

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE BOTÁNICA



Efecto del Tiempo de Retención Hidráulica en el Tratamiento de Agua  
Residual Doméstica de un Reactor Aerobio Air Lift

Por:

**ANAYELI GABRIELA GUZMÁN VERDUGO**

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

**INGENIERO EN AGROBIOLOGÍA**

Saltillo, Coahuila, México

Junio del 2014

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE BOTÁNICA

Efecto del Tiempo de Retención Hidráulica en el Tratamiento de Agua  
Residual Doméstica de un Reactor Aerobio Air Lift

Por:

**ANAYELI GABRIELA GUZMÁN VERDUGO**

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

**INGENIERO EN AGROBIOLOGÍA**

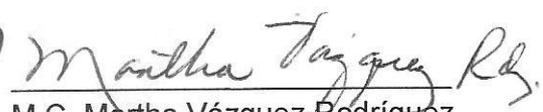
APROBADA



Dra. Silvia Yudith Martínez Amador  
Asesor Principal



M. C. Reynaldo Arturo Sánchez Martínez  
Coasesor

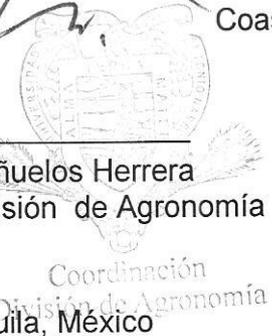


M.C. Martha Vázquez Rodríguez  
Coasesor

Dr. Leobardo Bañuelos Herrera  
Coordinador de la División de Agronomía

Saltillo, Coahuila, México

Junio del 2014



## DEDICATORIAS

*Gracias a Dios por haberme ayudado durante estos años, el sacrificio fue grande pero tú siempre me diste la fuerza necesaria para continuar y lograrlo, fue un largo y arduo camino, y puedo decir que entre sus planes para hoy me encontré.*

*A mis Padres por darme la vida, el cariño, por las energías depositadas en mí persona, por los consejos a seguir por el buen camino, por el apoyo moral y económico, porque ahora ven su anhelo realizado aunque fueron muchos valles de inseguridad los que cruce siempre conté con el apoyo incondicional, ahora se refleja el fruto de desvelos y el logro de ambiciones que siempre recibí de ustedes, con el cual logre culminar mi esfuerzo, terminando así mi carrera profesional que es para mí la mejor de las herencias.*

*A mis hermanas y hermano Enrry, Dany y Alex por brindarme el apoyo incondicional y económico para llevar a cabo este proyecto en mi vida y al resto de mis hermanas ahora que culmino mi carrera, me doy cuenta con gran sorpresa que entre más palabras conozco, más difícil resulta encontrar aquellas que expresen mi profundo agradecimiento, por ese pleno conocimiento que tienen de mi fortaleza y debilidad, por esa forma tan vertical de ser mi guía, siempre sobre una base de respeto, confianza y libertad, muestra indudable de amor; Pero basta decirles que su sacrificio y amor, en mis logros e ideales siempre*

*serán correspondidos. Así también a mis cuñados por los consejos y apoyo moral que siempre me brindaron para poder llevar a cabo este proyecto.*

*A mis sobrinos que me han impulsado a seguir adelante para ser un ejemplo a seguir, por el apoyo moral que me han brindado y las muestras de cariño y aprecio, los quiero.*

*A mis amigos: Javier, Mirsy, Estrella, Brenda, Ángel y Tommy que a pesar de las circunstancias siempre estaba ahí apoyándome así como también en los momentos buenos y malos de mi carrera profesional, a pesar de la distancia también el apoyo de mis amigos: Joel, Bersy y Will que siempre estaba echándome porras y ánimos para no decaer; a todos muchas gracias por estar ahí siempre conmigo.*

## AGRADECIMIENTOS

*A mi Alma Mater por cobijarme durante 5 años durante mi estancia en saltillo, por ser parte de su historia y por permitir poder desarrollarme profesionalmente bajo su techo.*

*A la Dra. Silvia Martínez por brindarme la oportunidad de poder realizar la tesis, por los consejos y por permitirme lograr un objetivo más en mi carrera profesional.*

*A la M.C Dalila Antonio por el apoyo para poder realizar adecuadamente y de manera cuidadosa el desarrollo de la tesis en el laboratorio.*

*Al M. C. Reynaldo por el apoyo durante el desarrollo práctico de la tesis.*

*A mis compañeros: Brenda, Tommy, Ángel, Isela y Lupita que también colaboraron conmigo en el laboratorio con la parte práctica de la tesis.*

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Medidas del reactor aerobio air lift.....	37
Figura 2. Reactor aerobio con acumulación de lodos, antes de su monitoreo.....	38
Figura 3. Después de monitoreo del reactor aerobio.....	39
Figura 4. Después de la inoculación del reactor aerobio con lodos activados.....	40

## INDICE

AGRADECIMIENTOS.....	I-II
DEDICATORIA.....	III
INDICE DE FIGURAS.....	IV
INDICE GENERAL.....	V-VI
RESUMEN.....	1
<b>I. INTRODUCCION.....</b>	<b>2-3</b>
OBJETIVOS GENERALES.....	4
OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	4
HIPOTESIS.....	4
<b>II. REVISION DE LITERATURA.....</b>	<b>5-9</b>
2.1 ORIGEN DE AGUA RESIDUAL.....	5
2.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS.....	6
2.2.1 Solidos totales.....	6
2.2.2 Temperatura.....	7
2.3 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS.....	7
2.3.1 DQO.....	7-8
2.3.2 pH.....	8
2.4 PROCESO DE LODOS ACTIVADOS.....	8-9
<b>III. METODOLOGIA.....</b>	<b>10-19</b>
3.1 DQO.....	11-13
3.2 Nitratos.....	14
3.3 Sulfatos.....	14-15
3.4 Amoniaco.....	16
3.5 Solidos Totales Suspendidos.....	17
3.6 Temperatura.....	17-18

3.7 pH.....	18-19
<b>IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....</b>	<b>20-29</b>
4.1 Antes del mantenimiento del reactor.....	20-21
4.2 Después del mantenimiento del reactor.....	21-22
4.3 Después de inoculación con TRH de 12 horas.....	23-26
4.4 Después de inoculación con resultados del TRH de 24 horas.....	26-29
<b>V. CONCLUSIÓN.....</b>	<b>30</b>
<b>VI. GLOSARIO DE TERMINOS.....</b>	<b>31</b>
<b>VII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....</b>	<b>32-36</b>

## RESUMEN

Se estudió el efecto del tiempo de retención hidráulica (TRH) en el funcionamiento de un reactor air lift tratando agua residual doméstica. Se evaluaron varios parámetros: a TRH de 24 y 12 horas donde se obtuvo más remoción fue en el TRH de 24 horas. Se analizaron los siguientes parámetros: Demanda Química de Oxígeno (DQO), pH, sólidos suspendidos totales (SST), Temperatura, Nitratos, Sulfatos y Amoníaco. Los resultados demostraron que hay eficiencia del reactor air lift tratando agua residual doméstica obteniéndose un porcentaje de remoción de DQO de 44% más alto, así también en sulfatos con un 32% mayor, en cuanto al amoníaco el resultado fue mejor con un porcentaje de 89 mg/l; todo esto comparado con el testigo (agua residual cruda). De esta manera se comprobó que para tratar las aguas residuales domésticas a escalas de laboratorio es utilizando el reactor *air lift* con un tiempo de retención hidráulica de 24 horas.

Palabras Clave: *agua residual doméstica; degradación aerobia; eficiencia de remoción.*

## ABSTRACT

The effect of the hydraulic retention time (HRT) in the operation of an air lift reactor treating domestic wastewater was studied. Several parameters were assessed: a HRT of 24 to 12 hours which is obtained as the removal in the HRT was 24 hours. Chemical Oxygen Demand COD, pH, total suspended solids (TSS), temperature, nitrates, sulfates and ammonia: The following parameters were analyzed. The results showed some efficiency there air lift reactor treating domestic wastewater to give a percentage of COD removal of 44% higher, so sulphate with 32% higher ammonia as the result was better with a rate of 89 mg/l; this compared to the control (raw wastewater). Thus it was found that to treat laboratory scales domestic wastewater using the air lift reactor is a hydraulic retention time of 24 hours.

Keywords: *domestic wastewater; aerobic degradation; removal efficiency.*

## I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha incrementado la contaminación del agua, debido al manejo inadecuado de las aguas residuales de origen industrial y urbano que se encuentran al norte del país, en donde este recurso es limitado. De tal manera que se ha estado implementando diferentes tecnologías para la depuración de las aguas residuales domésticas, ya que estas significan un peligro para la sociedad. Debido a sus características como: color, cantidad de grasas y materia orgánica estos efluentes causan severos daños si son descargados en ambientes acuáticos sin tratamiento alguno.

En México se generan alrededor de 200 m<sup>3</sup>/seg de aguas residuales, de las cuales reciben tratamiento sólo 36% (12). Lo que indica que se requiere de mayor infraestructura y recursos humanos para mejorar la calidad de este bien, además de propuestas innovadoras que permitan implementar el tratamiento en diferentes condiciones ambientales y socioeconómicas.

El tratamiento de las aguas residuales domésticas producidas por instituciones sin alcantarillados suele consistir en tratamiento aerobio, previa separación de sólidos suspendidos y posterior desinfección.

Los requisitos para el tratamiento de aguas residuales domésticas se asocian típicamente a la remoción y conversión de la materia orgánica disuelta en biomasa celular, remoción de nutrientes (15). Así también se miden los parámetros: demanda química de oxígeno (DQO), pH, temperatura, sólidos totales suspendidos, nitrato, sulfato y amonio.

En las últimas décadas se han desarrollado reactores air lift aerobios y anaerobios, llamados también de tercera generación por lo general de configuración vertical, empacados con diferentes tipos de soporte para utilizarlo en el tratamiento de aguas residuales. Con este bioreactor la aireación y la utilización de oxígeno se mejoran y la eficiencia del proceso global aumenta.

