

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA Y CINÉTICA DE REMOCIÓN DE
MATERIA ORGÁNICA EN UN REACTOR BIOLÓGICO AEROBIO
HORIZONTAL CON MEDIO DE SOPORTE PET
(POLITEREFTALATO DE ETILENO).**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERÍA
AMBIENTAL**

JESSICA LORENA REINA TRAVEZ
jesslore1@gmail.com

DIRECTOR: ING. ISAÍAS MARCELO MUÑOZ RODRÍGUEZ, M.Sc.
marcelo.munoz@epn.edu.ec

CODIRECTOR: ING. LUIS ÁNGEL JARAMILLO SÁNCHEZ, M.Sc.
luis.jaramillo@epn.edu.ec

Quito, Abril 2015

DECLARACIÓN

Yo, Jessica Lorena Reina Trávez, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido en la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

JESSICA LORENA REINA TRAVEZ

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Jessica Lorena Reina Travez, bajo mi supervisión.

ING. ISAÍAS MARCELO MUÑOZ RODRÍGUEZ, M.Sc.
DIRECTOR DEL PROYECTO

ING. LUIS ÁNGEL JARAMILLO SÁNCHEZ, M.Sc.
CODIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

En el presente trabajo quiero expresar mi agradecimiento a mi Madre, Digna Eloína Travez, que con su apoyo y amor ha realizado un esfuerzo para poder lograr un objetivo en mi vida, y sin importarle las lejanías que hemos pasado su amor siempre ha sido incondicional.

A mi familia que son las personas que me han acompañado en los momentos gratos y no gratos de mi vida y sin lugar a duda son un respaldo, los cuales me han brindado su cariño y apoyo emocional.

Finalmente, a mis profesores, que con sus conocimientos impartidos me han ayudado al desenvolvimiento del presente trabajo, en especial al Ingeniero Marcelo Muñoz, director del proyecto, el cual me ayudó en cada una de las dificultades que se presentaron en la experimentación, con su apoyo y conocimiento pude resolver mis inquietudes. Además agradezco enormemente al Ingeniero Luis Jaramillo, Codirector del proyecto, quién fue mi lector del presente escrito, ayudándome con su experiencia y gran energía infundida en mí, a parte de su enorme amistad brindada.

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo a mi Madre, a mis hermanos, en especial a mi hermana menor Karen, que está cursando sus estudios secundarios y deseo ser un ejemplo para ella, y que llegue a cumplir de igual manera sus sueños y metas planteadas.

También a mis sobrinos Zuleyka y Jeremy, que son mis adoraciones que con su llegada me han generado full alegrías y han sido una motivación para volver siempre a mi hogar y no olvidarme de ellos.

CONTENIDO

DECLARACIÓN	II
CERTIFICACIÓN	III
AGRADECIMIENTOS	IV
DEDICATORIA.....	V
CONTENIDO.....	VI
LISTADO DE TABLAS	X
LISTADO DE GRÁFICOS	XI
LISTADO DE FIGURAS.....	XII
RESUMEN	XIII
SUMARY.....	XV
PRESENTACIÓN	XVII
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	18
1.1 ALCANCE	18
1.2 JUSTIFICACIÓN	19
1.3 OBJETIVOS	20
1.3.1 OBJETIVO GENERAL.....	20
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
CAPÍTULO II: INVESTIGACIÓN BIBLIOGRÁFICA	22
2.1 SITUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN PRODUCIDA POR LA INDUSTRIA LÁCTEA	22
2.2 CINÉTICA DE CONSUMO DEL SUSTRATO.....	23
2.3 CRECIMIENTO BACTERIANO	24
2.4 TRATAMIENTO BIOLÓGICO AEROBIO	29
2.5 SISTEMAS AEROBIOS DE BIOPELÍCULAS.....	31
2.6 MEDIOS DE SOPORTE.....	33
CAPÍTULO III: CONSTRUCCIÓN DEL BIOREACTOR HORIZONTAL AEROBIO PILOTO.....	36

3.1	PARÁMETROS DE DISEÑO DEL BIOREACTOR.....	36
3.1.1	MATERIAL DEL REACTOR.....	37
3.1.2	FORMA DEL REACTOR.....	37
3.1.3	VOLUMEN DEL REACTOR.....	37
3.1.4	SISTEMA DE ALIMENTACIÓN.....	40
3.1.5	DIMENSIONES DEL REACTOR AEROBIO HORIZONTAL.....	41
3.2	ELABORACIÓN DEL SUSTRATO PARA ALIMENTACIÓN AL REACTOR.....	43
3.3	MEDIO DE SOPORTE IMPLEMENTADO.....	44
3.4	INOCULACIÓN DEL REACTOR.....	45
3.5	PARÁMETROS DE CONTROL EN EL FUNCIONAMIENTO DEL REACTOR.....	45
3.5.1	PARÁMETROS DE CONTROL BIOQUÍMICO.....	45
3.5.1.1	pH: (POTENCIAL DE HIDRÓGENO).....	46
3.5.1.2	DQO (DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO).....	46
3.5.1.3	SST (SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES) Y SSV (SÓLIDOS SUSPENDIDOS VOLÁTILES).....	47
3.5.2	PARÁMETROS DE CONTROL HIDRÁULICO.....	48
3.5.2.1	TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICO.....	48
3.5.2.2	CARGA ORGÁNICA VOLUMÉTRICA.....	50
3.5.2.3	CARGA ORGÁNICA SUPERFICIAL.....	51
3.5.2.4	EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA.....	52
3.5.2.5	SUPERFICIE ESPECÍFICA (S_e).....	52
3.5.2.6	RELACIÓN Y (BIOMASA-CARGA ORGÁNICA).....	53
CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE LABORATORIO.....		54
4.1	ARRANQUE Y OPERACIÓN DEL SISTEMA AEROBIO.....	54
4.2	MUESTREO PARA EL CONTROL DE LOS ANÁLISIS QUÍMICOS.....	55
4.3	ACONDICIONAMIENTO DEL SUSTRATO.....	56
4.4	FUNCIONAMIENTO DEL REACTOR.....	56
4.4.1	CARACTERÍSTICAS EN EL FUNCIONAMIENTO DEL REACTOR.....	43

4.4.1.1	ARRANQUE O ACONDICIONAMIENTO (ETAPA I)	60
4.4.1.2	OPERACIÓN DEL BIOREACTOR (ETAPA II)	61
4.5	ANÁLISIS DEL CRECIMIENTO DE LA BIOMASA.....	63
CAPÍTULO V: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		67
5.1	EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA EN FUNCIÓN DE MEDIDAS DE DQO Y LA CARGA ORGÁNICA VOLUMÉTRICA.	67
5.1.1	FASE I (OPERACIÓN)	67
5.1.2	FASE II (OPERACIÓN)	68
5.1.3	FASE III (OPERACIÓN)	68
5.2	CARGA ORGÁNICA SUPERFICIAL (L_s)	73
5.3	DQO DEL AFLUENTE Y DQO DEL EFLUENTE	75
5.4	TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICO.....	77
5.5	POTENCIAL DEL HIDRÓGENO (pH)	79
5.6	SUPERFICIE ESPECÍFICA (S_e).....	81
5.7	RELACIÓN Y (BIOMASA-CARGA ORGÁNICA)	81
5.8	VALORES DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA MÁSCA K, APLICANDO UN MODELO MATEMÁTICO, PARA EL DISEÑO TÉCNICO DEL REACTOR.....	82
5.8.1	MODELO CINÉTICO.....	84
CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		86
6.1	CONCLUSIONES.....	86
6.2	RECOMENDACIONES	89
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		91
ANEXOS		94
ANEXO N° 1 REGISTRO DE VALORES DE LOS PARÁMETROS ANALIZADOS EN LA ETAPA I.....		95

ANEXO N° 2	REGISTRO DE VALORES DE LOS PARÁMETROS ANALIZADOS EN LA ETAPA II.....	97
ANEXO N° 3	REGISTRO DE VALORES DE CARGA VOLUMÉTRICA, CARGA SUPERFICIAL, EFICIENCIA	101
ANEXO N° 4	DETERMINACIÓN DE LA CARGA ORGANICA TOTAL	105
ANEXO N° 5	FOTOGRAFÍAS DEL MONTAJE EXPERIMENTAL DEL REACTOR HORIZONTAL AEROBIO	109
ANEXO N° 6	FOTOGRAFÍAS DE LOS EQUIPOS Y MATERIALES.....	111
ANEXO N° 7	FOTOGRAFÍAS DEL ANÁLISIS DE LABORATORIO.....	113

LISTADO DE TABLAS

TABLA 2.1	RESISTENCIA QUÍMICA DEL PET.....	35
TABLA 3. 1	DESCRIPCIÓN DE LAS DIMENSIONES DEL BIOREACTOR AEROBIO HORIZONTAL.....	43
TABLA 4. 1	PARÁMETROS DE CONTROL EN LA ETAPA DE OPERACIÓN	58
TABLA 4. 2	RESULTADOS DE SÓLIDOS TOTALES Y SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN VOLÁTILES	66
TABLA 5. 1	VALORES PROMEDIOS DE LA DQO, DURANTE LA OPERACIÓN (3 FASES).....	83
TABLA 5. 2	VALORES PROMEDIOS DE LA EFICIENCIA, DURANTE LA OPERACIÓN (3 FASES).....	83

LISTADO DE GRÁFICOS

GRÁFICO 4. 1	RELACIÓN DQO AFLUENTE-DQO EFLUENTE ETAPA I (ARRANQUE O ACLIMATACIÓN)	57
GRÁFICO 4. 2	RELACIÓN DQO AFLUENTE-DQO EFLUENTE (ETAPA II DE OPERACIÓN).....	59
GRÁFICO 4. 3	RELACIÓN DQO AFLUENTE-DQO EFLUENTE (FASE I)	62
GRÁFICO 4. 4	RELACIÓN DQO AFLUENTE-DQO EFLUENTE (FASEII)	62
GRÁFICO 4. 5	RELACIÓN DQO AFLUENTE-DQO EFLUENTE (FASE III)	63
GRÁFICO 5. 1	RELACIÓN L_v AFLUENTE – EFICIENCIA (OPERACIÓN).....	69
GRÁFICO 5. 2	RELACIÓN L_s AFLUENTE – EFICIENCIA (EN LAS TRES FASES DE OPERACIÓN).....	74
GRÁFICO 5. 3	RELACIÓN DQO AFLUENTE Y EFLUENTE – EFICIENCIA (TRES FASES DE OPERACIÓN).....	76
GRÁFICO 5. 4	RELACIÓN TRH – EFICIENCIA (EN LAS TRES FASES DE OPERACIÓN)	78
GRÁFICO 5. 5	RELACIÓN pH AFLUENTE Y EFLUENTE – TIEMPO (EN LAS TRES FASES DE OPERACIÓN).....	80
GRÁFICO 5. 6	DQO PROMEDIO AFLUENTE Y EFLUENTE (ETAPA DE FUNCIONAMIENTO) CON CADA TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICO	83
GRÁFICO 5. 7	TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICO (ETAPA DE FUNCIONAMIENTO)- EFICIENCIA	84
GRÁFICO 5. 8	DETERMINACIÓN DE k	85

LISTADO DE FIGURAS

FIGURA 2. 1	CURVA DE CRECIMIENTO BACTERIANO	27
FIGURA 2. 2	MEDIO DE SOPORTE CON BIOPELÍCULA ADHERIDA	34
FIGURA 3. 1	SISTEMA DE ALIMENTACIÓN	40
FIGURA 3. 2	ESQUEMA DEL BIOREACTOR HORIZONTAL AEROBIO	41
FIGURA 3. 3	FOTOGRAFÍA DEL BIOREACTOR AEROBIO HORIZONTAL	42
FIGURA 3. 4	FOTOGRAFÍA MATERIAL DE SOPORTE	44
FIGURA 4. 1	BIOPELICULA FORMADA DENTRO DEL REACTOR AEROBIO HORIZONTAL JUNTO AL MEDIO DE SOPORTE PET	64
FIGURA 4. 2	MUESTRA DEL LODO BIOLÓGICO EN LA ESTUFA (105°C)...	65
FIGURA 4. 3	MUESTRA SECA.....	65

RESUMEN

La presente investigación consistió en la puesta en marcha de un sistema de tratamiento de agua residual, para la cual se utilizó agua residual artificial, conformada con agua de la red del sistema de agua potable de Quito más suero lácteo, procedente de los residuos de quesos o lácteos, obtenidos de forma artesanal, sin embargo también puede ser aplicado a aguas procedentes de residuos alimenticios, teniendo en cuenta que en su contenido o elaboración no tengan concentraciones de tóxicos o el volumen de desechos de estas fuentes sean mínimos comparados con el volumen total del agua, y que por efectos de dilución no causen problemas en el proceso biológico de tratamiento; así los contaminantes no inhiban el desarrollo de los microorganismos, los cuales son los encargados de realizar el proceso metabólico de transformación de la materia orgánica en su propio beneficio, transformándolos en componentes más sencillos como carbonatos, bióxido de carbono, amoníaco, nitratos, etc. (*Ingeniería de tratamiento de aguas residuales, 2014*). Así estos productos de formación intermedia no son de carácter agresivo ni repulsivo, son más estables y menos putrefactos, lo que posteriormente será menos problemático en su manejo y disposición final (*Tratamiento biológico de aguas residuales, 2014*).

Se desarrolló la operación y el funcionamiento de un reactor biológico aerobio por el hecho de ser más conveniente, para la conversión del material orgánico contenido en el agua residual, se suministró aire constante, garantizando una concentración entre 1-2 mg/L, para tener un medio aerobio adecuado, y con el diseño de construcción que se empleó se obtuvo un modelo flujo pistón, en el cual el agua a tratar fluye en forma de paquete, es decir de manera similar como el embolo fluye en una jeringa, desplazando el agua que entro con anterioridad hacia adelante, así no existe el inconveniente de que el agua regrese y se mezcle con otra corriente, siendo diferente en cada sección del tanque o reactor horizontal (*Ingeniería de tratamiento de aguas residuales, 2014*).

El monitoreo del reactor aerobio consistió en dos etapas con periodos de 21 y 81 días respectivamente; ETAPA I: consistió en el arranque o aclimatación del medio biológico al sustrato contenido en el agua residual, con un tiempo de retención hidráulico de 10,3 horas, hasta llegar a su estabilización en cuanto a la remoción de DQO. ETAPA II: Consistió en el funcionamiento del reactor, en base a tres fases de operación, para las cuales se cambiaron los tiempos de retención hidráulicos de 5.14 [horas], 6.01 [horas] y 8.01 [horas], respectivamente; y se varió las cargas orgánicas volumétricas en promedio de 7.68 [Kg/día.m³], 6.19 [Kg/día.m³] y 4.61 [Kg/día.m³], respectivamente; hasta llegar a estabilizarse en base a la eficiencia de remoción de materia orgánica en cada una de ellas. Además con las condiciones óptimas del medio que se brindó al reactor aerobio: como ajuste del pH, suministro de O₂, drenaje de lodos, se alcanzó eficiencias de remoción de materia orgánica del 67.2%, 85% y 94.5%, en cada fase de operación. Posteriormente se trabajó con los resultados de las tres fases o puntos de muestra para la obtención del modelo cinético de remoción de materia orgánica, determinando la constante cinética de transferencia másica k de 0.02 [m/día], con la cual se podrá determinar los demás parámetros de diseño para diferentes objetivos de las industrias.

SUMMARY

The present research consisted in start up a system for wastewater treatment, for which an artificial wastewater was used, formed with the main water system of Quito's drinking water more whey coming from cheese waste or milk, obtained using traditional methods, however, the treatment can also be applied to food waste, considering that the process do not have toxic concentrations or the waste volume from these sources are minimal compared to the volumen of total water and that dilution effects don't cause problems in the biological treatment process. So, the pollutants don't inhibit the growth of microorganisms, which are liable of making the metabolic transformation of organic matter for they own benefit, transforming them into simpler components as carbonates, carbon dioxide, ammonia, nitrates, and so on (Engineering wastewater treatment, 2014). So these intermediate products formation are not of aggressive or repulsive, these are more stable and less rotten, which subsequently will be less problematic in its handling and disposal (biological treatment of wastewater, 2014).

The operation and functioning of a biological aerobic reactor was developed because it is more convenient for the conversion of organic content material in the residual water, air was supplied constantly ensuring a concentration of 1-2 mg / L, to have an adequate milieu and for the construction model an aerobic model of plug flow was obtained, in which one the treated water flows as a package that is similar to the plunger that flows in a syringe, displacing the water previously entered forward, so there is no problem if the water backs and mixes with another stream, this situation is different in each section of the horizontal reactor tank (Engineering wastewater treatment, 2014).

Monitoring aerobic reactor consists of two stages with periods of 21 and 81 days respectively; PHASE I: consisted in the startup or acclimatization of biological environment to the substrate contained in wastewater with a hydraulic retention time of 10.3 hours to reach stabilization in terms of DQO removal. STAGE II: consisted of reactor operation, based on three operation phases for which ones

the hydraulic retention times were change to 5.14 [hours], 6.01 [hours] and 8.01 [hours] respectively. The volumetric organic loading on average changed to 7.68 [kg / día.m³] , 6.19 [kg / día.m³] and 4.61 [kg / day * m³], respectively; until stabilize it, based on organic removal efficiency in each area. Furthermore, with the optimal environmental conditions, given to the aerobic reactor: as pH adjustment, O₂ supply, sewage sludge, the removal efficiencies of organic matter were reached, the 67.2%, 85% and 94.5% of efficiency was achieved in each phase of operation. After, the work realized focused on the three phases results or in the sample points for obtain the kinetic model of organic matter removal, determining the rate constant mass transfer k of 0.02 [m / day], and with this, the others design parameters for the industry different targets could be determined.

PRESENTACIÓN

La presente investigación tiene la finalidad de evaluar el rendimiento de un reactor aerobio horizontal a nivel de laboratorio con material de soporte PET, para tratar aguas residuales con alta carga orgánica y determinar la cinética de remoción de materia orgánica a la temperatura ambiente de operación de Quito.

En el primer capítulo, se presenta la situación o alcance de los problemas que causan las aguas residuales, los objetivos y la justificación para la realización de esta investigación.

En el segundo capítulo, se realiza una recopilación bibliográfica acerca de los problemas ambientales de las industrias lácteas enfatizando en la contaminación de agua, también se enfoca en el crecimiento y cinética de las bacterias, además del funcionamiento de los sistemas de tratamiento biológicos aerobios y cada una de las reacciones que se producen en el interior del reactor.

En el capítulo tres, se detallan los parámetros de diseño para la construcción del reactor aerobio en laboratorio y los parámetros de control hidráulico y químico para el funcionamiento del reactor.

En el capítulo cuatro, se realiza el monitoreo, tanto en la etapa de arranque del reactor y en la etapa de operación, en cada una de sus fases; presentando el funcionamiento del reactor y las características que presentaron en cada una de ellas.

En el capítulo cinco, se presenta el análisis de los resultados obtenidos en la etapa de arranque y en la etapa de operación; verificando el comportamiento del reactor horizontal aerobio con las diferentes condiciones de funcionamiento.

En el capítulo seis, se presenta las conclusiones y recomendaciones basadas en los resultados obtenidos en la investigación.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 ALCANCE

En la actualidad en el país el parque industrial ha tenido un considerable incremento, con una diversidad de industrias entre ellas las del sector lácteo, las que en gran parte han acrecentado los niveles de contaminación en los cuerpos hídricos debido a que utilizan gran cantidad de agua limpia en el proceso productivo, en relación al producto elaborado, teniendo entre sus características elevadas cargas contaminantes como grasas y sólidos suspendidos, que alteran y contaminan el cuerpo receptor (*Fondo social Europeo, 2000*).

Al momento se cuenta con diferentes sistemas de plantas de tratamiento en especial tratamientos físico químicos, con una serie de etapas para su depuración, teniendo inconvenientes al ser instaladas dentro de la industria al ocupar demasiado espacio y los costos de adquisición son elevados, lo que implicaría que las empresas no garanticen un óptimo tratamiento en los efluentes producidos para evitar costos. (*Romero J. 2000*)

Si los efluentes se siguen descargando sin previo tratamiento a los cuerpos receptores, estos aumentarán su capacidad de carga y no podrán auto depurarse, aumentando su degradación, modificando la condición del elemento beneficioso para la vida, alterando la ecología acuática del mismo (*Roldan, P& Ramírez, J. 2010*).

Por tal razón es necesario investigar un tratamiento de aguas residuales con un sistema innovador, como es el tratamiento biológico de biopelícula (*Ronzan 2007*), en forma horizontal y además se contribuye con la reducción de desechos

sólidos como son los recipientes plásticos PET, los cuales servirán como medio de soporte para el crecimiento de la biomasa, escogido debido a su alta densidad específica (*Muñoz. M & Herrera 2007*).

El objeto de análisis a evaluar es agua residual preparada en laboratorio con lactosuero, que constituye el componente mayoritario de residuos en una industria láctea y por sus cargas orgánicas requieren tratamiento cuya implementación debe ser lo suficientemente viable en términos económicos a nivel de construcción y operación.

El funcionamiento y control de sistema de depuración se debe regir por parámetros hidráulicos y físico químicos que garanticen una alta remoción de materia orgánica, además de disminuir los tiempos de tratamiento.

Al final de la investigación se espera obtener datos cuantitativos y cualitativos en relación de la eficiencia de remoción de materia orgánica del reactor aerobio horizontal, y posteriormente determinar la constante cinética de transferencia másica mediante un modelo matemático, para el diseño de éste tipo de reactores y en base a los resultados se decidirá su implementación o rechazo del sistema.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Es una propuesta para el tratamiento de efluentes de la industria alimentaria, en especial para aguas residuales con gran cantidad de materia orgánica, así se analizará las aguas residuales con lactosuero provenientes de industrias lácteas, debido a que en sus procesos utiliza gran cantidad de agua limpia y de buena calidad para sus actividades que hacen de ésta industria una de las de mayor generación de aguas residuales con altas cargas de contaminantes orgánicos (*Wiblbrett, G. 2000*). Por lo mencionado, se propone un sistema de tratamiento aerobio ya que presenta ventajas sobre los anaerobios al evitar la generación de malos olores en caso de una mala operación y debido a que en general las

industrias se encuentran en zonas urbanas, siendo vital preservar las condiciones ambientales sobre el medio para que no existan afectaciones a la salud pública o contravenciones a la ley.

El diseño piloto del reactor biológico aerobio se hará de forma horizontal, para su análisis, con la finalidad de investigar una alternativa de tratamiento detallando su funcionamiento y operación. Para su posterior implementación dentro de industrias con poca capacidad de espacio.

Es un método innovador donde se utiliza un medio de soporte PET reciclado, para facilitar la formación de la película biológica y con la ayuda de los microorganismos acondicionados, se facilite una remoción de materia orgánica en términos de eficiencia (*Muñoz. M & Herrera 2007*).

