un reactor cuyo lecho está formado por gránulos de biomasa. A estos reactores se les denomina EGSB (*Expanded granular sludge blanket*). Habitualmente la relación altura/diámetro es mayor que para los convencionales UASB siendo capaces de alcanzar mayores cargas orgánicas (10-25 kg DQO/m³·día).

Los digestores tipo UASB son sistemas modernos de tratamiento anaerobio más difundidos en América Latina que han sido utilizados a partir de 1970 para el tratamiento directo de las aguas residuales domésticas e industriales en todo el mundo. Los sistemas UASB reemplazan en las plantas de tratamiento a los sedimentadores primarios, los sedimentadores

secundarios, las lagunas de oxidación y gran parte de los sistemas de lodos activados, pues logran eficiencias de remoción comprendidos entre el 70 y el 80 % de DQO y DBO (demanda bioquímica de oxígeno), en función de la concentración inicial del agua residual.

El digester UASB es particularmente apto para tratar aguas residuales industriales con elevada carga orgánica. Sin embargo, puede también aplicarse en aguas con menores concentraciones de materia orgánica (DBO), como es el caso de los efluentes municipales. El agua tratada por esta tecnología es factible de utilizarse, en algunos casos, en riego o puede ser evacuada al cumplir con la normatividad vigente. Dentro de diversas tecnologías anaerobias para el tratamiento del agua residual, es el digester tipo UASB el que ha tenido mayor aceptación debida, a los bajos costos de inversión y a sus instalaciones compactas.

Debido al metabolismo de los microorganismos involucrados, los procesos anaerobios no requieren oxígeno (no se tiene el consumo eléctrico asociado con la aireación), se genera la menor cantidad de lodo (residuos sólidos) posible en un sistema de tratamiento de agua y se obtiene un subproducto con alto valor energético como es el biogás, susceptible de ser aprovechado.

- **Filtro anaerobio (FA):** En este caso, los microorganismos anaerobios se desarrollan sobre la superficie de un sólido formando una biopelícula de espesor variable. El sólido permanece inmóvil en el interior del equipo, habitualmente una columna, constituyendo un lecho fijo. El agua residual se

hace circular a través del lecho, bien con flujo ascendente o bien descendente, donde entra en contacto con la biopelícula. El rango típico de cargas tratadas desde 5- 15 KgDQO/m³·día.

- **Reactor anaerobio de lecho fluidizado (RALF):** Son columnas en cuyo interior se introducen partículas de un sólido poroso (arena, piedra pómez, biolita, etc.) y de un tamaño variable (1-5 mm) con el objetivo de que sobre su superficie se desarrolle una biopelícula bacteriana que lleve a cabo la degradación anaerobia.

VII.3 El agua residual del café y el proceso anaerobio.

El agua residual del beneficiado proviene del procesamiento del fruto del café, que consiste de pulpa, mucílago, pergamino y el grano.

El agua se contamina al entrar en contacto con el fruto, ya sea para el transporte de la pulpa o el fruto, o para lavar el mucílago del pergamino.

La pulpa consiste principalmente de *celulosa* que es el material que da la rigidez a las hojas de las plantas, *azúcares* que dan los sabores dulces, característicos de la pulpa, compuestos complejos que se llaman *polifenoles*. Los polifenoles conforman un grupo de compuestos, y entre ellos encontramos la *cafeína* (característica para el café) y los ácidos tánicos (que provocan un color oscuro al disolver en agua). El agua de despulpado, que se origina del contacto entre pulpa y agua, contiene todos éstos elementos, pero en general contiene poca celulosa (que es la carne de la pulpa), ya que se separa en el separador de pulpa y agua. (Wasser, 1996)

El mucílago contiene principalmente *pectina*, que da la consistencia y el aspecto gelatinoso al mucílago, también *celulosa* y *azúcares*. El agua de lavado de café, después de su fermentación contiene estos tres elementos. (Wasser, 1996).

Las aguas de despulpado tienen alta concentración de sólidos sedimentables, azúcares, y otros materiales solubles, en tanto que las aguas de lavado contienen geles coloidales de pectinas y de otros productos removidos por fermentación del café. La contaminación de estas aguas es menor comparada con las de despulpado. (Morales, 1979).

Todos los compuestos mencionados anteriormente son de origen orgánico. Las bacterias anaerobias la transforman en el reactor, primero la acidifican, luego la convierten en metano. (Wasser, 1996)

La digestión anaerobia es un proceso biológico degradativo, en el cual la materia orgánica es descompuesta por la acción de determinados microorganismos que, en ausencia de oxígeno, la transforman en una mezcla de gases formada principalmente por metano y dióxido de carbono. La digestión anaerobia transcurre con un menor desprendimiento de calor, lo que determina un contenido energético más elevado de los productos resultantes, y consecuentemente un mayor rendimiento energético del proceso. En la digestión anaerobia, más del 90% de la energía disponible por oxidación directa de los azúcares se transfiere al metano producido, por lo que solo el 10% restante de la energía inicial puede ser utilizada por las bacterias para su crecimiento frente al 50% del que se dispone en un proceso aeróbico. (Muñoz, 1993).

VII.4 Agua residual del beneficio húmedo

El agua residual del beneficio húmedo del café está compuesta de constituyentes físicos, químico y biológicos. Es una mezcla de sustancias orgánicas e inorgánicas, suspendidas o disueltas.

Cuadro 4. Características del agua residual del beneficio húmedo del café

Parámetro	(Selvamurugan <i>et al.</i> , 2010)	(Narasimha <i>et al.</i> , 2000)	(Bermudez <i>et al.</i> , 2003)	(Horton <i>et al.</i> , 1946)
Sólidos totales disueltos	1130-1380 mg/L			
Sólidos totales disueltos	2390-2820 mg/L		2287-3660 mg/L	
Sólidos totales	3520-4200 mg/L	5440-13360 mg/L		10090-12340
pH	3.88-4.21	3.94-4.61	4.6	4.1-4.7
Conductividad eléctrica	0.96-1.20 mg/L			
Oxígeno disuelto	2.0-2.6 mg/L			
DBO	3800-4780 mg/L			3280-15000
DQO	6420-8480 mg/L		2532.32-2904.72 mg/L	
Carbón orgánico total	0.36-0.48 %			
Nitrógeno	125.8-173.2 mg/L	22.4-123.3 mg/L		
Fósforo	4.4-6.8 mg/L	4-8.8 mg/L		
Potasio	20.4-45.8 mg/L			
Calcio	67.8-92 mg/L			
Magnesio	42.5-62.1 mg/L			
Cloro	25.2-46.8 mg/L			
Sodio	7.8-13.8 mg/L			
Carbohidratos totales			0.72-0.83 g/L	
Azúcares reductores			0.12-0.94 g/L	
Taninos			0.05-0.16 mg/L	
Cafeína			10-23 mg/L	
Alcalinidad			10-15 mg CaCO ₃ /L	
Turbidez				1500-4000
Sólidos suspensión				625-1055

VIII.- PROCEDIMIENTO Y DESCRIPCIÓN DE LAS ACTIVIDADES REALIZADAS

VIII.1 Diseño y construcción del reactor

El reactor de flujo pistón se diseñó de acuerdo a las necesidades del proceso que se llevaron a cabo en el, guiándonos de los diseños ya existentes en revistas especializadas y en la base de datos del Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial (IMPI), pero buscando un diseño propio. Para su construcción se utilizó acrílico transparente de 3 mm de espesor, silicón 100%, soportes metálicos y plastilina epóxica (plasti loka), el volumen y tamaño del reactor se especifican más adelante. El escalamiento del reactor se hizo de acuerdo a la cantidad de residuos que genera la mayor parte de los productores en Chiapas, que son aquellos que cuentan con una superficie de 1 a 10 hectáreas, como se puede observar en el cuadro 5 y en la figura 3:

Cuadro 5. Estratificación de productores por superficie (COMCAFE, 2010)

ESTADO	SUPERFICIE 0 A 0.5 (HA.)			SUPERFICIE 0.51 A 1.0 (HA.)			SUPERFICIE 1.01 A 10.0 (HA.)			SUPERFICIE MAYOR A 10 (HA.)		
	PROD.	PRED.	SUPERF.	PROD.	PRED.	SUPERF.	PROD.	PRED.	SUPERF.	PROD.	PRED.	SUPERF.
CHIAPAS	54, 108	55, 192	19, 370.82	54, 062	56, 296	41, 506.8	63, 403	71, 604	138, 454.77	959	1, 378	42, 543.75

