

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

Tesis previa a la obtención del título de:
Ingeniero Ambiental

TEMA:

“Creación a nivel de laboratorio de un reactor de lecho fijo experimental de flujo ascendente para la determinación de los parámetros fundamentales de diseño a escala real”

AUTORES:

María Alejandra Noguera Roldán
Nelson Fernando Pacheco Bueno

DIRECTOR:

Ing. Servio Astudillo

Cuenca, marzo de 2014

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por María Alejandra Noguera Roldán con C.I. 1400556716 y Nelson Fernando Pacheco Bueno con C.I. 0104611165, bajo mi supervisión.

Cuenca, marzo de 2014



Ing. Servio Astudillo.

DIRECTOR DE TESIS

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

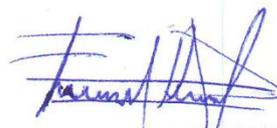
Los conceptos desarrollados, análisis realizados y las conclusiones del presente trabajo son de exclusiva responsabilidad de los autores.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Universidad Politécnica Salesiana, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Cuenca, marzo de 2014



Alejandra Noguera Roldán



Fernando Pacheco Bueno

AGRADECIMIENTOS

A Dios por la oportunidad de gozar de sus bendiciones y permitirnos culminar esta etapa.

A nuestro director de tesis Ing. Servio Astudillo, quien con su acertada labor y su don de gente ha compartido desinteresadamente sus amplios conocimientos, por todo esto y más estamos eternamente agradecidos.

A ETAPA EP por su gran apertura y generosa colaboración en la instrucción de los análisis de laboratorio.

A los docentes del laboratorio de Ciencias de la Vida por su cooperación y tiempo dedicado a este trabajo, de manera especial al Ing. Pablo Arévalo por su asesoría durante la ejecución del experimento y análisis de resultados.

A la Universidad Politécnica Salesiana y a los docentes de la carrera de Ingeniería Ambiental, quienes nos han apoyado durante toda nuestra vida estudiantil.

A nuestros padres por su cariño, comprensión y apoyo incondicional a lo largo de nuestras vidas.

DEDICATORIA

Este trabajo de tesis dedicamos de manera especial a Dios por brindarnos la maravillosa bendición de llegar a este momento. Con amor y admiración a nuestros padres quienes a lo largo de nuestras vidas han velado por nuestro bienestar y que han constituido un excepcional apoyo durante nuestra carrera universitaria. A nuestros hermanos por su motivación permanente en el cumplimiento de nuestras metas.

Los autores

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se emplea un tratamiento aerobio de cultivo biológico adherido de flujo ascendente utilizando un medio de soporte fijo de plástico, para la determinación de sus parámetros fundamentales de diseño como son: tiempo de retención hidráulico, tiempo de retención celular y relación alimento/microorganismos.

Se construyó un equipo compuesto de 3 reactores independientes, con un sistema de distribución de macrogoteo para la dotación del agua residual conectado a un tanque de almacenamiento ubicado a 2,4 m respecto el suelo. En cada fondo se dispuso de una red de suministro de aire conectada a dos bombas de acuario, con el propósito de mantener las concentraciones de oxígeno disuelto en un valor de 2 mg/L o ligeramente superior, garantizando condiciones aerobias a los microorganismos.

Debido a los inconvenientes y a la peligrosidad que conlleva la manipulación de agua residual doméstica real, y a la necesidad de mantener constantes las características del afluente, en nuestro trabajo se preparó agua residual sintética, elaborada con harina de sangre de bobino y melaza.

Para el arranque del sistema se cargaron los reactores con el agua residual sintética, se suministró el oxígeno y se adicionó un complejo bacterial comercial, de origen ecuatoriano, desarrollado para la depuración de aguas residuales; este último con la finalidad de acelerar el proceso de aclimatación y desarrollo de la biopelícula en el medio de soporte. Este periodo tuvo una duración de 1 mes.

La experimentación se llevó a cabo en dos etapas. La primera corresponde al tratamiento en sistema cerrado, donde se evaluó durante 8 días la remoción de materia orgánica en términos de DQO, de esta manera se determinó el grupo de tiempos de retención hidráulico que serían evaluados en el sistema continuo. Adicionalmente se monitoreó la temperatura que registró un valor promedio de 16,73°C, el pH mantuvo un valor constante de 7 y el oxígeno disuelto estuvo alrededor de 2,39 mg O₂/L.

Durante la segunda etapa, en la que se evaluó el tratamiento en flujo continuo, se analizaron las concentraciones iniciales y finales de DQO y DBO₅ de los tres tiempos de retención hidráulico obtenidos en la etapa anterior, así como los SSV del influente, medio de soporte y efluente. Se ajustó el caudal para cada tiempo de retención en cada uno de los reactores y se preparó diariamente agua residual sintética para alimentar al sistema. De manera similar a la primera etapa fueron monitoreados la temperatura, el pH y el oxígeno disuelto al inicio y fin de cada tiempo de retención hidráulico; la temperatura registró un valor promedio de 18,33°C al inicio y 17,93°C al final; el pH se mantuvo constante en un valor de 7 y el oxígeno disuelto al inicio estuvo alrededor de 2,61 mg O₂/L y al final bordeó los 2,43 mg O₂/L.

Los resultados de la evaluación nutricional del agua sintética correspondientes a la relación DBO₅/N/P igual a 100/32,9/1,13 demostraron que el agua residual utilizada cumple con los requerimientos nutricionales mínimos para tratamientos biológicos aerobios. Además el análisis de biodegradabilidad indicó que el agua residual con un valor de 1,86 es fácilmente biodegradable.

Del mismo modo, las pruebas de caracterización del lecho, indican que este posee una alta área superficial específica (97,16 m²/m³), y un elevado porcentaje de vacíos (95,42%), proporcionando un adecuado medio de soporte para el desarrollo de la biomasa.