Se pretende investigar la cinética de degradación de la materia orgánica, para la implementación técnica de esta tecnología en caso de ser altamente eficiente dentro de las industrias que generen aguas residuales con alto contenido de materia orgánica, para contribuir con la preservación y conservación del medio ambiente mediante la reducción cualitativa y cuantitativa de efluentes contaminados.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la eficiencia y cinética de remoción de materia orgánica en un reactor biológico aerobio horizontal con medio de soporte PET, para el tratamiento de efluentes lácteos.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar y construir un reactor biológico aerobio horizontal a escala de laboratorio, estabilizarlo para la aclimatación del medio biológico.
- Determinar y cuantificar los parámetros químicos e hidráulicos indicando la remoción de carga orgánica en términos de eficiencia.
- Cuantificar la cantidad de materia orgánica removida en el tiempo de uso del reactor, tiempo de retención y carga volumétrica.
- Aplicar un modelo matemático para obtener constante cinética de transferencia másica y posteriormente los parámetros de diseño.

CAPÍTULO II

INVESTIGACIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 SITUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN PRODUCIDA POR LA INDUSTRIA LÁCTEA

“La industria láctea se caracteriza por la existencia de muchas fábricas relativamente pequeñas que ofrecen productos como leche, queso, requesón, nata, helados, suero y lactosa. Desde hace tiempo, la industria láctea ha defendido el tratamiento aeróbico de las aguas residuales biológicas. Numerosos centros de producción han realizado grandes inversiones en sistemas de cienos activos, bio-torres, reactor químico secuencial por cargas y tratamiento en paquetes. El interés por el agua y la conservación de la energía ha llevado a muchas instalaciones de producción láctea a reducir el consumo de este elemento. Esta tendencia, con la presencia en los centros productivos de cursos de aguas residuales, normalmente de gran potencia, ha dado lugar al diseño y construcción de numerosos sistemas anaeróbicos de tratamiento de aguas residuales” (*Berkowitz*), pero en la presente investigación se enfoca en un sistema de tratamiento biológico aerobio horizontal, con un medio de soporte donde se formará la biopelícula, que aumenta el tratamiento. Ideal para empresas o industrias ubicadas en el interior de zonas urbanas, donde su funcionamiento y operación se garantiza una zona libre de malos olores en caso de desestabilización del sistema.

La industria Láctea constituye una de las industrias alimenticias que generan el lactosuero entre sus procesos, un subproducto caracterizado como contaminante. Cada 1000 litros de lactosuero generan cerca de 35 [kg] de demanda biológica de oxígeno (DBO) y cerca de 68 [kg] de demanda química de oxígeno (DQO), cuya

carga contaminante es equivalente a la de las aguas negras producidas en un día por 450 personas (CNPML, 2003).

En la actualidad el lactosuero constituye un subproducto importante, como base de alimentos ya sea para uso humano; debido, a que las proteínas del suero de queso poseen excelentes propiedades funcionales y un valor nutritivo muy alto por sus concentraciones altas en lisina, triptófano y aminoácidos azufrados, sin embargo durante muchos años el lactosuero ha servido como alimento para porcinos, desechado a cloacas y ríos, combinación con excremento animal para generar combustible, fertilizante potencial, o simplemente eran dispersados sobre los campos, provocando contaminación del medio ambiente (Recinos & Saz, 2006).

Por otra parte, lo que se necesita es tratar el agua residual con lactosuero que se produce en los proceso de lavado en las instalaciones de cada uno de los sistemas unitarios u ocasionalmente el exceso que no pudo ser usado y poder evitar la contaminación mencionada.

2.2 CINÉTICA DE CONSUMO DEL SUSTRATO

Para determinar el modelo cinético del reactor horizontal biológico aerobio, es esencial que el agua residual atravesase en forma de flujo pistón. Así se considera a la ecuación 2.1, en cuanto a la remoción de materia orgánica, representada por una cinética de primer orden (Mara, 1978).

$$\frac{Le}{Li} = e^{-k \frac{V \cdot Se}{Q}} \quad (2.1)$$

Dónde:

Li: DQO del afluente [mg/L]

Le: DQO del efluente [mg/L]

Se: Superficie específica del medio de soporte [m²/m³]

- V: Volumen útil del reactor [m³]
 Q: Caudal [m³/día]
 k: Coeficiente de transferencia másico [m/día]

La ecuación 2.1 representa un modelo matemático para el diseño del reactor horizontal, con un coeficiente de transferencia másico, determinado a una temperatura específica, la cual puede ser transformada, a la zona o sitio de instalación, mediante la ecuación 2.2 de Arrhenius, dada a la temperatura promedio de la presente investigación de 17° C, y con un coeficiente de actividad bacterial (θ) igual a 1.08, en base a lodos activados (*Romero, 2000*):

$$k_T = k_{17^\circ C} (1.08)^{T-17^\circ C} \quad (2.2)$$

2.3 CRECIMIENTO BACTERIANO

Como crecimiento bacteriano se entiende al aumento ordenado de todos los constituyentes químicos de la célula, que se dan en sus correspondientes magnitudes y períodos; son afectadas por las condiciones físico-químicas del medio en donde los microorganismos se encuentran. El ambiente es un factor de influencia sobre el crecimiento, el cual ayuda a explicar la distribución de los microorganismos en la naturaleza y hace posible diseñar estrategias que favorezcan el crecimiento, que permiten controlarlo y estudiarlo (*Forbes, 2002*).

Las bacterias como grupo, son extremadamente versátiles y tienen gran capacidad para utilizar una amplia gama de nutrientes. Así, en cuanto a macronutrientes el carbono es el mayor constituyente de la célula bacteriana y según la forma en que lo usa, existen dos tipos de bacterias; las *autótrofas*, las cuales son capaces de sintetizar todos sus componentes orgánicos a partir de compuestos inorgánicos como el CO₂, ejemplo las bacterias del suelo y las *heterótrofas*, en cambio utilizan sustancias orgánicas, ejemplo la glucosa. Después del carbono, el elemento más abundante en la célula es el nitrógeno,

principal constituyente de las proteínas y de los ácidos nucleicos. En cuanto a los micronutrientes importantes para la nutrición de las bacterias, están el cobalto, el cobre y el manganeso (*Forbes, 2002*).

Entre los requerimientos atmosféricos y ambientales para el crecimiento celular se destacan:

➤ **Oxígeno:** Las exigencias de oxígeno de una bacteria reflejan el tipo de metabolismo productor de energía, así existen bacterias: anaerobias obligadas; crecen en ausencia de oxígeno, el mismo que es muy tóxico e incluso letal en una breve exposición, las anaerobias facultativas; son capaces de crecer en presencia o en ausencia de oxígeno, las bacterias aerobias obligadas; requieren oxígeno para su desarrollo y las bacterias microaerófilas; crecen mejor con presiones de oxígeno bajas (*Forbes, 2002*).

➤ **Dióxido de carbono:** En ciertas bacterias como *Neisseria* y la *Brucella* que tienen muchas enzimas, con baja afinidad por el CO₂, requieren una concentración más elevada (10%) de la que habitualmente está presente en la atmósfera (0.03%) (*Forbes, 2002*).

➤ **Temperatura:** Este es un factor ambiental relevante que influye en la proliferación y mantenimiento de la vitalidad de los microorganismos. El crecimiento bacteriano tiene su propia temperatura mínima, por debajo de la cual el crecimiento no puede darse, una temperatura óptima en la cual el crecimiento es más rápido y una temperatura máxima por encima de la cual las bacterias no pueden multiplicarse. Así, es posible distinguir tres grupos de bacterias según el rango de temperatura en el que es posible su multiplicación: psicrófilas; crecen entre -5 y 30 ° C (óptima de 15°C), mesófilas; crecen entre 10 y 45°C (óptimo a los 30°C) y termófilas, que crecen entre 25 y 80°C (óptimo en 55°C) (*Forbes, 2002*).

➤ **Concentraciones de hidrógeno:** El crecimiento bacteriano es posible en un determinado rango de pH. Así, según el pH obtenido se encontrarán bacterias

acidófilas, neutrófilas y alcalófilas, que crecen en pH ácidos, neutros y alcalinos respectivamente (*Forbes, 2002*).

➤ **Captación de nutrientes:** La concentración de solutos en el interior de una célula bacteriana es mayor que en el medio extracelular, el cual se da tanto en el medio natural como en la mayoría de los medios de cultivo, usados en laboratorios, donde la principal barrera para el paso de solutos entre la célula y el medio externo es la membrana celular. Las bacterias están rodeadas de membranas semipermeables, compuestas por una mezcla compleja de proteínas, lípidos y glucoproteínas, que restringen el ingreso de la mayoría de los solutos. Sin embargo, tienen sistemas que permiten el transporte de sustancias pequeñas a través de dichas membranas. Así las moléculas de mayor tamaño primero deben ser degradadas a moléculas más pequeñas por enzimas (exoenzimas) producidas por la propia bacteria y secretadas al exterior celular (*Forbes, 2002*).

El crecimiento como tal es entendido como el aumento del número de bacterias en una población determinada, en general el crecimiento de las poblaciones de bacterias se da mediante el cultivo de una cepa bacteriana que provee de una población de bacterias, el cultivo es el proceso de propagación de los microorganismos en el laboratorio, que se obtiene aportando las condiciones ambientales adecuadas y los nutrientes necesarios para el crecimiento bacteriano (*Forbes, 2002*).

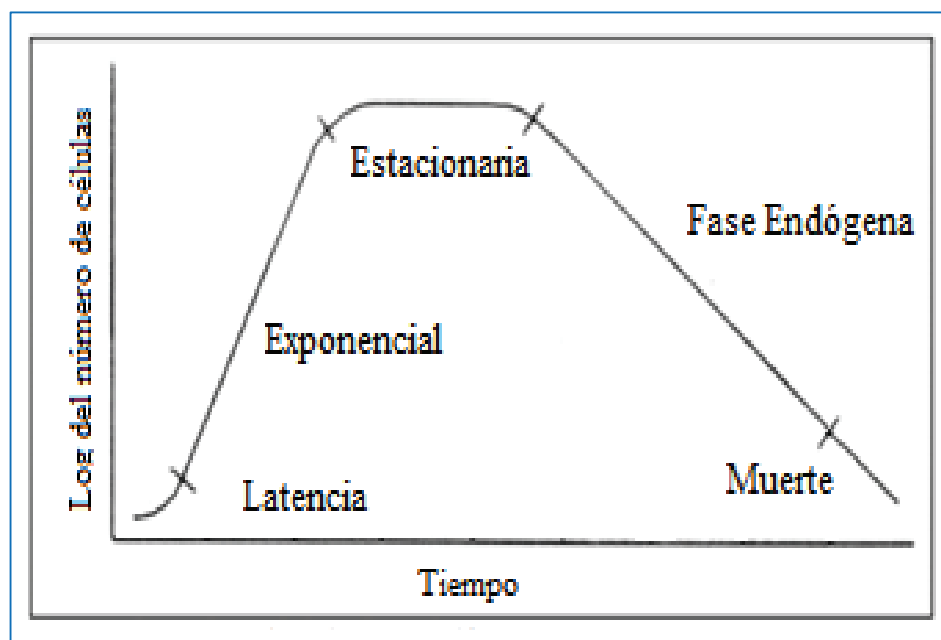
La siembra de un material que contiene bacterias en un medio sólido adecuado con la técnica de aislamiento permite; luego de un período adecuado de incubación, la obtención de millones de bacterias agrupadas en colonias aisladas, las cuales se pueden aislar nuevamente en un nuevo medio para obtener un cultivo puro (*Forbes, 2002*).

Es importante diferenciar entre el crecimiento de una célula individual; dicho crecimiento celular es el resultado del aumento del tamaño de la célula, seguido de su división y el de una población que, es el resultado del aumento del número

total de células, que puede ser cuantificado directamente (número de células) o indirectamente (masa celular) (Forbes, 2002). El crecimiento de las poblaciones bacterianas en un sistema de cultivo cerrado, es decir sin entrada ni salida de los componentes del sistema, se limita por el agotamiento de los nutrientes o bien por la acumulación de productos tóxicos del propio metabolismo celular (Forbes, 2002).

Cuando las bacterias se siembran en el laboratorio en un medio líquido se trata de un sistema cerrado de cultivo, si se toman muestras a intervalos regulares en diferentes tiempos de incubación y se realiza un recuento del número de células viables por mililitro de cultivo, se puede representar en base a datos del conteo de células viables en función del tiempo, como muestra la Figura 2.1, indicando el comportamiento o curva de crecimiento, caracterizada por cuatro fases del crecimiento celular: latencia, exponencial, estacionaria y muerte, explicadas a continuación (Forbes, 2002):

FIGURA 2.1 CURVA DE CRECIMIENTO BACTERIANO



Fuente: Forbes, "Diagnóstico Microbiológico", 2002

Elaborado por: Jessica Reina

- **Fase de Latencia:** Las bacterias transferidas de un cultivo en fase estacionaria a un medio fresco, sufren un cambio en su composición química antes de ser capaces de iniciar la multiplicación, existiendo un aumento de los componentes macromoleculares y de la actividad metabólica, casi sin división celular, asociado a un incremento de la susceptibilidad a los agentes físicos y químicos (*Forbes, 2002*). Por lo tanto, la mal llamada fase de latencia implica una intensa actividad metabólica, donde las células necesitan sintetizar enzimas apropiadas para los nuevos nutrientes (*Romero, 2000*).

- **Fase Exponencial:** Las células se dividen a velocidad constante, determinada por la naturaleza intrínseca de la bacteria y por las condiciones del medio. Existe gran aumento del número total de células viables, que puede ser expresado en forma exponencial. Próximo al final de esta fase, se produce la liberación de exotoxinas por las bacterias que las producen (*Forbes, 2002*). La tasa de conversión del sustrato es máxima, los organismos crean las reservas alimenticias propias de su estructura celular y se logran condiciones de estado permanente como lo indican relaciones aproximadamente constantes de ADN/ células ARN/ célula, proteína/ célula y densidad celular (*Romero, 2000*).

- **Fase Estacionaria:** Eventualmente el agotamiento de los nutrientes o la acumulación de productos tóxicos determinan el cese del crecimiento, en esta etapa ya hay pérdida de células por muerte, la cual es balanceada por la formación de nuevas células. Cuando esto ocurre, el conteo total de células aumenta levemente aunque el de las bacterias viables permanece constante. Hacia el final de esta etapa, puede ocurrir la esporulación en aquellas bacterias que poseen este mecanismo de resistencia (*Forbes, 2002*), se sugiere que es una fase donde las células se mantienen en un estado de animación suspendida (*Romero, 2000*).

- **Fase Endógena y de Muerte:** Luego de la fase estacionaria, la tasa de mortalidad alta y lisis celular, el número de bacterias viables disminuye rápidamente y por lo tanto la curva de crecimiento declina. Las características de

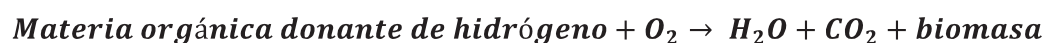
la curva de crecimiento pueden variar, dependiendo de las características propias de las bacterias, del estado metabólico del inoculo, del medio de cultivo y de las condiciones de incubación, un factor importante son las condiciones físico-químicas del medio donde las bacterias se desarrollan (*Forbes, 2002*).

El cultivo continuo con un aporte y salida de nutrientes y requerimientos a una tasa constante, permite mantener a las bacterias en una misma fase de crecimiento durante un largo período de tiempo (*Forbes, 2002*). Así para reactores de flujo continuo y abierto como en la presente investigación, se logra mantener las células, en fase de crecimiento logarítmico, con periodos prolongados y con tasas menores que la tasa máxima de crecimiento.

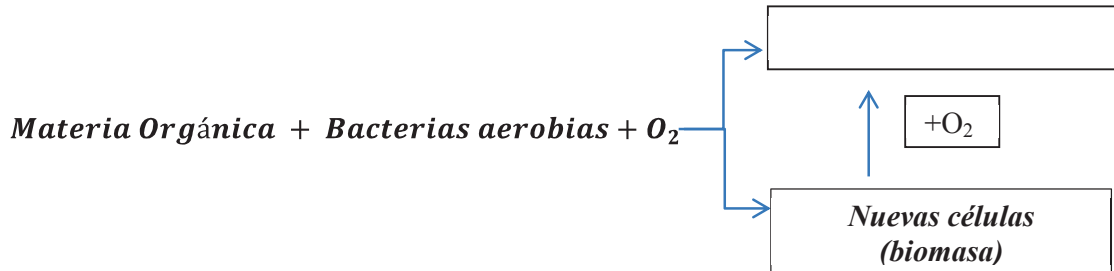
2.4 TRATAMIENTO BIOLÓGICO AEROBIO

El tratamiento biológico de aguas residuales consiste en la remoción de contaminantes mediante la actividad biológica, removiendo así principalmente sustancias orgánicas biodegradables, coloidales o disueltas, nitrógeno, fósforo del agua residual, mediante su conversión en gases que escapan a la atmósfera y en biomasa extraíble mediante sedimentación (*Romero, 2000*).

Para el presente trabajo se explica uno de los grupos principales de los procesos biológicos; el proceso aerobio, el cual se efectúa en presencia de oxígeno, denominado también proceso de respiración de oxígeno, en el cual el oxígeno libre es el único aceptador final de electrones, siendo éste reducido y el carbono es oxidado, al igual que la materia orgánica o inorgánica, representada con la siguiente expresión (*Romero, 2000*).



Las reacciones que se involucran en el crecimiento microbio son de gran complejidad, así el proceso de oxidación aerobia también se lo puede representar por la siguiente expresión:



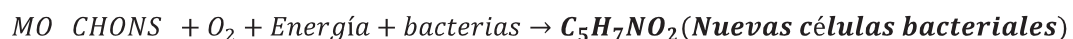
Como se aprecia en la expresión anterior, el proceso aerobio se ejecuta con el propósito de obtener energía necesaria para la síntesis del tejido celular nuevo, usualmente las bacterias son los organismos más importantes en el tratamiento aerobio de las aguas residuales debido a que son excelentes oxidadores de materia orgánica, y se desarrollan bien en aguas residuales, formando una capa floculenta gelatinosa denominada biopelícula, de buenas características para la remoción de la materia orgánica (Romero, 2000).

En la oxidación biológica aerobia o respiración aerobia, el oxígeno molecular es el aceptador final de electrones (reducción); proceso por el cual se transportan electrones del donante oxidable al oxígeno molecular para obtener la energía requerida para el crecimiento de los microorganismos aerobios; ésta energía es almacenada preferentemente en la biomasa sintetizada y los residuos son compuestos estables de bajo contenido energético (Romero, 2000). Las reacciones metabólicas esenciales en el proceso aerobio, ocurren simultáneamente; son tres y se describen de la siguiente forma:

➤ **Catabolismo (Oxidación o descomposición)**



➤ **Anabolismo (Síntesis o asimilación)**



➤ **Autólisis (Respiración Endógena o autooxidación)**



Donde la fórmula $C_5H_7NO_2$ representa la composición promedio celular bacteriana, adicionalmente la reacción de autólisis no se completa como se indica en la teoría, en la realidad se forman productos orgánicos estables, puesto a que una porción de la biomasa celular es resistente a la descomposición aeróbica, generalmente se considera un 77% de biomasa como porción biodegradable, en términos de sólidos suspendidos volátiles (Romero, 2000).

2.5 SISTEMAS AEROBIOS DE BIOPELÍCULAS

Un sistema de tratamiento biológico aerobio de las aguas residuales se da, en una primera instancia por el desarrollo de bacterias que se reúnen en forma de películas o flóculos, y que, por acción fisicoquímica, retienen contaminación orgánica y se alimentan de ella. Posteriormente en una segunda fase se separan por sedimentación los fangos ya producidos. (Degremont, 1979)

El biofilm o biopelícula es una estructura compleja con canales de agua y aireación, para el transporte de nutrientes, desechos, oxígeno y agua. Generando estos canales gradientes de tensión de pH y oxígeno, permitiendo el desarrollo de micronichos y diversos grupos bacterianos (Kourkoutas Y. B., 2004). Las bacterias se agrupan en colonias con el objeto de buscar protección ante las posibles condiciones adversas del medio, así los microorganismos tenderán a unirse entre sí, a adherirse a diversas superficies sólidas, a reproducirse y a crecer mediante la producción de polisacáridos extracelulares (Livingston, 1995).

Los biofilms pueden formarse en superficies vivas o no vivas y pueden prevalecer

en medios naturales, industriales u hospitalarios. Los microorganismos formadores de los biofilm o biopelícula poseen algunas ventajas sobre los microorganismos suspendidos que es otro sistema de depuración de aguas residuales (*Lapo, 2014*);

- Mayor persistencia dentro del sistema
- Mayor tasa de crecimiento
- Mayor incremento en la actividad metabólica
- Mayor resistencia a la toxicidad

Para la obtención de un biofilm adecuado se debe generar una inmovilización celular, definida como la ubicación física de células en espacio o región específica, de forma natural o inducida, en la cual son capaces de mantener una actividad catalítica deseada (*Karel et al., 1985*). Ocurriendo por procesos de adherencia a superficies o microorganismos, debido a estructuras celulares o a sustancias que estos mismos segregan y en otros casos de manera artificial, pueden quedar atrapados en los espacios o poros de fibras y geles (*Couto A, 2005*).

Existe dos formas de inducir la inmovilización; la inmovilización pasiva e inmovilización activa, donde una vez alcanzado el acondicionamiento o células inmovilizadas se logra facilitar la operación de reactores a velocidades de flujo independientes de la velocidad de crecimiento, donde la estabilidad catalítica podrá ser mayor para células inmovilizadas que para células libres y los microorganismos inmovilizados pueden tolerar concentraciones altas de tóxicos (*O'Reilly KT, 1989*).

La inmovilización activa consiste en atrapar las células formadas dentro de una matriz, impidiendo que se difundan en el medio, pero sin interrumpir el paso de metabolitos y nutrientes (*Kourkoutas Y. B., 2004*). También se la denomina

inmovilización artificial debido al uso de agentes floculantes, adherencia química y atrapamiento en geles de polímeros (*Moreno & Garrido, 2008*).

La inmovilización pasiva fue la empleada para la presente investigación, la cual corresponde al fenómeno natural de formación de biofilm en un medio de soporte (PET), está caracterizada por células vivas (15-25%), agua, polisacáridos extracelulares, proteínas y ácidos nucleicos (*Lapo, 2014*). Donde los microorganismos tienden a adherirse a las superficies y a crecer sobre ellas (*Robinson, Mak, & Trevan, 1986*), cuya interacción con las superficies se da por la presencia de estructuras celulares, fimbrias (bacterias) e hifas (hongos) (*Lapo, 2014*).

Dentro del campo de la biotecnología ambiental, el tratamiento de aguas residuales con la implementación de tecnología de biofilm, es de uso extensivo por las siguientes ventajas (*Lapo, 2014*):

- Comparado con otros bioprocesos industriales, se pueden tratar grandes volúmenes de soluciones acuosas diluidas
- Poblaciones de microorganismos son usados para formar biofilm
- El proceso puede ser operado a altas concentraciones de biomasa en el reactor, sin la necesidad de recircular y retener biomasa. Luego se requerirá un tratamiento, de un sedimentador secundario o filtro, en el efluente, para la remoción de biomasa desprendida.