El modo de mezcla producida y los fenómenos de transporte que ocurrirán en este reactor air lift depende de varios factores el volumen de reactor, configuración hidrodinámica, flujo de aire, tamaño de burbuja, etc. Para

optimizar la transferencia de masa. Por lo que se espera obtener menos residuos sólidos en el agua residual doméstica, por lo que también se le puede dar otras aplicaciones al agua ya tratada de manera que el uso de este sea de menos impacto para la sociedad.

De esta manera el tratamiento de aguas residuales por medio de reactores que utilizan la acción de biopelícula adherida a un soporte fijo, como es el caso de los reactores aerobios conocidos como air lifts, tiene como ventajas el uso de poco espacio, la retención de gran concentración de biomasa activa y la remoción eficiente y simultánea de materia carbonácea y nitrogenada.

En la configuración de los air lifts, la velocidad de circulación del líquido es un parámetro importante, pues determina los procesos de mezcla líquida, recirculación de burbujas y suspensión de sólidos.

Si este tipo de reactores son operados con velocidades bajas, las biopartículas podrán sedimentarse o presentar bajas tensiones de corte, aumentando el grosor de la biopelícula, provocando condiciones anaerobias, llevando a la formación de biomasa suspendida en exceso; y si son operados con alta velocidad puede ocurrir reducción del grosor de las biopartículas. En ambos casos los procesos de remoción de la materia orgánica se ven perjudicados (32).

Debido a la contaminación sanitaria que traen consigo las aguas residuales domésticas, en el presente trabajo se implementó el uso de un reactor aerobio tipo air lift, para evaluar la eficiencia de remoción de diferentes parámetros, indicadores de contaminación. Con este trabajo se evaluó el tiempo de retención hidráulica para conocer el desempeño del reactor aerobio air lift.

## **OBJETIVO GENERAL**

Determinar el desempeño de un reactor air lift empacado con espuma de poliuretano a tres diferentes tiempos de retención hidráulica.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Evaluar el desempeño del reactor aerobio air lift a un tiempo de retención hidráulica de 12 horas.

Evaluar el desempeño del reactor aerobio air lift a un tiempo de retención hidráulica de 24 horas.

## **HIPOTESIS**

En uno de los tiempos de retención hidráulica el reactor tendrá un mejor desempeño.

## II. REVISION DE LITERATURA

### 2.1. ORIGEN DE LAS AGUAS RESIDUALES

Toda comunidad genera residuos tanto sólidos como líquidos. La fracción líquida de los mismos –aguas residuales– es esencialmente el agua de que se desprende la comunidad una vez ha sido contaminada durante los diferentes usos para los cuales ha sido empleada. Desde el punto de vista de las fuentes de generación, podemos definir el agua residual como la combinación de los residuos líquidos, o aguas portadoras de residuos, procedentes tanto de residencias como de instituciones públicas y establecimientos industriales y comerciales, a los que pueden agregarse, eventualmente, aguas subterráneas, superficiales y pluviales.

En la Legislación Mexicana de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana (26) se consideran como aguas residuales a las “Las aguas de composición variada provenientes de las descargas de uso municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticos, incluyendo fraccionamientos y en general de cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas.

El agua residual es aquella que se genera como producto de la utilización en las diversas actividades de hombre; provenientes de las viviendas, instituciones y establecimientos comerciales, las cuales han sido utilizadas para diferentes actividades de tipo doméstico y finalmente son descargadas al sistema de alcantarillado (22).

Si se permite la acumulación y estancamiento de agua residual, la descomposición de la materia orgánica que contiene puede conducir a la generación de grandes cantidades de gases malolientes. A este hecho cabe añadir la frecuente presencia en el agua residual bruta, de numerosos microorganismos patógenos y causantes de enfermedades que habitan en el aparato intestinal humano o que pueden estar presentes en ciertos residuos industriales.

También suele contener nutrientes, que pueden estimular el crecimiento de plantas acuática, y puede incluir también compuestos tóxicos. Es por todo ello que la evacuación inmediata y sin molestias del agua residual de sus

fuentes de generación, seguida de su tratamiento y eliminación, es no sólo deseable sino también necesaria en toda sociedad industrializada (30). Los microorganismos presentes en estas aguas son de diversas clases, tales como bacterias unicelulares, hongos, algas, entre otros, de los cuales, las bacterias son los más importantes y se encuentran en todo tipo de tratamiento biológico.

Las aguas residuales se caracterizan por su composición física, química y biológica, normalmente las aguas residuales domésticas no son tan complejas como las aguas residuales de tipo industrial, donde pueden existir compuestos tóxicos y peligrosos (23).

Crites y Tchobanoglous, citado por Ramírez (2008) mencionaron que los constituyentes encontrados en las aguas residuales pueden ser clasificados como físicos, químicos y biológicos. Existen cinco características físicas esenciales en el agua residual que pueden ser fácilmente percibidas por los sentidos.

## **2.2. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS**

Las principales características físicas de un agua residual, son: su contenido de sólidos y su temperatura.

### **2.2.1. Sólidos totales**

El agua puede contener, tanto, partículas en suspensión como compuestos solubilizados. Se definen los sólidos totales como, los residuos de material que quedan en un recipiente después de la evaporación de una muestra y su consecutivo secado en estufa a temperatura definida. Los sólidos totales incluyen los sólidos suspendidos, porción de sólidos totales retenidos por un filtro y los sólidos disueltos totales, porción que atraviesa un filtro. El origen de los sólidos disueltos puede ser múltiple, orgánico e inorgánico, tanto en aguas superficiales como subterráneas.

Los sólidos totales son el residuo que queda después que una muestra de agua residual ha sido evaporada y secada a una temperatura específica de 103 a 105° C.

### 2.2.2. Temperatura

La temperatura condiciona los procesos de depuración biológica aerobios y anaerobios (destrucción de materia orgánica y de nitrificación); es pues importante su control. A medida que desciende la temperatura se ralentizan los procesos señalados. En consecuencia disminuye el rendimiento de los procesos de depuración.

La temperatura del agua residual es por lo general mayor que la temperatura del agua para abastecimiento como consecuencia de la incorporación de agua caliente proveniente del uso doméstico e industrial.

## 2.3. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS

### 2.3.1.- DQO

Una medida cuantitativa de la contaminación del agua por materia orgánica es la determinación de la rapidez con que la materia orgánica nutritiva consume oxígeno por la descomposición bacteriana y se le denomina Demanda Química de Oxígeno (DQO) (24). La DQO es afectada por la temperatura del medio, por las clases de microorganismos presentes, por la cantidad y tipo de elementos nutritivos presentes. Si estos factores son constantes, la velocidad de oxidación de la materia orgánica se puede expresar en términos del tiempo de vida media (tiempo en que descompone la mitad de la cantidad inicial de materia orgánica) del elemento nutritivo.

Guzmán y Guerrero (1998), demostraron que la variación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y depuración lograda en una planta piloto, para distintos tipos de muestras y tiempos de retención hidráulicas, pudieron observar que a partir del día 20, se logra operar en estado estacionario, manteniéndose la depuración en alrededor de 82% hasta el día 46. Posteriormente, observaron un decaimiento hasta valores de 72% con un monitoreo de 20 días. Y el pH del efluente se mantuvo prácticamente constante alrededor de 7, independiente del valor del pH del afluente y del comportamiento del reactor *air lift*.

Nuttapun *et al*, (2003) mostraron resultados similares obtenidos por el tratamiento aerobio, que el color se eliminó por completo en la fase aeróbica. Una disminución rápida de la concentración de colorante durante los primeros 10 minutos de incubación se produjo como resultado de la decoloración abiótica. Esto dio lugar a una concentración de colorante inicial real de aproximadamente 80-85 mg l<sup>-1</sup> para la decoloración bacteriana. La mayoría de la DQO se eliminó en el aeróbico fase (68.2% frente al 24.5% en la fase aeróbica).

### 2.3.2.- pH

La expresión usual para medir la concentración del ion hidrógeno en una solución está en términos del pH, el cual se define como el logaritmo negativo de la concentración de ion hidrógeno. Si las aguas residuales urbanas no contienen vertidos industriales, su pH oscila entre 6,5 y 8,5, valores a los que los procesos de depuración no plantean problemas. Fuera del rango señalado, se producen problemas en los procesos biológicos.

## 2.4 PROCESO DE LODOS ACTIVADOS

El proceso de lodos activados es el más empleado para el tratamiento de residuos líquidos que presentan contaminación orgánica (31). El proceso de lodos activados consiste en una población microbiana densa mezclada en suspensión con el agua residual bajo condiciones aerobias, donde tasas extremadamente altas de crecimiento y respiración microbiana se llevan a cabo purificando el agua a través de la metabolización de la materia orgánica presente a productos finales inorgánicos oxidados como CO<sub>2</sub> o NO<sub>3</sub> y la biosíntesis de nuevos microorganismos. A diferencia de los antiguos procesos extensivos, se le llama intensivo por su característica de alcanzar elevadas concentraciones de lodos biológicos dentro de un tanque aireado, a través del empleo de una decantación secundaria junto al retorno de los lodos separados al tanque aireado.

El proceso de lodos activados consiste en dos principales fases: la aireación y la decantación secundaria de los lodos. En la primera fase, el agua residual es introducida al tanque de aireación, el cual contiene la población microbiana; el aire es suministrado a través de aireadores que cumplen la

doble función de mantener un nivel mínimo de oxígeno para la respiración microbiana en el medio y de mantener los flóculos microbianos en un estado continuo de suspensión agitada, asegurando de esa manera el contacto máximo entre la superficie de los flóculos y el agua residual.

El lodo activado está formado por microorganismos, que cambian continuamente en función de las variaciones de composición de las aguas residuales y de las condiciones del medio ambiente (23).

### III. METODOLOGIA

El presente trabajo se realizó en el Laboratorio de Biología, del Departamento de Botánica, que se ubica gráficamente sobre las coordenadas 25° 21` latitud norte, y 101° 01` de longitud oeste con una altura sobre el nivel del mar de 1781 m, en Buenavista, Saltillo, Coah. México.

El sitio donde se obtuvo el agua residual doméstica fue en el cárcamo que se encuentra ubicado a lado del jardín botánico que se localiza en las instalaciones de la UAAAN, la cual se utilizó como testigo, ya que esta agua es obtenida directamente de las descargas que se producen en la misma Universidad y que aún no tienen ningún tipo de tratamiento, los resultados se compararon con el agua residual ya tratada mediante el reactor air lift.