Finalmente los resultados obtenidos durante el sistema cerrado y continuo demostraron que en las condiciones del experimento, la remoción del tratamiento es del 78% de remoción de DQO y 88% de DBO₅. El tiempo de retención hidráulico resultante es de 5 días, con un tiempo de retención celular de 8,93 días, y la relación alimento/microorganismos de $0,105 \frac{\text{Kg DBO}_5}{\text{Kg SSV día}}$.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN	1
JUSTIFICACIÓN	3
OBJETIVOS	6
OBJETIVO GENERAL	6
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
CAPÍTULO I.....	7
MARCO TEÓRICO.....	7
1. GENERALIDADES	7
2. USOS DEL AGUA	8
2.1. Situación del agua en el Ecuador	9
2.1.1. Legislación elemental ecuatoriana del agua	10
3. CONTAMINACIÓN DEL AGUA	12
3.1. Tipos de aguas contaminadas.....	12
4. AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS	14
4.1. Características y composición.....	14
5. TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES.....	16
5.1. Procesos del tratamiento de aguas residuales.....	18
6. PRINCIPIOS DEL TRATAMIENTO BIOLÓGICO	18
6.1. Crecimiento microbiológico.....	21
6.2. Clasificación de los tratamientos biológicos.....	22
6.2.1. Procesos aerobios.....	22
6.2.2. Procesos anóxicos	23
6.2.3. Procesos anaerobios	23
6.3. Importancia de los procesos biológicos aerobios.....	23

6.3.1.	Tratamientos de crecimiento suspendido.....	24
6.3.2.	Tratamientos de crecimiento adherido.....	24
6.3.2.1.	Medios de soporte	25
6.3.2.2.	Biopelícula.....	27
7.	REACTORES BIOLÓGICOS AIREADOS SUMERGIDOS.....	30
7.1.	Reactores aerobios de crecimiento adherido sumergido con flujo ascendente	30
CAPÍTULO II		32
MARCO METODOLÓGICO		32
8.	TRATABILIDAD DE LAS AGUAS RESIDUALES.....	32
9.	VARIABLES DE CONTROL.....	33
9.1.	Demanda química de oxígeno (DQO)	33
9.1.1.	Cálculo de la DQO.....	34
9.2.	Demanda bioquímica de oxígeno (DBO).....	36
9.2.1.	Relación entre DBO y DQO	37
9.1.	Sólidos suspendidos volátiles (SSV).....	38
10.	CONDICIONES DEL PROCESO.....	40
10.1.	Oxígeno disuelto (OD).....	40
10.1.1.	Determinación del oxígeno disuelto.....	41
10.2.	Potencial de hidrógeno (pH)	42
10.3.	Temperatura (T)	43
10.4.	Agua residual sintética	44
11.	PARÁMETROS DE DISEÑO.....	46
11.1.	Tiempo de retención hidráulico (θ_H).....	46
11.2.	Tiempo de retención celular (θ_C).....	47
11.3.	Relación Alimento/Microorganismos (A/M).....	49

11.1.	Consideración complementaria.....	50
11.1.1.	Carga orgánica (CO).....	50
12.	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO.....	50
12.1.	Características de los reactores	50
12.1.1.	Red de distribución del agua residual sintética empleado para el sistema en flujo continuo	52
12.2.	Propiedades del lecho.....	53
12.2.1.	Cálculo del Área superficial específica (A_{SE})	54
12.2.2.	Prueba de porosidad (ϵ).....	55
12.3.	Evaluación nutricional del agua sintética.....	56
12.4.	Arranque y acondicionamiento de los reactores	57
12.4.1.	Cultivo de microorganismos	57
12.5.	Ensayos en sistema cerrado.....	60
12.6.	Ensayos en sistema continuo.....	61
13.	EVALUACIÓN ESTADÍSTICA.....	61
CAPÍTULO III.....		62
RESULTADOS Y DISCUSIÓN		62
14.	EVALUACIÓN NUTRICIONAL DEL AGUA RESIDUAL SINTÉTICA	62
15.	CARACTERIZACIÓN DEL MEDIO DE SOPORTE UTILIZADO ...	63
15.1.	Área superficial específica	63
15.2.	Porosidad.....	64
16.	DETERMINACIÓN DEL θ_H	66
16.1.	Sistema cerrado	66
16.1.1.	Condiciones del proceso.....	66
16.1.2.	Remoción de materia orgánica	67

16.1.3.	Comportamiento de la remoción de DQO y rendimiento	68
16.1.4.	Análisis de varianza.....	69
16.1.5.	Comparaciones o prueba de rangos múltiples.....	70
16.2.	Sistema continuo	73
16.2.1.	Condiciones del proceso.....	73
16.2.2.	Remoción de materia orgánica	76
16.2.3.	Análisis de varianza.....	77
16.2.4.	Prueba de rangos múltiples.....	78
16.2.5.	Remoción en términos de DBO ₅	79
16.2.5.1.	Análisis de varianza.....	81
16.2.5.2.	Prueba de rangos múltiples.....	81
17.	DETERMINACIÓN DEL θC	83
18.	DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN A/M.....	85
CAPÍTULO IV		87
OBSERVACIONES FINALES		87
19.	CONCLUSIONES	87
20.	RECOMENDACIONES	89
21.	PROYECCIÓN FUTURA	90
BIBLIOGRAFÍA		91
GLOSARIO		98
Anexo 1		101
Anexo 2		107
Anexo 3		110
Anexo 4		113
Anexo 5		119