2.6 MEDIOS DE SOPORTE

El medio de soporte se lo utiliza con el fin de que se beneficie la formación de biopelícula, tanto en sistemas fijos como móviles. Siendo los plásticos inertes que poseen alta superficie específica para cargar la biomasa que trata el agua, característica que favorece la adhesión de los microorganismos y la formación de

una película biológica, que asegure el atrapamiento, en los espacios vacíos del lecho, de flóculos microbianos no adheridos (Baecheler, Zambrano, & Urrutia, 2001). En la Figura 2.2 se muestra el medio de soporte PET con la biomasa o biopelícula formada luego del tratamiento biológico del agua residual:

FIGURA 2. 2 MEDIO DE SOPORTE CON BIOPELÍCULA ADHERIDA



Elaborado por: Jessica Reina

Entre las características del medio de soporte, que son de gran importancia para la formación de la biopelícula está la porosidad, la cual proporciona protección a los microorganismos contra los esfuerzos cortantes, contra organismos depredadores y contra la abrasión (*Lewandowski, 1993*), siendo de gran relevancia durante las etapas iniciales de formación de la biopelícula, debido a que influye en la velocidad de formación, y distribución de las especies dentro del biofilm (*Lapo, 2014*). Entre los principales fines del uso de un medio de soporte, se tiene (*Lapo, 2014*):

- Mejorar el contacto entre el sustrato contenido en el agua residual y los sólidos biológicos inoculados
- Generar gran acumulación de biomasa

- Facilitar un flujo uniforme en el reactor
- Evitar que los sólidos sean arrastrados fuera del sistema de depuración

En el mercado existe una variedad de materiales que son empleados como medio de soportes cada una con una superficie específica y costos altamente determinados, en base a los modelos, dimensiones, material, etc. El material o medio de soporte utilizado en la presente investigación fue el Polietileno Tereftalato (PET), un material sintético perteneciente al grupo de los poliésteres, el cual se obtiene mediante una reacción de policondensación entre el ácido tereftálico y el etilenglicol. Es un polímero termoplástico lineal, con un alto grado de cristalinidad, cuyo proceso atraviesa por fases de extrusión, inyección, soplado, soplado de preforma y termoformado, cuyo uso entre otras cosas es para la fabricación de botellas de plástico destinado al envase de bebidas de consumo humano gaseosas y no gaseosas (Lapo, 2014). En la Tabla 2.1 muestra la resistencia química del PET a diferentes componentes:

TABLA 2.1 RESISTENCIA QUÍMICA DEL PET

BUENA RESISTENCIA	POCA RESISTENCIA
Grasas y aceites presente en alimentos	Solventes halogenados
Soluciones diluidas de ácidos minerales, álcalis, sales, jabones	aromáticos
Hidrocarburos alifáticos	Cetonas de bajo peso molecular
Alcoholes	bases

FUENTE: Lapo, 2014

Elaborado: Jessica Reina

CAPÍTULO III

CONSTRUCCIÓN DEL BIOREACTOR HORIZONTAL AEROBIO PILOTO

El reactor biológico horizontal se construyó a nivel de laboratorio con una sección circular, cuyas medidas se consideraron en base a ciertos parámetros predeterminados y valores dados como una base de cálculo para el inicio de la experimentación, así se tiene:

- Temperatura ambiente: la temperatura ambiente de Quito para el periodo de Agosto- Noviembre osciló en un rango de 15-18 ° C, en el día, mientras que en la noche osciló en un rango de 7-10 ° C, es decir el reactor operó a esas temperaturas en todas sus fases, sin embargo la temperatura del agua o del interior del reactor, tuvo una variación entre la entrada y salida del agua, con un promedio de 18-20° C, permanentemente.
- Carga volumétrica de 9,6 [g/L. día], dato obtenido de una investigación sobre el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea (*Arango & Sánchez, 2009*), donde se obtuvo el mayor porcentaje de remoción de materia orgánica.
- Concentración de DQO (Demanda Química de Oxígeno), se tomó como base la concentración de DQO, del agua residual, medida de 2100 [mg/L], típica para efluente de la industria láctea (*Arango & Sánchez, 2009*).

3.1 PARÁMETROS DE DISEÑO DEL BIOREACTOR

3.1.1 MATERIAL DEL REACTOR

Se escogió trabajar con tubería de PVC (Policloruro de vinilo), para evitar el contacto con la luz y evitar el crecimiento de algas que interfieran con el proceso de depuración del agua residual, además es un material de bajo costo, no es corrosivo y presenta una alta estabilidad química, el cual no afectó en los procesos biológicos

3.1.2 FORMA DEL REACTOR

Para el diseño y construcción del bioreactor se consideró una forma horizontal y circular debido a su fácil construcción y operación, a nivel de laboratorio, y poder evitar formaciones como; zonas muertas o cortocircuitos, sin embargo se garantiza un constante paso del agua residual a través del sistema, ya que se trabaja con un sistema de reactor flujo pistón, y también se tuvo en consideración características de funcionamiento como puntos o salidas para la espuma que se pueda generar, producto de la agitación del agua con lactosuero debido al ingreso del aire proveniente de los difusores.

Luego de determinar la forma y el material del bioreactor se procedió a calcular las dimensiones del mismo, tomando como base un diámetro de 58 mm y a partir de esto se calcularon las demás dimensiones.

3.1.3 VOLUMEN DEL REACTOR

Se determinó trabajar con un volumen aproximado de 2 litros, considerando los siguientes parámetros de diseño:

$$L_V = \frac{Q S_o}{V} \quad (3.1)$$

$$V = \frac{Q S_o}{L_V} \quad (3.2)$$

Dónde:

L_V : Carga volumétrica [$\frac{g}{L \cdot día}$]

Q : Caudal [$\frac{L}{día}$]

S_o : Concentración DQO [$\frac{g}{L}$]

V : Volumen [L]

Con los siguientes datos obtenemos el volumen:

S_o : 2,1 [$\frac{g}{L}$]

Q : 9,4848 [$\frac{L}{día}$]

L_V : 9,6 [$\frac{g}{L \cdot día}$]

Obteniendo como resultado, a partir de la ecuación 3.2:

$$V = \frac{Q S_o}{L_V}$$

$$V = \frac{9,4848[\frac{L}{día}] * 2,1[\frac{g}{L}]}{9,6[\frac{g}{L \cdot día}]}$$

$$V = 2,07 [L]$$

Se obtuvo un volumen del reactor de 2 L, en el interior se colocó el medio de soporte PET, cuyo volumen ocupó 13,79 % (prueba realizada en laboratorio), teniendo un volumen libre para el tratamiento de 1,73 L, medida que se necesitará para el diseño y construcción, considerado como el volumen útil del reactor donde las bacterias realizarán los procesos de depuración del agua residual y el resto de 0,276 L, ocupados por el medio de soporte donde crecerán y se adherirán las

colonias de bacterias.

Para la obtención de la longitud se tiene:

$$V = \pi r^2 h \quad (3.3)$$

$$h = \frac{V}{\pi * r^2} \quad (3.4)$$

Dónde:

V: volumen [m³]

r: radio [m]

h: longitud [m]

Teniendo en consideración los cálculos predeterminados se determina h mediante la ecuación 3.4, y los valores dados a continuación:

$$V = 0,002 \text{ [m}^3\text{]}$$

$$r = 0,029 \text{ [m]}$$

$$h = \frac{V}{\pi * r^2}$$

$$h = \frac{0,002 \text{ m}^3}{\pi * (0,029 \text{ m})^2}$$

$$h = 0.75 \text{ [m]}$$

La geometría para los reactores con aireación constante de forma alargada

$\frac{\text{Díametro}}{\text{Longitud}} = \frac{1}{5}$, determina que el régimen de flujo hidráulico, sea de flujo pistón

(Guía Ambiental, 2010). En éste sistema se obtuvo la relación $\frac{\text{Díametro}}{\text{Longitud}} = \frac{d}{h} = \frac{1}{13}$

que garantiza un flujo predominantemente pistón.

3.1.4 SISTEMA DE ALIMENTACIÓN

La alimentación al bioreactor se realizó de manera gradual y a gravedad, como muestra la Figura 3.1, donde se utilizó un agua residual elaborada, la cual ingresó de manera continua a través del reactor sin recirculación es decir teniendo un solo contacto con el material de soporte con la finalidad de cumplir el tiempo de retención establecido, y permitir al afluyente entrar al reactor en forma de flujo-pistón, además de la adición del aire, el cual no solo ayudó a producir las reacciones de oxidación de los microorganismos de la materia orgánica, sino también a su mezcla y obtención de un mejor contacto entre el afluyente con la biopelícula.

El suministro de aire se lo realizó mediante unos pequeños difusores, los cuales se monitorearon constantemente con concentraciones de oxígeno mayores a los 2 [mg/L], para garantizar la oxidación de la materia orgánica por medio de los microorganismos, el cual operó permanentemente desde el inicio hasta el fin de la experimentación, se tuvo una limpieza regular de los difusores para evitar la disminución del suministro de oxígeno dentro del reactor.

FIGURA 3. 1 SISTEMA DE ALIMENTACIÓN

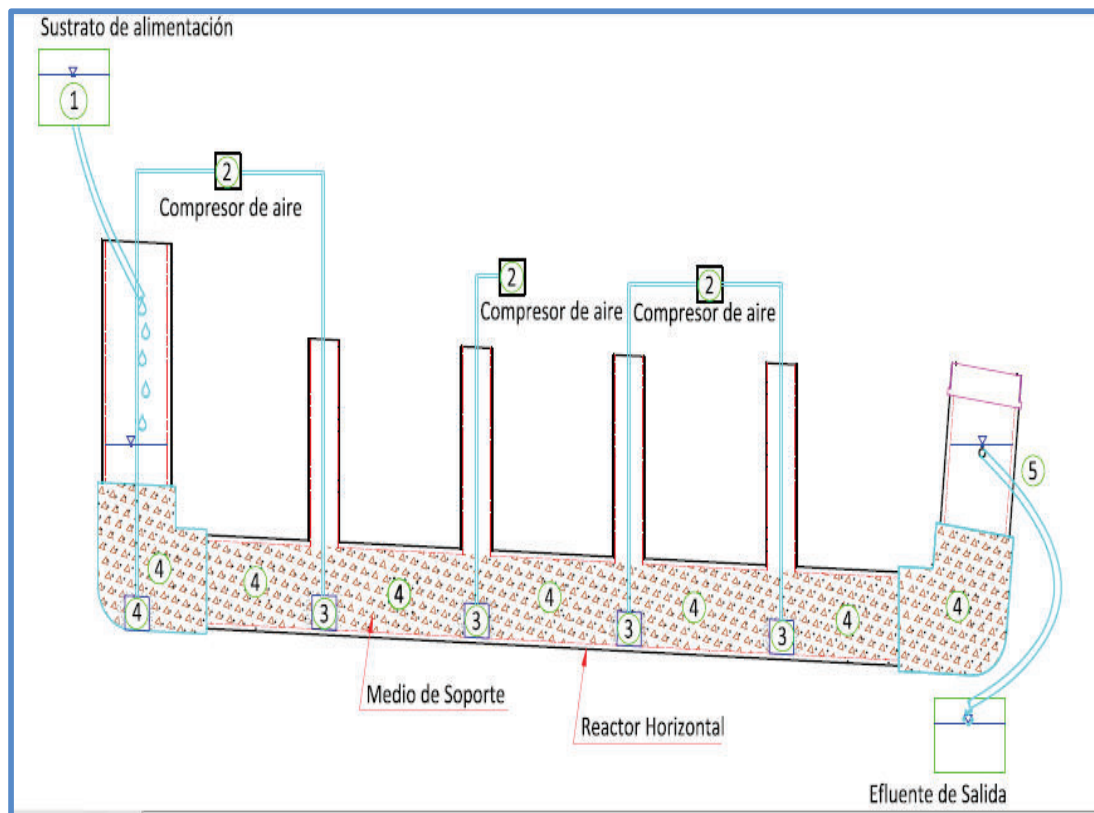


Elaborado por: Jessica Reina

3.1.5 DIMENSIONES DEL REACTOR AEROBIO HORIZONTAL

Se construyó el bioreactor horizontal a escala de laboratorio en las instalaciones del Laboratorio de Hidráulica de la EPN, en base a los parámetros antes calculados. Como se muestra en la Figura 3.2, el sistema está conformado de la siguiente manera y se explica cada uno de sus componentes:

FIGURA 3. 2 ESQUEMA DEL BIOREACTOR HORIZONTAL AEROBIO



Elaborado por: Jessica Reina

El Bioreactor aerobio horizontal constituye toda la zona de las numeraciones (3) (4), construido en tubería PVC (Policloruro de Vinilo), contiene en la parte interna (4) el medio de soporte PET, en forma de techo (^) y los difusores de aire (3) en constante burbujeo, que proviene de los aireadores (2) para asegurar el sistema aerobio, los cuales ingresaron por tubos de escape o salidas; que también sirven para el control de espuma que pueda formarse en alguna etapa del tratamiento,

además del sistema de alimentación (1), donde ingresa el afluente a tratar en diferentes cargas y (5) salida del efluente.

Se forró las mangueras expuestas a la luz solar con papel aluminio y se taparon las entradas y salidas del reactor con tapas oscuras, para así evitar el crecimiento de algas. Además en la instalación se lo inclinó al reactor un 5% (5cm) con respecto de la horizontal, para que el oxígeno pueda circular en todo su interior y se garantice la fase aerobia. En la Figura 3.3 se muestra el reactor aerobio horizontal construido en su totalidad:

FIGURA 3.3 FOTOGRAFÍA DEL BIOREACTOR AEROBIO HORIZONTAL



Elaborado por: Jessica Reina

La Tabla 3.1 presenta los parámetros de construcción y diseño, usadas a escala de laboratorio con los que trabajó el bioreactor aerobio horizontal:

TABLA 3. 1 DESCRIPCIÓN DE LAS DIMENSIONES DEL BIOREACTOR AEROBIO HORIZONTAL

PARÁMETRO	VALOR
Volumen total	2 L
Volumen útil	1,73 L
Diámetro del reactor	58 mm
Largo del reactor	0,75 m
Medio de soporte	PET
Altura de la horizontal	5 cm
Forma y disposición del medio de soporte	Irregular, techo (^)

Elaborado por: Jessica Reina

3.2 ELABORACIÓN DEL SUSTRATO PARA ALIMENTACIÓN AL REACTOR

El sustrato fue elaborado a partir de lactosuero y luego se realizó diluciones conforme a las cargas orgánicas a tratar y para el tiempo de retención determinado. Así se simuló un agua residual, la cual fue tratada dentro del sistema propuesto de tratamiento, en base a los análisis biológicos y físico químicos, se calcularon las eficiencias en cada una de las etapas del proceso, y posterior se estudió la factibilidad de implementación del sistema en función de la remoción de materia orgánica.

En la fase inicial se adicionó bicarbonato de sodio para poder regular el pH en un rango entre 6.5-7.5, para que dentro del reactor se pueda formar una solución tapón o amortiguadora, así el agua no se acidifique y no afecte al funcionamiento de los microorganismos, ya que se debe garantizar el pH en el interior del reactor para que se desarrolle sin inconvenientes el medio biológico, donde lo ideal sería en un rango de 6,5-8.5 (*Romero, 2000*), en las siguientes fases el reactor se convirtió en un buen amortiguador con una alcalinidad de 144 mg/L, donde la acidez del efluente ya no era un inconveniente y empezó a funcionar como una solución tapón de alta tolerancia, manteniendo un pH superior a 8, a la salida, sin

importar el pH del afluente, en las etapas finales.

Teniendo en cuenta aspectos importantes como la concentración de nutrientes presentes en el agua residual en su fase inicial se colocó pequeñas cantidades de nutrientes adicionales, para que las bacterias puedan desarrollarse y lleguen a su nivel máximo de crecimiento, consumiendo una gran cantidad de materia orgánica y posteriormente obtener un agua clara, que cumpla con los parámetros establecidos en la norma, para que pueda ser descargado al alcantarillado o sobre el ambiente y no afecte al entorno.

3.3 MEDIO DE SOPORTE IMPLEMENTADO

El medio de soporte consistió en realizar cortes de material PET (Tereftalato de Polietileno), procedente de botellas plásticas, de forma rectangulares de dimensiones variantes entre 2 cm a 4 cm y 1cm a 2 cm, luego se dió una forma de techo (^) para permitir que las colonias de bacterias se instalen en los pequeños espacios y evitar que se eliminen con el efluente la biopelícula generada. En la Figura 3.4 muestra el medio de soporte implementado:

FIGURA 3.4 FOTOGRAFÍA MATERIAL DE SOPORTE



Elaborado por: Jessica Reina

Se determinó el volumen que ocuparía en el interior del reactor, para el cual se realizó un ensayo en el Laboratorio docente de Ingeniería Ambiental, con un probeta de 1 L, se llenó con los pedazos de plásticos cortados y con la forma mencionada, hasta las 500 ml, y posteriormente se agregó 500 ml de agua, y se obtuvo un volumen final de 580 ml; dando como resultado que los pedazos de plásticos ocuparon un 13,79% y el 86,21% ocupado por el agua. Teniendo como resultado el volumen que ocupa el plástico en el interior del bioreactor aerobio horizontal.

3.4 INOCULACIÓN DEL REACTOR

La inoculación se realizó a partir de agua que contenía colonias de bacterias estabilizadas, denominado inóculo, procedentes del agua residual del río Machangara, se tomó un volumen de 100 [ml] de suero, y se combinó con 1400 [ml] de lodo biológico, con una resiembra de inóculo de 30, 100, 100 [ml], semanalmente, luego de los primeros 21 días de operación, junto con las cargas del sustrato.

3.5 PARÁMETROS DE CONTROL EN EL FUNCIONAMIENTO DEL REACTOR

3.5.1 PARÁMETROS DE CONTROL BIOQUÍMICO

Los análisis para determinar los parámetros químicos que sirvieron para la evaluación del reactor aerobio, se los realizó en las instalaciones de la Escuela Politécnica Nacional, dentro del Laboratorio docente de Ingeniería Ambiental.

Para el estudio se determinó evaluar los siguientes parámetros de control:

3.5.1.1 pH: (POTENCIAL DE HIDRÓGENO)

Es un parámetro de gran importancia debido a que permite la neutralización de ácidos, y su medida afecta de manera directa en el crecimiento bacteriano, debido a su alta sensibilidad, el medio biológico para un buen desarrollo de la biopelícula deber ser constante y mantenerse en un rango entre 6,2 y 7,6, para que no haya inconvenientes en la operación del reactor y evitar la producción de espumas o la muerte de las bacterias.

Para medir el pH en el afluente del agua residual, se realizó con la ayuda de un pH-metro, o con la ayuda de las bandas indicadoras de pH, la operación del reactor fue en un rango de pH entre 6,5 y 7,5. Se usó una base (bicarbonato de sodio) para subir el pH cuando era necesario como se mencionó anteriormente y en el efluente o salida del reactor con una medida en el rango de 7 y 8, formándose una solución tampón con gran capacidad de amortiguamiento, donde luego ya se evitó el uso de la base, disminuyendo costos y recursos, para lograr un mismo fin.

3.5.1.2 DQO (DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO)

El parámetro de DQO sirve para poder determinar la cantidad de materia orgánica e inorgánica, susceptible de ser oxidada por los microorganismos, sin embargo se ha tomado como un parámetro que permite determinar la remoción de materia orgánica debido a que el sustrato o agua residual utilizada posee gran cantidad de material orgánico biodegradable.

Para el análisis de la Demanda Química de Oxígeno se siguió el procedimiento propuesto por el Stándar Methods, APHA 1997, detallado como 5220 Demanda Química de Oxígeno DQO D. Éste método constituye la base del procedimiento propuesto por el manual de procedimientos del espectrofotómetro Hach DR2800 (*Hach, 2007*), descrito como el método 8000, método del reactor de digestión para

rangos bajos y altos de medición. Así para el análisis de utilizaron viales preparados comercialmente de rango alto, es decir entre 20-1500 [mg/L], que sirvieron para determinar la medición de la DQO soluble, es decir la muestra se filtró antes de cada ensayo.

Se siguieron los procedimientos antes mencionados, considerando en el digestor para el análisis, el programa 435 DQO HR (alto rango) y la longitud de onda de trabajo ya determinada de 620 nanómetros. Definiéndose como resultado los mg de O₂ consumidos por litro de muestra.

3.5.1.3 SST (SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES) Y SSV (SÓLIDOS SUSPENDIDOS VOLÁTILES)

Estos parámetros fueron evaluados en la última fase de la experimentación, y al final de la experimentación, con la finalidad de conocer la cantidad de materia orgánica contenida en la biomasa o biopelícula formada.

Para la determinación de los análisis de los sólidos en suspensión totales (SST), se utilizó el método estándar 2540 B, APHA 1992. Para lo cual se colocó en una estufa a una temperatura entre 103 ° C a 105 ° C, durante dos horas, el lodo se obtuvo por gravimetría y con el valor del volumen útil del reactor se obtuvo la concentración de sólidos totales suspendidos. Posteriormente se calcularon los sólidos volátiles en suspensión (SSV), a partir del sólido seco, se calcinaron durante media hora a 550°C, denominado procedimiento de Ignición, SM 2540 E, obteniéndose los sólidos fijos en el filtro y por gravimetría, se determinó los sólidos volátiles en suspensión (SSV), en el volumen útil del tratamiento (*American Public Health Association, 2012*).

3.5.2 PARÁMETROS DE CONTROL HIDRÁULICO

Los parámetros de control hidráulico constituyen la base de funcionamiento del reactor aerobio, que muestra el comportamiento del sistema en cuanto a la cantidad de materia orgánica removida. Así se tiene los siguientes parámetros con los cuales trabajó el reactor durante las etapas de experimentación; Tiempo de Retención Hidráulico (TRH), Carga Orgánica Volumétrica (L_v), Carga Orgánica Superficial (L_s), Superficie específica (S_e), Carga Biológica (X), Relación Y (Biomasa-Carga Orgánica) y Eficiencia de remoción de materia orgánica.

3.5.2.1 TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICO

El tiempo de retención hidráulico, se lo define como el tiempo necesario que se tarda en atravesar el flujo que contiene el sustrato orgánico, desde el inicio del tratamiento hasta el final o hasta la salida del efluente. Se considera al sistema como un reactor flujo pistón, el cual atraviesa en forma de capas verticales, facilitando el contacto con la biopelícula formada en el material de soporte, para obtener una alta remoción de materia orgánica, la cual para el análisis del presente proyecto se la determina o expresa como DQO (Demanda Química de Oxígeno).

Las fórmulas de cálculo dependen del tipo de reactores a implementar, debido a lo expuesto previamente, el reactor analizado fue de flujo pistón ideal (Tchobanoglous G, 1987), para el cual se desarrollará la explicación sobre la ecuación 3.11 que se utilizó.