El biorreactor de tipo air lift Los reactores air lift también están siendo empleados en el tratamiento de aguas residuales, o en procesos industriales de hidrogenación. Por lo tanto, se puede indicar de forma general, que los air lift tienen aplicaciones en el campo de los procesos metalúrgicos, químicos y bioquímicos. Está formado generalmente por un tanque cilíndrico que tiene en su interior al menos dos zonas, una de flujo ascendente y otra de flujo descendente. Cuando éstas se forman por la presencia de un tubo concéntrico, denominado tubo de arrastre, colocado en el interior del biorreactor, se dice que es de circulación interna. La zona de flujo ascendente tiene en su parte inferior un dispositivo a través del cual se introduce aire, dispersándolo en el líquido en forma de pequeñas burbujas. Las medidas del reactor se muestran en la (figura 1).

El muestreo se realizó a diferentes tiempos de retención hidráulica: 12 y 24 horas con tres repeticiones: (R1) antes del mantenimiento del reactor (Figura 2); (R2) después del mantenimiento de reactor (Figura 3); (R3) después de inoculación con TRH de 12 horas (Figura 4). Cada una mediante el diseño experimental completamente al azar, las cuales se midieron los parámetros:

pH, sulfatos, amoníaco, Sólidos Suspendidos Totales (SST), Demanda Química de Oxígeno (DQO), temperatura y nitratos.

Para el arranque del reactor se utilizó inóculo de lodos activos de la Planta Tratadora de Agua Residual Generada en el Bosque Urbano (PTARGBU), con un 20% del v/v del vol. Del reactor y donado por la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Coahuila, lo cual se licuo en la licuadora para que este pudiera entrar en la manguera que conduce al reactor aerobio para poder adherirse al soporte del reactor.

Procedimientos utilizados para medir los parámetros de: DQO, sulfatos, nitratos, amoníaco y SST.

### 3.1. Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La determinación de la demanda química de oxígeno (DQO) proporciona la cantidad de oxígeno requerida para oxidar bajo condiciones específicas, la materia orgánica susceptible de oxidarse contenida en una muestra de agua. Se expresa en mg/L de oxígeno y proporciona una medida de la cantidad de sustancias, bajo las condiciones en las que se efectúa esta prueba.

La materia orgánica se oxida por el dicromato de potasio en un medio fuertemente ácido en presencia del catalizador sulfato de plata y ácido sulfúrico ( $\text{Ag}_2\text{SO}_4$  y  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). La coloración pasa de un color amarillo o verde-azul y se lee a una observancia de 600nm. Esta es la base de las mediciones de los reactores aerobios y anaerobios, las condiciones de los parámetros de operación para los tratamientos de efluentes industriales y urbanos.

#### Materiales

- 2 dispersores del 1.5 ml o pipetas
- Tubos de HACH con tapón rosca
- Frascos ámbar de 1 litro
- Matraces de aforación de 1 litro
- Baño con hielo

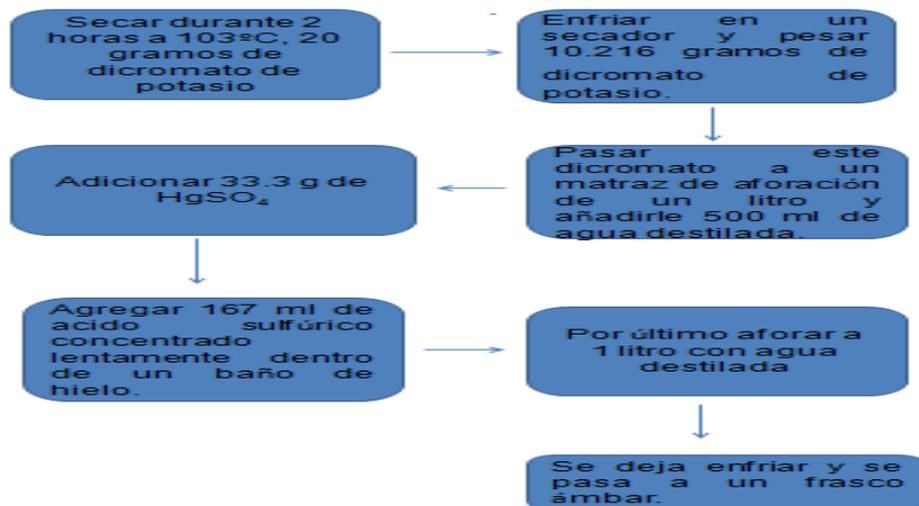
## Equipos

- Espectrofotómetro HACH DR 2010
- Termoreactor TR-3000 MERK

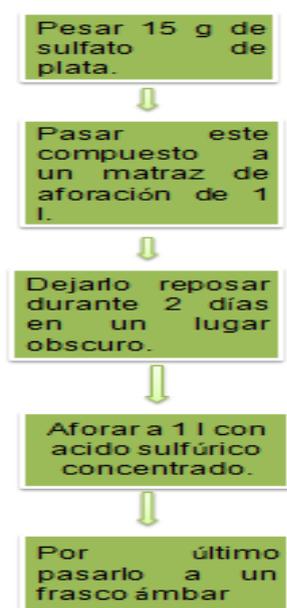
## Reactivos

- Dicromato de potasio ( $K_2, Cr_2, O_7$ )
- Sulfato de mercurio, alquime ( $HgSO_4$ )
- Ácido sulfúrico, alquime ( $H_2SO_4$ )
- Sulfato de plata, alquime o aldrich ( $Ag_2SO_4$ )
- Biftalato de potasio, alquime ( $HOOC-C_6H_4-COOK$ )

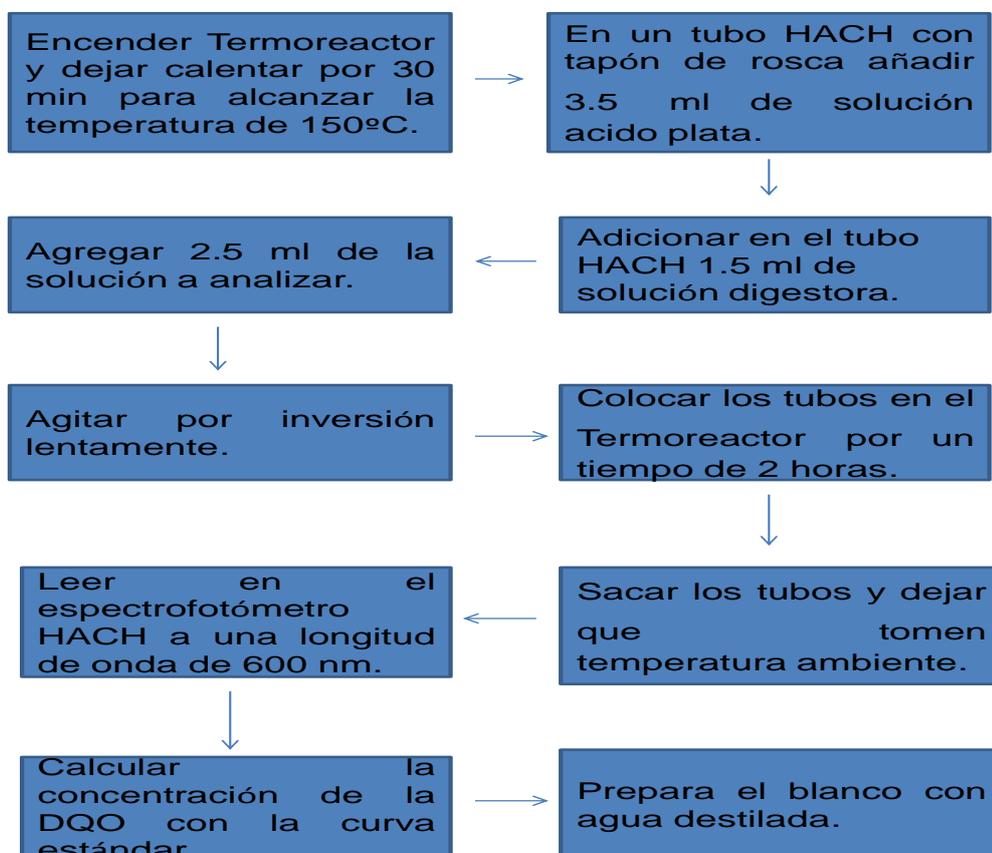
## Diagrama de flujo para la preparación para solución digestora



## Diagrama de flujo para la preparación de ácido plata



## Procedimiento para preparar DQO



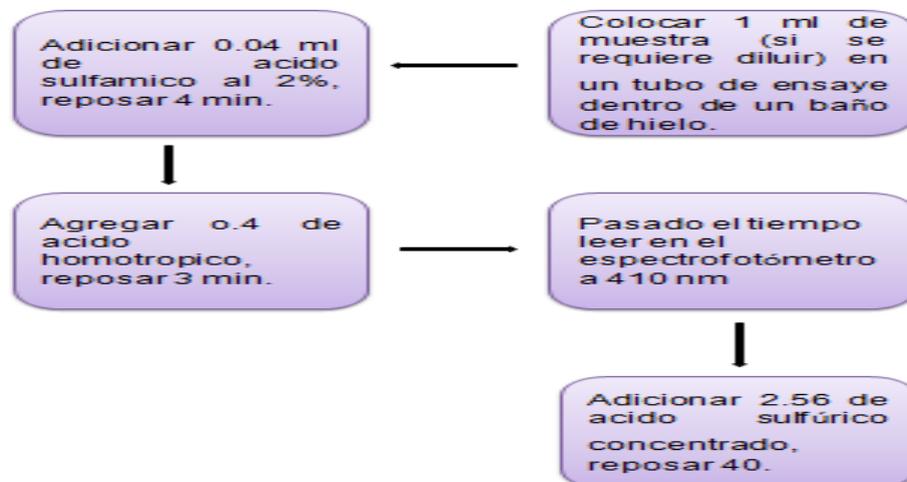
### 3.2. Nitratos

El nitrato es una de las formas de nitrógeno de mayor interés en las aguas naturales, residuales y residuales tratadas, se presenta generalmente a nivel de trazas en el agua de superficie, pero puede alcanzar niveles elevados en las subterráneas.