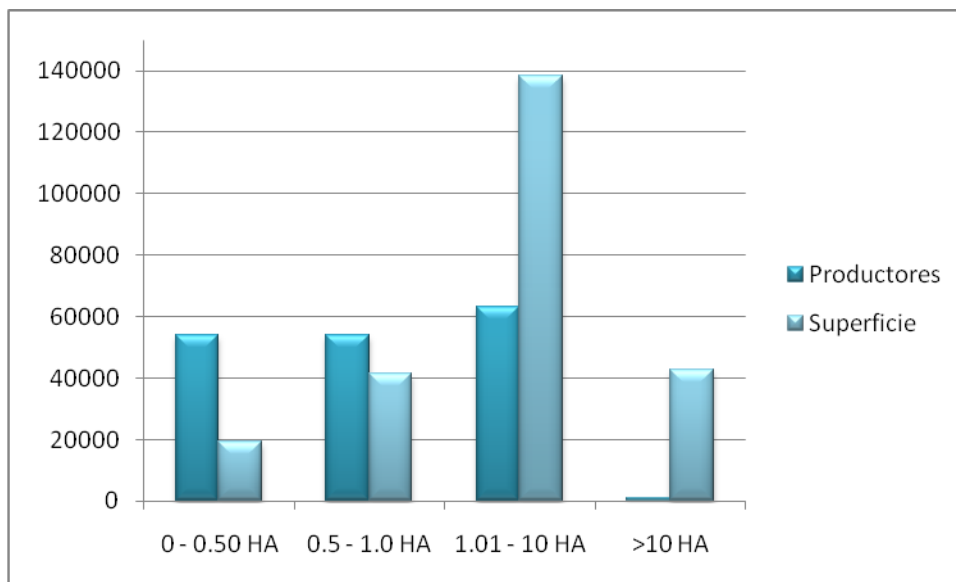


Figura 3. Estratificación de productores por superficie (COMCAFE, 2010)

De acuerdo con estos datos, en Chiapas existen 63 403 productores que cuentan con una superficie de tierra destinada a la producción de café que va de 1 a 10 hectáreas, que juntos abarcan una superficie de 138, 454.77 hectáreas. Por lo tanto el reactor se diseñó (a escala) para tratar las aguas residuales que se generan en 10 hectáreas.

Haciendo el cálculo se obtiene que en 10 hectáreas se producen 30 000 kg de residuos con potencial de contaminación.

El filtro del reactor se elaboró con carbón activado, arena y grava. En la siguiente proporción:

25 g de carbón activado. 3 cm de altura de la arena y de grava 4 cm, tal como se observa en la figura 4.

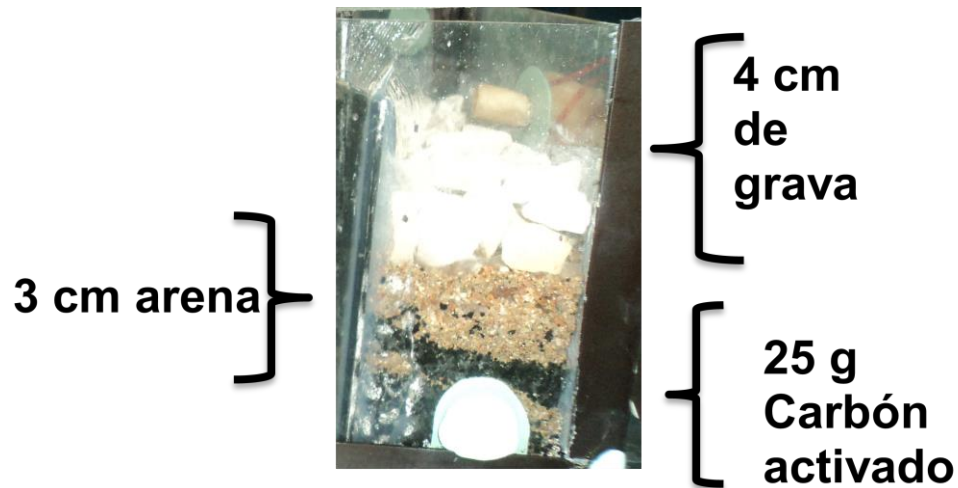


Figura 4. Filtro del reactor

VIII.2 Preparación del agua residual sintética

Con base en las características del agua residual del beneficio húmedo del café, se preparó un sustrato sintético con composición tanto orgánica como inorgánica y parámetros físico-químicos similares. Este sustrato sintético fue utilizado en los estudios a escala de laboratorio tanto en reactores de flujo pistón y en diferentes estudios posteriores.

La calidad del agua residual sintética fue verificada por los ensayos de biodegradabilidad cuyos resultados se presentan más adelante.

Cuadro 6. Composición del agua residual sintética

Parámetro	Valor
Fosfato monobásico de sodio	5.6 mg/L
Cloruro de potasio	33.1 mg/L
Carbonato de calcio	80 mg/L
Sulfato de magnesio	52.3 mg/L
Cloruro de sodio	10.8 mg/L
DQO (Glucosa)	7450 mg/L
pH	4.28

El agua recién preparada se almacenó en botellas de plástico limpias y con tapa hermética en congelación.

VIII.3 Prueba de biodegradabilidad del agua residual sintética

Al agua residual sintética del beneficio húmedo del café se le calculó la DQO el mismo día que se preparó, 4 días y 6 días después para comprobar que no se degradara en el transcurso del tiempo, según el método para determinar DQO que se describe en este informe.

VIII.4 Cuantificación de DQO de Sacarosa grado alimenticio

Con la finalidad de cuantificar la DQO que representa la sacarosa en el agua residual sintética, se preparó una solución estándar de sacarosa (1000 mg/ml), se

colocó en digestión a 150°C durante 120 minutos y se leyó absorbancia a 620 nm, la absorbancia fue interpolada en la curva tipo anteriormente elaborada.

VIII.5 Determinaciones a realizar

VIII.5.1 Determinación de turbidez

La turbidez del agua se debe a la presencia de materias en suspensión finamente divididas. La determinación de la turbidez tiene un gran interés como parámetro de control en aguas contaminadas y residuales. La turbidez en este caso significó índice del grado de calidad del agua, midiéndose en espectrofotómetro a 600 nm y como blanco se usó agua destilada.

VIII.5.2 Determinación de pH

La determinación del pH de las muestras se realizó conforme a la norma mexicana NMX-AA-008-SCFI-2000 por el método potenciométrico. El método se fundamenta en la existencia de una diferencia de potencial entre las dos caras de una membrana de vidrio, expuestas a disoluciones acuosas que difieren en su valor de pH. En primera aproximación, a temperatura constante, la magnitud de esta diferencia de potencial es directamente proporcional a la diferencia de pH entre dichas disoluciones. En este método, se efectúa la determinación electrométrica del pH con base en la definición operacional antes expuesta.

VIII.5.3 Demanda química de oxígeno (DQO)

Se determinó de acuerdo con la norma mexicana NMX-AA-030-SCFI-2001. Se entiende por demanda química de oxígeno (DQO), la cantidad de materia orgánica e inorgánica en un cuerpo de agua susceptible de ser oxidada por un oxidante

fuerte. Es una medida aproximada del contenido total de materia orgánica presente en una muestra de agua.

El método que involucra el uso de dicromato es preferible sobre procedimientos que utilizan otros oxidantes debido a su mayor potencial redox y su aplicabilidad a una gran variedad de muestras.

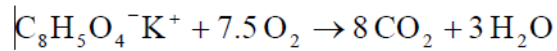
Se describen dos métodos para la determinación de DQO con dicromato. El método a reflujo abierto es conveniente para aguas residuales en donde se requiera utilizar grandes cantidades de muestra. El método a reflujo cerrado es más económico en cuanto al uso de reactivos, pero requiere una mayor homogeneización de las muestras que contienen sólidos suspendidos para obtener resultados reproducibles. Una gran cantidad de compuestos orgánicos e inorgánicos son oxidados con una mezcla de ácido crómico y sulfúrico a ebullición. La muestra se coloca a reflujo en una disolución de ácido fuerte con un exceso conocido de dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$).

Después de la digestión, el dicromato no reducido se mide por titulación o espectrofotométricamente para determinar la cantidad de dicromato consumido y calcular la materia oxidable en términos de oxígeno equivalente.

VIII.6 Curva de calibración de DQO

Se realizó la determinación de la demanda química de oxígeno empleando el método 8000, rango 0 a 1500 ppm (HACH) aceptado por la USEPA.

1. El reactivo empleado para preparar el patrón para la curva de calibrado fue el Ftalato Ácido de Potasio (KHP). La reacción de oxidación del KHP es:



Por lo que una solución de 850 mg/L de Ftalato Ácido de Potasio requiere 1000 mg/L de O₂ para su oxidación (esto es, la DQO de 850 mg/L de KHP es 1000 mg/L). El KHP se molió ligeramente y luego se secó hasta temperatura constante a 110 °C.

Se preparó una solución patrón con una concentración de 424 ppm lo que equivale a 498,82 ppm de DQO.

2. Luego se realizaron diluciones del patrón de KHP, preparando cinco puntos por duplicado de manera de cubrir todo el rango de concentraciones.

3. Se adicionó 2 ml de cada dilución a los tubos. Para el punto cero de la curva se utilizaron 2 ml de agua destilada. Se taparon los tubos y se los invirtió cuidadosamente para mezclarlos completamente.