Anexo 6	125
Anexo 7	132
Anexo 8	139

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Principales propiedades del agua.....	7
Tabla 2.- Demanda de agua por sector en el Ecuador.....	9
Tabla 3.- Valores para la descarga de efluentes al alcantarillado.	11
Tabla 4.- Valores para la descarga de efluentes a cuerpos de agua dulce.....	11
Tabla 5.- Clasificación general de las aguas residuales.	13
Tabla 6.- Grado de contaminación típica de las aguas residuales.....	15
Tabla 7.- Conteos bacterianos típicos en el agua.	16
Tabla 8.- Principales microorganismos de los tratamientos biológicos.	19
Tabla 9.-Propiedades físicas de medios de soporte para tratamientos biológicos.	25
Tabla 10.- Especificaciones del equipo de aireación.	41
Tabla 11.- Condiciones de temperatura ambiente durante la experimentación.	43
Tabla 12.- Características microbiológicas, físicas y químicas del complejo bacterial PLUS 1.....	57
Tabla 13.- Proporción de reactivos para preparación del inculo.....	59
Tabla 14.- Resultados de una muestra de agua residual sintética afluyente.	62
Tabla 15.- Cumplimiento de la relación nutricional mínima para aguas residuales. .	62
Tabla 16.- Principales magnitudes del medio de soporte.....	63
Tabla 17.- Cálculo de la A_{SE} del medio de soporte.....	63
Tabla 18.- Datos obtenidos para la prueba de porosidad.	64
Tabla 19.- Condiciones monitoreadas en el sistema cerrado.	66
Tabla 20.- Valores iniciales de DQO en el sistema cerrado.	67

Tabla 21.- Resultados de remoción de DQO en el sistema cerrado.....	67
Tabla 22.- ANOVA para la remoción de DQO en el sistema cerrado.	70
Tabla 23.- Grupos homogéneos mediante prueba de rango múltiple, método LSD, factor: tiempo de tratamiento en el sistema cerrado.....	71
Tabla 24.- Diferencia significativa entre medias mediante prueba de rango múltiple, método LSD, factor: tiempo de tratamiento en el sistema cerrado.	71
Tabla 25.- Condiciones monitoreadas en el $\theta H = 96$ horas.	73
Tabla 26.- Condiciones monitoreadas en el $\theta H = 120$ horas.	74
Tabla 27.- Condiciones monitoreadas en el $\theta H = 144$ horas.	74
Tabla 28.- Caudales ajustados y sus cargas orgánicas correspondientes para los tiempos de retención hidráulica de interés.	75
Tabla 29.- Valores iniciales de DQO en el sistema continuo.	76
Tabla 30.- Resultados de remoción de DQO en el sistema continuo.....	76
Tabla 31.- ANOVA para la remoción de DQO en el sistema continuo.	77
Tabla 32.- Grupos homogéneos (% remoción DQO) mediante prueba de rango múltiple, método LSD, factor: θH	78
Tabla 33.- Diferencia significativa entre medias (% remoción DQO) mediante prueba de rango múltiple, método LSD, factor: θH	78
Tabla 34.- Valores iniciales de DBO_5 en el sistema continuo.....	79
Tabla 35.- Resultados de remoción de DBO_5 en el sistema continuo.....	80
Tabla 36.- ANOVA para la remoción de DBO_5 en el sistema continuo.....	81
Tabla 37.- Grupos homogéneos (% remoción DBO_5) mediante prueba de rango múltiple, método LSD, factor: θH	82
Tabla 38.- Diferencia significativa entre medias (% remoción DBO_5) mediante prueba de rango múltiple, método LSD, factor: θH	82
Tabla 39.- SSV en el afluente del reactor.	83
Tabla 40.- SSV en el efluente del reactor.	84
Tabla 41.- SSV en el medio de soporte.....	84

Tabla 42.- Tiempo de retención celular para los diferentes θ_H .	85
Tabla 43.- Relación A/M para los diferentes θ_H .	85
Tabla 44.- Proporción de soluciones para la oxidación.	105

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1.- Curva de crecimiento microbiano.	21
Ilustración 2.- Fases de crecimiento microbiano con cambios en la biomasa y sustrato en el tiempo.	22
Ilustración 3.- Fases de formación de biopelícula.	29
Ilustración 4.- Modelo de desarrollo de biopelícula.	29
Ilustración 5.- Esquema de un reactor de lecho fijo de flujo ascendente.	31
Ilustración 6. Determinación de la curva de calibración.	35
Ilustración 7.- Curva de calibración para ensayos de DQO.	35
Ilustración 8.- Muestreo de agua residual para mediciones de DQO.	36
Ilustración 9.- Muestreo de agua residual para mediciones de DBO.	37
Ilustración 10.- Muestreo de agua residual para mediciones de SSV.	39
Ilustración 11.- Bombas de acuario para suministro de aire.	41
Ilustración 12.- Medición de OD en los reactores.	42
Ilustración 13.- Medición de pH del agua residual.	42
Ilustración 14.- Medición de temperatura del agua residual.	44
Ilustración 15.- Harina de sangre y melaza.	45
Ilustración 16.- Cuantificación del peso de la harina de sangre y volumen de la melaza.	45
Ilustración 17.- Mezclado del agua sintética y vertido en los reactores.	46
Ilustración 18.- Lavado y filtrado de la biomasa adherida al medio de soporte.	49
Ilustración 19.- Sistema de tratamiento.	51
Ilustración 20.- Colocación de las mangueras perforadas para el suministro de aire.	51