El nitrato se encuentra sólo en pequeñas cantidades en las aguas residuales domésticas, pero en el diluyente de las plantas de tratamiento biológico desnitrificante, el nitrato puede encontrarse en concentraciones de hasta 30 mg de nitrato como N/L. El nitrato es un nutriente esencial para muchos autótrofos fotosintéticos, y en algunos casos ha sido identificado como el determinante del crecimiento de estos.

Una concentración alta de nitratos es indicio de una etapa mayor de mineralización de los compuestos nitrogenados. En las aguas de algunos pozos suele encontrarse cantidades apreciables de nitratos, lo que es objetable desde el punto de vista sanitario (6).

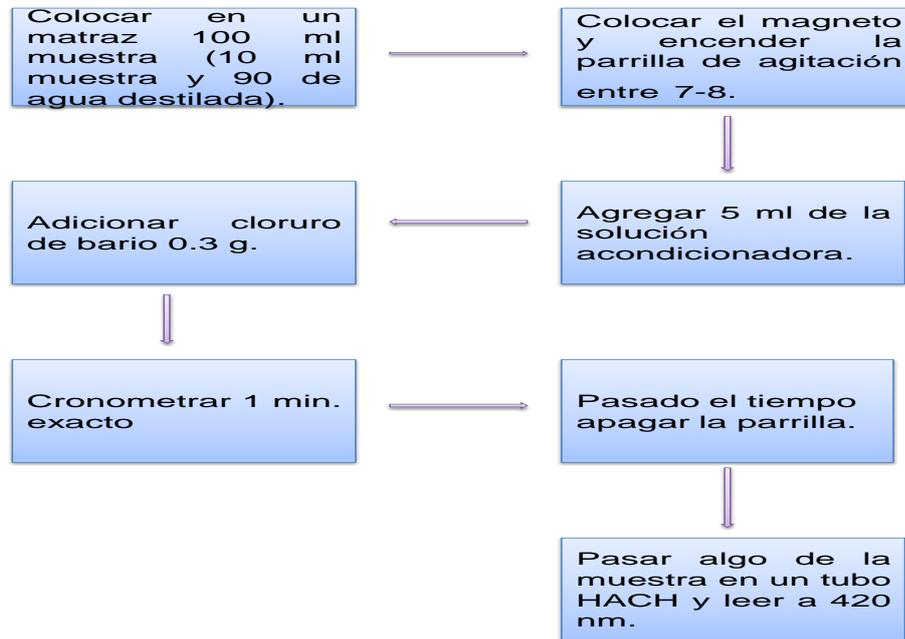
Procedimiento para la determinación de Nitratos



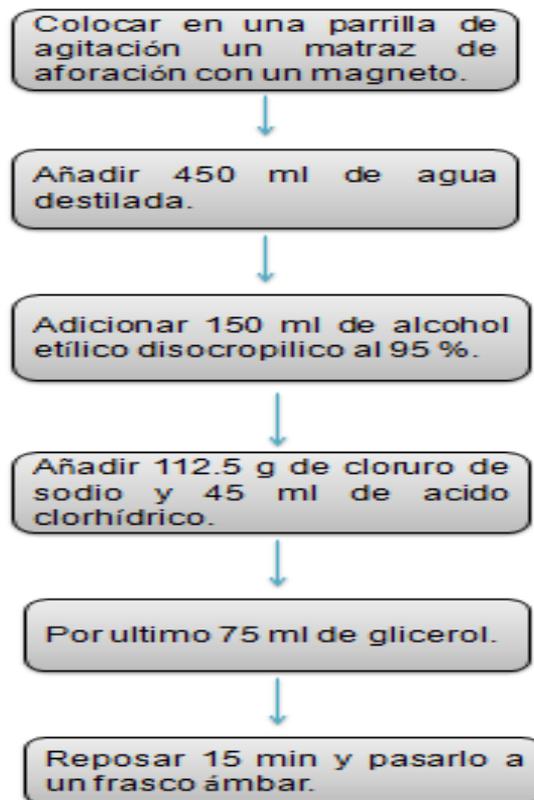
### 3.3. Sulfatos

El ion sulfato precipita con cloruro de bario, en un medio ácido (HCl), formando cristales de sulfato de bario de tamaño uniforme. La absorción espectral de la suspensión del sulfato de bario se mide con un nefelómetro o fotómetro de transmisión. La concentración de ion sulfato se determina por comparación de la lectura con una curva patrón (5).

## Procedimiento para la determinación de Sulfatos



## Preparación de la solución acondicionadora

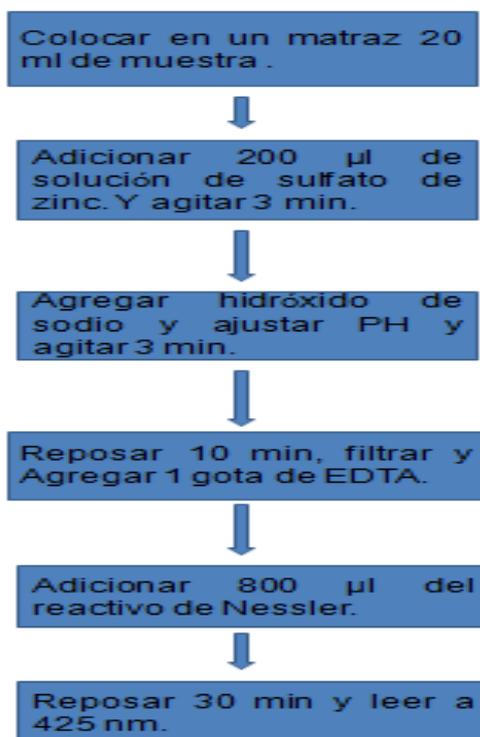


### 3.4. Amoniaco

El amoníaco es una sustancia química producida tanto por los seres humanos como la naturaleza. Consiste de una parte de nitrógeno (N) y tres partes de hidrógeno (H<sub>3</sub>). En condiciones de temperatura y presión ambiente el Amoniaco es un gas incoloro, sofocante, de olor irritante y altamente irritante. Es sumamente importante para las plantas, los animales y los seres humanos. Se encuentra en el agua, el suelo y el aire, y es una fuente de nitrógeno que necesitan las plantas y los animales.

Algunas aguas residuales contienen grandes cantidades de amoníaco y/o de compuestos de nitrógeno que generan fácilmente nitrógeno amoniacal. A menudo es más fácil y menos costoso el remover el nitrógeno del agua residual en forma de amoníaco que el convertirlo a nitratos antes de su remoción.

Procedimiento para la determinación de amoniaco



### 3.5. Sólidos Totales Suspendidos (SST)

Sólidos constituidos por sólidos sedimentables, sólidos y materia orgánica en suspensión y/o coloidal, que son retenidas en el elemento filtrante.

#### Equipo

- Bomba de vacío
- Estufa eléctrica, para operar de 103°C a 105°C
- Balanza analítica con precisión de 0,1 mg
- Mufla eléctrica para operar a 500°C ± 50°C

#### Materiales

- Cápsulas de evaporación adecuadas al volumen de la muestra
- Desecador, provisto con un desecante que contenga un indicador colorido de humedad.
- Crisol Gooch de poro fino con adaptador de hule para el equipo de filtración
- Matraz Kitazato de 1 a 2 L de capacidad
- Filtro de fibra de vidrio de tamaño adecuado al crisol Gooch utilizado con una porosidad de 2 µm o menor
- Pinzas para crisol
- Guantes para protección al calor
- Careta para protección al calor

#### Reactivos

- Cloruro de sodio (NaCl)
- Carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>)
- Almidón en polvo
- Disolución estándar para muestras de control. Agregar la cantidad necesaria de almidón, Cloruro de Sodio y Carbonato de Calcio de acuerdo con la concentración deseada de sólidos en las muestras de control y diluir a 1 L. Este patrón debe prepararse cada vez que se realice el método (8).

### 3.6. Temperatura

Las temperaturas elevadas en el agua son indicadores de actividad biológica, química y física en el agua, lo anterior tiene influencia en los

tratamientos y abastecimientos para el agua, así como en la evaluación limnológica de un cuerpo de agua, por lo que es necesario medir la temperatura como un indicador de la presencia de compuestos y contaminantes en el agua, a través del método de prueba que se establece en la presente Norma Mexicana.

El valor de temperatura es un criterio de calidad del agua para la protección de la vida acuática y para las fuentes de abastecimiento de agua potable, es también un parámetro establecido como límite máximo permitido en las descargas de aguas residuales y una especificación de importancia en los cálculos de balance de energía y de calor de los procesos industriales (9).

### 3.7. pH

La medición del pH del agua es muy importante para muchos tipos de muestra. Los valores altos y bajos de pH son tóxicos para organismos acuáticos, ya sea directamente o indirectamente. Es el parámetro más importante utilizado en la evaluación de las propiedades corrosivas de un medio ambiente acuático. Asimismo, es importante para el funcionamiento efectivo de los procesos de tratamiento de aguas y su control (por ejemplo, floculación y desinfección de cloro), el control de plumbosolencia de aguas potables y tratamiento biológico de aguas residuales y los vertidos de aguas residuales.

Se utilizan distintos métodos de determinación, que van desde la simple utilización de papel indicador a sofisticados métodos utilizando un medidor de pH. La determinación de pH se puede clasificar en dos clases, colorimétricas y electrométrico métodos (7).

Para esto se utilizaron los siguientes aparatos como: balanza analítica AND, parrilla de agitación: clima rec HEAT, parrilla de agitación SCIOLOGEX, digestores Hach DRB 200, digestor LABCONCO, centrifuga J600, estufa de secado, micro centrifuga 16 m, incubadora BOD INCUBATOR, pipetas automáticas (5-100 UIL abmatrsoft, 20, 100, 100-500), además del PH-metro, termómetro y reactivos.

En las muestras se emplearon etiquetas con la siguiente información: lugar, fecha y hora. De esta manera también se obtuvo un registro para tener un control de los datos obtenidos y hacer las comparaciones en los diferentes tiempos de retención hidráulica.