4. Se colocaron los tubos en el bloque digestor precalentado a 150°C y se digirieron las muestras por 2 horas.

5. Luego se dejó enfriar a temperatura ambiente colocando los tubos en una gradilla para evitar la formación de precipitado.

6. Se realizó la lectura de absorbancia a 420 nm utilizando agua destilada como solución de referencia.

7. Se siguió el mismo procedimiento para el tratamiento de las muestras incógnitas agregando 2 ml de muestra a cada tubo Hach. Se digirió y se leyó absorbancia a 420 nm.

VIII.7 Recolección de Lodos

El inóculo inicial del reactor fue una muestra de sedimentos del río Sabinal, que previamente ha dado buenos resultados en remoción de contaminantes en aguas y producción de metano. Dicho inóculo se tomaron en las coordenadas siguientes:

- Elevación: 542 msnm
- Latitud Norte: 16° 45' 33.3"
- Longitud Oeste: 93° 05' 48.8"



Figura 5. Rio Sabinal



Figura 6. Zona de recolección de lodos anaerobios



Figura 7. Presencia de bacterias anaerobias (burbujas)



Figura 8. Muestreo



Figura 9. pH del río (7.5)



Figura 10. pH del lodo (7.0)

VIII.8 Operación de los reactores

Los reactores operaron en sistema continuo. Cabe señalar que dos veces fue realizada esta experiencia bajo diferentes condiciones.

a) Se pusieron en funcionamiento dos reactores uno con un flujo volumétrico= 1.4 ml/min y el otro con flujo= 1.6 ml/min. Se inocularon dichos reactores con lodo en una proporción respecto al agua residual sintética de 1:1. Se alimentó con el agua residual sintética del beneficio húmedo del café que se mencionó anteriormente. Y se puso en marcha durante 10 días.



Figura 11. Inoculación de lodos en reactor

b) Se instaló un reactor con un flujo volumétrico de 1.4 ml/min debido a que en la experiencia anterior se obtuvieron mejores resultados con este flujo. Se inoculó el reactor con lodo en una proporción respecto al agua residual sintética del 50 % (v/v). Se alimentó con agua residual sintética del beneficio húmedo pero con un pH de 6.9, puesto que a este pH se encontraron los lodos anaerobios.

VIII.9 Análisis del agua tratada en el reactor

Se tomaron muestras representativas del agua que salió del reactor, con la finalidad de comparar la calidad de la misma antes y después de ser tratada en el reactor. A esas muestras se le realizaron las determinaciones de pH, DQO y turbidez que se describieron anteriormente.

IX.RESULTADOS

IX.1 Diseño del reactor:

Se propuso *Volumen total* (V_t) = 3L

$$Volumen\ operación\ (V_{op}) = 2.5L$$

Dimensiones Generales

Altura	10 cm
Largo	25 cm
Ancho	12 cm

Tiempo de retención hidráulica (TRH): El tiempo de residencia hidráulico, parece ser el principal factor que influye en el rendimiento de los filtros anaerobios de flujo ascendente. Tiempos de retención altos favorecen el contacto íntimo tanto de la biopelícula como del floc granular suspendido con las aguas residuales, lo que se refleja en una mayor producción de microorganismos y una mayor eficiencia de remoción de contaminantes.

Por lo cual se establecieron los siguientes TRH: 16 h, 20 h y 24 h.

A partir de los TRH propuestos se calcularon los 3 Flujos volumétricos:

$$F_1 = \frac{2500\ ml}{16\ h} = 2.064\ \frac{ml}{min}$$

$$F_2 = \frac{2500\ ml}{20\ h} = 2.083\ \frac{ml}{min}$$

$$F_3 = \frac{2500\ ml}{24\ h} = 1.736\ \frac{ml}{min}$$

Pero en el filtro el tiempo de retención es casi nulo, por lo cual se ajustan nuevos TRH y por lo tanto nuevos flujos volumétricos tomándose en cuenta el tiempo en que el ARS esta en el sedimentador y en las 3 separaciones de los reactores.

$$\text{Para TRH: 24 Horas} = 1.4 \frac{ml}{min}$$

$$\text{Para TRH: 20 Horas} = 1.6 \frac{ml}{min}$$

$$\text{Para TRH: 16 Horas} = 2 \frac{ml}{min}$$

IX.1.1 Sedimentador

Los tanques de sedimentación primaria se diseñan con TRH que van desde 1.5 hasta 2.5 horas con base al caudal promedio del agua residual.

*El fondo de un tanque circular se diseña con pendientes de 1 in/ft (83 mm/m) y su Relación Largo/Ancho es 4:1.

Calculando para nuestro reactor:

TRH (en el sedimentador) = 180 minutos

$$F_3 = \frac{2.5 L}{24 h} = 1.736 \frac{ml}{min}$$

Ahora si:

$$TRH = \frac{Volumen}{Flujo volumetrico(Q)} \quad \therefore \quad Volumen = Q * TRH$$

$$V_{Sedimentador} = (180 min) * \left(1.736 \frac{ml}{min}\right)$$

$$V_{Sedimentador} = 312.48 ml$$

Profundidad efectiva del agua: ésta se considerará el 70% de la altura total del reactor (10cm) por lo tanto la profundidad efectiva del agua es: 8.4 cm.

Se conoce el volumen del sedimentador (312.48 ml), el largo del reactor (12 cm) y la altura del sedimentador (8.4 cm) y ahora se calcula el ancho de dicho sedimentador:

$$V_{\text{sedimentador}} = L * A * h$$
$$A = \frac{V_{\text{sedimentador}}}{L * h} = \frac{312.48 \text{ ml}}{12 \text{ cm} * 8.4 \text{ cm}}$$
$$A = 3.1 \text{ cm}$$

Carga superficial:

$$\text{Carga superficial} = \frac{Q}{A} = \frac{1.736 \frac{\text{ml}}{\text{min}}}{3.1 \text{ cm} * 12 \text{ cm}}$$
$$\text{Carga superficial} = 0.0466 \frac{\text{ml}}{\text{min} * \text{cm}^2}$$

Bien ahora determinamos el volumen que tendrán los 3 reactores:

$$V_{\text{operacion}} - V_{\text{sedimentador}} = V_{\text{resto del reactor}}$$
$$2500 \text{ ml} - 312.48 \text{ ml} = 2187.52 \text{ ml}$$

2187.52 ml es el volumen que incluye a los tres reactores, por lo cual el volumen que ocupa cada reactor (3 de ellos) más el filtro es el siguiente:

$$V_{\text{reactor}} = \frac{2187.52 \text{ ml}}{4} = 546.88 \text{ ml}$$

IX.1.2 Filtro

Suponiendo que el flujo volumétrico en el filtro será igual al de la entrada (lo que se puede conseguir al no poner materia tan fina en el filtro), con un volumen de 546.88 ml y altura de 7.5 cm, entonces:

$$V_{filtro} = L * A * h$$

$$L_{filtro} = \frac{546.88 \text{ ml}}{12 \text{ cm} * 7.5 \text{ cm}}$$

$$V_{filtro} = 6.076 \text{ cm}$$

Pero con 6.076 cm la altura correspondiente a los reactores es de 8.6 cm y la altura máxima es 8.4, para evitar esto se redimensionan los reactores:

$$V_{reactor} = 546.88 \text{ ml}$$

$$V_{3 \text{ reactores}} = 1640.64 \text{ cm}^3$$

En donde para los reactores:

$$h = 8.3 \text{ cm} \quad A = 12 \text{ cm} \quad L = 5.5 \text{ cm}$$

Y para el filtro:

$$h = 8.3 \text{ cm} \quad A = 12 \text{ cm} \quad L = 5.4 \text{ cm}$$

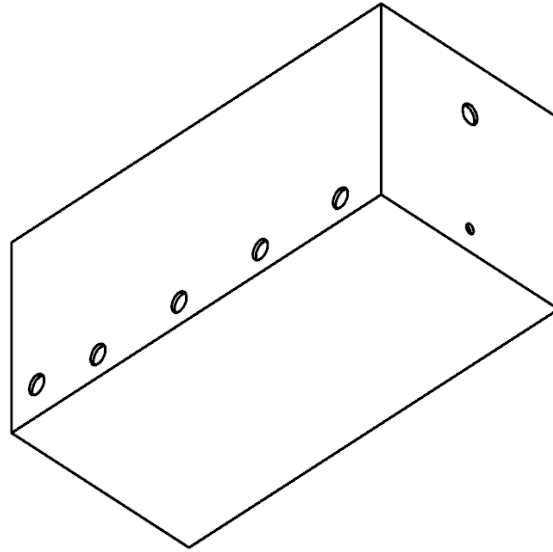
Cabe señalar que la $h=8.3$ cm, es la altura del filtro, pero la altura que se ocupará para colocar el carbón activado, arena y grava será de 7.5 cm.