Asumiendo que la concentración de materia orgánica contenida en el afluente varía a nivel longitudinal en el eje x, la cual cambia en el transcurso del tiempo en cada uno de los tramos, al avanzar el tratamiento se tiene el siguiente balance de masa:

$$\text{Acumulación} = \text{Entrada} - \text{Salida} + \text{Generación}$$

$$\frac{dC_A}{dt} \Delta V = Q C_A x - Q C_A x + \Delta x + r_A \Delta V \quad (3.5)$$

Donde:

C_A : Concentración del sustrato A en la sección de volumen [g/m³]

V : Volumen [m³]

Q : Caudal [m³/s]

r_A : Tasa de reacción del sustrato A [g/m³s]

Dividiendo la ecuación 3.5 para $\Delta V = A \Delta x$ y simplificando se obtiene la ecuación 3.6:

$$\frac{dC_A}{dt} = \frac{Q C_A x - Q C_A x + \Delta x}{A \Delta x} + r_A \quad (3.6)$$

Así tomando el límite cuando $\Delta x \rightarrow 0$, y recordando que la derivada de una función real se define como:

$$\frac{d f (x)}{d x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f (x + \Delta x) - f (x)}{\Delta x} \quad (3.7)$$

Asumiendo además que el caudal Q y el área de la sección transversal A , son constantes, se tiene la siguiente ecuación:

$$\frac{dC_A}{dt} = - \frac{Q}{A} \frac{d C_A}{d x} + r_A \quad (3.8)$$

Se toma la parte positiva del segundo término de la ecuación 3.8, y se obtiene la variación del tiempo de retención hidráulico (θ_H) en el eje x :

$$\frac{Q}{A} \frac{d C_A}{d x} = \frac{d C_A}{d \theta_H} \quad (3.9)$$

Finalmente, se define el tiempo de retención hidráulico como:

$$d \theta_H = \frac{A d x}{Q} \quad (3.10)$$

Dado que se requirió θ_H total, integrando se llegó a la ecuación 3.11, se asume la constante de integración igual a cero.

Así se consideró tres etapas de operación, para cada una con un TRH, los cuales se determinaron en base a los caudales a tratar y a las eficiencias obtenidas de DQO en las etapas previas, mediante la siguiente fórmula:

$$\text{TRH} = \theta_H = \frac{V}{Q} \quad (3.11)$$

Dónde:

TRH: Tiempo de retención hidráulico [día]

V: Volumen [m³]

Q: Caudal [m³/día].

3.5.2.2 CARGA ORGÁNICA VOLUMÉTRICA

La carga orgánica volumétrica (L_V) se define como la carga orgánica que entra al sistema en un tiempo determinado ($Q \cdot S_O$), y en un volumen del sistema depurador, o también expresa la relación entre la concentración contaminante del afluente (S_O), dado en kg DQO/m³, y el tiempo de retención hidráulico (TRH). Es decir matemáticamente podemos expresar a L_V con la siguiente ecuación:

$$L_v = \frac{Q * S_o}{V} = \frac{DQO * Q}{V} = \frac{S_o}{TRH} \quad (3.12)$$

Dónde:

L_v : Carga orgánica volumétrica [$\frac{\text{kg DQO}}{\text{L.día}}$]

S_o : Concentración de DQO o carga orgánica en el afluente [$\frac{\text{mg DQO}}{\text{L}}$]

V : Volumen [m^3]

Q : Caudal [$\frac{\text{m}^3}{\text{día}}$]

TRH : tiempo de retención hidráulico [día]

3.5.2.3 CARGA ORGÁNICA SUPERFICIAL

La carga orgánica superficial (L_s), es un parámetro de diseño físico, indica la cantidad de materia orgánica por día, que ingresa al reactor, la cual va a ponerse en contacto con el área del medio de soporte PET, para lograr su remoción en una mayor área de contacto.

$$L_s = \frac{Q * S_o}{A_{PET}} \quad (3.13)$$

Dónde:

L_s : Carga orgánica superficial [$\text{kg/día} * \text{m}^2$]

S_o : Concentración del sustrato en el afluente [$\text{Kg DQO}/\text{m}^3$]

Q : Caudal del afluente [$\text{m}^3/\text{día}$]

A_{PET} : Área del material de soporte PET [m^2]

3.5.2.4 EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA

La determinación de la eficiencia de remoción de materia orgánica (η), es la base fundamental para la aceptación del sistema de depuración para aguas residuales industriales. Se la define como el porcentaje de materia orgánica que se queda contenida en el interior del reactor biológico, como biomasa formada, como parte del tratamiento, así el efluente o agua de salida se ve reducido o eliminada su carga orgánica dependiendo de la calidad del funcionamiento del reactor.

Su fórmula de obtención se expresa de la siguiente manera:

$$\% \eta_{remoción} = \frac{DQO_{afluente} - DQO_{efluente}}{DQO_{afluente}} * 100 \quad (3.14)$$

Dónde:

η : Eficiencia de remoción de materia orgánica [%]

$DQO_{afluente}$: Cantidad de material orgánica en la entrada [mg/L]

$DQO_{efluente}$: Cantidad de material orgánica en la salida [mg/L].

3.5.2.5 SUPERFICIE ESPECÍFICA (S_e)

La superficie específica (S_e), para el medio de soporte PET, fue calculada en función del área superficial total del PET, y el volumen útil del reactor, así se tiene la siguiente ecuación:

$$S_e = \frac{A_{PET}}{V_{\text{útil}}} \quad (3.15)$$

Dónde:

Se: Superficie específica [m^2/m^3]

A_{PET} : Área total del medio de soporte [m^2]

$V_{\text{útil}}$: Volumen libre por donde atraviesa el efluente [m^3]

3.5.2.6 RELACIÓN Y (BIOMASA-CARGA ORGÁNICA)

La relación Y o también denominada coeficiente de producción de biomasa, es un parámetro cinético que identifica a un agua residual, se define como la cantidad de biomasa que se produce sobre el material de soporte, la cual se la expresa en términos de SSV, por la cantidad de materia orgánica que ingresa al reactor (DQO), así se tiene la siguiente ecuación:

$$Y = \frac{\text{Biomasa (Kg SSV)}}{CO_{\text{TOTAL}} (S_o * Q * TRH)} \quad (3.16)$$

Dónde:

Y: Coeficiente de producción de biomasa

Biomasa: Cantidad de Sólidos Suspendidos Volátiles en el reactor [kg SSV]

CO: Cantidad de sustrato a la entrada del reactor [kg], en el tiempo de tratamiento

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE LABORATORIO

4.2 ARRANQUE Y OPERACIÓN DEL SISTEMA AEROBIO

El arranque del reactor se inició llenándolo totalmente con el medio biológico, es decir con la inoculación del mismo, con 1.5 litros de lodo de efluente de aguas residuales domésticas que contienen bacterias facultativas, proveniente del río Machangara, durante un periodo de 21 [días], realizando una resiembra de 30 ml a los 7 primeros [días], una posterior de 100 ml a los 7 [días] siguientes y finalmente en los 7 [días] restantes una de 100 ml, y a la vez estuvo en constante alimentación con el agua residual (sintética), a razón de 2.8 [ml/min] con el afluente para el acondicionamiento del medio. Luego en la etapa de operación se disminuyó progresivamente el tiempo de retención hidráulico (TRH); inicialmente se lo alimentó con el afluente proveniente del suero lácteo con dilución, a una relación de 1:15, es decir por cada litro de agua se añadió 15 ml de suero lácteo, con un caudal de 5,6 [ml/min]. Teniendo las siguientes condiciones iniciales:

- Tiempo de Retención Hidráulico constante para cada fase de operación ($TRH_1 = 5.14$ [horas]; $TRH_2 = 6.01$ horas]; $TRH_3 = 8.01$ [horas])
- DQO alimentado = rango entre 1000-2100 [mg/L]

Todos los datos enunciados se han tomado en base a las siguientes características:

- Para llegar a la estabilidad de un reactor hay que tener condiciones estables en cuanto a las condiciones de temperatura y el tiempo de retención hidráulico; no

- realizar variantes drásticas en la carga orgánica o cambios bruscos de caudal y no alterar su estabilidad en la fase de arranque del reactor aerobio.
- El tiempo de permanencia del arranque, depende del valor de los parámetros biológicos y químicos. Además el arranque se verá influenciado por las características de las aguas residuales como: composición, concentración, volumen, la adaptación del inóculo, condiciones ambientales, configuración del reactor, y parámetros de operación los cuales están estrechamente relacionados (Noyola, 1994).

4.2 MUESTREO PARA EL CONTROL DE LOS ANÁLISIS QUÍMICOS

En cada una de las etapas de la experimentación se siguió la siguiente metodología:

- Se realizaron diluciones para la obtención del agua residual con concentraciones variantes para poder asemejar a la salida de un efluente procedente de la industria láctea, 1:15, 1:20, 1:25, sin considerar detergentes ni tóxicos.
- Los valores de pH se realizaron directamente in situ, con la ayuda de un pH-metro, marca Thermo Orión modelo 410^a 110 VAC, disponible en el laboratorio docente de Ambiental, tanto en la entrada como en la salida del efluente además se utilizaron las bandas indicadoras de pH para un mayor número de mediciones.
- Para los análisis de la DQO del efluente, se tomaron 10 [ml], y en laboratorio se realizó diluciones con agua destilada a una relación 1:2, para no sobrepasar el límite del valor dado por los viales, y se efectuaron los análisis por duplicado para tener una menor probabilidad de error en el procedimiento del mismo y descartar valores fuera de rango.

4.3 ACONDICIONAMIENTO DEL SUSTRATO

Se adaptó al medio biológico con un solo tipo de alimentación, además de los tiempos de retención antes mencionados para que puedan colonizar y fijarse en el medio de soporte PET, hasta llegar a su estabilización en términos de reducción en la DQO. Para que los microorganismos puedan desarrollarse en el medio se monitoreó los parámetros de pH y temperatura para su óptimo crecimiento.

El pH se logró mantener en un rango de 6.5-7.5, para el óptimo desarrollo de los microorganismos, con la ayuda de la adición de bicarbonato de sodio (NaHCO_3), debido a su gran capacidad de acidificación del agua residual, la cual registraba valores entre 4-5 de pH. Proceso que se realizó durante la primera etapa, debido a que posteriormente llegó a formarse todo el medio biológico en una solución amortiguadora, capaz de neutralizar la acidez sin dificultad.

Un parámetro constante de operación fue la temperatura ambiente, Quito registra valores promedio del medio, entre 15-17 ° C, según los meses entre agosto-noviembre (INAMHI, 2014).

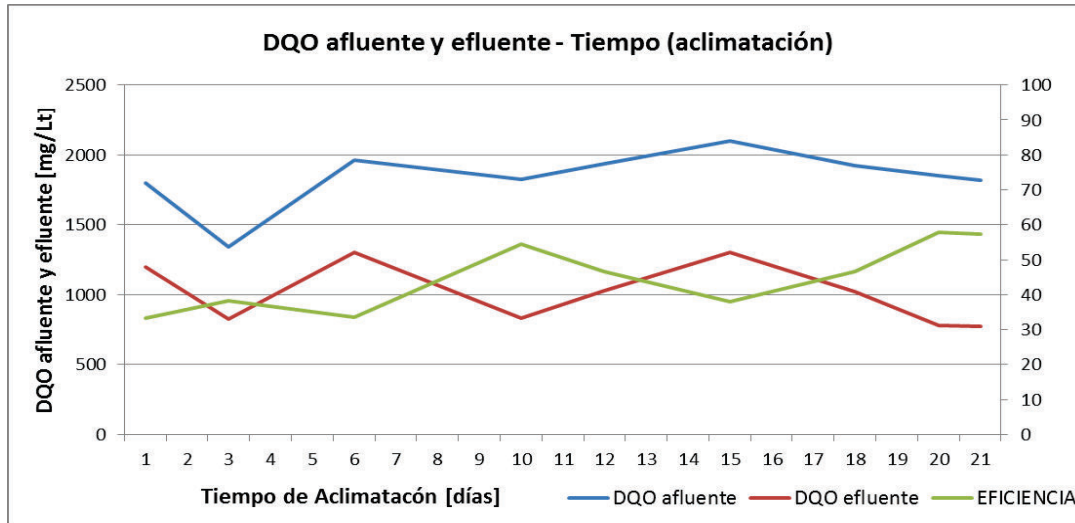
4.4 FUNCIONAMIENTO DEL REACTOR

La experimentación del sistema aerobio horizontal consistió en el arranque o aclimatación 21 [días] y operación del reactor hasta su estabilización, con una duración de 81 [días]. Los cuales se dividieron por etapas, arranque y operación (variación en el TRH), obteniendo parámetros de control en cada una como se muestra en el GRÁFICO 4.1:

➤ **ETAPA DE ARRANQUE** (Etapa I), se realizó la inoculación y alimentación para el acondicionamiento de los microorganismos que reducirán y removerán la cantidad de materia orgánica, con concentraciones de DQO del afluente de hasta 2100 [mg/L], con parámetros constantes del TRH de 10,3 [horas] y un caudal de 2,8 [ml/min], durante un periodo de 21 [días], como se mencionó anteriormente,

hasta la estabilización del reactor horizontal aerobio, como se muestra en el GRÁFICO 4.1, para luego empezar a obtener los parámetros de funcionamiento en la etapa II de operación.

GRÁFICO 4.1 RELACIÓN DQO AFLUENTE-DQO EFLUENTE ETAPA I (ARRANQUE O ACLIMATACIÓN)



Elaborado por: Jessica Reina

➤ **ETAPA DE OPERACIÓN** (Etapa II), se monitoreó el parámetro de remoción de materia orgánica, de mayor amplitud y exacta determinación. Por el cual se enfocó en analizar la Demanda Química de Oxígeno (DQO), con concentraciones variables de materia orgánica, dividiéndolos en tres periodos de acuerdo a cada tiempo de retención hidráulico calculado (TRH), cuyos valores de DQO mantuvieron un rango variable, pero con un caudal constante calculado para cada periodo o fase como lo muestra el GRÁFICO 4.1.

Luego tomando valores promedio en cada una de las fases de funcionamiento, se determinó los valores de los parámetros de operación del sistema de tratamiento horizontal aerobio, obteniéndose los resultados que se encuentran en la Tabla 4.1:

TABLA 4. 1 PARÁMETROS DE CONTROL EN LA ETAPA DE OPERACIÓN

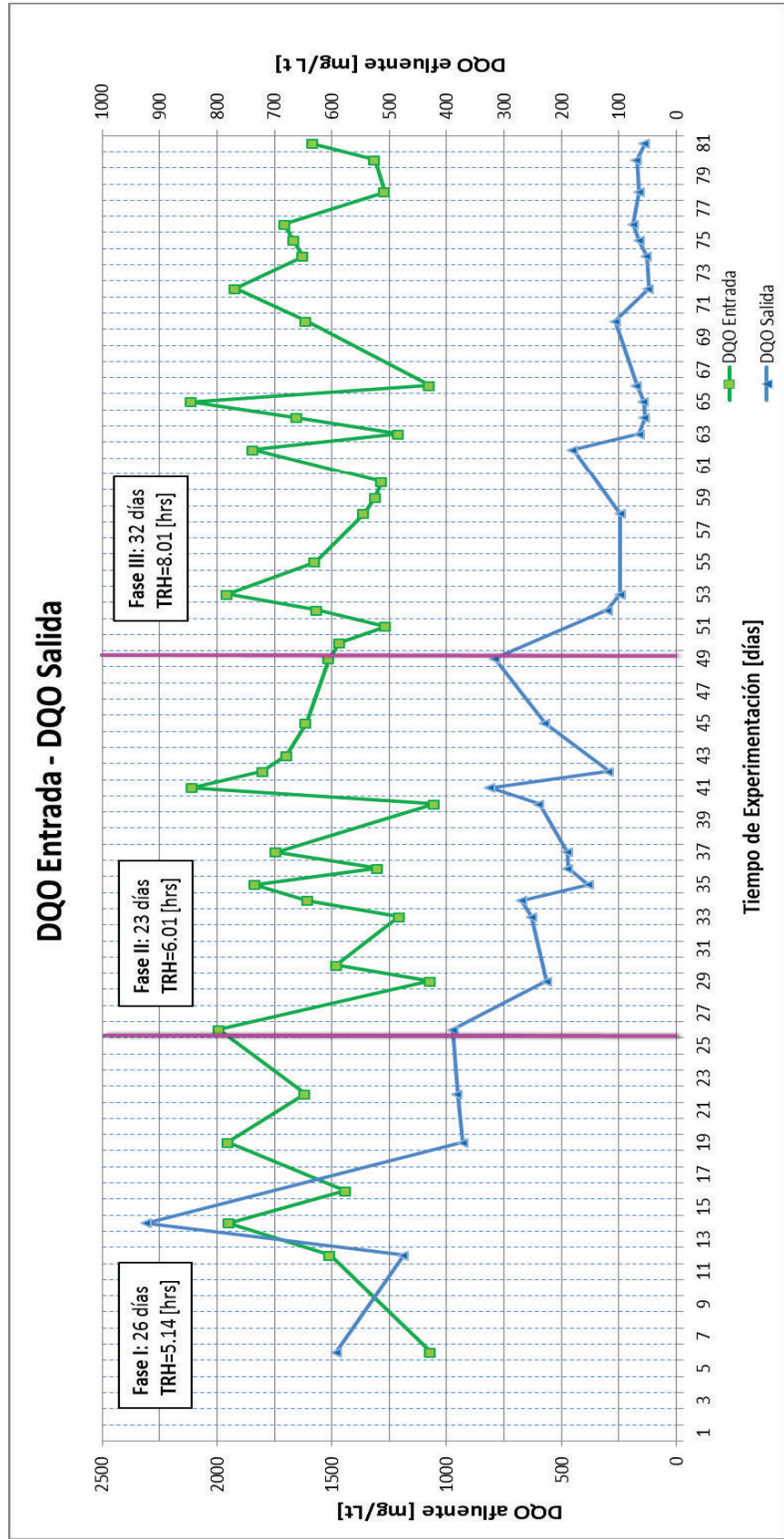
TRH(horas)	CARGA VOLUMÉTRICA AFLUENTE [Kg/día*m ³]	CARGA ORGÁNICA SUPERFICIAL [Kg/día*m ²]	FACTOR DE CARGA (F/M)	EFICIENCIA (%)
5,14	7,28	0,0119	0,7	67.2
6,01	6,16	0,00952	0,5	85
8,01	4,61	0,00713	0,4	94

Elaborado por: Jessica Reina

Los factores de carga (F/M), que se muestran en la Tabla 4.1, expresan la relación entre la carga orgánica que entra al sistema y la cantidad de microorganismos que se encuentran en el interior del reactor, indicando que el tratamiento es un sistema de lodos activados convencionales (0.5 d^{-1} - 0.8 d^{-1}). Los valores expresados en función de la DQO varían entre 0.2 d^{-1} y 0.9 d^{-1} , valores de F/M menores de $0.2 \text{ [Kg DQO/Kg SSV. día]}$, indican un sistema microbiológico limitado por el sustrato, mientras que valores de F/M mayores de $0.6 \text{ [Kg DQO/Kg SSV. día]}$, indican un sistema con exceso de alimento, en relación con la biomasa existente (Oliviera et. Al. 2001).

Con los datos obtenidos en la etapa de operación para cada tiempo de retención, se pudo realizar los cálculos para la obtención del coeficiente de transferencia másica (k), que será una base sobre los parámetros de diseño, dependiendo de la necesidad de la empresa o industria, y que están expresados en el capítulo V.

GRÁFICO 4. 2 RELACIÓN DQO AFLUENTE-DQO EFLUENTE (ETAPA DE OPERACIÓN)



Elaborado por: Jessica Reina

4.4.1 CARACTERÍSTICAS EN EL FUNCIONAMIENTO DEL REACTOR

El reactor biológico horizontal aerobio presentó características durante el arranque y operación del mismo. Así se tiene a continuación un detalle en cada etapa de su funcionamiento:

4.4.1.1 ARRANQUE O ACONDICIONAMIENTO (ETAPA I)

El tiempo de arranque tuvo un periodo de 21 días en el cual se monitoreó, realizando las siguientes actividades;

- Inoculación, se añadió un carga de inóculo (lodo biológico), y se alimentó al reactor diariamente a gravedad con un caudal constante de 2,8 [ml/min].
- Se realizó resiembras de inóculo semanalmente después de la primera semana, debido a su buena respuesta de tratamiento del agua residual de 30, 100, 100 [ml] respectivamente.
- Se trabajó con un tiempo de retención constante hasta la siguiente etapa cuyo valor fue de 10.3 [horas].
- Las concentraciones de DQO fueron variadas con rango entre 1000-2100 [mg/L], para que la estabilización de los microorganismos se adapten de forma inmediata y progresiva al sustrato con suero de leche.
- Se inyectó aireación con la ayuda de aireadores eléctricos, en las zonas más próximas de la entrada del reactor, teniendo valores entre 1,3 [mg O₂/L] a 1,5 [mg O₂/L] y en la salida, valores entre 2,5 [mg O₂/L] a 2,9 [mg/L], mostrando así la existencia de una alta actividad biológica al inicio del tratamiento.

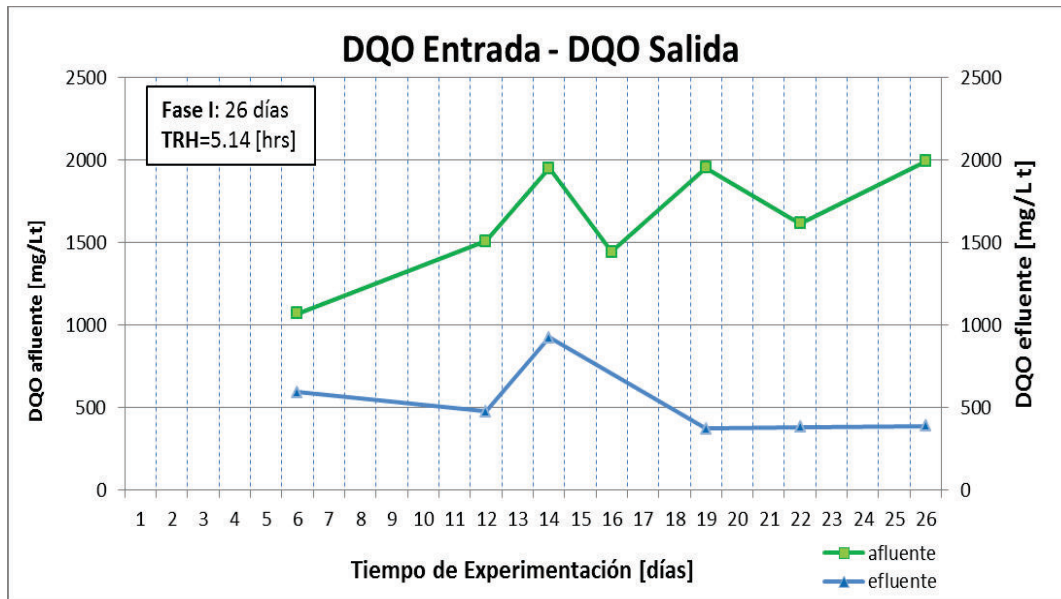
- El pH se mantuvo en un rango de 6 a 7, para lo cual se añadió una base débil como es el hidróxido de sodio (NaOH), así en cada carga del sustrato se adicionó 15 [ml] de base al 5% y posteriormente solución de bicarbonato de sodio (NaHCO₃), ya que el agua residual presentaba valores entre 4 a 5, logrando el aumento progresivo del pH.