De esta manera también se realizó el lavado del reactor el 21 de Octubre del 2013, ya que de alguna manera esto tuvo que ver con que los resultados reportados en la literatura no tuvieran significancia.

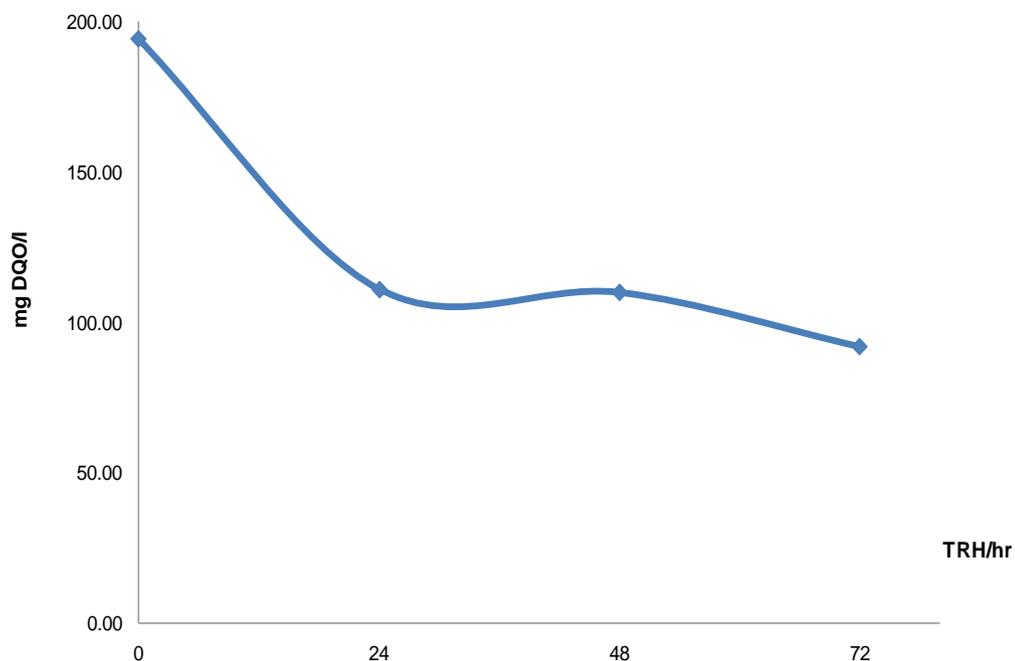
## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se discutirá la eficiencia de la remoción que se obtuvo con los análisis del influente de agua residual doméstica respecto al efluente del reactor aerobio air lift.

### 4.1 Antes del mantenimiento del reactor

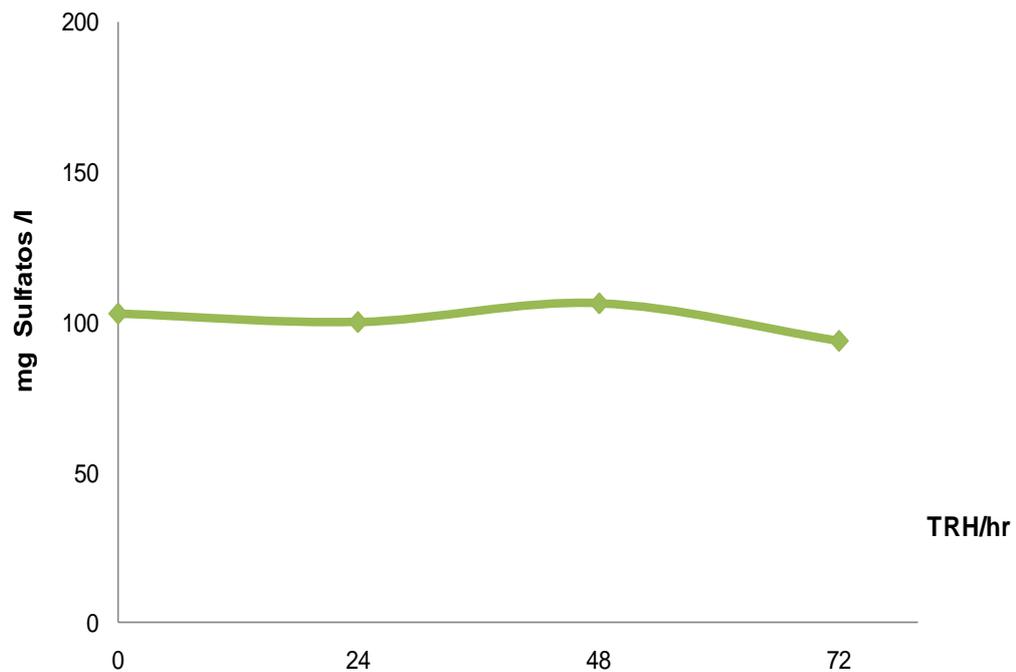
En este monitoreo no se realizó la medición de todos los parámetros ya que el reactor no estaba funcionando bien por lo que se procedió a realizar solo dos parámetros que son: DQO y Sulfatos en un tiempo de retención hidráulica de 12 horas con tres repeticiones (ensayos de 24, 48 y 72 horas).

Durante el monitoreo del reactor los resultados mostraron que la DQO del agua residual doméstica en el efluente disminuyó en un 47% respecto al testigo, ya que tiene una significancia mayor, esto se puede observar a continuación (Gráfica 1).



**Gráfica 1. Comportamiento de los mg/l de DQO en los diferentes tiempos de retención hidráulica.**

A continuación se puede observar que el comportamiento de los sulfatos es constante con respecto al testigo en los diferentes tiempos de retención hidráulica por lo que no tiene significancia. Esto puede ser debido a que el reactor presento desprendimiento de biopelícula lo que ocasionó que hubiera muchos solidos suspendidos, (Grafica 2).

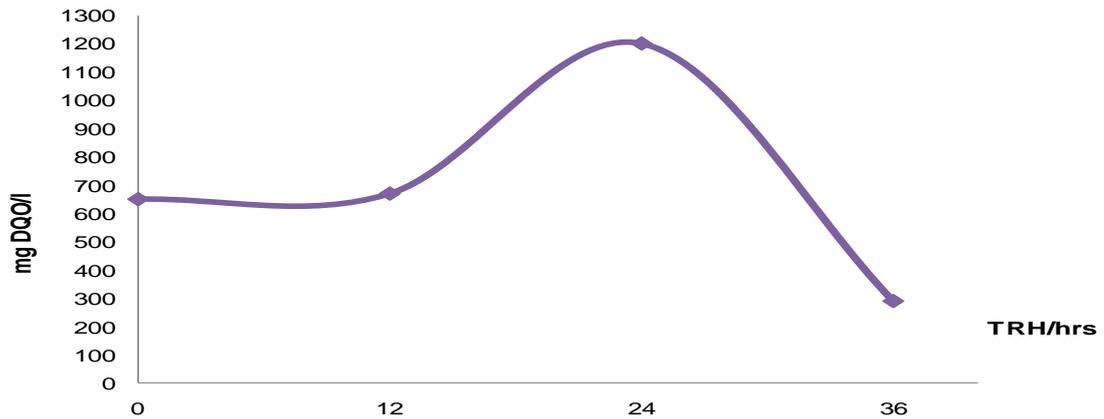


**Grafica 2. Comportamiento de mg de sulfato en diferentes tiempos de retención hidráulica.**

#### 4.2 Después del mantenimiento del reactor

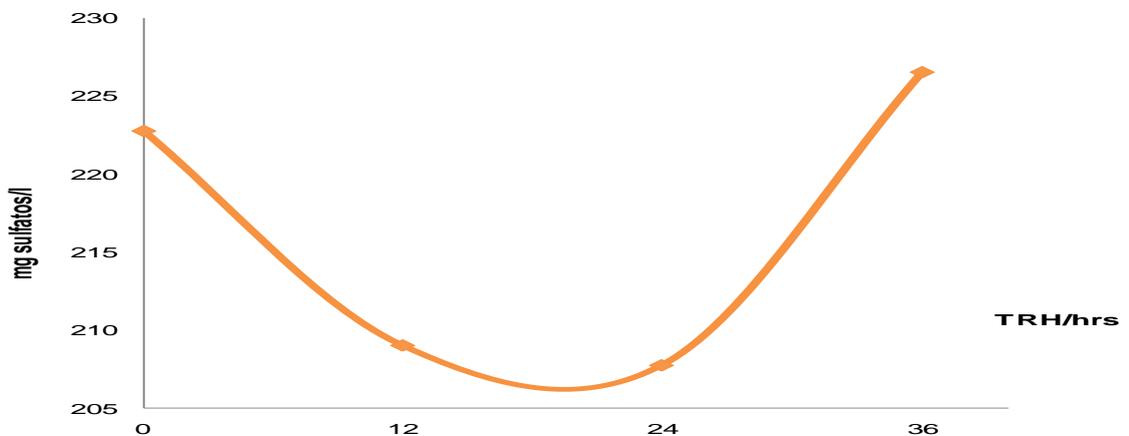
Se puede observar solo la medición de dos parámetros, debido a que se procedió a la lavar el reactor por lo que contenía muchos sólidos suspendidos lo que provocó que perdiera estabilización y por consecuencia, falta de eficiencia en la remoción, por lo que el tiempo de retención hidráulica siguió siendo de 12 horas con una inoculación de lodo para que este tuviera un mejor rendimiento. Estos fueron solo ensayos para que al momento de tomar datos verdaderos no hubiese errores.

En la Grafica 3. Se observa también que en DQO hay muy poca significancia respecto al testigo (agua residual cruda), esto puede ser debido a que el reactor aún no estaba calibrado debido a que se acababa de lavar así como seguía en recirculación, por lo que los datos arrojados en la gráfica muestran que no hay mucha eficiencia en las repeticiones de 12 y 24.



**Grafica 3. Determinación de mg DQO/l en diferentes tiempos de retención hidráulica.**

En la Grafica 4. Se puede apreciar que el comportamiento de los sulfatos en las primeras dos repeticiones (12 y 24), tendió a ser menos que el testigo (agua residual cruda), ya que esto puede ser por falta de estabilización del reactor air lift, por lo que en la tercer repetición tiende a aumentar por lo tanto tiene muy poca significancia.