IX.1.3 Baffles

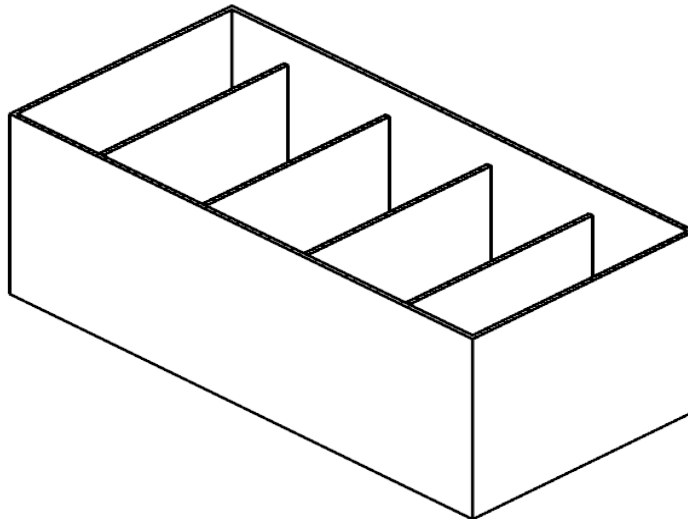
La relación $Ar/Ad=0.411$ en donde $Ar=$ *niser cross-sectional area* y $Ad=$ *Downconer cross.*

L_b : altura del baffle (Que debe ser 72 % de hL)

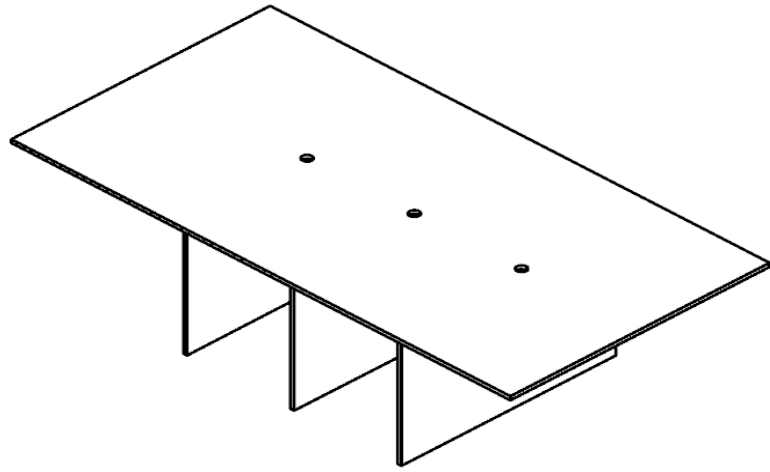
IX.2 Esquemas del Reactor



Dibujo isométrico del reactor en donde se muestran los orificios en la pared del mismo, los cuales sirven para desalojar la materia que podría acumularse impidiendo la circulación. El orificio inferior que esta solo es por donde sale la manguera que lleva el efluente del reactor.

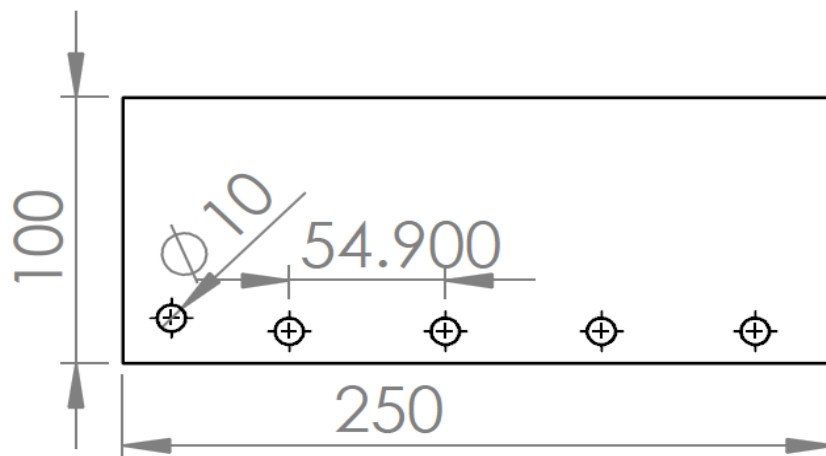


Vista aérea en donde se aprecian los 3 espacios o reactores, sedimentador y filtro.



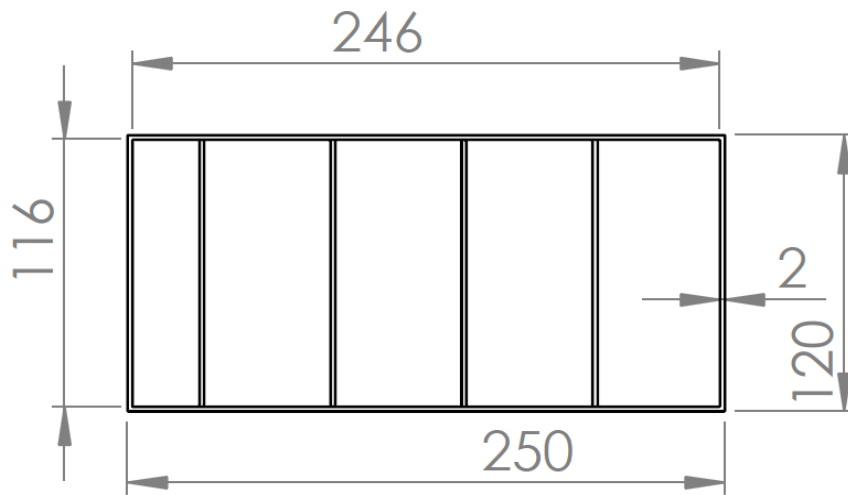
Dibujo que corresponde a la tapa del reactor en donde se aprecian los baffles y orificios que permiten la salida de los gases emitidos por las bacterias.

Vistas del reactor:



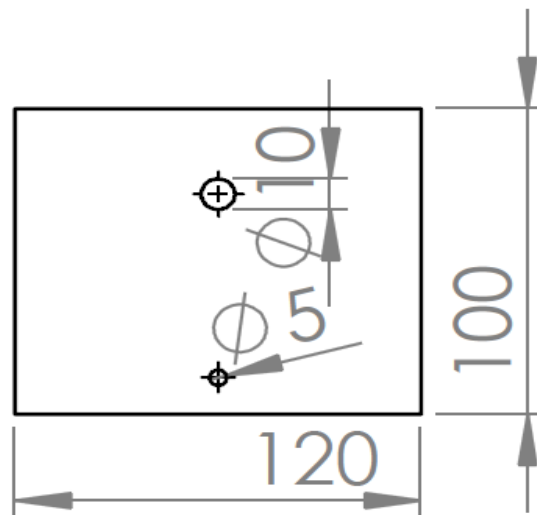
Vista Lateral

En esta vista lateral se puede apreciar la longitud del reactor 250 mm, la altura 100 mm, las separaciones entre el centro de cada orificio en la base del mismo 54.9 mm y el diámetro de cada orificio 10 mm.



Vista Superior

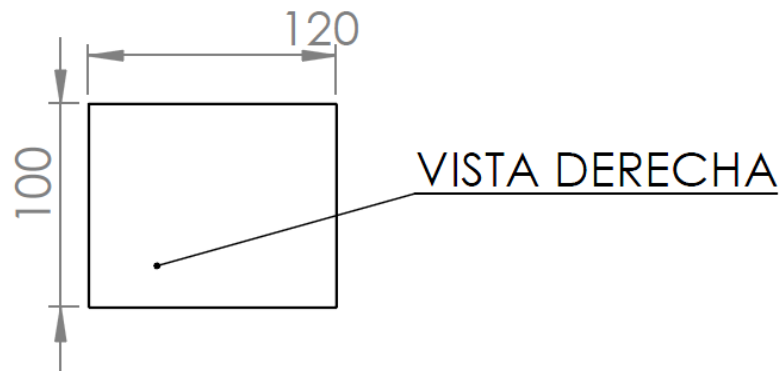
En esta vista se detallan las dimensiones del reactor, con el ancho de 116 mm, la longitud 250 mm, se muestran además los 2 mm que corresponden al ancho del material con el cual fue construido el reactor (acrílico).