4.4.1.2 OPERACIÓN DEL BIOREACTOR (ETAPA II)

Una vez transcurrido la etapa de aclimatación, se procedió a la etapa de operación o funcionamiento para la evaluación del tratamiento, la cual se la dividió en 3 fases para la obtención de datos y poder realizar cálculos numéricos para la obtención de la constante cinética de remoción de materia orgánica (k), efectuando cargas de alimentación diariamente y evaluando las eficiencias de remoción en cada una de ellas hasta llegar a su estabilización, así se tiene explícitamente cada una de ellas:

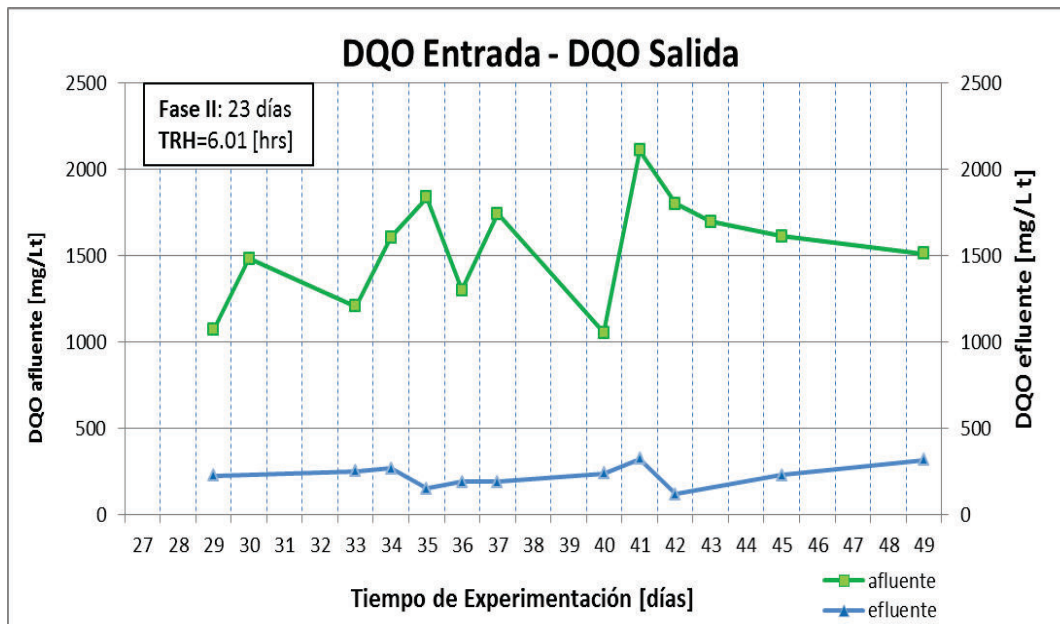
- **FASE I:** se llevó a cabo en un periodo de 26 [días], con un control diario, y con un caudal constante de inicio de 5,6 [ml/min], GRÁFICO 4. 3.
- **FASE II:** se llevó a cabo en un periodo de 23 [días], con un control diario, y con un caudal constante de 4,8 [ml/min], GRÁFICO 4. 4.
- **FASE III:** se llevó a cabo en un periodo de 32 [días], con un control diario, y con un caudal constante de 3,6 [ml/min], GRÁFICO 4. 5.

GRÁFICO 4. 3. RELACIÓN DQO AFLUENTE-DQO EFLUENTE (FASE I)

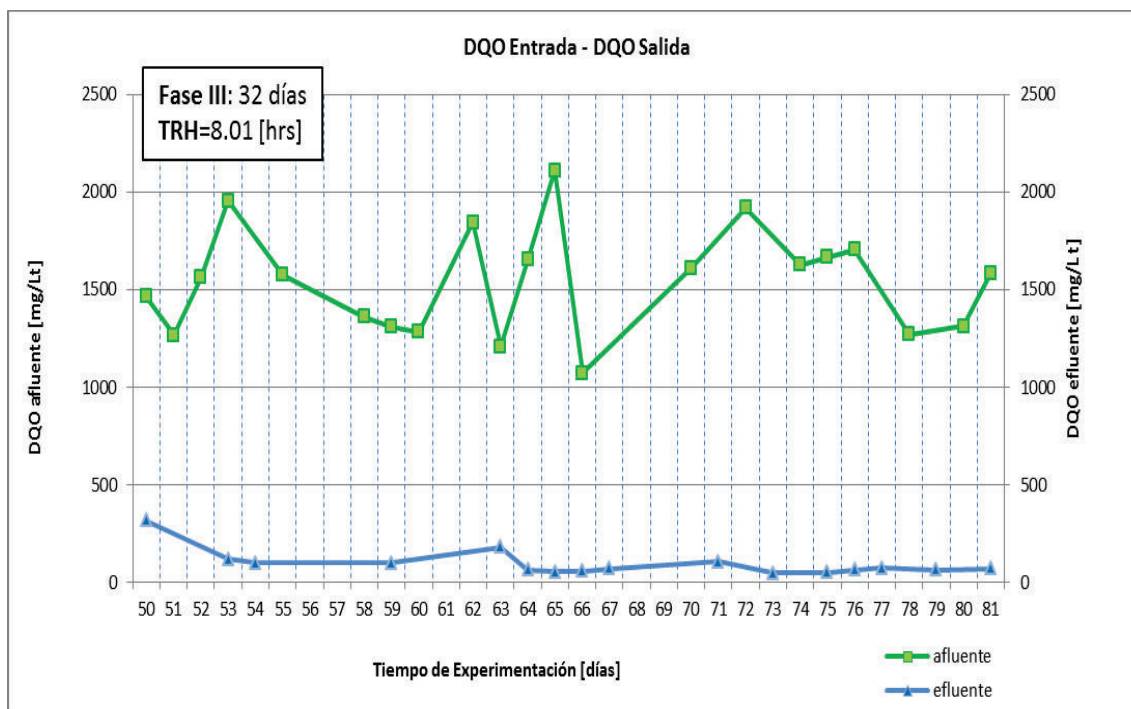


Elaborado por: Jessica Reina

GRÁFICO 4. 4. RELACIÓN DQO AFLUENTE-DQO EFLUENTE (FASEII)



Elaborado por: Jessica Reina

GRÁFICO 4.5 RELACIÓN DQO AFLUENTE-DQO EFLUENTE (FASE III)

Elaborado por: Jessica Reina

4.5 ANÁLISIS DEL CRECIMIENTO DE LA BIOMASA

La biomasa se la empezó a analizar cuando el reactor biológico horizontal en su zona de salida presentó gran sedimentación y empezó a taponarse, hecho que ocurrió en el día (44) de la experimentación y se realizó drenaje posterior de lodos dando un valor de 10.3 [g].

Terminada la etapa de operación se analizó el lodo biológico o biopelícula formada en el interior del material de soporte, para lo cual se procedió a abrir el reactor aerobio biológico horizontal, para realizar su cuantificación. Obteniendo un valor de 25 [g]; teniendo un total de lodos durante la experimentación de 35.3 [g]. Así en la Figura 4.1, se muestra la biopelícula formada entre el material PET.

FIGURA 4.1 BIOPELICULA FORMADA DENTRO DEL REACTOR AEROBIO HORIZONTAL JUNTO AL MEDIO DE SOPORTE PET

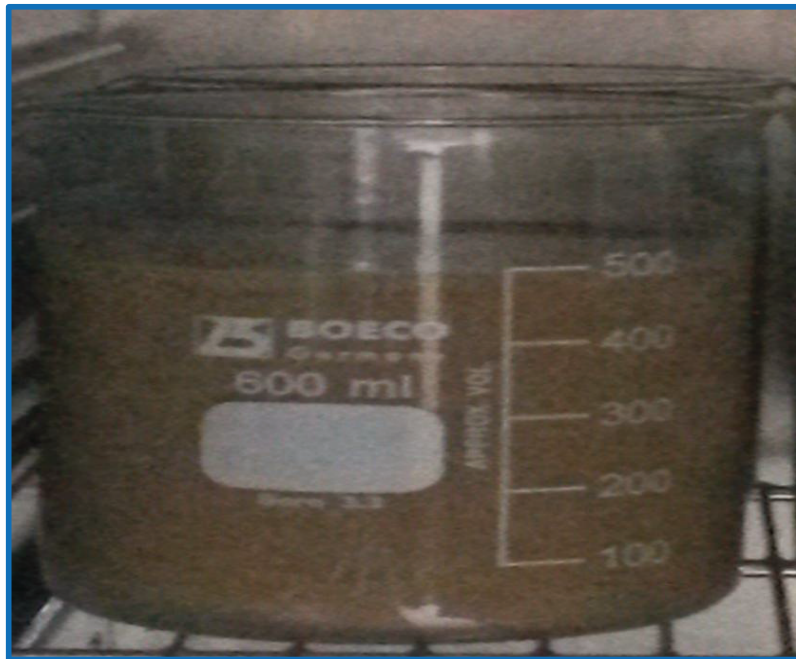


Elaborado por: Jessica Reina

Una vez desarmado se obtuvo el lodo biológico, mediante un lavado con agua destilada para no alterar los resultados y poder desprender la biopelícula, la cual posteriormente se la hizo sedimentar durante dos días, manteniéndola en refrigeración y retirando el agua en exceso, hasta que no presentó una diferencia de fase entre el agua y la biopelícula. Obteniéndose un volumen final de 1,8 [L] el cual fue la muestra total para la realización del análisis de la biomasa generada.

Los parámetros analizados fueron Sólidos en Suspensión Totales (SST) y Sólidos en Suspensión Volátiles (SSV), con los procedimientos mencionados anteriormente, con una modificación en el tiempo de evaporación, aproximadamente 2 [días], hasta su secado total como se muestra en las Figuras 4.2 y 4.3:

FIGURA 4.2 MUESTRA DEL LODO BIOLÓGICO EN LA ESTUFA (105°C)



Elaborado por: Jessica Reina

FIGURA 4.3 MUESTRA SECA



Elaborado por: Jessica Reina

El resultado de los análisis que fueron realizados en el laboratorio docente de ambiental se muestra en la Tabla 4.2:

TABLA 4. 2 RESULTADOS DE SÓLIDOS TOTALES Y SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN VOLÁTILES

Sólidos en Suspensión Totales (SST)	25 (g)
Sólidos en Suspensión Volátiles (SSV)	20,13 (g)

Elaborado por: Jessica Reina

Los sólidos en suspensión volátiles es un parámetro que se relaciona con la cantidad de biomasa presente, además da una referencia de que el sistema operó con alta eficiencia de remoción de materia orgánica.

La concentración de los Sólidos en Suspensión Volátiles (SSV), se obtuvo a partir de la ecuación 4.1. Con el valor de los SSV de la Tabla 4.2, y con el volumen útil de 1.73 [L], se obtiene la concentración de biomasa en el reactor aerobio horizontal:

$$X = \frac{SSV}{V_{\text{útil}}} \quad (4.1)$$

$$X = 11560 \frac{mg}{L}.$$

Los valores determinados serán empleados en la determinación del parámetro o relación Y (Biomasa vs. Carga orgánica).

CAPÍTULO V

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA EN FUNCIÓN DE MEDIDAS DE DQO Y LA CARGA ORGÁNICA VOLUMÉTRICA.

Para la presente investigación se empezó a monitorear, desde la etapa de aclimatación, llegando a su estabilización del reactor aerobio horizontal, obteniendo una eficiencia de remoción de materia orgánica del 45%, luego de la aclimatación se cambió el tiempo de retención para cada una de las fases, de la etapa de operación o funcionamiento, monitoreando constantemente en cada una de ellas. Los GRÁFICOS 5.1 (a), (b), (c), muestran el comportamiento del sistema de tratamiento en cada una de sus fases, donde se observa la fluctuación de la carga orgánica volumétrica (L_v), alcanzando sus máximas eficiencias como se describen a continuación:

5.1.1 FASE I (OPERACIÓN)

En la fase I de operación se trabajó con un tiempo de retención (TRH) de 5.14 (horas), caudal constante ($Q_1=0.0081[m^3/día]$), y con carga orgánica volumétrica (L_v) entre 5 $[Kg/día * m^3]$ a 9.4 $[Kg/día * m^3]$, cuya fluctuación refleja en la realidad un contenido no constante de sustrato en las aguas residuales, es decir con un promedio de L_v de 7.68 $[Kg/día * m^3]$, en un periodo de 23 (días). Teniendo como resultado eficiencias entre 45 % a 81%, con un promedio del 67.2%, como se muestra en el GRÁFICO 5.1 (a).

5.1.2 FASE II (OPERACIÓN)

Posteriormente en la fase II de operación se aumentó el tiempo de retención (TRH) a 6.01 (horas), por ende se empezó a trabajar con un caudal constante ($Q_2=0.0069$ [$\text{m}^3/\text{día}$]), y con carga orgánica volumétrica (L_v) entre 4.2 [$\text{Kg}/\text{día} * \text{m}^3$] a 8.4 [$\text{Kg}/\text{día} * \text{m}^3$], con un promedio de L_v de 6.19 [$\text{Kg}/\text{día} * \text{m}^3$], en un periodo adicional de 26 (días). Teniendo como resultado eficiencias entre 77 % a 91%, con un promedio del 85%, como se muestra en el GRÁFICO 5.1 (b).

5.1.3 FASE III (OPERACIÓN)

En la fase III de operación finalmente se aumentó el tiempo de retención (TRH) a 8.01 (horas), donde el caudal disminuyó, funcionando así con un caudal constante ($Q_3=0.005154$ [$\text{m}^3/\text{día}$]), y con carga orgánica volumétrica (L_v) entre 3.22 [$\text{Kg}/\text{día} * \text{m}^3$] a 6.3 [$\text{Kg}/\text{día} * \text{m}^3$], con un promedio de L_v de 4.61 [$\text{Kg}/\text{día} * \text{m}^3$], en un periodo adicional de 32 (días). Teniendo como resultado eficiencias entre 80 % a 98%, con un promedio del 94.5%, como se muestra en el GRÁFICO 5.1 (c).

Así para el día (49), muestra una eficiencia de remoción de materia orgánica del 80%, trabajando con una carga orgánica L_v de 4.5 [$\text{Kg}/\text{día} * \text{m}^3$] y para el día (80), se obtuvo una eficiencia de remoción de materia orgánica de 94.5% con un L_v de 3.4 [$\text{Kg}/\text{día} * \text{m}^3$].

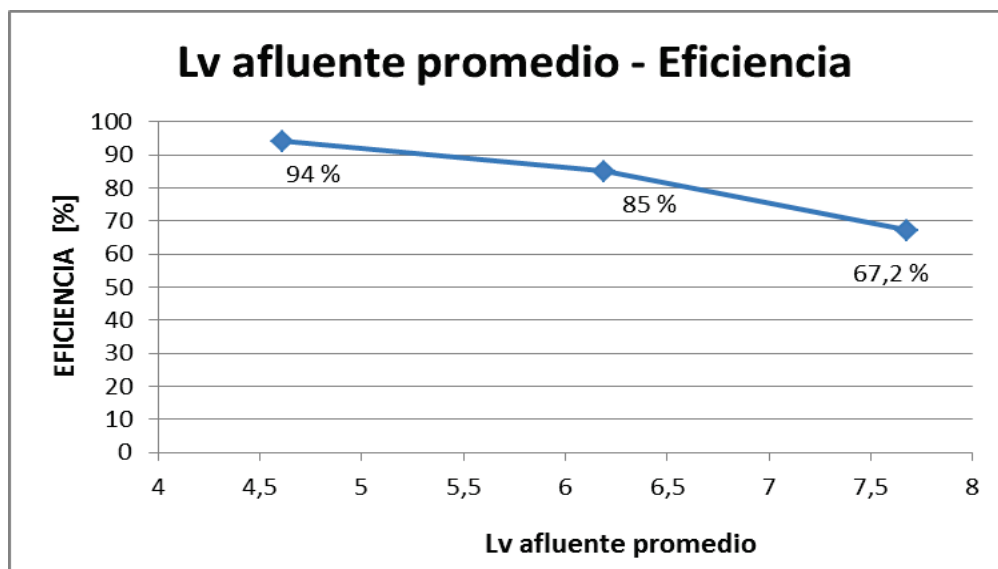
Obteniendo una máxima remoción de materia orgánica del 97.3%, al día (65), con una carga orgánica volumétrica $L_v= 9.85$ [$\text{Kg}/\text{día} * \text{m}^3$].

Así las GRÁFICAS 5.1 (a), (b), (c); muestran en promedio cada una de las fases de operación, indicando como al disminuir la carga orgánica volumétrica (L_v), la eficiencia aumenta, trabajando con valores variables de DQO a la entrada del reactor horizontal, en cada una de las etapas o fases de operación. Las fases fueron cambiadas cuando se llegó a la estabilización del reactor en función de la eficiencia de remoción de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), aumentando

el tiempo de retención.

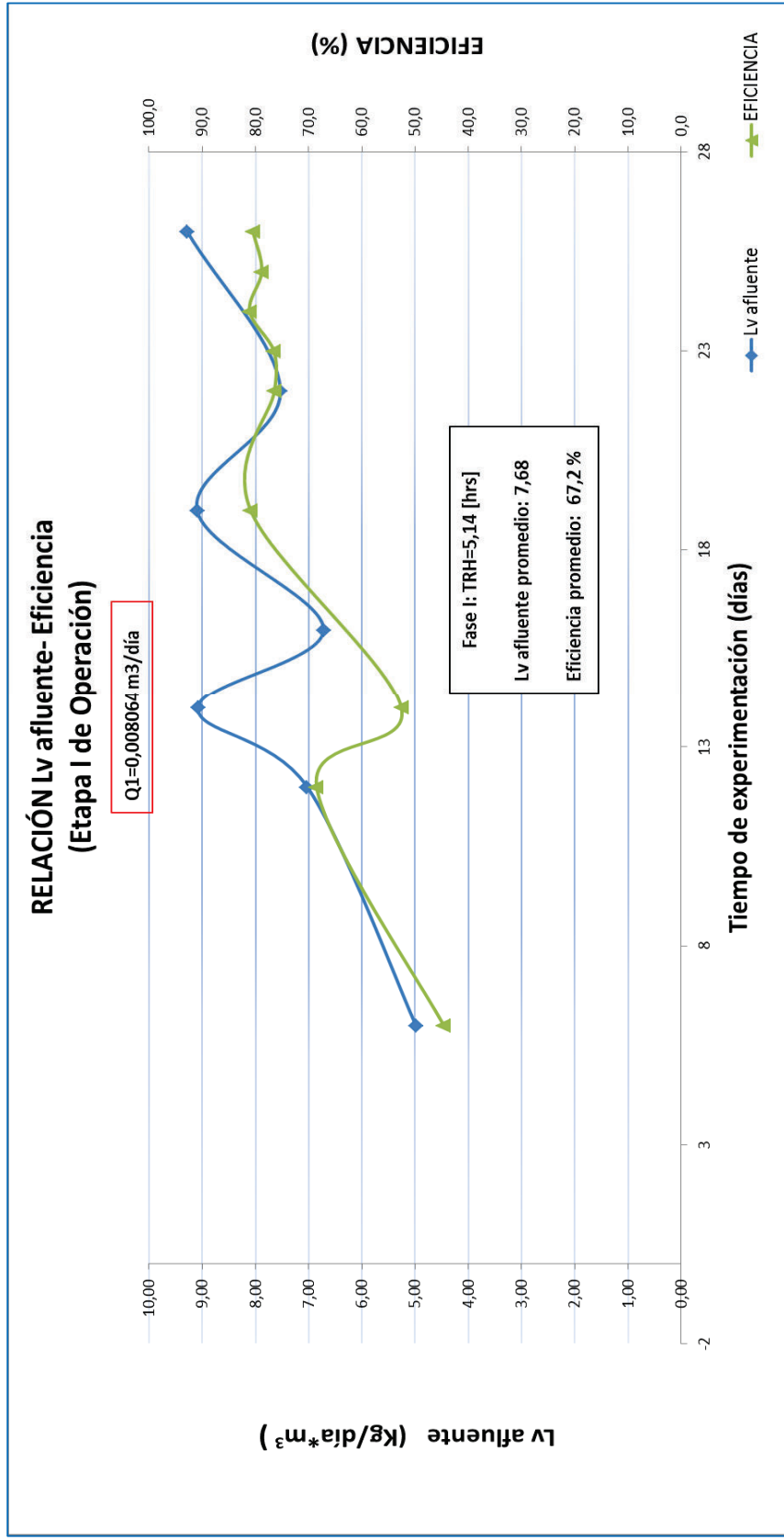
En el GRÁFICO 5.1, se presenta los valores promedio de la carga orgánica volumétrica (Lv), con la que operó el reactor en cada una de las fases y sus eficiencias en promedio alcanzada, teniendo así una relación inversa, entre la Lv y la eficiencia.