Ilustración 21.- Esquema de la red de dotación de aire al reactor.....	52
Ilustración 22.- Ubicación del tanque de alimentación.....	52
Ilustración 23.- Dosificadores por goteo para sistema de flujo continuo.....	53
Ilustración 24.- Módulo de plástico utilizado como medio de soporte.....	53
Ilustración 25.- Ubicación del material de soporte en los reactores.	53
Ilustración 26.- Módulos del lecho antes y después del crecimiento microbiano.....	55
Ilustración 27.- Arranque de los reactores.	57
Ilustración 28.- Complejo bacterial ecuatoriano PLUS 1.	58
Ilustración 29.- Pesaje de la melaza y el complejo bacterial PLUS 1.....	59
Ilustración 30.- Activación del complejo bacterial y distribución en el sistema.	59
Ilustración 31.- Formación de la biopelícula en el sistema.....	60
Ilustración 32.- Tratamiento en sistema cerrado.....	60
Ilustración 33.- Tratamiento en sistema de flujo continuo.....	61
Ilustración 34.- Recipiente de 50 L y ubicación de los módulos.	65
Ilustración 35.- Vertido de agua con recipientes graduados.	65
Ilustración 36.- Diagrama de cajas para concentración de DQO en el sistema cerrado.	68
Ilustración 37.- Comportamiento de la DQO y el rendimiento.....	69
Ilustración 38.- Gráfico de medias y 95% de Fisher LSD, factor: tiempo de tratamiento en el sistema cerrado.....	73
Ilustración 39.- Diagrama de cajas para concentración de DQO en el sistema continuo.....	76
Ilustración 40.- Gráfico de medias (% remoción DQO) y 95% de Fisher LSD, factor: θ_H	79
Ilustración 41.- Diagrama de cajas para concentración de DBO ₅ en el sistema continuo.....	80
Ilustración 42.- Gráfico de medias (% remoción DBO ₅) y 95% de Fisher LSD, factor: θ_H	82

Ilustración 43.- Preparación de la solución ácida de Dicromato de Potasio.	103
Ilustración 44.-Preparación de la Mezcla Digestora.	103
Ilustración 45.-Estándares de 100, 200, 400, 600 y 800 mg O ₂ /L.	104
Ilustración 46.- Dilución de las muestras de agua.....	104
Ilustración 47.- Calentamiento de los tubos y enfriamiento.	105
Ilustración 48.- Determinación de la absorbancia.....	106
Ilustración 49.- Filtración de las muestras de agua.....	108
Ilustración 50. Calcinación de las muestras filtradas.	109
Ilustración 51.- Pesaje de las muestras calcinadas.	109

INTRODUCCIÓN

El agua es el compuesto más abundante en el planeta. Evidentemente, casi los tres cuartos de la superficie terrestre están cubiertos por agua, y a primera vista parece no diferir de cualquier otro líquido. Sin embargo, las propiedades físicas y químicas del agua resultan diferentes cuando se comparan con las de los otros fluidos, y estas diferencias son esenciales para el desarrollo de la vida en el planeta. Asimismo, la disponibilidad de agua se reduce al considerar que aproximadamente el 0,04% del total es aprovechable para el consumo humano, actividades productivas y recreación; debido a que este recurso se encuentra concentrado en gran parte en los océanos, mares, glaciales y aguas subterráneas.

Uno de los elementos determinantes de la salud humana es la disponibilidad de agua dulce. El crecimiento de la población, la industrialización y la expansión de la agricultura de regadío en los últimos decenios han provocado un aumento drástico en la demanda humana de agua, situación que es agravada por la distribución geográfica irregular que presenta.

Paralelamente, la pequeña porción de agua disponible para consumo humano está sufriendo un acelerado proceso de pérdida de calidad y cantidad. Según el Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos (WWAP) hasta el año 2003 se estimó que la producción mundial de aguas residuales rodeaba los 1.500 Km³ y considerando que un litro de aguas residuales contamina aproximadamente 8 litros de agua dulce, la carga mundial de contaminación alcanzó los 12.000 Km³.

Las sustancias que son vertidas en las aguas residuales muestran dos condiciones: biodegradabilidad y no biodegradabilidad; la primera condición hace referencia a la facilidad de ser descompuestas por agentes microbianos y sus reacciones químicas; lo que no ocurre en el segundo caso.

Aunque los eventos más enfáticos y difundidos de contaminación de las aguas se dirigen a sustancias no biodegradables tóxicas, no exhiben el problema de manera determinante al contrastarlos con los casos que involucran a sustancias biodegradables, provenientes casi en su totalidad de fuentes domésticas.

Del mismo modo, la composición de las aguas residuales auténticamente domiciliarias ha cambiado por efecto de las nuevas tendencias del mercado ahora disponibles, como detergentes artificiales, blanqueadores, entre otros. Por tanto, tratar las aguas residuales domésticas de manera eficiente requiere modificaciones del enfoque tradicional, considerando nuevas tecnologías, innovadores procesos y en general nuevas directrices de tratamiento, así como modificación de las antiguas.

Los tratamientos biológicos se consideran los procesos más eficientes para la depuración de aguas residuales con alto contenido de materia orgánica, dado que lo que para nosotros es contaminación, para las bacterias es alimento. Según el estado de los microorganismos, existen dos alternativas de tratamiento, reactores con cultivos en suspensión y reactores con cultivos fijos; siendo este último de nuestro interés. Además, por conocimientos previos se reconoce que las condiciones aeróbicas en un reactor biológico son deseables, ya que los productos finales son sustancias químicamente estabilizadas, no reprochables por la población beneficiada, algo que sí ocurre cuando la digestión es en condiciones de ausencia de oxígeno o anaerobias.

Actualmente, existe una gran oferta de diversos reactores que involucran tratamientos biológicos de cultivo fijo prefabricados, diseñados a partir de condiciones ambientales muy generalizadas que se han pretendido implementar en localidades con realidades particulares. En consecuencia, esta situación ha ocasionado la disminución de efectividad de los reactores, mayores costos de control, y en muchos casos, el colapso del sistema.