Vista Frontal

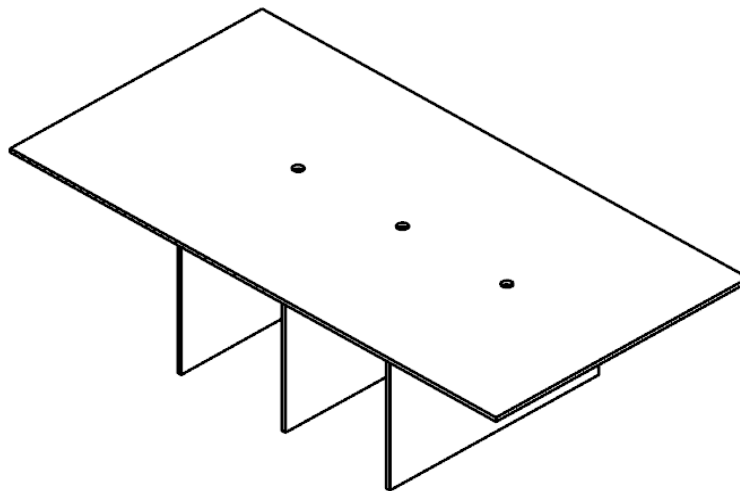
En esta vista frontal se señalan los valores del diámetro por donde pasara el efluente del reactor (5 mm) y el diámetro del orificio destinado para retirar

residuos(10 mm), además de las dimensiones de alto y ancho, (100 y 120 mm respectivamente)

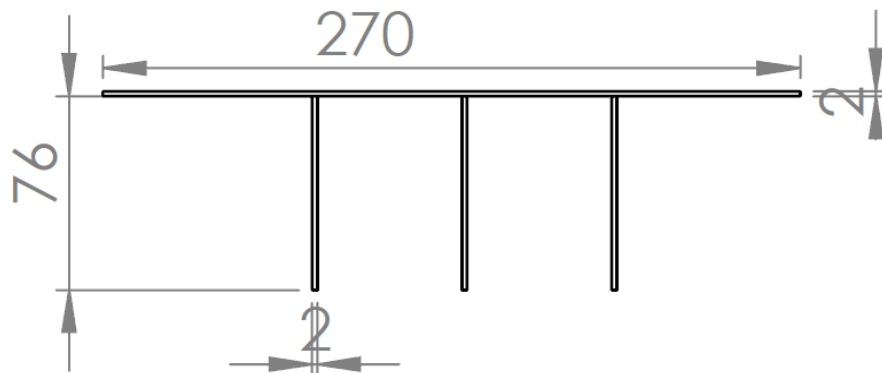


Aquí se aprecian las longitudes de alto y ancho en una vista del reactor.

Tapa del reactor:

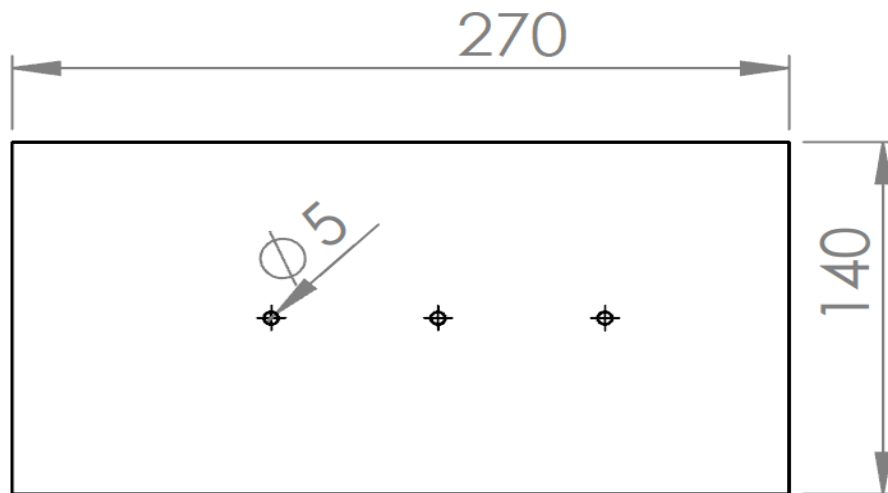


Dibujo del la tapa del reactor, incluyendo baffles y orificios para la salida del gas durante el proceso anaerobio.



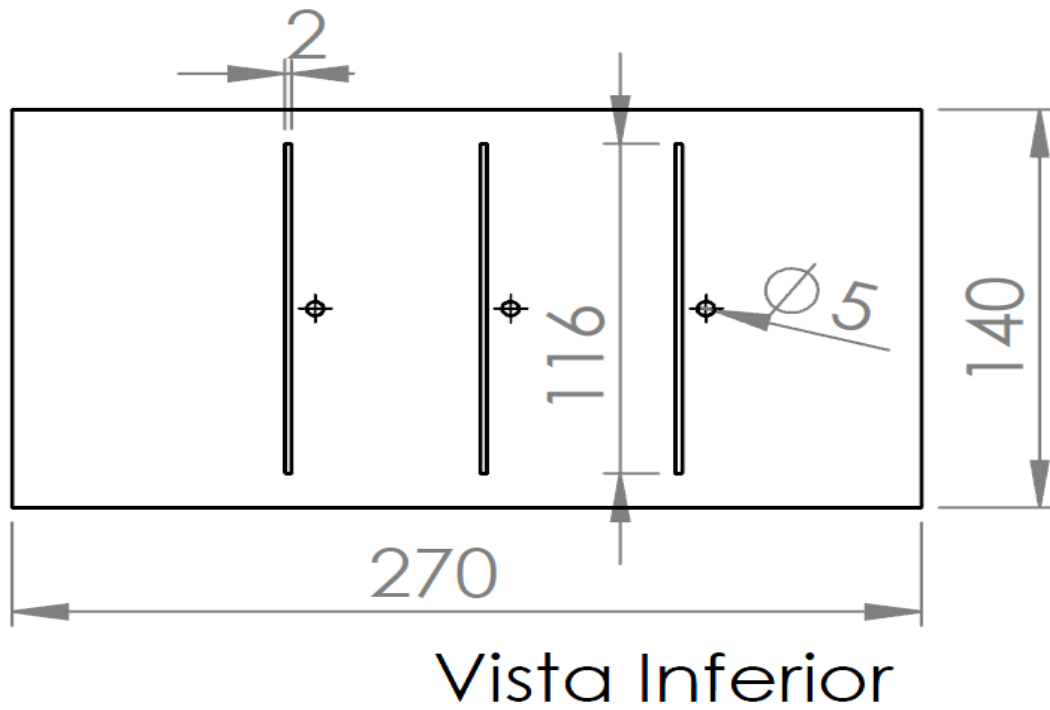
Vista Frontal

En esta vista se aprecian las medidas de la tapa del reactor, que tendrá un largo de 270 mm, el ancho del material utilizado 2 mm y el largo de los baffles (76 mm).



Vista Superior

Aquí se indica el diámetro de los orificios para la salida de gas (5 mm) y la longitud de la tapa (270 mm) además del ancho de la misma (140 mm).



En la vista inferior apreciamos el ancho de los baffles (116 mm), el ancho del acrílico (2 mm) y las dimensiones generales de ancho y largo de la tapa.



Figura 12. Reactores contruidos

En la figura 12 se presentan las fotos de los tres reactores construidos, se presentan el sedimentador, los espacios destinados a los reactores y el filtro, cabe señalar que las fugas se remediaron con plastilina epóxica (plasti loka). Son de un tamaño pequeño pero adecuado para el desarrollo de experimentos que involucran remoción de materia orgánica a través de lodos anaerobios.

IX.3 Prueba de biodegradabilidad del agua sintética

Día	Absorbancia a 620 nm	DQO (mg/L de O ₂)
1	0.268	6677.5
4	0.261	6502.5
6	0.247	6152.5

La variación de DQO a lo largo de los días fue poco significativa, por lo cual se puede considerar al agua residual sintética del beneficio húmedo del café estable y un sustrato factible de utilizar en un ensayo a nivel laboratorio.

IX.4 Cuantificación de DQO de sacarosa grado alimenticio

Al leer absorbancia a 620 nm de la solución de sacarosa (1000 mg/L) se obtuvo la siguiente absorbancia promedio: 0.5615 e interpolando en la curva patrón de DQO se tiene un valor de 1401.5 mg/L

$$\begin{array}{r}
 \text{Sacarosa} \qquad \qquad \qquad \text{DQO} \\
 1000 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \text{ ---} \rightarrow 1401.5 \text{ mg/L} \\
 \qquad \qquad \qquad ? \text{ ---} \rightarrow 7450 \text{ mg/L} \\
 \qquad \qquad \qquad ? = 5315.73 \text{ mg/L}
 \end{array}$$

El valor de 7450 mg/L es el que se requiere para la preparación del agua sintética, por lo cual por cada 10 L de Agua residual sintética del beneficio húmedo del café se ocuparon 53 g de sacarosa grado alimenticio.