GRÁFICO 5.1 RELACIÓN Lv AFLUENTE – EFICIENCIA (OPERACIÓN)



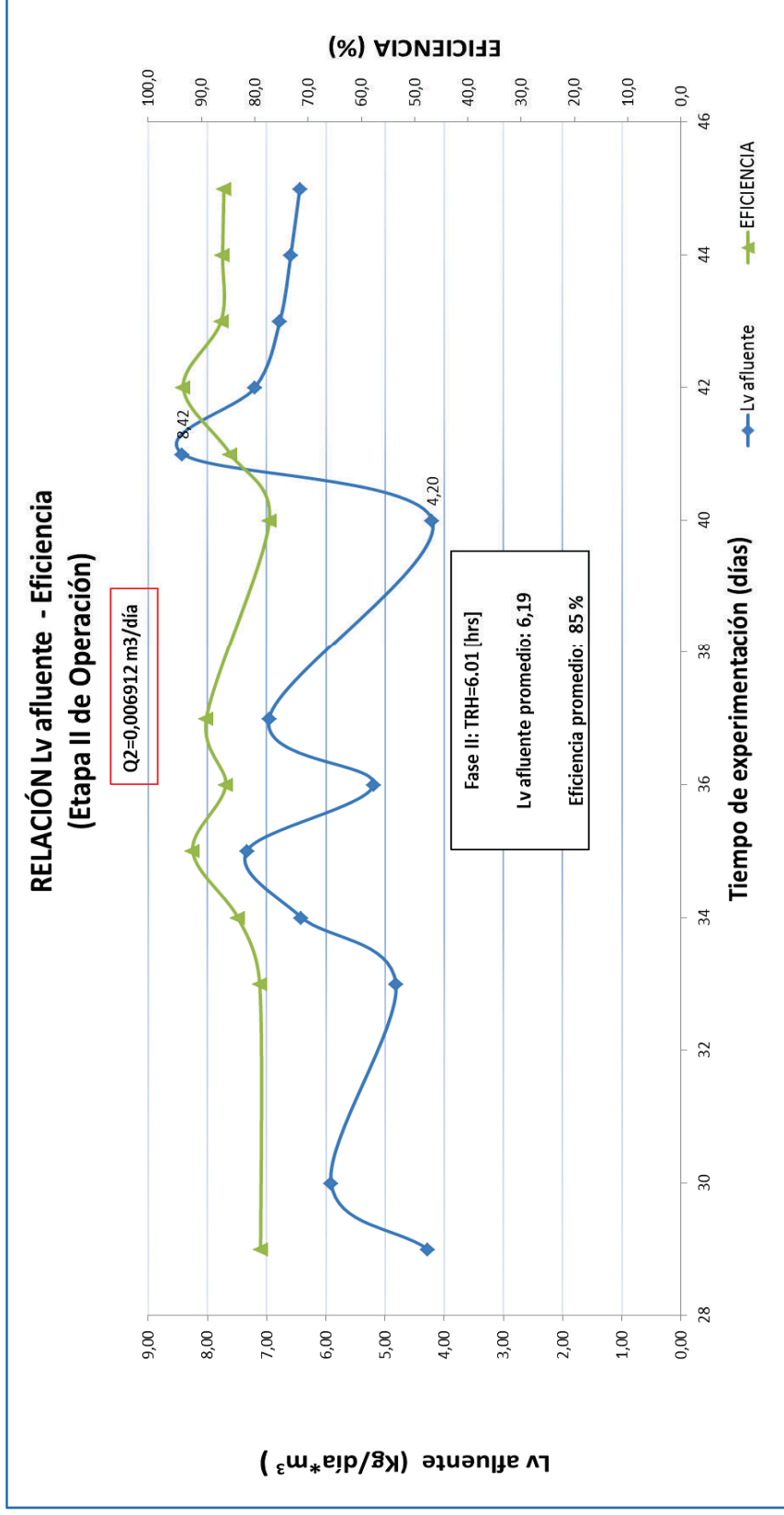
Elaborado por: Jessica Reina

GRÁFICO 5.1 (a) RELACIÓN Lv AFLUENTE – EFICIENCIA (FASE I DE OPERACIÓN)



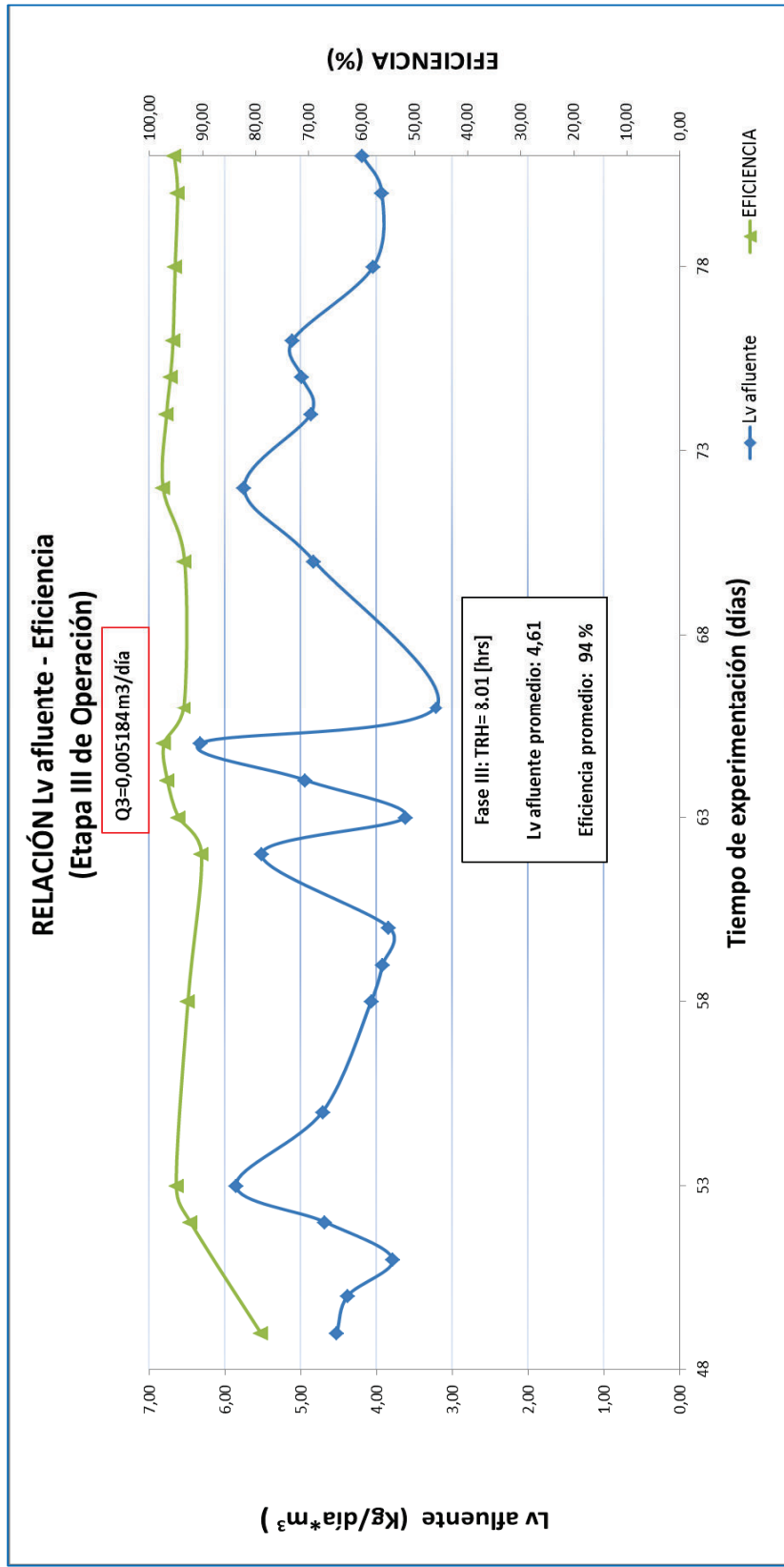
Elaborado por: Jessica Reina

GRÁFICO 5.1 (b) RELACIÓN Lv AFLUENTE – EFICIENCIA (FASE II DE OPERACIÓN)



Elaborado por: Jessica Reina

GRÁFICO 5.1 (c) RELACIÓN Lv AFLUENTE – EFICIENCIA (FASE III DE OPERACIÓN)



Elaborado por: Jessica Reina

5.2 CARGA ORGÁNICA SUPERFICIAL (L_s)

La carga orgánica superficial (L_s), se la determinó al igual que (L_v), para cada una de las fases en promedio con las que funcionó el reactor, y a las condiciones de operación presentadas en el Capítulo IV, Tabla 4.1.

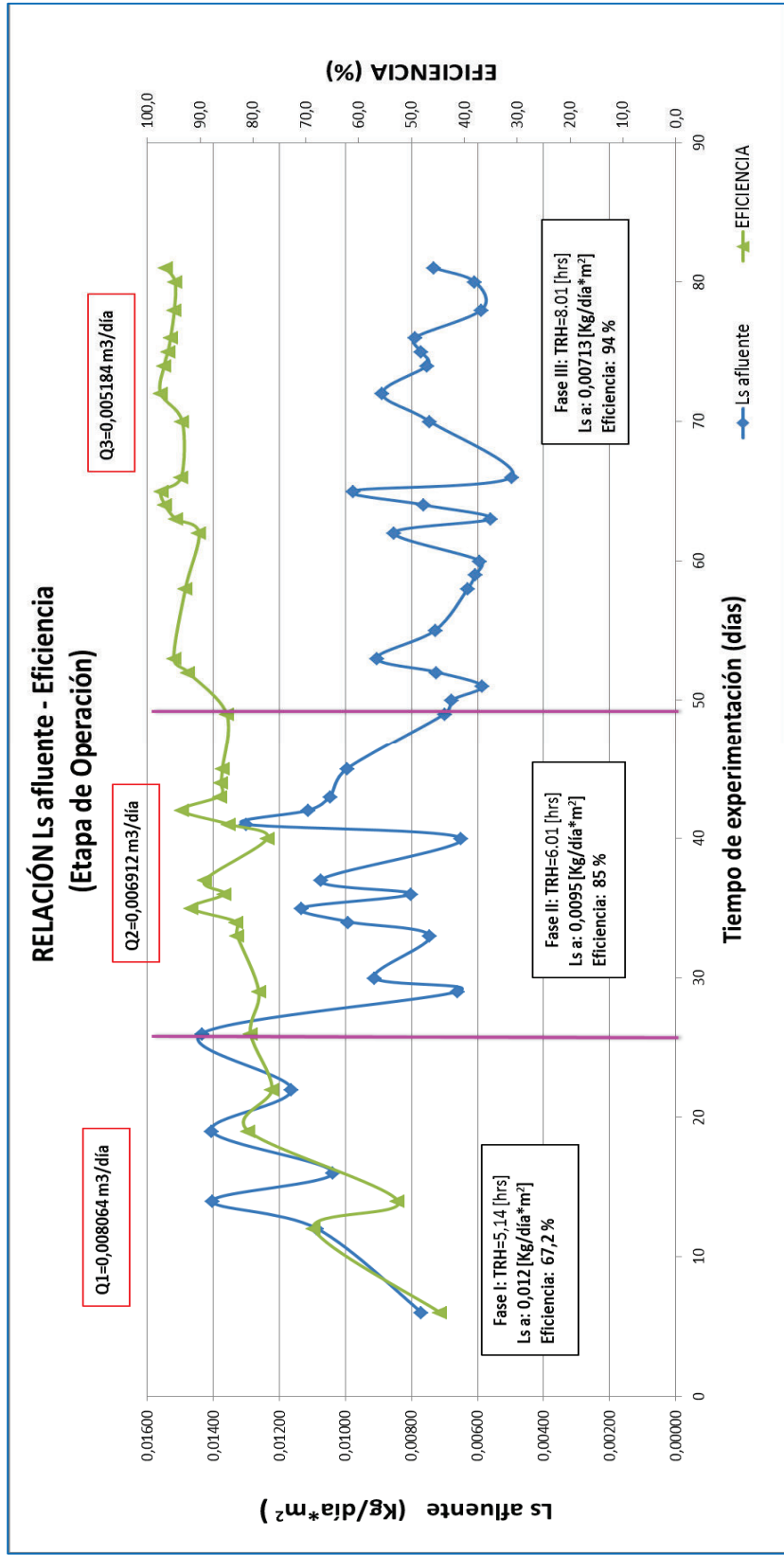
Como se mencionó en la sección 2.6, el material de soporte o plástico PET fue de forma laminar y se obtuvo el área antes de ser cortados, cuyo valor es de 1.12 m^2 .

Para el cálculo de la carga orgánica superficial del medio PET (L_s), se empleó la ecuación (3.7) de la sección 3.5.2.3. Es un parámetro de diseño, cuyo valor representa la carga orgánica que ingresa al reactor biológico horizontal en un tiempo determinado, dividido para el área o superficie de contacto del medio de soporte, donde se formará la biopelícula. Los valores obtenidos se representan en GRÁFICO 5.2. En el (Anexo No. 3) se muestran los valores para su determinación.

En la fase I se observan los valores de la carga orgánica superficial, más altos entre $0.008 \text{ [Kg/día * m}^2\text{]}$ y $0.015 \text{ [Kg/día * m}^2\text{]}$, teniendo valores de eficiencia entre 45% al 81%. En la fase II se observan los valores de la carga orgánica superficial, que disminuyen, con valores entre $0.0066 \text{ [Kg/día * m}^2\text{]}$ y $0.012 \text{ [Kg/día * m}^2\text{]}$, teniendo valores de eficiencia entre 77% al 91%. En la fase III se observan los valores de la carga orgánica superficial, más bajos entre $0.0066 \text{ [Kg/día * m}^2\text{]}$ y $0.007 \text{ [Kg/día * m}^2\text{]}$, teniendo valores de eficiencia entre 80% al 95%.

Así en resumen, el GRÁFICO 5.2 muestra, que a medida que la carga orgánica superficial disminuye, la eficiencia aumenta, hasta llegar a su estabilización, y poder obtener un promedio del parámetro de diseño (L_s), para cada tiempo de retención hidráulico (TRH).

GRÁFICO 5. 2 RELACIÓN Ls AFLUENTE – EFICIENCIA (EN LAS TRES FASES DE OPERACIÓN)



Elaborado por: Jessica Reina

5.3 DQO DEL AFLUENTE Y DQO DEL EFLUENTE

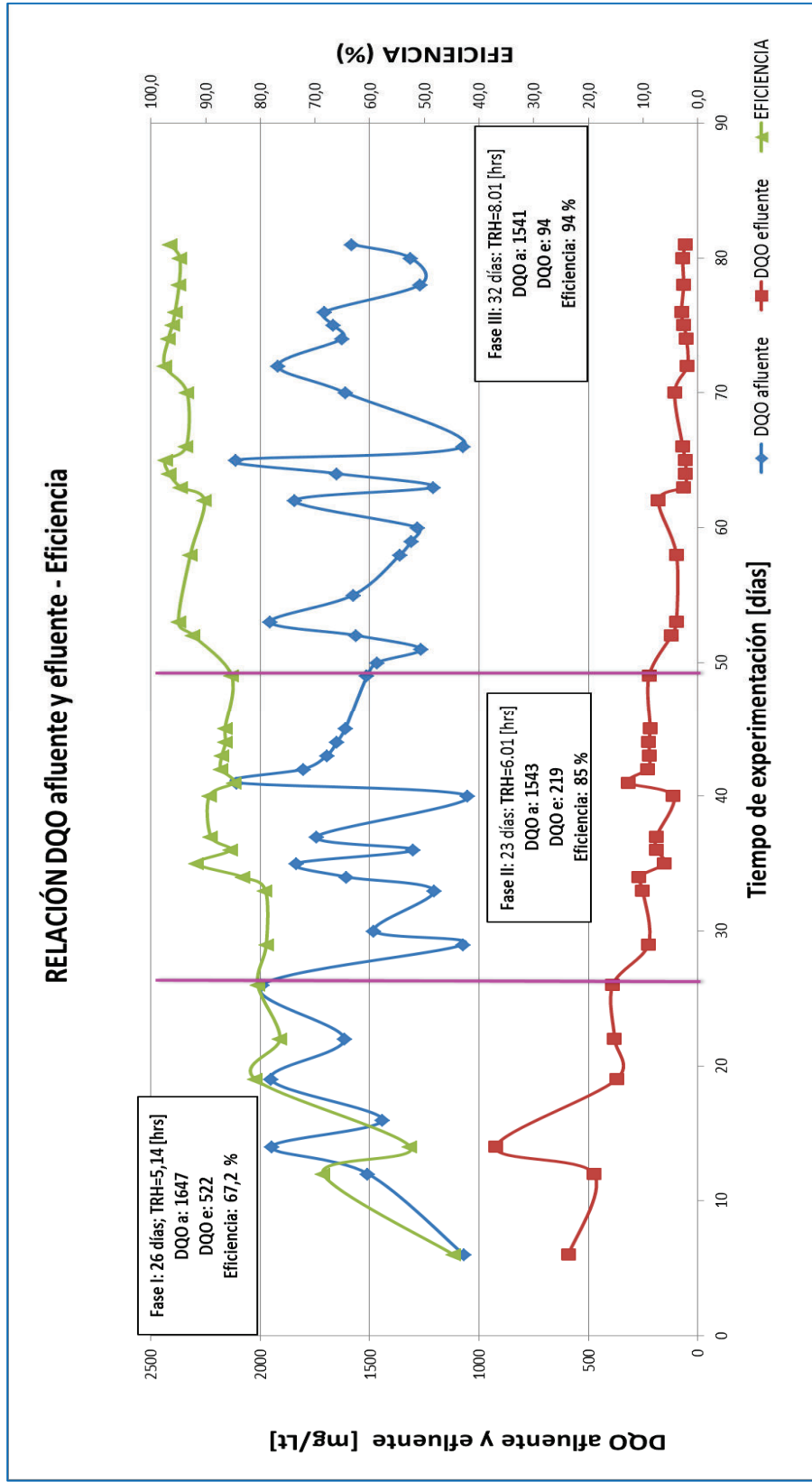
Cómo se mencionó en la sección 4.2, se realizó diferentes diluciones para cada etapa de funcionamiento 1:15, 1:20, 1:25, respectivamente, para la simulación de un agua residual real procedente de las industrias artesanales de queso. Teniendo el GRÁFICO 5.3, donde se muestra las fluctuaciones de la DQO del afluente y del efluente, hasta llegar a la estabilización en cada una de las fases y poder trabajar con los valores promedios, para posteriormente poder determinar el modelo cinético en base a las tres fases de funcionamiento, para las cuales se varió el tiempo de retención (TRH).

En la fase I: se registró valores promedios de DQO afluente de 1647 [mg/L], y de DQO efluente de 522 [mg/L], obteniendo una eficiencia promedio de remoción de materia orgánica del 67.2%.

En la fase II: se registró valores promedios de DQO afluente de 1543 [mg/L], y de DQO efluente de 219 [mg/L], obteniendo una eficiencia promedio de remoción de materia orgánica del 85%.

En la fase III: se registró valores promedios de DQO afluente de 1541 [mg/L], y de DQO efluente de 94 [mg/L], obteniendo una eficiencia promedio de remoción de materia orgánica del 94.5%.

GRÁFICO 5.3 RELACIÓN DQO AFLUENTE Y EFLUENTE – EFICIENCIA (EN LAS TRES FASES DE OPERACIÓN)



Elaborado por: Jessica Reina

5.4 TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICO

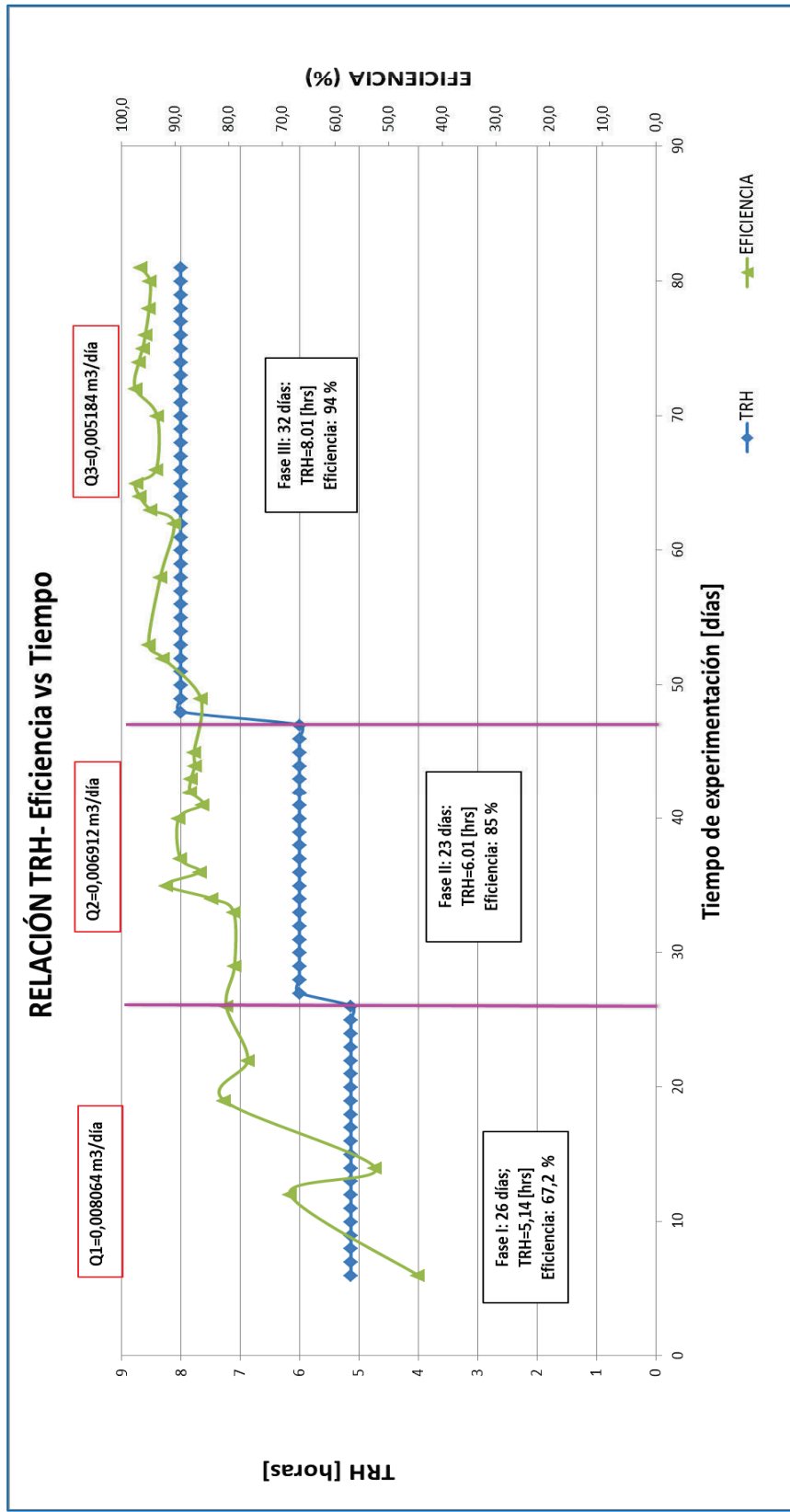
El tiempo de retención hidráulico (TRH), fué un parámetro constante en cada una de las etapas de operación, obteniéndose un caudal (Q), diferente para cada etapa, cómo se muestra en el GRÁFICO 5.4. En el cual se observa que a medida que se aumenta el (TRH), la eficiencia aumenta, hasta llegar a su estabilización y lograr la máxima eficiencia del reactor horizontal aerobio.

En la fase I: con el TRH=5.14 [horas], caudal $Q_1=0.008064$ [m³/día] y operando por un periodo de 26 (días), se obtuvo una eficiencia en promedio de 67.2%.

En la fase II: con el TRH=6.01 [horas], se caudal $Q_2=0.006912$ [m³/día] y operando por un periodo de 23 (días), se obtuvo una eficiencia en promedio de 85%.

En la fase III: con el TRH=8.01 [horas], se caudal $Q_3=0.005184$ [m³/día] y operando por un periodo de 32 (días), hasta alcanzar su estabilización y máxima eficiencia, se obtuvo un valor promedio de 94.5%.

GRÁFICO 5. 4 RELACIÓN TRH – EFICIENCIA (EN LAS TRES FASES DE OPERACIÓN)



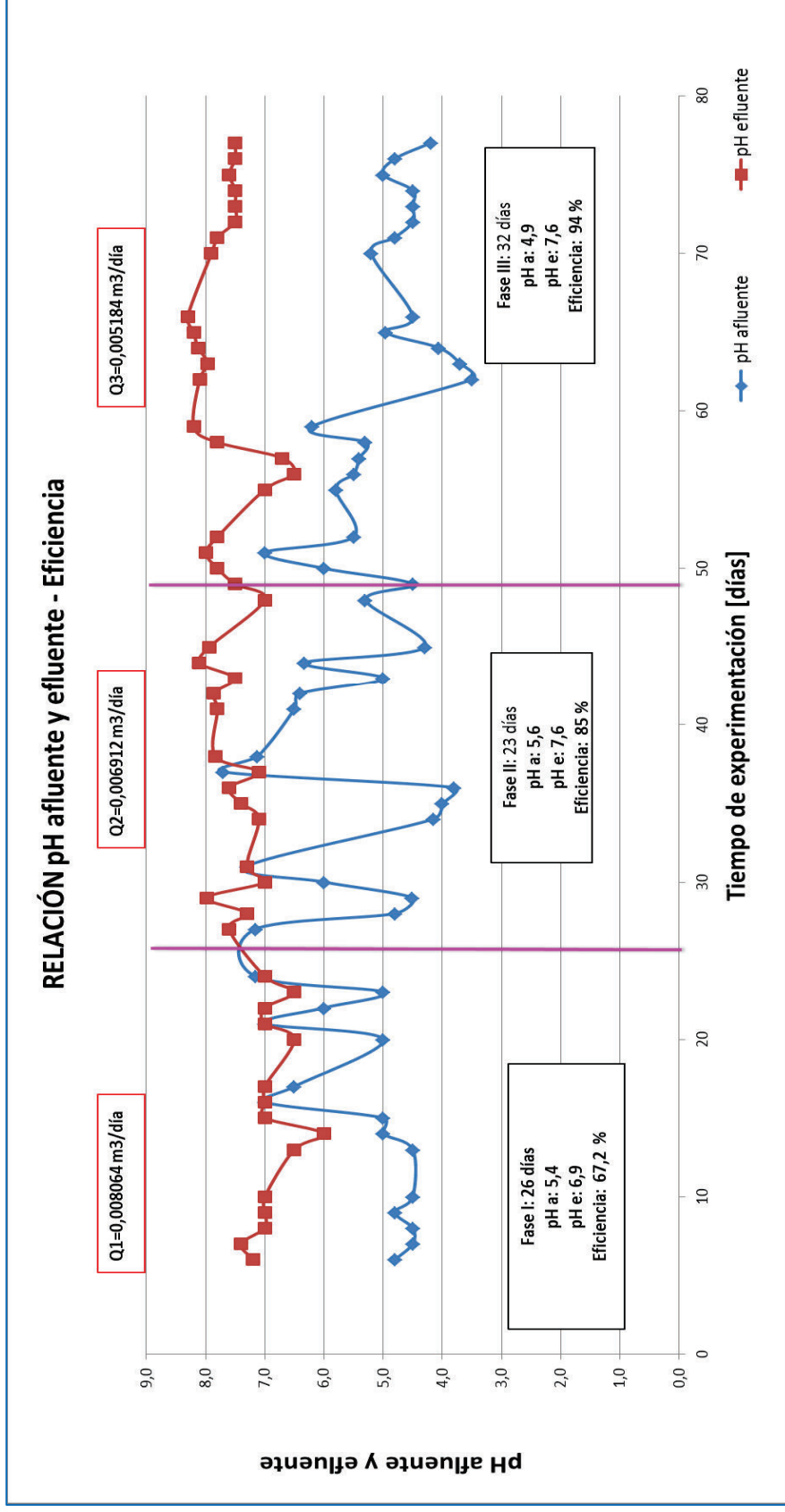
Elaborado por: Jessica Reina

5.5 POTENCIAL DEL HIDRÓGENO (pH)

Los valores que se muestran en el GRÁFICO 5.5, son valores registrados en cada una de las etapas de funcionamiento, tomados antes que ingrese el agua residual al reactor aerobio (afluente), y en el interior o salida del efluente. El valor del pH, cómo se mencionó en la sección 3.2, es un parámetro de funcionamiento para no afectar el medio biológico.