Este trabajo de investigación propone como solución el estudio de tratabilidad biológica previo a un proyecto de saneamiento de aguas residuales, con el fin de identificar los parámetros fundamentales de diseño, acondicionados a las circunstancias propias de la zona intervenida; y al mismo tiempo constituir una garantía de inversión en la etapa de construcción, la optimización de procesos de control y evaluación del sistema en su etapa de funcionamiento. Los resultados alcanzados en la presente investigación detallan que el reactor aerobio de flujo ascendente con las condiciones ambientales de la ciudad de Cuenca, tiene una alta eficiencia y asegura su rendimiento a largo plazo.

JUSTIFICACIÓN

Dentro de los Objetivos de Desarrollo del Milenio de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), se plantea reducir en un 50% el porcentaje de la población mundial sin acceso sostenible al agua potable y a servicios de saneamiento, para el período de 1990- 2015¹, el cual según datos de la Organización Mundial de la Salud (OMS) sigue estando muy retrasado. Prueba de esto se observa que el 64% de la población mundial carece de sistemas de saneamiento mejorados².

Para cumplir la meta de los Objetivos de Desarrollo del Milenio relacionada con el saneamiento sería preciso que, desde ahora hasta 2015, la cobertura global deba alcanzar el 75%, esto “significará extender los servicios de saneamiento a aproximadamente 660.000 personas al día, todos los días”³; misión que resulta dificultosa considerando que el saneamiento no suele definirse prioritario en los proyectos de desarrollo. A nivel de América Latina y el Caribe se estima que únicamente el 28% de las aguas residuales se trata antes de la descarga⁴, datos que proporcionan evidencia del descuido sobre este servicio.

Dentro de la estrategia adoptada por la OMS en el período 2013-2020, para gestionar la calidad del agua con el fin de proteger y promover la salud humana, se menciona, que el agua contaminada es un mecanismo de transmisión de enfermedades como la diarrea, el cólera, la disentería, la fiebre tifoidea y la infección del gusano de Guinea; de manera alarmante se estima que más de 200 millones de personas están afectadas por la esquistosomiasis y alrededor de 800 millones más están en riesgo de infección. En lo referente a vectores de transmisión de enfermedades presentes en el agua se cita que los brotes de fiebre del dengue se han multiplicado por cuatro desde 1995, con 2,5 millones de personas en situación de riesgo en la actualidad; se estima que existen aproximadamente 50-100 millones de casos de dengue en todo el mundo cada año⁵.

¹ ONU^a, *Objetivos de Desarrollo del Milenio – Informe 2013*, Nueva York, junio de 2013, p. 46.

² OMS, *Estadísticas Sanitarias Mundiales 2013*, WHO Documents Production Services, Ginebra - Suiza, 2013, p. 16.

³ ONU^a, *Op. Cit.*, p. 48.

⁴ UNESCO^a, 4^{to}. *Informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo. “Gestionar el agua en un contexto de incertidumbre y riesgo”*, 2012. p. 205.

⁵ WHO^a, *Water Quality and Health Strategy 2013-2020*, 2013, p. 6-7.

El Dr. LEE Jong-wook, Ex Director General de la OMS manifestó que:

“El agua y el saneamiento es uno de los principales motores de la salud pública. [...] en cuanto se pueda garantizar el acceso a las instalaciones sanitarias adecuadas para todos, independientemente de la diferencia de sus condiciones de vida, se habrá ganado una importante batalla contra todo tipo de enfermedades”⁶.

Si bien las políticas mundiales en pro de aumentar el acceso al agua potable antes de 2015 han dado resultados; resulta insuficiente lo hasta ahora realizado a favor de la implementación de sistemas de tratamiento, donde Ecuador no es la excepción.

Aludiendo al último censo de Población y Vivienda 2010, la cobertura de agua potable en el país llegó a un 72% y el acceso a la red de alcantarillado sanitario alcanzó el 54%. Por otro lado, según la Secretaría Nacional del Agua (SENAGUA) para el año 2012, apenas el 8% de las aguas residuales en el país son sometidas a algún proceso de depuración, mientras el 92% de las aguas residuales domésticas son descargadas directamente a los cauces principales, causando un aumento significativo en el número de enfermedades por infecciones estomacales. Las enfermedades diarreicas agudas, generadas por la mala calidad del agua y alimentos están entre las 10 principales causas de mortalidad y morbilidad en el país, según información presentada en el Programa Agua Segura del Ministerio de Salud Pública del 2012.

Dentro de la variabilidad de opciones para la depuración de aguas negras, los tratamientos biológicos son los preferidos, ya que tienen mayores rendimientos de remoción de materia orgánica con menores costes económicos de utilización y mantenimiento a diferencia de procesos químicos⁷. “Los costes de inversión de los procesos biológicos son del orden de 5 a 20 veces menores que los químicos. A su vez, los costes de tratamiento son de 3 a 10 veces menores”⁸.

Los procesos biológicos ocurren con o sin presencia de oxígeno. Los sistemas biológicos aeróbicos son los más eficaces para la eliminación de compuestos

⁶ WHO^b, *Facts and figures: Water, sanitation and hygiene links to health*, 2004, p. 1.

⁷ SHUN, Dar Lin, *Water and Wastewater Calculations Manual*, 2^{da}. Edición, McGraw-Hill, Estados Unidos, 2001, p. 617.

⁸ LOPEZ, Erick, *Tratamiento de Aguas Residuales*, Instituto Tecnológico Superior de Irapuato, México, 2012, p. 203.

orgánicos; estos procesos pueden ser llevados a cabo por medio de procesos de crecimiento suspendido, en el que las células bacterianas se suspenden en la columna de agua en un tanque, o procesos de crecimiento adherido, en los que las células se unen a una superficie como una biopelícula y el agua fluye sobre la superficie⁹.