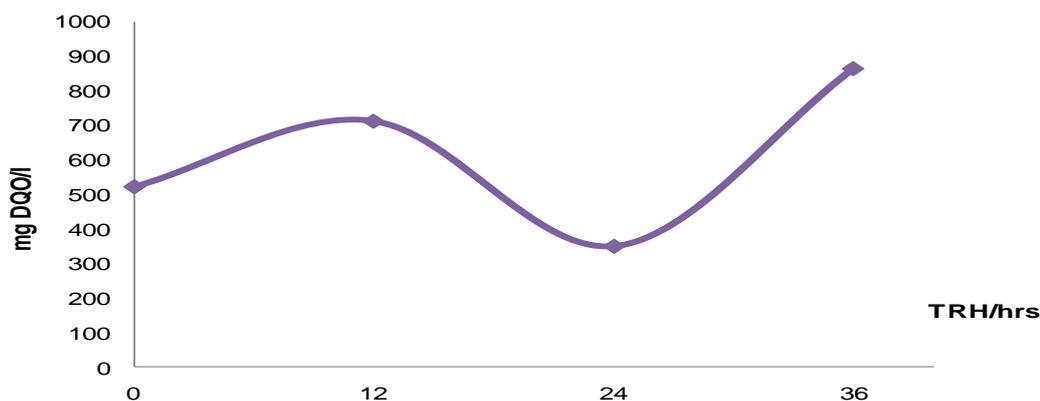


**Grafica 4. Determinación de mg de sulfato/l a tres tiempos de retención hidráulica.**

#### 4.3 Después de inoculación con TRH de 12 horas.

En este monitoreo se puede apreciar la medición de todos los parámetros antes mencionado excepto nitratos ya que hay una disminución en los resultados arrojando así datos por debajo de cero por lo que no se realizó gráfica, ya que el reactor estaba estabilizado para este tiempo de retención de 12 horas. Así como también los datos son comparables con datos obtenidos por autores.

La Grafica 5. Nos muestra un aumento en los mg de DQO/l por lo que no tiene significancia debido a que los resultados obtenidos son mayores excepto con el TRH de 24 horas respecto al testigo.

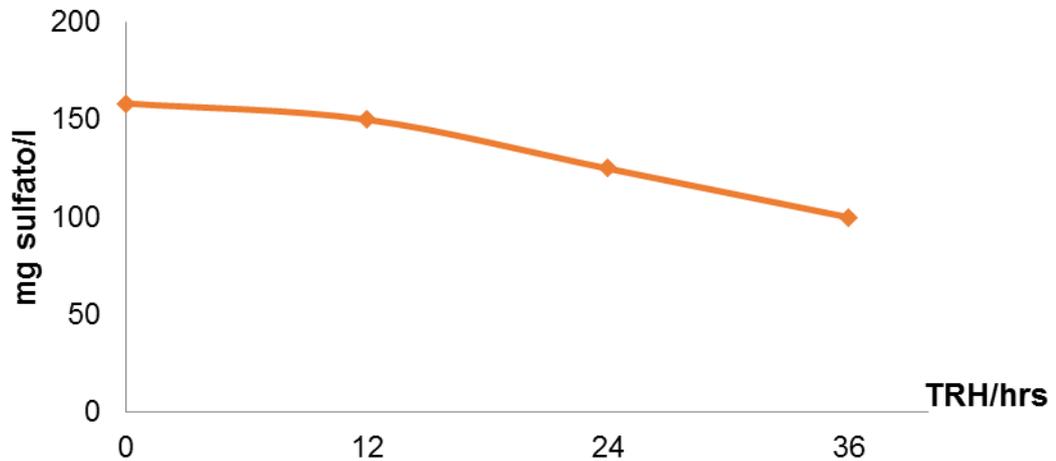


**Grafica 5. Determinación de mg DQO/l de diferentes tiempos de retención.**

Los resultados anteriores son similares a los que demostraron la eficiencia del reactor air lift tratando efluentes cárnicos obteniendo un porcentaje de remoción de DQO promedio de 79% para CO de 17 kg DQO/m<sup>3</sup>d a TRH de 12 h. Se obtuvo una disminución en el porcentaje de remoción de DQO promedio entre 1 y 8% con la variación del TRH de 12 a 16 horas. (11).

Guzmán y Guerrero (1998), obtuvieron reducciones en la DQO (depuración) del orden de un 80%, para todas las mezclas de residuos industriales y cloacales, a tiempos de retención hidráulicas entre 28 y 36 horas. Para un TRH de 20 horas, la depuración decae hasta un 70%, por lo que consideraron un valor deficiente.

La Grafica 6. Nos muestra una disminución en un 45 % de mg de sulfatos/l respecto al testigo (agua residual cruda), de esta manera no muestra significancia alguna en los diferentes Tiempos de Retención Hidráulica.

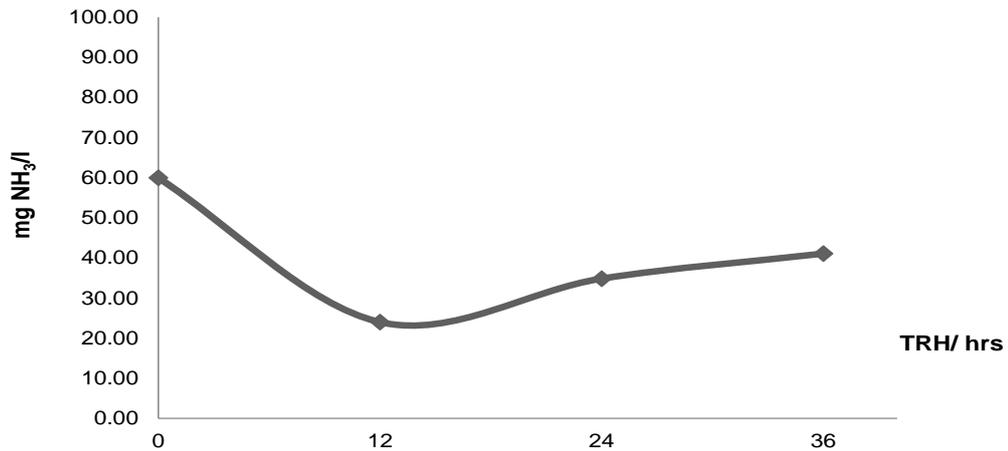


**Grafica 6. Determinación de mg de sulfato/l en tres diferentes tiempos de retención hidráulica.**

Se demostró que la remoción de sulfato fue incrementando en un 96% a medida que el reactor estuvo trabajando, para el beneficio de este por lo que conviene trabajar con un pH de 6 para tener una mejor significancia (18).

La remoción de sulfato por su parte presentó un aumento en sus comienzos, para luego aumentar los tiempos de recuperación y marcar notorias diferencias en los diferentes tiempos de retención hidráulica y el aumento de este parámetro (19).

La grafica 7. Nos muestra una disminución de 30% de mg  $\text{NH}_3$ /l respecto al testigo (agua residual cruda), esto es debido a que el reactor esta funcionando bien ya que los datos arrojados son de alta significancia de acuerdo con resultados obtenidos por otros autores.



**Grafica 7. Determinación de mg NH<sub>3</sub>/l en tres diferentes tiempos de retención hidráulica.**

De acuerdo al pH de 6 en el reactor, el NH<sub>3</sub> se mantuvo constante a 80 gr/l con una eficacia de eliminación media de nitrógeno total de amoníaco de 41.2 % (31).

Jácome *et, al* (1995) mostraron un aumento de la velocidad de eliminación del amoníaco al tener un TRH de 15 horas, de modo que, mientras la carga aplicada se incrementa en un 100%, el TRH sólo lo hace en un 33%.

se puede apreciar el comportamiento del reactor aerobio con una muy poca significancia respecto al testigo (agua residual cruda), también se puede decir que el reactor si esta trabajando con respecto a los Solidos Totales Suspendidos (Tabla 1).

**Tabla 1. Determinacion en promedio de Solidos Totales Suspendidos.**

Solidos Totales Suspendidos		
	Agua residual	Reactor aerobio
promedio mg/l	1277	975

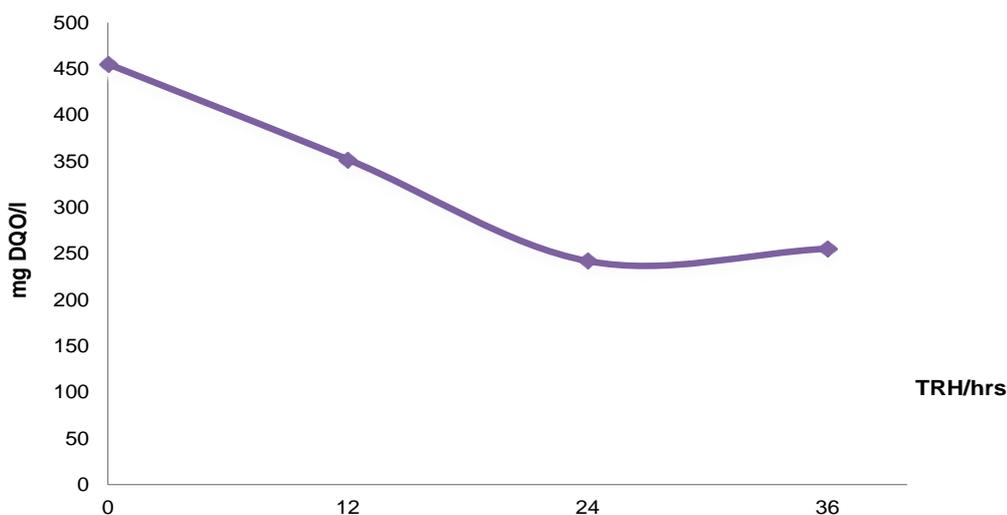
Garcia *et al* ( 1997) realizaron estudios donde obtuvieron una remoción de 95% de eficiencia en solidos sedimentables totales (460 mg/l agua residual en el influente hasta 23 mg/l en el agua tratada).

En otros estudios realizados se reporta que el agua residual del influente disminuyó en un 96% en el efluente con una alta remoción de sólidos totales suspendidos (1).