IX.5 Curva Patrón DQO

DQO (mg/L)	Absorbancia a 620 nm	σ (desviación estándar)
0	0	0
300	0.13467	0.00306
600	0.26467	0.00208
900	0.39700	0.00200
1000	0.43333	0.00208
1200	0.51467	0.00473
1500	0.66567	0.00208

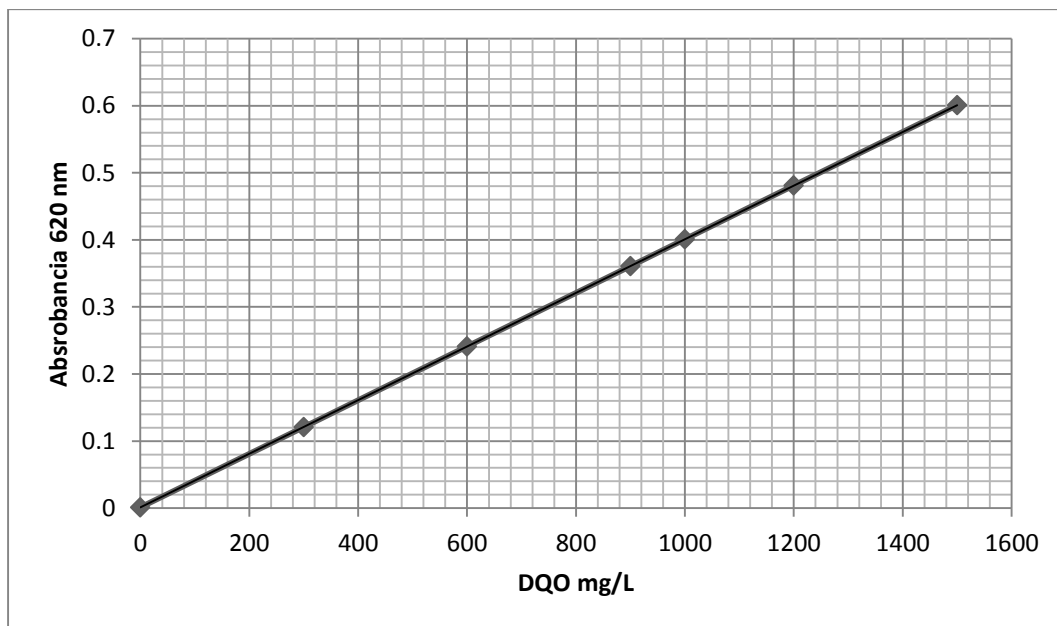
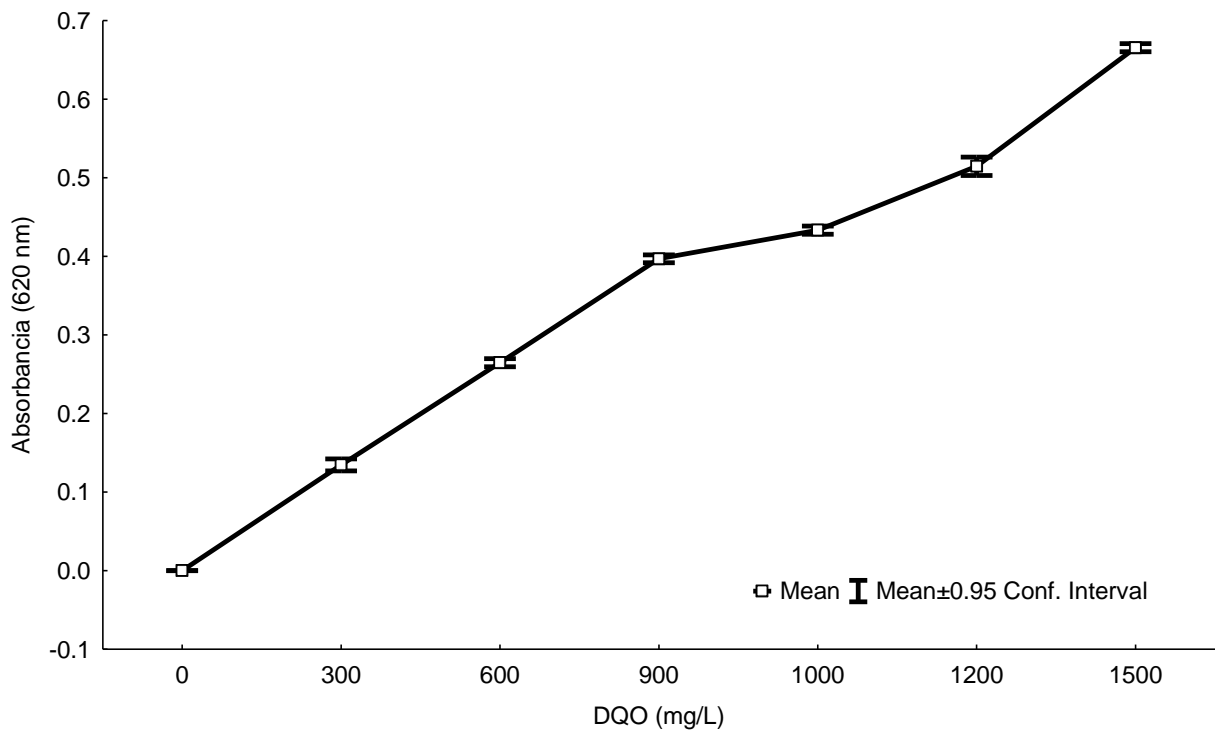


Figura 13. Curva patrón DQO

IX.6 Resultados del primer experimento con los reactores

Cuadro 7. Reactor alimentado con lodos residuales y agua residual sintética, operado con un flujo volumétrico de 1.4 mL/min y un tiempo de retención hidráulica de 24 h. pH de ingreso 4.2

Tiempo (horas)	DQO (mg/L)	%Remoción de materia orgánica	Turbidez (Absorbancia a 600 nm)	pH
0	6445	0	0	4.258
32	2727.5	57.6803724	0.293	
60	3677.5	42.9402638	0.129333333	
83	3277.5	49.1466253	0.130666667	
106	3277.5	49.1466253	0.1645	6.757
132	3810.83333	40.8714766	0.129	6.624
147	2794.16667	56.6459788	0.174	5.81
251	4327.5	32.8549263	0.185	

Cuadro 8. Reactor alimentado con lodos residuales y agua residual sintética, operado con un flujo volumétrico de 1.6 mL/min y un tiempo de retención hidráulica de 20 h. pH de ingreso 4.2

Tiempo (horas)	DQO (mg/L)	%Remoción de materia orgánica	Turbidez (Absorbancia a 600 nm)	pH
0	6445	0	0	4.258
43	4590	28.7820016	0.172333333	
71	4877.5	24.3211792	0.177666667	
94	5015	22.1877424	0.128	
117	3677.5	42.9402638	0.1525	6.01
143	3327.5	48.3708301	0.165	6.052
158	2944.16667	54.3185932	0.171	5.241
262	4327.5	32.8549263	0.183	