Dentro de los sistemas aerobios de crecimiento adherido se destacan: los procesos de crecimiento en película bacterial sumergidos, procesos de crecimiento no sumergidos y procesos híbridos de crecimiento en película bacterial adherida y crecimiento en suspensión; siendo el primero de un desarrollo relativamente reciente y usado para tratar aguas residuales domésticas¹⁰. Adicionalmente, al emplear materiales sintéticos como medio de soporte en estos sistemas, las cargas hidráulicas y orgánicas que podrían soportar son mayores debido a la gran superficie específica y espacios huecos que posee el lecho, permitiendo además una mejor transferencia de oxígeno¹¹.

Por otro lado, según Moncayo & Ayala¹² los sistemas de tratamiento prefabricados o compactos hoy en día empleados, tienden a perder eficiencia con el tiempo debido al desconocimiento de parámetros de control requeridos y la forma de hacerlo; lo que deriva en una estricta necesidad de realizar un estudio de tratabilidad biológica previa elaboración de cualquier diseño, con el fin de optimizar resultados y a su vez obtener una ventaja comercial, mediante la comprobación de la eficiencia del tratamiento propuesto con pruebas de laboratorio certificado antes de invertir en la implementación.

Haciendo hincapié en estos hechos, consideramos necesario aplicar un estudio de tratabilidad biológica mediante un Reactor Aerobio de Flujo Ascendente de Lecho Fijo Experimental para optimizar resultados a escala real, de manera que se pueda garantizar su eficiencia y aplicabilidad en el tratamiento de aguas residuales domésticas.

⁹ TEMPLETON, Michael and BUTLER, David, *Introduction to Wastewater Treatment*, Ventus Publishing ApS, Londres, 2011, p. 43-44.

¹⁰ CRITES, Ron y TCHOBANOGLOUS, George, *Tratamiento de Aguas Residuales en Pequeñas Poblaciones*, McGraw-Hill, Colombia, 2000, p. 430-431.

¹¹ ARNAIZ, Carmen y otros, "Eliminación biológica de contaminantes (II)", *Ingeniería Química*, año XXXIV, número 390, España, mayo de 2002, p. 188.

¹² MONCAYO, Irina y AYALA, Diana, "Estudio de tratabilidad biológica de aguas residuales domésticas para optimizar resultados a escala real", *Revista Digital VI CONGRESO Ciencia y Tecnología ESPE 2011*, ESPE Campus Politécnico-Sangolquí, junio de 2011, p. 1.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Determinar los parámetros de diseño a escala real de un reactor de lecho fijo experimental de flujo ascendente en laboratorio.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Identificar el valor nutricional del agua residual, mediante la cuantificación de la demanda química de oxígeno, nitrógeno y fósforo.

- ✓ Diseñar y estabilizar el reactor para determinar el tiempo de retención celular, tiempo de retención hidráulica y la relación Alimento/Microorganismos del reactor, mediante un caudal de entrada.

- ✓ Evaluar la eficiencia de remoción del reactor.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1. GENERALIDADES

El agua junto con el aire, la tierra y la energía constituyen los cuatro recursos básicos en que se apoya el desarrollo de la vida. Particularmente, el agua constituye el líquido más abundante en el planeta y en promedio forma parte del 70% de los seres vivos, de manera que un ser humano no puede sobrevivir más de tres a cuatro días sin beber agua.

Es un compuesto químico estable formado por la unión de dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno que se encuentra distribuido en la naturaleza en tres estados: líquido, sólido y gaseoso. Sus propiedades organolépticas son: inodora, insípida, e incolora en pequeñas cantidades y azulada en grandes volúmenes.

Se le atribuye la denominación de disolvente universal debido a que la mayoría de sustancias pueden disolverse en ella, permite mantener la temperatura corporal al poseer elevado calor específico, facilita el transporte de sustancias, sirve como lubricante y participa en los procesos metabólicos de los seres vivos; todas estas funciones vitales hacen del agua un recurso imprescindible para la existencia misma.

Algunas de las propiedades más importantes del agua se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 1.- Principales propiedades del agua.

PROPIEDAD	VALOR	PROPIEDAD	VALOR
<i>Peso molecular</i>	18,015 g/mol	<i>Calor de vaporización (1 atm)</i>	539,5 cal/g
<i>Punto de congelación</i>	0°C	<i>Calor de fusión (1 atm)</i>	79,7 cal/g
<i>Punto de ebullición</i>	100°C	<i>Viscosidad (20°C)</i>	0,001002 g/cm/s
<i>Calor específico (15°C)</i>	1 cal/g	<i>Densidad (3,98°C)</i>	0,99997 g/ml

Fuente: DOMÉNECH, Xavier, *Química de la Hidrósfera: Origen y destino de los contaminantes*, 2000.

En términos generales el agua puede clasificarse por su origen en dos grupos: *agua meteórica*, que corresponde al agua proveniente de la lluvia, nieve o granizo; y *agua telúrica* (surge del interior de la tierra), referida al agua originaria de manantiales, corrientes y depósitos subterráneos¹³.

Estos diversos orígenes del agua promueven una distribución irregular en las distintas regiones del planeta; es así que, de la totalidad del agua en el mundo, el 97,5% conforma los océanos y el 2,5% corresponde al agua dulce, de los cuales el 99,6% se localiza en glaciares, aguas subterráneas y permafrost (suelo permanentemente congelado), y únicamente el 0,4% es parte de los ríos, lagos, humedales, plantas y animales¹⁴.

2. USOS DEL AGUA

Los factores naturales y antropogénicos son los que definen la calidad del agua que se requiere para los diferentes usos. En ausencia de la actividad humana, la calidad del agua dependería de los procesos de evapotranspiración y sedimentación de sales y lodos, de la lixiviación natural de los nutrientes y materia orgánica del suelo debido a la precipitación, y los procesos biológicos existentes en el agua. La calidad del agua, usualmente se determina a partir de las características físicas, químicas y biológicas, con normas de calidad de agua o estándares para determinados usos.