#### 4.4 Después de inoculación con resultados del TRH de 24 horas

En este Tiempo de Retención Hidráulica se puede apreciar la medición de todos los parámetros antes mencionado, por lo que el reactor ya estaba en equilibrio para este tiempo de retención de 24 horas.

El comportamiento de la DQO disminuyó en dos de los tiempo de retención de forma gradual respecto al testigo excepto el TRH de 36 que siguió constante de acuerdo al TRH anterior, por ende se muestra que el reactor estuvo trabajando como se esperaba (Grafica 8).



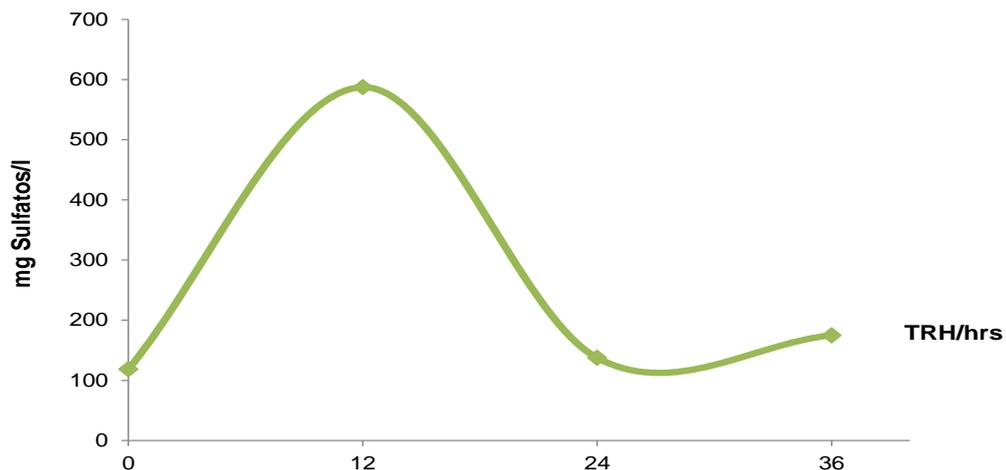
**Grafica 8. Determinación de mg de DQO/l en tres diferentes tiempos de retención hidráulica.**

Behling *et al* (2003) demostraron que se presentó eficiencias en la remoción de materia orgánica medidas de la DQO superiores al 95% con respecto al agua residual del influente por lo que se obtuvo una alta significancia.

De esta manera también Rincón *et al* (2003) también observaron que a pesar de que las muestras fueron aplicadas con 2 diferentes tiempos de

retención, es decir, de 15 y 30 horas, los valores de la DQO se mantuvieron cercanos, en el rango de concentraciones entre 1100 a 1230 mg/L. A la salida del reactor aerobio los valores de DQO se encontraron entre 176 y 264 mg/L. Estos resultados corroboraron la alta biodegradabilidad aerobia que presentó el agua. El porcentaje de remoción en promedio para el tratamiento aerobio con el reactor fue de 80%.

El comportamiento de los sulfatos en el TRH de 24 horas tiene un aumento muy grande respecto al testigo en la primera repetición por lo que en las siguientes se mantuvo constante pero más alta que el testigo, esto puede ser debido a que como el reactor ya estaba equilibrado los resultados no fueron muy significativos (Grafica 9).

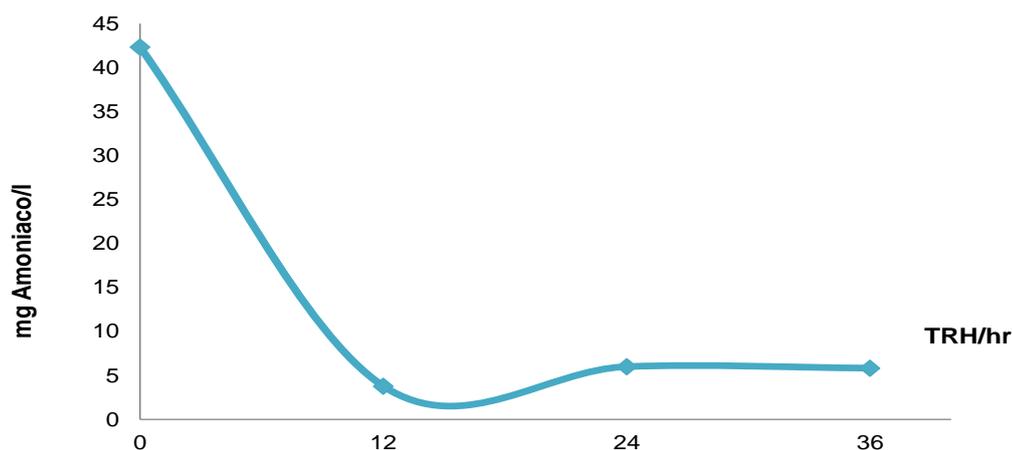


**Grafica 9.D determinación de sulfatos en diferentes tiempos de retención.**

Kalyuzhnyi *et al* (1998) demostraron el aumento de  $\text{SO}_4$ , desde 170 mg/l a 900 mg/l en diferentes tiempos de retención hidráulica, es decir, en 15, 30 y 45 horas, por lo que dedujo que estos resultados tienen una alta significancia (21).

Hulshoff *et, al* (1998) demostraron que el aumento de sulfato en diferentes tiempos de retención hidráulica tiene una significancia de un 95%, por ende estos resultados son mayores a los que se esperaba obtener de los TRH de 20, 28 y 36 horas.

Se puede observar que el comportamiento del amoníaco respecto al testigo (agua residual cruda), tuvo una disminución bastante grande con respecto al testigo, por lo que se puede decir que el reactor estuvo trabajando adecuadamente respecto a este parámetro y que tiene una alta significancia (Grafica 10).



**Grafica 10. Determinación de Amoníaco en tres diferentes tiempos de retención hidráulica.**

Romero (2002) demostró que los resultados obtenidos en los diferentes tiempos de retención hidráulica, es decir, 20, 30 y 40 horas, alcanzaron en promedio una disminución de 85% en la eliminación de amoníaco, respectivamente se obtuvieron mejores rendimientos.

Así Von (2002), también demostró que el amoníaco disminuyó en promedio un 65% en los 2 TRH, es decir de 24 y 30 horas, mostrando una descendencia con respecto al agua de entrada, teniendo así una alta significancia (34).

Se aprecia que el parámetro Sólidos Totales Suspendidos tiende a ser mayor en el reactor aerobio respecto al testigo (agua residual cruda) por lo que no tiene significancia debido a que se encuentra por encima de los Límites Máximos Permisibles de acuerdo a la norma NOM-067-ECOL-1994 (Tabla 2).

**Tabla 2. Determinación de Sólidos Totales Suspendedos**

Sólidos Totales Suspendedos		
TRH 24	Agua Residual	Reactor Aerobio
promedio mg SST/l	2947	3558

Después de su inoculación con lodos el reactor mostró una degradación en los sólidos, de 975 mg/L a 1466 mg/L. Desde un principio, los lodos presentaron una buena reducción, arrojando así resultados mejores que los valores óptimos (33).

Estudios realizados demostraron que se obtuvo concentraciones de hasta 2166 mg/L a 1800 mg/L de STS respectivamente. Sin embargo debido al aumento continuo de los sólidos se dedujo que este sobrepasa con lo establecido en la norma NOM-067-ECOL-1994 (3).

## V. CONCLUSIÓN

La metodología de inocular el lodo y alimentar el reactor con la misma agua residual a tratar posteriormente demostró ser una forma efectiva para el acoplamiento y formación de la biopelícula, así también presentó la ventaja de un bajo costo. Esto se debió principalmente a que los parámetros escogidos que son: Demanda Química de Oxígeno DQO, los porcentajes de remoción en sulfatos y amoníaco, independientemente de que no se presentó remoción de nitratos y sólidos totales suspendidos ya que estos sobrepasan los límites máximos permisibles con respecto a la Norma Mexicana NMX-AA-154-SCFI-2011. Para el seguimiento del arranque fueron de determinación sencilla y con una baja frecuencia de muestreo.

De acuerdo con lo anterior y con el comportamiento de los parámetros de control obtenidos durante el arranque, se deduce que la puesta en marcha de un reactor aerobio tratando aguas residuales domésticas, con un inoculo de poco volumen, puede ser iniciado, con un tiempo de retención hidráulico (THR) de 24 horas aproximadamente, debido a que su respuesta fue muy estable, se deduce que el arranque de estos reactores tratando estos tipos de aguas residuales con alta carga orgánica puede iniciar con este TRH, consiguiendo con esto disminuir el tiempo requerido para lograr la estabilización del reactor.

## **VI. GLOSARIO DE TERMINOS**

DQO: la demanda química de oxígeno (DQO) es un parámetro que mide la cantidad de sustancias susceptibles de ser oxidadas por medios químicos que hay disueltas o en suspensión en una muestra líquida.

Reactor: los reactores de tipo air lift toman ventaja de la inyección de una corriente gaseosa (generalmente aire) para proporcionar el mezclado y una transferencia de sustancias gaseosas con la fase líquida, el diseño específico de los reactores air lift causan que el líquido circule entre dos zonas interconectadas conocidas como la zona elevada y la zona de descenso.

TRH: Tiempo de Retención hidráulica.

SST: Sólidos suspendidos totales (SST) Sólidos constituidos por sólidos sedimentables, sólidos y materia orgánica en suspensión y/o coloidal, que son retenidas en el elemento filtrante.

Parámetro: variable que se utiliza como referencia para determinar la calidad del agua.