En el gráfico 5.5, se observa la variación del pH con respecto al tiempo de operación del reactor. Al afluente se le añadió solución de bicarbonato de sodio (NaHCO_3), ya que el agua residual tiende a una rápida acidificación, con valores que fluctuaban alrededor de 4, no adecuado para el desarrollo de los microorganismos aerobios. Al adicionar el alcalinizante el pH aumentó progresivamente y se mantuvo en valores estables. En la primera etapa de operación se mantuvo el pH del efluente entre 6.5 y 7.4, en las segunda fase entre 7 y 8.1, y en la tercera fase, en la que ya se dejó de adicionar la solución alcalinizante debido a la solución tapón formada, logrando una alta amortiguación de las sustancias ácidas, se registraron valores entre 6.5 y 8.3 de pH.

GRÁFICO 5. 5 RELACIÓN pH AFLUENTE Y EFLUENTE – TIEMPO (EN LAS TRES FASES DE OPERACIÓN)



Elaborado por: Jessica Reina

5.6 SUPERFICIE ESPECÍFICA (S_e)

Con lo expuesto previamente, en la sección 3.3, se determinó la superficie específica para el bioreactor aerobio horizontal, considerando el área total superficial del material PET de 1,12 (m^2) y el volumen útil del reactor 0,00172 (m^3), con la ecuación (3.9):

$$S_e = \frac{A_t}{V}$$

$$S_e = \frac{1,12 \text{ m}^2}{0,001724 \text{ m}^3}$$

$$S_e = 650 \frac{\text{m}^2}{\text{m}^3}$$

Obteniendo así una superficie específica de 650 [m^2/m^3].

5.7 RELACIÓN Y (BIOMASA-CARGA ORGÁNICA)

Para la relación Y, se puede expresar mediante la ecuación (3.10), cuyo valor es adimensional:

$$Y = \frac{\text{Biomasa (Kg SSV)}}{\text{Carga Orgánica Total (So * Q * TRH)}}$$

El valor de la biomasa se determinó en base a los resultados del análisis de los sólidos en suspensión volátiles (SSV), tanto en la fase final, como en el drenaje de lodos realizados previamente. En el (Anexo 4), se presentan los cálculos para obtener el valor de la carga orgánica total, se lo determinó en base a todo el tiempo de operación (3 fases), dando como resultado el coeficiente de producción de biomasa Y. Así la ecuación (3.10), se puede expresar de la siguiente manera:

$$Y = \frac{\text{Biomasa Lodo final} + \text{Biomasa(Lodo drenado)}}{\text{Carga Orgánica Total}} \quad (5.1)$$

$$Y = \frac{0.02013 \text{ kg SSV} + 0.0103 \text{ kg SSV}}{0.11 \text{ kg DQO}}$$

$$Y = 0.28$$

Así, en el reactor biológico aerobio horizontal, se obtuvo un coeficiente de producción de biomasa Y de 0.28, lo que significa, que por cada [Kg] de DQO alimentado se desarrolla 0.28 [Kg] de biomasa expresada como SSV.

5.8 VALORES DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA MÁSICA K, APLICANDO UN MODELO MATEMÁTICO, PARA EL DISEÑO TÉCNICO DEL REACTOR.

Luego de llegar a las eficiencias máximas en cada una de las fases de funcionamiento, se determinaron los valores promedios en cada una de ellas, como se observa en la tabla 5.2 y en el GRÁFICO 5.7. Para poder aplicar un modelo matemático y determinar la cinética para éste sistema de tratamiento en particular; es necesario calcular el parámetro k (coeficiente de transferencia másico) de la siguiente manera:

Primero se emplearon las tres fases como puntos de muestras, en base a los tiempos de retención y la DQO promedio, tanto a la entrada como en la salida del efluente, mostradas en la Tabla 5.1, y luego en base a la eficiencia promedio de las mismas, mostradas en la Tabla 5.2 y en función de los tiempos de retención utilizados, se observa la reducción de la DQO y por ende la eficiencia de remoción de la materia orgánica como se muestra en los GRÁFICOS 5.6 y 5.7, respectivamente:

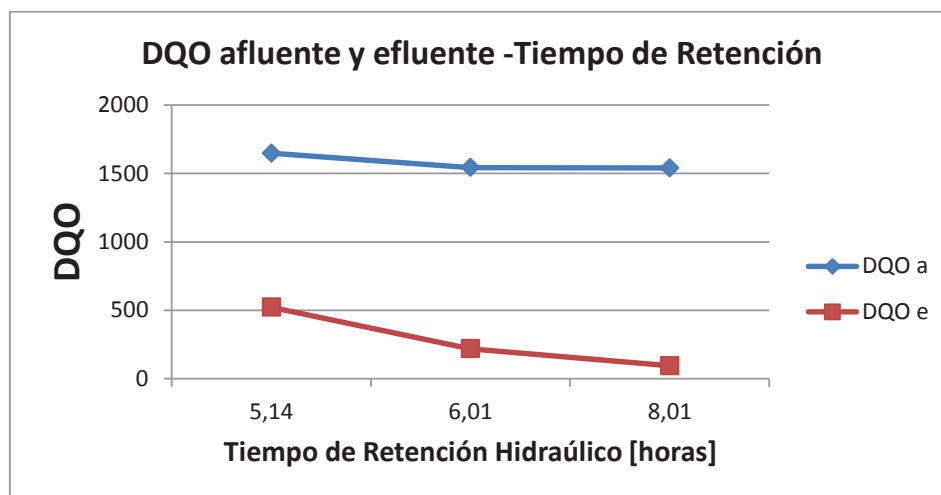
TABLA 5. 1 VALORES PROMEDIOS DE LA DQO, DURANTE LA OPERACIÓN (3 FASES)

Tiempo de Retención [horas]	ENTRADA	SALIDA
	DQO [mg/L]	DQO [mg/L]
5,14	1647	522
6,01	1543	219
8,01	1540	94

*Valores medios durante las etapas de funcionamiento

Elaborado por: Jessica Reina

GRÁFICO 5. 6 DQO PROMEDIO DEL AFLUENTE Y EFLUENTE (ETAPA DE FUNCIONAMIENTO) CON CADA TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICO



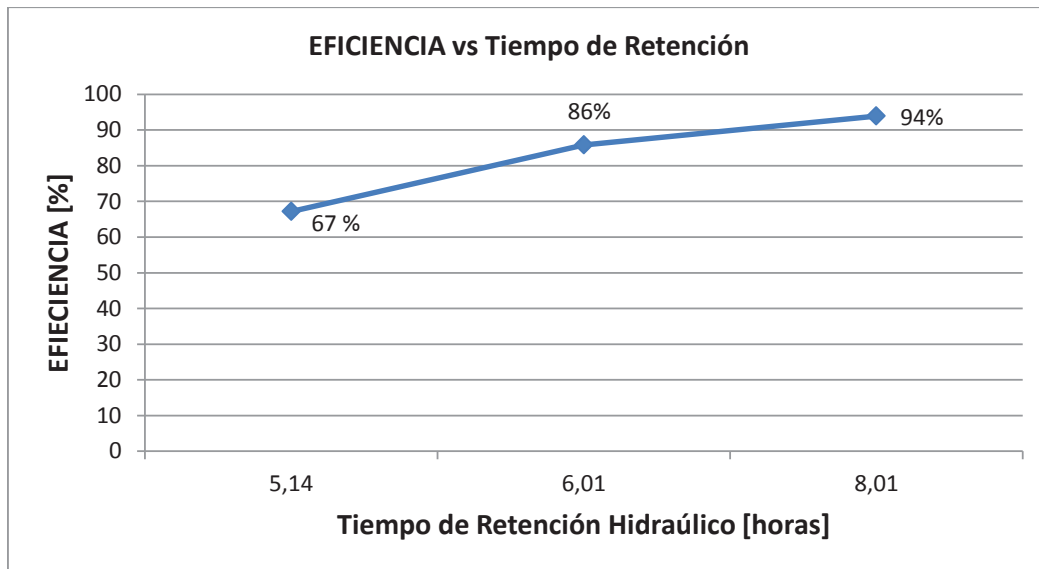
Elaborado por: Jessica Reina

TABLA 5. 2 VALORES PROMEDIOS DE LA EFICIENCIA, DURANTE LA OPERACIÓN (3 FASES)

Tiempo de Retención [horas]	Eliminación de DQO [%]
5,14	67.2
6,01	85.5
8,01	94.5

Elaborado por: Jessica Reina

GRÁFICO 5.7 TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICO (ETAPA DE FUNCIONAMIENTO)- EFICIENCIA



Elaborado por: Jessica Reina

La eliminación de la materia orgánica, como se muestra en la Tabla 5.2 y en las Gráfica 5.7, depende explícitamente del tiempo de retención, mostrando que para tener una adecuada eliminación de la materia orgánica se requerirá trabajar con tiempos de retención mayores a 7 [horas], logrando así una significativa reducción de la DQO.

5.8.1 MODELO CINÉTICO

En la sección 3.1.3, se determinó que el flujo en éste bioreactor aerobio horizontal es preponderantemente tipo pistón y como se está utilizando un medio de soporte de alta superficie específica, se obtuvo la cinética con la ayuda de la ecuación de la sección 2.2.

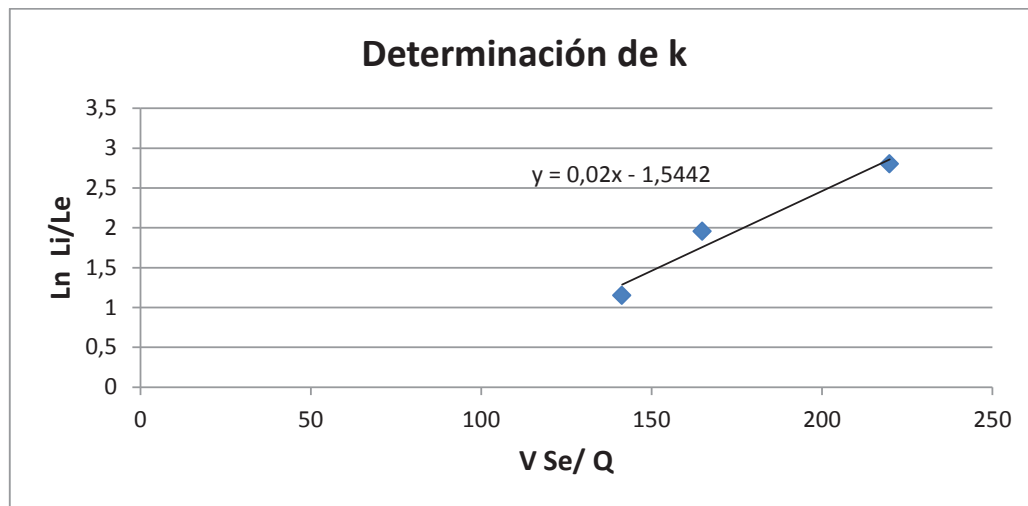
A partir de los datos experimentales determinados en el sistema de tratamiento piloto se determinó k .

La ecuación de la sección 2.2 puede expresarse de la siguiente manera:

$$\ln \frac{Li}{Le} = k \frac{V Se}{Q} \quad (5.2)$$

Adoptando la forma, de la ecuación de una recta $y = mx$, donde m es la pendiente, representada por k (coeficiente de transferencia másico [m/día]). En el gráfico 5.8 se determinó el valor de k , valor de 0.02 [m/día].

GRÁFICO 5. 8 DETERMINACIÓN DE k



Elaborado por: Jessica Reina

Finalmente el modelo cinético, para éste reactor horizontal con medio de soporte PET, se expresa mediante la ecuación 5.3:

$$\frac{Le}{Li} = e^{-\frac{0.02 V Se}{Q}} \quad (5.3)$$

Considerando que el modelo (5.3) es dependiente de la temperatura, el valor de k en ésta experimentación correspondió a una temperatura ambiente de operación, en promedio de 17° C.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

La presente investigación demuestra la factibilidad de implementar un reactor aerobio biológico horizontal con medio de soporte PET, para el tratamiento de aguas residuales con alta carga orgánica, como en este caso se analizó el agua con sustrato lácteo a una temperatura ambiente (Quito, 17° C); se obtuvo una alta actividad biológica, en base a la mayor eficiencia de remoción de materia orgánica en la fase III de operación.

El reactor aerobio horizontal operó con un medio ambiental adecuadamente controlado, obteniéndose una estabilización efectiva del residuo, por ejemplo se suministró una concentración adecuada de oxígeno y se controló el pH, favoreciendo el crecimiento microbial, representada por la concentración de microorganismos o biomasa presente de 11560 [mg/L].

El valor de la constante de crecimiento en la fase logarítmica o factor de producción de biomasa (Y) es de 0.28, valor de un sistema de lodos activados de aireación prolongada, además es un valor mayor al de los sistemas de tratamiento anaerobio; representa la masa de sustrato removido, es decir que, por cada unidad de sustrato removido una porción se sintetizará en biomasa y la porción restante se oxidará para promover energía para síntesis y demás funciones celulares.

El reactor horizontal aerobio funcionó en tres fases, obteniéndose los parámetros de funcionamiento, en promedio de cada una de ellas; el L_v o carga orgánica volumétrica y el L_s o carga orgánica superficial, mostrando una

relación inversa con la eficiencia de remoción de materia orgánica, es decir a mayor L_v o L_s , se tendrá un menor porcentaje de eficiencia.

Las eficiencias promedio obtenidas en cada una de las fases como máximas de estabilización, fueron de 67.2%, 85% y 94.5%, con cargas orgánicas volumétricas de 7.25; 6.16 y 4.61 [Kg/día*m³] respectivamente, con un tiempo de retención hidráulico (TRH) de 5.14; 6.01 y 8.01 (horas), y con periodos de 23; 26 y 32 (días) respectivamente.

Se obtuvo un modelo cinético sobre la remoción de la materia orgánica específica para el reactor aerobio biológico horizontal, en base a tres tiempos de retención analizados, con la finalidad de establecer parámetros de diseño en base a las necesidades finales del tratamiento de aguas residuales.

El tiempo de aclimatación para los sistemas de tratamiento aerobio se han estimado alrededor de cuatro semanas, en ésta investigación duró un periodo de 21 días, debido a la utilización de un inóculo maduro, contenido de bacterias aerobias previamente acondicionadas al sustrato con suero de leche y a temperatura ambiente, las cuales son excelentes oxidadores de la materia orgánica. Además del oxígeno suministrado, en las reacciones metabólicas, el oxígeno molecular libre es el agente para la oxidación de compuestos orgánicos en CO₂; produciendo una reacción eficiente porque se liberan grandes cantidades de energía, la cual se usa para la síntesis de tejido celular nuevo formando así la biomasa sintetizada (*Romero, 2000*).

Para favorecer la digestión aerobia de los microorganismos, el rango del pH, en el interior del reactor aerobio horizontal se mantuvo entre 6.5 y 8.5; realizando un acondicionamiento previo del afluente con la sustancia química alcalinizante de bicarbonato de sodio (NaHCO₃), hasta formar una solución buffer en el interior del reactor, así se deberá adicionar en menor cantidad progresivamente, disminuyendo los costos en la utilización del químico.

Este sistema de tratamiento, funcionó en base a la teoría de los reactores de flujo pistón, pasando el agua residual de manera gradual y continua, sin recirculación; facilitando la operación, disminuyendo el costo de infraestructura y obteniendo un rápido tratamiento por los tiempos de retención bajos.

El diseño horizontal del reactor aerobio favorece a que el flujo sea en forma de pistón, además presenta ventajas sobre los verticales en su infraestructura o instalación, usando menos espacio al ubicarlos en zonas periféricas o sobrepuestos, y disminuyendo su costo de material en base a los soportes de construcción.

El reactor biológico con digestión aerobia, tuvo un arranque con concentraciones de DQO entre 1000-2000 [mg/L], es decir funcionó sin inconvenientes con altas cargas de materia orgánica (soluble); además el uso de oxígeno en el proceso evita malos olores, por lo que es favorable para fábricas o empresas que se encuentren dentro de las zonas urbanas.

Se observó buena formación de biopelícula, en el material de soporte PET, con forma gelatinosa y con un espesor de 3 [mm], asegurando así la acción del oxígeno, para que se den sin inconvenientes las reacciones esenciales metabólicas como: Catabolismo, Anabolismo y Autólisis.

En el lodo final, se obtuvo una relación de factor de carga (F/M), de 0.7; 0.5 y 0.4, disminuyendo en cada una de las fases con sus respectivas condiciones de operación, obteniendo mayor porcentaje de eficiencia de remoción de materia orgánica, en la tercera fase con un tiempo de retención hidráulico (TRH) mayor; con un (F/M=0.4), lo que indica un sistema de lodos activados tendiente a aireación prolongada.

6.3 RECOMENDACIONES

Se recomienda un control en todo el funcionamiento del sistema de tratamiento biológico aerobio, en base a la cantidad suministrada de oxígeno, no menor de 2 [mg/L].

El inóculo a usar se debe aclimatizar con el sustrato de alimentación y oxígeno constante, antes de empezar a tratar las aguas residuales; cuyas concentraciones pueden variar, sin embargo, se recomienda tener previo un ecualizador, para que no sea drástica la concentración de DQO de las aguas a tratar, y así no se desestabilice el sistema.

El agua residual se debe caracterizar previamente, para determinar si los nutrientes son suficientes y evitar así la presencia de compuestos tóxicos. Se considera la relación apropiada de DBO/N/P de 100/5/1 (*Romero, 2000*).

Es importante proveer condiciones ambientales óptimas, en todos los procesos biológicos, para que los organismos se desarrollen de manera apropiada y poder obtener altas eficiencias de remoción de materia orgánica; controlar el pH en tratamientos aerobios, si se usan aguas con suero lácteo debido a su rápida fermentación o acidificación, ya que puede inhibir el anabolismo, y disminuir las nuevas células bacteriales.

Para aumentar los valores de pH, se puede emplear bicarbonato de sodio, el cual aporta la cantidad de alcalinidad bicarbonatada de manera progresiva hasta obtener la requerida por el sistema; además presenta ventajas como fácil manipulación, bastante soluble y excelente acción amortiguadora.

Realizar análisis de los lodos de drenaje, en cuanto a la relación del factor de carga (F/M), para evidenciar que son lodos estables. Así posteriormente podrá ser dispuesto finalmente como compostaje o acondicionador del suelo.

En reactores biológicos de cultivos fijos sin recirculación, el material que constituye como medio de soporte debe someterse periódicamente a drenajes a lo largo del reactor.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arango Bedoya O., y L., Sánchez. (2009). Tratamiento de aguas residuales de la industria láctea en sistemas anaerobios tipo UASB. Pasto, Colombia.

American Public Health Association. (2012). Standard Methods for Examination of Water and Wastewater. Apha.

Berkowitz D.(2014); Procesos de la industria alimentaria. Sectores basados en recursos biológicos

Baecheler, J., Zambrano, E., & Urrutia, H. (2001). Estudio de la cinética de crecimiento de biopelículas bacterianas aplicadas en el tratamiento de riles. XIV Congreso de Ingeniería Sanitaria y Ambiental AIDIS. Santiago.

Couto A, A. M. (2005). Molecular, anatomical, and functional organization of the Drasophila olfactory system. *Curr Biol*, 1535-1547

Centro de Producción Más Limpia (CPMLN). 2003. Manual de Buenas Prácticas Operativas de Producción Más Limpia para la Industria Láctea. Managua, Nicaragua. pp, 48.

Degremont. (1979). Manual Tecnico del Agua. Bilbao: Grafo.

Forbes BA (2002), Diagnostic Microbiology; Sahm DF, Weissfeld AS. editors. Bailey & Scott's. 11th. ed. St. Louis, Missouri. Mosby.

Fondo social europeo. (2000). Guía de buenas prácticas medioambientales en el sector lácteo.
http://www.camaracompostela.com/mambiente/CCS_Guia.BP.Sector.Lacteo.pdf

Hach, C. (2007). Procedures Manual DR 2800 Spectrophotometer.

Karel, S., Libicki, S., Robertson, C. (1985). The immobilization of whole cells engineering principles. *Chemical Engineering Science* (40), 1321 - 1354.

Kourkoutas, Y. B. (2004). Immobilization technologies and support materials suitable in alcohol beverages production: a review. Food Microbiology, 21: 377-397.

Lapo Byron, C. (2014). Estudio de medios de soporte para crecimiento bacteriano, aplicado al tratamiento biológico aerobio de aguas residuales. (Tesis inédita de titulación de Post-grado). Escuela Politécnica Nacional, Quito

Lewandowski, Z. A. (1993). NMR and microelectrode studies of hydrodynamics and Kinetics on biofilms. Biotechnol. Prog. 9, 40-45

Livingston, L. M. (1995). Biotechnol. Bioeng. 47(1).

Moreno-Garrido, I. (2008). Microalgae immobilization: Current techniques and uses. *Bioresource Technology*, 3949-3964.

M. Muñoz & P.M. Herrera, (2007). Tratamiento anaeróbico-aeróbico de efluentes de curtiduría en reactores con biopelícula.; universidad Santiago de Compostela, Santiago de Compostela.