La ONU analiza por sectores la situación de la demanda de agua a nivel mundial donde, del total del agua dulce utilizada en el mundo, el 78% corresponde a la agricultura; el 20% se destina al uso industrial (incluida la energía), aunque este valor varía según el país, proporcional al nivel de ingreso promedio, con sólo un 5% en países de bajos ingresos y un 40% en los que poseen ingresos altos. Finalmente, el 2% del agua dulce corresponde al uso en asentamientos humanos y la conservación de ecosistemas¹⁵.

¹³ LLATA María Dolores, *Ecología y Medio Ambiente*, 1^{ra}. Edición, Editorial Progreso, México, 2006, p. 160.

¹⁴ UNESCO^b, 2^{do}. *Informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo*. “EL Agua, una responsabilidad compartida”, 2006, p. 121.

¹⁵ UNESCO^a, *Op. Cit.*, p. 59-477.

El 87% de la población mundial goza de agua potable proveniente de fuentes mejoradas; el servicio es mayor en las zonas urbanas (94%) que en la rurales (76%); datos que pueden no representar la realidad, debido a la falta de información fiable sobre las poblaciones en barrios marginales, y por no considerar la calidad del servicio. Asimismo, se calcula que no son tratadas o recogidas más del 80% de las aguas contaminadas a nivel global¹⁶.

2.1. Situación del agua en el Ecuador

El Ecuador adquiere el agua mayoritariamente de las fuentes de agua superficiales; la disponibilidad hídrica de nuestro país rodea los 20.700 m³/hab/año, cifra que es muy superior a la media mundial de aproximadamente 1.700 m³/hab/año¹⁷.

El número de concesiones de agua concedidas desde 1973 al 2010 es de 73.015¹⁸, en donde la cantidad de agua implicada se distribuye de la siguiente manera:

Tabla 2.- Demanda de agua por sector en el Ecuador.

USO	DEMANDA	USO	DEMANDA
<i>Hidroeléctricas</i>	80%	<i>Agua Potable</i>	1,16%
<i>Riego</i>	15%	<i>Abrevadero, balneología, camaroneras, fuerza mecánica, piscícolas, termales y aguas de mesa.</i>	0,73%
<i>Uso doméstico</i>	1,32%		
<i>Industria</i>	1,29%		

Fuente: CABRERA, Hernán & otros, 4^{to} Taller regional sobre el uso seguro de aguas residuales en la agricultura para América Latina y el Caribe, 2012.

De éstas, las demandas correspondientes a los usos consuntivos representan el 18,99%, es decir las destinadas a abrevadero, uso doméstico, industrias, agua

¹⁶ UNESCO^a, *Op. Cit.*, p. 59-477.

¹⁷ SENAGUA, *Plan Nacional del Agua*, Quito, Ecuador, Documento no publicado, 2012. **Tomado de** SENPLADES, *Plan Nacional del Buen Vivir 2013-2017*, 1^{ra}. Edición, Quito, Ecuador, 2013, p. 229.

¹⁸ SENAGUA, *Política Pública Nacional del Agua*, Quito, Ecuador, 2012. **Tomado de** CABRERA, Hernán y otros, 4^{to} Taller regional sobre el uso seguro de aguas residuales en la agricultura para América Latina y el Caribe, *Informe para el Ecuador: Desarrollo de Capacidades para el Uso Seguro de Aguas Servidas en Agricultura-Producción de Aguas Servidas, Tratamiento y Uso en el Ecuador*, Lima, Perú, 2012, p. 3.

potable, riego y agua de mesa; mientras que las demandas referidas a los usos no consuntivos constituyen el 81,01%, concerniendo a estos usos, las aguas destinadas a la balneología, camaroneras, fuerza mecánica, hidroeléctricas, piscícolas y termales¹⁹.

Si bien la disponibilidad de agua en el país es abundante, la contaminación biológica, física y química de las aguas superficiales constituye un gran problema, agravado por el crecimiento poblacional y el incremento en la demanda por la utilización de la tierra. En el país las mayores fuentes contaminantes son la agricultura comercial, las plantas manufactureras, la minería y las petroleras²⁰.

Más del 80% de las industrias, agroindustrias, empresas de comercio y servicios, originan aguas residuales con alta carga orgánica, frecuentemente con sustancias tóxicas, que son descargadas directamente sobre el alcantarillado público o a los cuerpos de agua sin ningún tratamiento²¹. Como consecuencia de esta contaminación, se ha estimado que bajo los 2800 msnm el agua no es apta para consumo en más del 70% de las cuencas hidrográficas²².

Según los últimos reportes de saneamiento, a nivel nacional la cobertura de agua potable alcanza el 74,5%, para la red de alcantarillado llega al 54%, y de la correcta eliminación de excretas existe una cobertura del 93,2%²³. Sin embargo, únicamente el 8% de las aguas residuales son sometidas a algún tipo de tratamiento²⁴.

2.1.1. Legislación elemental ecuatoriana del agua

La regulación ambiental con respecto a la descarga de aguas residuales en el Ecuador se encuentra establecida en el Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA), Libro VI, Anexo 1, Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes: Recurso agua.

¹⁹ CABRERA, Hernán y otros, *Op. Cit.*, p. 3.

²⁰ CUERPO DE INGENIEROS DE LOS ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA, *Evaluación de los Recursos de Agua del Ecuador, 1998. Tomado de* CABRERA, Hernán y otros, *Op. Cit.*, p. 3.

²¹ CABRERA, Hernán y otros, *Op. Cit.*, p. 5.

²² *Idem.*, p. 5.

²³ SENPLADES, *Op. Cit.*, p. 141.