## **VII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS**

1. Abastecimiento de Agua y Remoción de Aguas Residuales Fair Geyer y Okun Limusa S. A. de C. V. (1989)
2. Agudelo, R. IV seminario – taller latinoamericano sobre el Tratamiento de Aguas y Aguas Residuales. Bucaramanga, 1998. Ponencia: Tratamiento de lixiviados producidos en el Relleno Sanitario Curva de Rodas de la ciudad de Medellín utilizando reactores UASB y filtros anaerobios FAFA. Medellín, 1996, p. 579 - 591.
3. APHA/AWWA/WPCF (1989) "Métodos Normalizados para el Análisis de Aguas Potables y Residuales", 17ª Ed., Editorial Díaz de Santos S.A., Madrid.
4. APPHA, AWWA, WPCFF. "Standard Methods the Examinations of Water and Wastewaters" 20 thed, USA: 4204-4210 (1998).
5. Análisis de agua determinación del ion sulfato. NORMA MEXICANA NMX-AA-074-1981.
6. Análisis de aguas determinación de nitratos en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas - método de prueba (CANCELA A LA NMX-AA-079-1986).
7. Análisis de agua - determinación del pH - método de prueba. CANCELA A LA NMX-AA-008- SCFI-2000.
8. Análisis de agua - determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba. CANCELA A LAS NMX-AA-020-1980 Y NMX-AA-034-1981.
9. Análisis de agua - determinación de la temperatura en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba. CANCELA A LA NMX-AA-007-1980.

10. Behling E. H., Caldera Y. A., Marín J. C., Gutiérrez E. C., Fernández N. M. (2003). Comportamiento de un reactor biológico rotativo de contacto (RBC) en el tratamiento de efluentes de una industria cárnica. "Boletín del centro de investigaciones biológicas", Vol. 37, No. 1, 56 – 69.
11. Calderas, M, Y, A., Madueño, M, P,I., Griborio D, A,G. 2006. Efecto del tiempo de retención hidráulica en el funcionamiento de un reactor uasb tratando efluentes cárnicos. Universidad del Zulia, Apartado 526. Maracaibo 4001-A, Edo. Zulia, Venezuela.
12. CNA (2007). Situación del subsector agua potable, alcantarillado y saneamiento.
13. Comisión Nacional del Agua. SEMARNAT. México. D.F. 235 pp.
14. Crites, R.; and Tchobanoglous, G., 2000. Sistema de manejo de aguas residuales: para núcleos pequeños y descentralizados. Tomó I. 1ª Edición. Ed. McGraw-Hill. Colombia. 1043 p.
15. Drizo, Frost, C.A., Grace, J., and Smith, K. A., 2000. Phosphate and ammonium distribution in a pilot-scale constructed wetland with horizontal subsurface flow using shale as a substrate. *Water Res.* 34 (9), 2483-2490.
16. García, S. S., Ordaz, C, L., Orozco Á, C., Franco H, M, O. 1997. Depuración de aguas residuales en un biorreactor neumático. La Laguna-Ticomán. México, D. F.
17. Guzmán, K. y Guerrero, L. 1998. Co-tratamiento aerobio de aguas residuales industriales y domésticas. Universidad Técnica Federico Santa María.

18. Hao, O.J., Chen, J. M., Huang, L. and Buglass, R.L. (1996). Sulfate-reducing bacteria. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 26,(1):155-187.
19. Hulshoff Pol, L., Lens, P., Stams, A., Lettinga, G. (1998). Anaerobic treatment of sulphate-rich wastewaters. *Biodegradation*. Vol. 9, pag. 213-224.)
20. Jácome A., Eguía E., Vidart T., Tejero I. (1995). Depuración de aguas residuales con un reactor biopelícula. *Ingeniería Química*, núm. 309: 137 - 141.
21. Kalyuzhnyi, S., Fedorovich, V., Lens, P. Hulshoff Pol, L. & Lettinga, G. (1998). Mathematical modelling as a tool to study population dynamics between sulfate reducing and methanogenic bacteria Koster, I. (1996) Characteristics of the pH influenced adaptation of methanogenic sludge to ammonium toxicity. *Journal Chem. Techn. Biotech*. Vol. 36, pag. 445-455.
22. Kiely, G. 1999. *Ingeniería ambiental*. Editorial McGraw–Hill. México.
23. Levin, M., y Gealt, M. A. 1997. *Biotratamiento de residuos tóxicos y peligrosos*. McGraw–Hill. España.
24. Metcalf y Eddy, 1995. *Ingeniería de Aguas Residuales: Tratamiento, Vertido y Reutilización*". Tercera edición. Editorial McGraw-Hill, España, 1485 p.
25. Muñoz, C, A., 2008. *Caracterización y tratamiento de aguas residuales*. Monografía. Hidalgo.
26. Norma Oficial Mexicana NOM-001-ecol-1996. Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. México. D.F.

27. Nuttapun, S., Kanchana. J., S D., M. D. D., P. S. 2003. Microbial decolorization of reactive azo dyes in a sequential anaerobic–aerobic system. *Chemical Engineering Journal* 99 (2004) 169–176. Francia.
28. Rincón N, Chacín E., Marín J., Torrijos M., Moletta M. and Fernández N. (2003) Anaerobic biodegradability of water separated from extracted crude oil, *Environmental Technology*, Vol. 24.963-970.
29. Romero J. (2002). Tratamiento de Aguas Residuales, Teoría y Principios de Diseño. Escuela Colombiana de Ingenieros. Bogotá D.C. 1244 p.
30. Sánchez. M. J. 2010. Modelamiento de las condiciones hidráulicas de una planta compacta para el tratamiento de aguas residuales domésticas. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. 75pp.
31. Sánchez, I, A., Tsunao. M., IC, Ph D. 2011. Ammonia removal in a water recirculating system for tilapia using an aerobic three-phase fluidized-bed reactor. Departamento de Recursos Hidrobiológicos, Facultad de Ciencias Pecuarias, Universidad de Nariño. San Juan de Pasto, Nariño – Colombia.
32. W. N. Martins Jr. *Perdas de carga e velocidades induzidas em reatores aeróbios de leito fluidizado com circulação*. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira UNESP. Ilha Solteira. SP. Brasil. 2005. pp. 104.
33. Vidal, G. (2000). Apuntes de la asignatura “Reactores Bioquímicos”, Universidad de La Frontera, Temuco.
34. Von Sperling M. (2002). Principios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias: Lodos Ativados. 2ª ed. DESA, UFMG. Belo Horizonte, Brasil. 427 pp.

35. Zamora, O, J. 2006. Depuración biotecnológica del suero lácteo empleado un sistema continuo mixto: anaerobio de lecho fijo-aerobio. Huajuapam de León, Oaxaca. 87 pp.

## VIII. ANEXOS

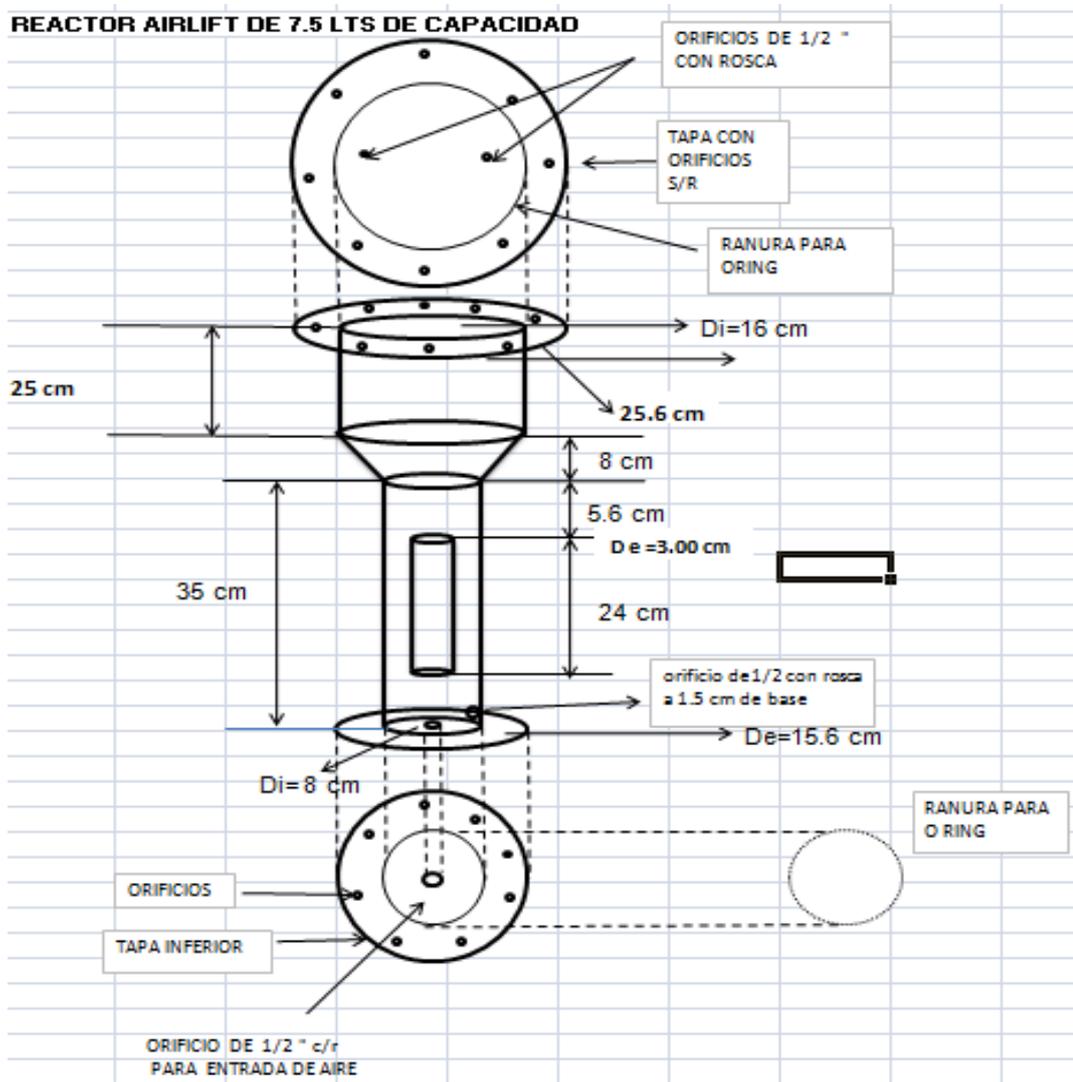


Figura 1. Medidas del reactor aerobio *air lift*.



Figura 2. Reactor aerobio con acumulación de lodos, antes de su monitoreo.



Figura 3. Después del monitoreo del reactor.



Figura 4. Después de la inoculación del reactor aerobio con lodos activados.