Mara D., (1978). Sewage treatment in hot climate. John wiley & sons. 112-113

Noyola A. (1994). Diseño, inoculación y arranque de reactores UASB. Motevideo, Uruguay.

O'Reilly KT, C. R. (1989). Cinética de degradación de p-cresol por un inmovilizado Pseudomonas sp. . Appl Environ Microbiol. , 866-870.

Oliviera et. Al. 2001; Tratamiento biológico del agua residual; <http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/5909/12Mjkm12de18.pdf;jsessionid=DFB8941A94B63943AAFD0CA543C6B6EF.tdx1?sequence=12>;Capítulo 7.

Romero J. (2000). Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño. Primera edición. Centro editorial. Santafé de Bogotá.

Ronzano E. Llodra, J. L. (2007). Tratamiento biológico de las aguas residuales.
Bilbao: Ediciones Díaz de Santos.

Robinson, P., Mak, A., & Trevan, M. (1986). Immobilized algae: a review.
Process Biochem, 122-126.

ANEXOS

ANEXO N° 1
REGISTRO DE VALORES DE LOS PARÁMETROS
ANALIZADOS EN LA ETAPA I

MONITOREO DEL REACTOR AEROBIO HORIZONTAL ETAPA DE ARRANQUE O ACLIMATACIÓN

Días	FECHA	DQO afluente [mg/L]	DQO efluente [mg/L]	Eficiencia [%]	pH efluente
1	14/08/2014	1800	1200	33,33	6,5
2	15/08/2014				7
3	16/08/2014	1342	828	38,30	
4	17/08/2014				
5	18/08/2014				6,8
6	19/08/2014	1960	1300	33,67	7
7	20/08/2014				6,8
8	21/08/2014				6,5
9	22/08/2014				7,2
10	23/08/2014	1826	832	54,44	
11	24/08/2014				
12	25/08/2014	1933	1030	46,71	6,7
13	26/08/2014				6,2
14	27/08/2014				6,8
15	28/08/2014	2100	1300	38,10	6,9
16	29/08/2014				6,8
17	30/08/2014				
18	31/08/2014	1920	1023	46,72	
19	01/09/2014				7,2
20	02/09/2014	1850	778	57,95	6,2
21	03/09/2014	1820	776	57,36	6,8
				45,2	

Elaborado por: Jessica Reina

ANEXO N° 2
REGISTRO DE VALORES DE LOS PARÁMETROS
ANALIZADOS EN LA ETAPA II

MONITOREO DEL REACTOR AEROBIO HORIZONTAL FASE I DE OPERACIÓN

FECHA	DQO afluente [mg/Lt]	DQO efluente [mg/Lt]	Eficiencia [%]	Oxígeno Disuelto entrada [ppm]	Oxígeno Disuelto salida [ppm]	T entrada [°C]	T salida [°C]	pH afluente	pH efluente
18/08/2014									
26/08/2014				1,3	2,5				
29/08/2014				1,35	2,89				
01/09/2014	1070	592	44,7						
02/09/2014	1509	475	68,5						
03/09/2014				1,78	2,24	20,2		4,5	7
04/09/2014								4,8	7
05/09/2014	1948	923	52,6					4,5	7
08/09/2014	1442	372	74,2					4,5	6,5
09/09/2014	1647	381	76,9	1,43	2,4			5	6
10/09/2014	1952	389	80,1					5	7
11/09/2014								7	7
12/09/2014	1616							6,5	7
15/09/2014		186		2,3	1,3			5	6,5
16/09/2014	1992			2,95	1,5			7	7
17/09/2014								6	7
18/09/2014	1647	381	76,9					5	6,5
19/09/2014				4,2	3,4			7,16	7

Elaborado por: Jessica Reina

MONITOREO DEL REACTOR AEROBIO HORIZONTAL FASE II DE OPERACIÓN

FECHA	DQO afluente [mg/Lt]	DQO efluente [mg/Lt]	Eficiencia [%]	Oxígeno Disuelto entrada [ppm]	Oxígeno Disuelto salida [ppm]	T entrada [°C]	T salida [°C]	pH afluente	pH efluente
22/09/2014	1072	226	78,9			17,7		7,16	7,6
23/09/2014	1480	252		2,28	0,06	18,5		4,8	7,3
24/09/2014	1206	269		3,25	1,69	19,1	19	4,51	7,98
25/09/2014	1606	153	90,5	3,12	1,12			6	7
26/09/2014	1836	189						7,3	7,3
29/09/2014	1052	324	69,20					4,15	7,1
30/09/2014	2108	118	94,40					4	7,4
02/10/2014	1801	229	87,28	3,2	1,62			3,8	7,6
03/10/2014	1696	189	88,86					7,7	7,1
04/10/2014	1612	190	88,21					7,12	7,84
06/10/2014	1052	239	77,28					6,5	7,8
07/10/2014	2108	324	84,63	1,42	1,3	18,5	21,1	6,4	7,87
08/10/2014	1801	118	93,45	2,14	1,62		19,2	5	7,5
09/10/2014	1300			2,69	1,16	18,8	19,2	6,33	8,11
10/10/2014	1742	190					17,8	4,3	7,94
11/10/2014								6,65	

Elaborado por: Jessica Reina

MONITOREO DEL REACTOR AEROBIO HORIZONTAL FASE III DE OPERACIÓN

FECHA	DQO afluente [mg/Lt]	DQO efluente [mg/Lt]	Eficiencia [%]	Oxígeno Disuelto entrada [ppm]	Oxígeno Disuelto salida [ppm]	T entrada [°C]	T salida [°C]	pH afluente	pH efluente
13/10/2014								5,3	7
14/10/2014	756	158	79,1					4,5	7,5
15/10/2014	1464			2,32	1,23			6	7,8
16/10/2014	1266							7	8
17/10/2014	1064	120	88,7	2,14	1,62			5,5	7,8
18/10/2014	978	98	90,0						
20/10/2014	1574							5,8	7
21/10/2014								5,5	6,5
22/10/2014				1,5	2,8			5,4	6,7
23/10/2014	1360	98	92,8					5,3	7,8
24/10/2014	1310							6,2	8,2
25/10/2014	1282								
27/10/2014	1844	90	95,1					3,5	8,1
28/10/2014	1210	65	94,6	2,3	3,8	16,1	16	3,7	7,96
29/10/2014	1652	55	96,7			14,8	16,3	4,06	8,13
30/10/2014	2112	57	97,3					4,96	8,2
31/10/2014	1074	69	93,6	2,28	3,259	17,5	17,5	4,5	8,3
02/11/2014								5,2	7,9
03/11/2014								4,8	7,8
04/11/2014	806	106	86,8	1,9	2,6			4,5	7,5
05/11/2014	960	48	95,0					4,5	7,5
06/11/2014	813	52	93,6	1,9	2,3			4,5	7,5
07/11/2014	1706	65	96,2					5	7,6
08/11/2014	1270	125	90,2	2,6	2,8			4,8	7,5
09/11/2014	1314	107	91,9					4,2	7,5

Elaborado por: Jessica Reina

ANEXO N° 3
REGISTRO DE VALORES DE CARGA VOLUMÉTRICA,
CARGA SUPERFICIAL, EFICIENCIA

MONITOREO DEL REACTOR AEROBIO HORIZONTAL FASE I DE OPERACIÓN

Días	DQO afluente [mg/Lt]	DQO efluente [mg/Lt]	Eficiencia [%]	Lv afluente [Kg/día*m3]	Lv efluente [Kg/día*m3]	Ls afluente [Kg/día*m2]	Ls efluente [Kg/día*m2]
2							
4							
5							
6	1070	592	44,7	4,98756	2,75947	0,00426	0,00660
7							
11							
12	1509	475	68,52	7,03386	2,21410	0,00342	0,00931
13					0,00000		
14	1948	923	52,6	9,08016	4,30235	0,00665	0,01202
15							
16	1442			6,72155			0,00890
17							
18							
19	1952	372	80,9	9,09880	1,73399	0,00268	0,01205
20							
21							
22	1616	381	76,4	7,53262	1,77594	0,00274	0,00997
23							
24							
25							
26	1992	389	80,5	9,28525	1,81323	0,00280	0,01229

Elaborado por: Jessica Reina

MONITOREO DEL REACTOR AEROBIO HORIZONTAL FASE II DE OPERACIÓN

Días	DQO afluente [mg/L]	DQO efluente [mg/L]	Eficiencia [%]	Lv afluente [Kg/día*m3]	Lv efluente [Kg/día*m3]	Ls afluente [Kg/día*m2]	Ls efluente [Kg/día*m2]
27							
28							
29	1072	226	78,9	4,99688	1,05345	0,00772	0,00163
30	1480			6,89868		0,01066	
31							
32							
33	1206	252	79,10	5,62149	1,17464	0,00868	0,00181
34	1606	269	83,25	7,48600	1,25388	0,01156	0,00194
35	1836	153	91,67	8,55809	0,71317	0,01322	0,00110
36	1300	189	85,46	6,05965	0,88098	0,00936	0,00136
37	1742	190	89,09	8,11994	0,88564	0,01254	0,00137
38							
39							
40	1052	239	77,28	4,90366	1,11404	0,00757	0,00172
41	2108	324	84,63	9,82596	1,51025	0,01518	0,00233
42	1801	118	93,45	8,39495	0,55003	0,01297	0,00085
43	1696			7,90552		0,01221	
44							
45	1612	229	85,8	7,51397	1,06743	0,01161	0,00165

Elaborado por: Jessica Reina

MONITOREO DEL REACTOR AEROBIO HORIZONTAL FASE III DE OPERACIÓN

Días	DQO afluente [mg/L]	DQO efluente [mg/L]	Eficiencia [%]	Lv afluente [Kg/día*m3]	Lv efluente [Kg/día*m3]	Ls afluente [Kg/día*m2]	Ls efluente [Kg/día*m2]
49	1512	316	79,10	7,04784	1,47296	0,01089	0,00228
50	1464			6,82410		0,01054	
52	1564	120	92,33	7,29023	0,55935	0,01126	0,00086
53	1956	98	94,99	9,11745	0,45680	0,01408	0,00071
55	1574			7,33684		0,01133	
58	1360	98	92,79	6,33933	0,45680	0,00979	0,00071
59	1310			6,10627		0,00943	
60	1282			5,97575		0,00923	
62	1844	180	90,24	8,59538	0,83903	0,01328	0,00130
63	1210	65	94,63	5,64014	0,30298	0,00871	0,00047
64	1652	55	96,67	7,70042	0,25637	0,01189	0,00040
65	2112	57	97,30	9,84461	0,26569	0,01521	0,00041
66	1074	69	93,58	5,00621	0,32163	0,00773	0,00050
70	1612	106	93,42	7,51397	0,49409	0,01161	0,00076
72	1920	48	97,50	8,94964	0,22374	0,01382	0,00035
74	1626	52	96,80	7,57923	0,24239	0,01171	0,00037
75	1666	65	96,10	7,76568	0,30298	0,01200	0,00047
76	1706	75	95,60	7,95213	0,34960	0,01228	0,00054
78	1270	65	94,88	5,91982	0,30298	0,00914	0,00047
80	1314	69	94,75	6,12491	0,32163	0,00946	0,00050
81	1584	55	96,53	7,38190	0,25637	0,01140	0,00040

Elaborado por: Jessica Reina

ANEXO N° 4
DETERMINACIÓN DE LA CARGA ORGANICA TOTAL

ETAPA DE EXPERIMENTACIÓN (TRES FASES DE OPERACIÓN)

Q [m3/día]	0,008064	0,006912	0,005184		CARGA ORGÁNICA DQO*Q*TRH [Kg]	
Días experimentación	DQO afluente [mg/L]	DQO efluente [mg/L]	Eficiencia [%]	TRH [horas]		
1				5,14		
2						
3						
4						
5						
6	1070	592	44,7			0,001847933
7						
8						
9						
10						
11						
12	1509	475	68,52			0,002606103
13						
14	1948	923	52,6			0,003364274
15						
16	1442					0,002490392
17						
18						
19	1952	372	80,9			0,003371182
20						
21						
22	1616	381	76,4			0,002790897
23						
24						
25						
26	1992	389	80,5			0,003440264
27				6,01		
28						
29	1072	226	78,9			0,00185456
30	1480					0,0025604
31						
32						
33	1206	252	79,10			0,00208638
34	1606	269	83,25			0,00277838
35	1836	153	91,67			0,00317628

Elaborado por: Jessica Reina

CONTINUACIÓN...

Q [m3/día]	0,008064	0,006912	0,005184		CARGA ORGÁNICA DQO*Q*TRH [Kg]
Días experimentación	DQO afluente [mg/L]	DQO efluente [mg/L]	Eficiencia [%]	TRH [horas]	
36	1300	189	85,46	6,01	0,002249
37	1742	190	89,09		0,00301366
38					
39					
40	1052	239	77,28		0,00181996
41	2108	324	84,63		0,00364684
42	1801	118	93,45		0,00311573
43	1696				0,00293408
44					
45	1612	229	85,8		0,00278876
46					
47					
48				8,01	
49	1512	316	79,10		0,00261576
50	1464				0,00253272
51	1266				0,00219018
52	1564	120	92,33		0,00270572
53	1956	98	94,99		0,00338388
54					
55	1574				0,00272302
56					
57					
58	1360	98	92,79		0,0023528
59	1310				0,0022663
60	1282				0,00221786
61					
62	1844	180	90,24		0,00319012
63	1210	65	94,63		0,0020933
64	1652	55	96,67		0,00285796
65	2112	57	97,30		0,00365376
66	1074	69	93,58	0,00185802	

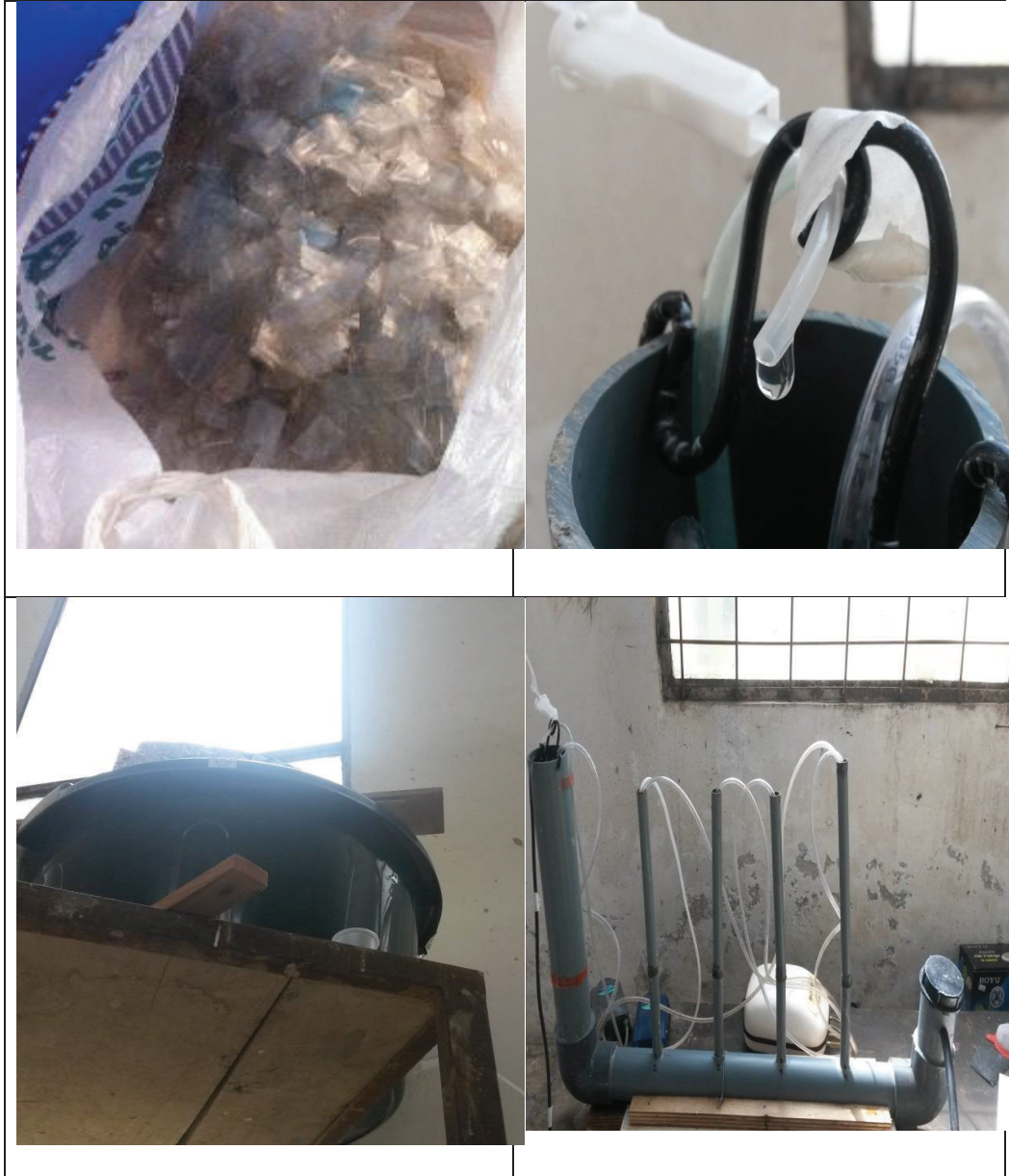
Elaborado por: Jessica Reina

CONTINUACIÓN...

Q [m3/día]	0,008064	0,006912	0,005184		CARGA ORGÁNICA DQO*Q*TRH [Kg]
Días experimentación	DQO afluente [mg/L]	DQO efluente [mg/L]	Eficiencia [%]	TRH [horas]	
69				8,01	
70	1612	106	93,42		0,00278876
71					
72	1920	48	97,50		0,0033216
73					
74	1626	52	96,80		0,00281298
75	1666	65	96,10		0,00288218
76	1706	75	95,60		0,00295138
77					
78	1270	65	94,88		0,0021971
79					
80	1314	69	94,75		0,00227322
81	1584	55	96,53		0,002739743
				Carga Orgánica Total	0,11054

Elaborado por: Jessica Reina

ANEXO N° 5
FOTOGRAFÍAS DEL MONTAJE EXPERIMENTAL
DEL REACTOR HORIZONTAL AEROBIO

FOTOGRAFÍA 1.

Elaborado por: Jessica Reina

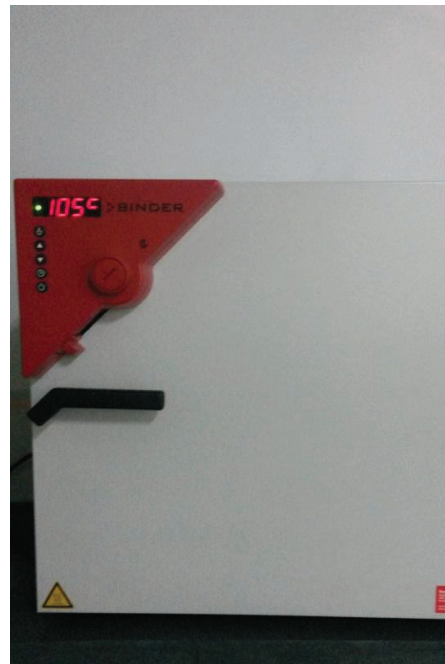
ANEXO N° 6
FOTOGRAFÍAS DE LOS EQUIPOS Y MATERIALES

FOTOGRAFÍA 2

Espectrofotómetro



Estufa



Mufla

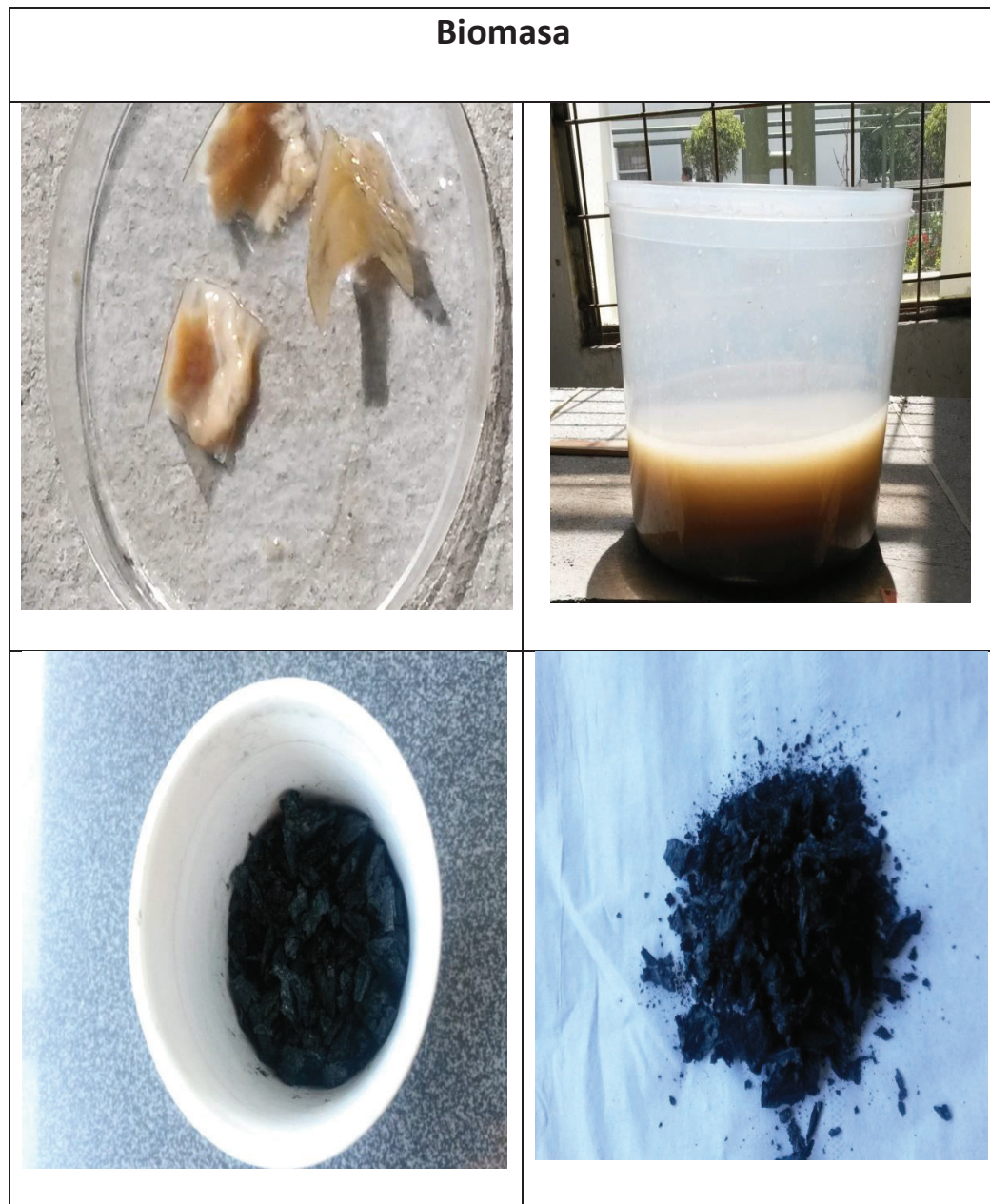


Desecador



Elaborado por: Jessica Reina

ANEXO N° 7
FOTOGRAFÍAS DEL ANÁLISIS DE LABORATORIO.

FOTOGRAFÍA 3.

Elaborado por: Jessica Reina