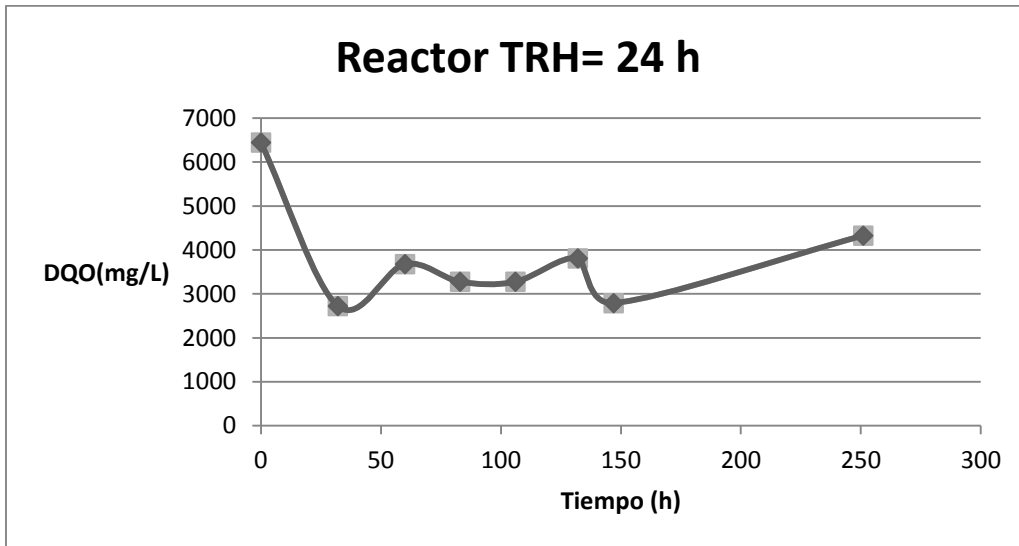


Figura 14. Comportamiento de DQO TRH 24h, pH ARS 4.2

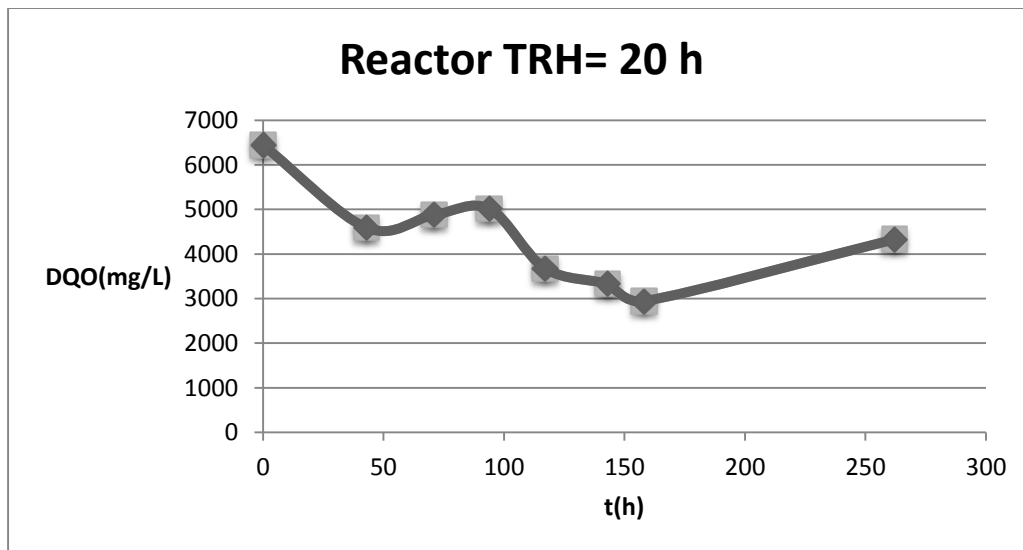


Figura 15. Comportamiento de DQO TRH 20h, pH ARS 4.2

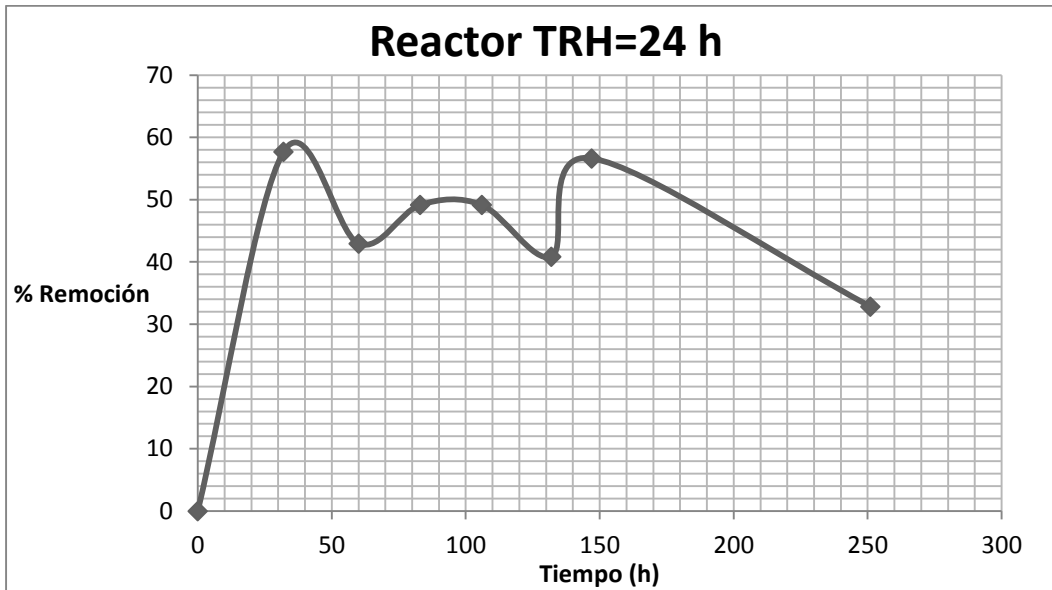


Figura 16. Porcentaje de remoción en TRH 24h, pH ARS 4.2

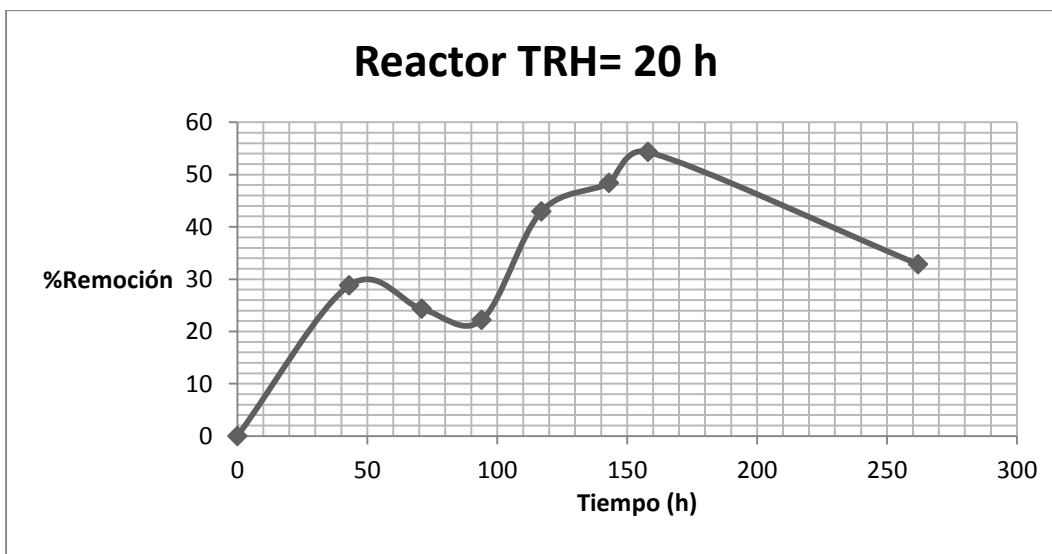


Figura 17. Porcentaje de remoción en TRH 20h, pH ARS 4.2

Para el reactor con TRH 24 horas al cabo de 147 horas presenta una remoción de materia orgánica del 56.65 %.

La turbidez más baja (en este caso indica el grado de calidad del agua) se presento a las 132 horas.

El pH de las aguas residuales tratadas debe ser próximo a la alcalinidad y en este caso se obtienen pH 6.7 y 6.6 a las 106 y 132 horas respectivamente.

Respecto al reactor con TRH 20 horas, se observa una remoción significativa a las 117 horas (43%) y además también presenta una remoción del 54.32 % a las 158 horas y la turbidez más baja registrada se obtuvo a las 94 horas. Al disminuir este porcentaje a las 262 horas (32%) indica una posible sobrecarga orgánica que definiría la carga límite que el sistema puede soportar.

Los pH más alcalinos en este caso fueron 6.010 y 6.052 a las 117 horas y 143 h respectivamente.

En base a los resultados explicados anteriormente, se escoge el TRH 24 horas para el próximo experimento pero a su vez el pH del ARS se cambia al valor que presentan los lodos anaerobios (6.9) esperando que el lodo se estabilice y ocurra mayor remoción de materia orgánica.

IX.7 Resultados del Segundo experimento con los reactores

Cuadro 9. Reactor alimentado con lodos residuales y agua residual sintética, operado con un flujo volumétrico de 1.4 mL/min y un tiempo de retención hidráulica de 24 h. pH de ingreso 6.9

Tiempo (horas)	DQO (mg/L)	%Remoción	Turbidez (Absorbancia a 600 nm)	pH
0	6519.16667	0	0.018	7.15
77	4127.5	36.6866931	0.124	6.87
98	3752.5	42.438962	0.123	6.765
171	3669.16667	43.717244	0.16	6.779
195	3685.83333	43.4615876	0.115	5.267
220	3369.16667	48.3190592	0.167	6.495
245	3335.83333	48.830372	0.184	5.063
266	3377.5	48.191231	0.1825	5.047

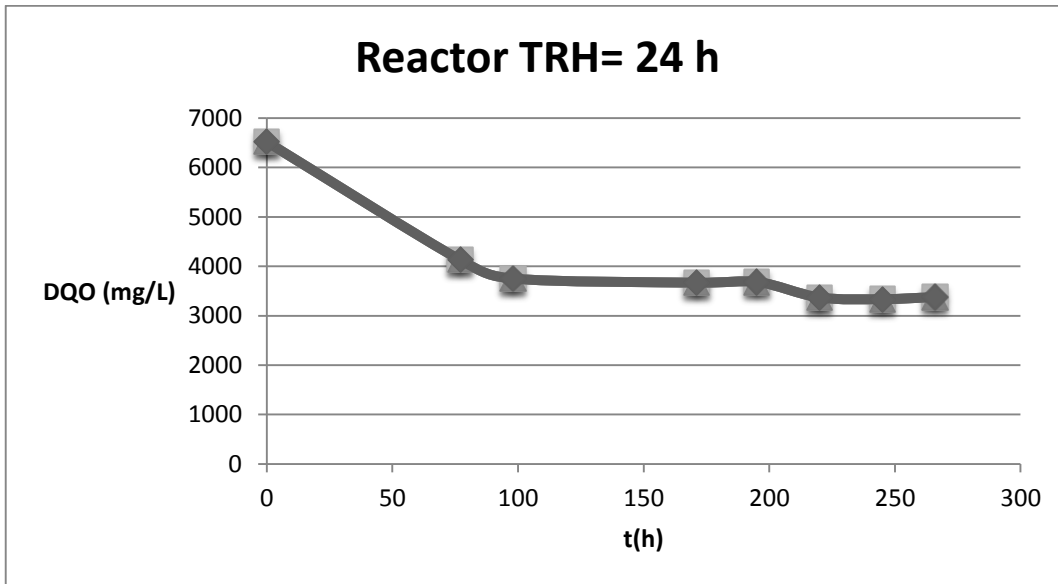


Figura 18. Comportamiento de DQO en TRH 24h, pH ARS 6.9

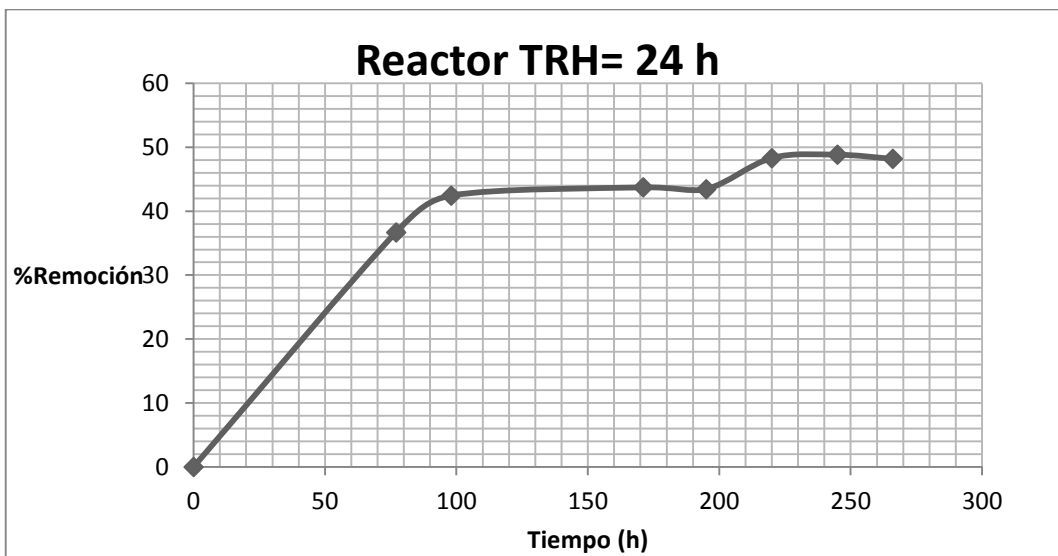


Figura 19. Porcentaje de remoción en TRH 24h, pH ARS 6.9

En este caso hubo remoción de la materia orgánica del 48.83 % a las 245 horas y la DQO disminuyó pero no de manera considerable comparando con la experiencia anterior, lo cual deja en claro que el hecho de ajustar el valor del pH al mismo valor que el de los lodos anaerobios no beneficia en la degradación de materia orgánica.

Teniendo ambas experiencias se recomienda usar el reactor con TRH 20 horas con ARS pH 4.2, esto es importante ya que al momento de usar el agua residual del beneficio húmedo se sabrá que el pH no debe ajustarse a ningún otro valor si no que debe ser tratado tal cual llegue (pH: 3.94-4.61).

IX.8 Sugerencias para el rediseño del reactor

- ✓ El orificio de entrada al sedimentador debe colocarse a la mitad de la altura total del reactor, esto con la finalidad de que las partículas que entren a él no homogenicen resto y pueda existir una adecuada sedimentación y así optimizar su uso.
- ✓ La placa de acrílico que separa al sedimentador del primer reactor deberá ser de una altura mayor respecto a las demás placas de acrílico que conforman las separaciones entre cada reactor. Que se cumpla esta condición garantizará que lo que entre al sedimentador no se mezcle con el contenido en el primer reactor, luego con el segundo y así sucesivamente.
- ✓ El filtro deberá ser más angosto ya que el área de contacto entre el agua tratada y el filtro es muy pequeña, por lo cual se sugiere sea más pequeño para evitar gasto innecesario de material.

X.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se construyeron tres reactores que operaron a flujo pistón y se realizaron experimentos que permitieron establecer nuevas características para mejorar el sistema.

El agua residual sintética preparada en laboratorio fue similar al agua residual del beneficio húmedo del café, tanto en lo referente a su composición orgánica e inorgánica; además, es un sustrato muy estable lo que permite que sea manipulado con facilidad en estudios a escala de laboratorio donde se precise profundizar sobre aspectos del tratamiento de este tipo de residuos.

El mejor tiempo de retención hidráulica (TRH) fue de 20 horas usando agua residual sintética (ARS) pH 4.2 ya que a partir de dicha experiencia se obtuvo un porcentaje de remoción de materia orgánica de 54.32 % a las 158 horas, sin embargo, se observa una remoción significativa a las 117 horas (43%), a las 262 horas la remoción del 32% lo cual indica una posible sobrecarga orgánica que definiría la carga límite que el sistema puede soportar.

Se descarta la idea de cambiar el pH del ARS al mismo que de los lodos anaerobios ya que no presenta mejoría significativa en la remoción de materia orgánica.

Los ensayos en los reactores mostraron la potencialidad de los lodos en la degradación anaerobia de los componentes orgánicos del agua residual sintética del beneficio húmedo del café, verificándose la importancia de la afinidad del lodo utilizado como inóculo con el tipo de sustrato que va a ser tratado, a pesar de ello se requiere un porcentaje de remoción de la materia orgánica de un 70 % para tal

resultado se recomiendan mayores tiempos de retención, estabilización del lodo antes de ser sometido al tratamiento de remoción de materia orgánica e incluso elevar la proporción: lodo anaerobio/sustrato a degradar .

El rediseño propuesto en este trabajo mejorará la eficacia del reactor al momento de de tratar aguas residuales.

Aunque no se utilizó membrana como medio de filtración, se obtuvieron resultados preliminares que serán de mucha utilidad cuando se utilice la membrana en experimentos posteriores.

XI.- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bermudez R.C., Rodríguez S., Martínez M., Terry A.(2003). Ventajas del empleo de reactores UASB en el tratamiento de residuales líquidos para la obtención de biogás. Centro de Estudios De Biotecnología Industrial, Universidad de Oriente. Tecnología Química Vol. XXIII (2)

Blanco, J y Perera, C. (1999). Dilemas de la reconversión del beneficiado de café en Centroamérica. BUN-CA. San José, Costa Rica. P 29-39.

Chacón Lázaro E. Director de COMCAFE. Comunicación personal. 2010

Cléves, R. (1995). Tecnología en Beneficiado de Café. Tecnicafé. San José, Costa Rica. 201p

Horton, R. K., M. Pachelo, and M.F. Santana, (1946) "Study of the treatment of the wastes from the preparation of coffee" paper presented at American Regional Conference on Sanitary Engineering, Caracas Venezuela.

Morales, A. (1979). Caracterización de Aguas Residuales del Beneficiado de Café. CICAFAE.

Muñoz, J. (1993). Tratamiento Anaerobio de Aguas Residuales Agroindustriales: Parámetros de Operación, diseño y control. En: Tratamiento de Aguas Residuales, basuras y escombros en el Ámbito Rural. Serie Técnica. Editorial Agrícola Española, S.A. Madrid, España. Pp 215-254.

Narasimha K.V., D'Sa A., Kapur G., (2000) An effluent treatment-cum-electricity generation option at coffee estates: is it financially feasible?. International Energy Initiative Bangalore

Nemerow N., Dasgupta A. (1998) Tratamiento de vertidos industriales y peligrosos. Editorial Diaz de Santos. Pp 470

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

Rodríguez Fernández, Antonio; Letón García, Pedro; Rosal García, Roberto; Dorado Valiño, Miriam; Villar Fernández, Susana y Sanz García, Juana. (2006). Informe de vigilancia: Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales. Fundación para el conocimiento Madrid CEIM. 137 pp.

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.

Vázquez, R. (1997). Descontaminación de las aguas residuales en el beneficiado del café en Costa Rica. ICAFE. San José, Costa Rica, 26p.

Veenstra, IR.S.(1995) Recovery of biogas from landfill sites. IHE Delft. In: Curso taller Internacional sobre tratamiento anaerobio de aguas residuales. Santiago de Cali.

Wasser, R.(1996). Planta de Tratamiento de aguas residuales de café. Reactor Wheatley, A.; Johnson, K; Winstanley, C. (1990). The Beliability of Anaerobic Digestion for the Treatment of Food Processing Effluents. Anaerobic Digestion, IAWPRC :135-146.

Zambrano F., D. (1989) Estudios de laboratorio: Caracterización de las aguas residuales del proceso de beneficio húmedo del café.. In: CENTRO NACIONAL DE 76 INVESTIGACIONES DEL CAFÉ, Cenicafé. Informe anual de actividades de la disciplina de Química Industrial, Octubre 1988-Septiembre 1989. Chinchiná, Cenicafé, pp 22

Páginas web

<http://www.aqualimpia.com/PDF/UASB%20Ventajas.pdf>

<http://www.plantasdepuradoras.com/PDF/Folleto%20PDAR%20Compactas.pdf>

<http://www.sagarpa.gob.mx>

<http://www.promor.com.mx/seco.html>