²⁴ SENAGUA, *Política Pública Nacional del Agua*, Quito, Ecuador, 2012. *Tomado de* CABRERA, Hernán y otros, *Op. Cit.*, p. 5.

Esta norma técnica determina o establece los límites permisibles, disposiciones y prohibiciones para las descargas en cuerpos de aguas o sistemas de alcantarillado.

A continuación se destaca los principales parámetros que serán sujeto de interés para la presente investigación, tanto para la descarga de efluentes al alcantarillado como a cuerpos de agua dulce:

Tabla 3.- Valores para la descarga de efluentes al alcantarillado.

PARÁMETROS	EXPRESADO COMO	UNIDAD	LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE*
Demanda Bioquímica de oxígeno (5 días)	D.B.O ₅	mg/l	250
Demanda Química de Oxígeno	D.Q.O	mg/l	500
Fósforo total	P	mg/l	15
Nitrógeno Total Kjeldahl	N	mg/l	40
Potencial de Hidrógeno	pH	mg/l	5-9
Sólidos Suspendidos Totales		mg/l	220
Temperatura	°C		<40
* Los valores de los límites máximos permisibles, corresponden a promedios diarios.			

Fuente: TULSMA, *Libro VI, Anexo 1, Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes: Recurso agua*, 2003.

Tabla 4.- Valores para la descarga de efluentes a cuerpos de agua dulce.

PARÁMETROS	EXPRESADO COMO	UNIDAD	LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE*
Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días)	D.B.O ₅	mg/l	100
Demanda Química de Oxígeno	D.Q.O	mg/l	250
Fósforo Total	P	mg/l	10
Nitrógeno Total Kjeldahl	N	mg/l	15
Potencial de hidrógeno	pH		5-9
Sólidos Suspendidos Totales		mg/l	100
Temperatura	°C		< 35
* La apreciación del color se estima sobre 10 cm de muestra diluida.			

Fuente: TULSMA, *Libro VI, Anexo 1, Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes: Recurso agua*, 2003.

3. CONTAMINACIÓN DEL AGUA

La contaminación del ambiente es un fenómeno latente desde la antigüedad, inherente a todos los niveles y lugares del mundo. Sin embargo, en años recientes se ha convertido en un delicado problema directamente relacionado con las actividades del ser humano y la manera en que hace uso de los recursos de la naturaleza.

Un recurso hídrico está contaminado cuando su composición, características o estado normal han sido alterados por fenómenos ajenos a su condición natural, limitando su utilidad y beneficio.

Todos los cuerpos de agua en el mundo sufren de contaminación, esto incluye el agua que se encuentra en los océanos, ríos, lagos, y bajo la tierra. Y si bien en el ciclo biogeoquímico del agua existen mecanismos naturales de purificación, la alta concentración y descarga de contaminantes provenientes del ser humano y sus actividades, dificultan la regeneración normal de las masas de agua. De aquí surge la denominación de aguas negras o residuales como:

Aguas residuales son fundamentalmente las aguas de abastecimiento de una población, después de haber sido impurificadas por diversos usos. [...], resultan de la combinación de líquidos o desechos arrastrados por el agua, procedentes de las casas habitación, edificios comerciales e instituciones, junto con los provenientes de los establecimientos industriales, y las aguas subterráneas, superficiales o de precipitación que puedan agregarse²⁵.

3.1. Tipos de aguas contaminadas

Existen diversos criterios de organización que pueden establecerse para las aguas residuales. Por simplicidad, Aurelio Hernández & otros²⁶ clasifican las aguas residuales conforme a su procedencia de la siguiente manera:

²⁵ DEPARTAMENTO DE SANIDAD DEL ESTADO DE NUEVA YORK, *Manual de tratamiento de aguas negras*, Editorial Limusa, México, 2009, p. 15.

²⁶ HERNÁNDEZ, Aurelio y otros, *Manual de depuración de uralita*, 2^{da}. Edición, Thomson Editores Spain, España, 2000, p. 4-5.

Tabla 5.- Clasificación general de las aguas residuales.

AGUA RESIDUAL	DESCRIPCIÓN
<i>Aguas pluviales</i>	Son las aguas de la escorrentía superficial provocada por las precipitaciones atmosféricas (lluvia, nieve, granizo, entre otros). Se caracterizan por grandes aportaciones intermitentes de caudal, y por una contaminación importante en los primeros 15-30 minutos. Las cargas contaminantes se incorporan al agua al atravesar la atmósfera y por el lavado de superficies y terrenos.
<i>Aguas blancas</i>	Son procedentes de la escorrentía superficial y de drenajes. Se caracterizan también por grandes aportaciones intermitentes y su contaminación. Su volumen está determinado por los primeros 15-30 minutos de las escorrentías y el flujo de caudales drenados (aguas salobres, filtraciones de alcantarillado, entre otros).
<i>Aguas urbanas o domésticas</i>	Son aguas recogidas en las aglomeraciones urbanas procedentes de los vertidos de la actividad humana doméstica, o de la mezcla de éstas con las procedentes de actividades comerciales, industriales y agrarias integradas en dicha aglomeración, y con las de drenaje y escorrentía de dicho núcleo. Sus volúmenes son menores que los de las aguas blancas y sus caudales y contaminación mucho más regulares.
<i>Aguas industriales</i>	Aguas procedentes de actividades industriales (preparación de materias primas, elaboración y acabado de productos, así como la transmisión de calor y frío). Con independencia del posible contenido de sustancias similares a los vertidos de origen doméstico, pueden aparecer en las aguas industriales elementos propios de cada actividad industrial, entre los que pueden citarse: tóxicos, iones metálicos, productos químicos, hidrocarburos, detergentes, pesticidas, productos radioactivos, entre otros.
<i>Aguas agrarias</i>	Son aguas procedentes de actividades agrícolas y ganaderas. Análogamente a las aguas industriales, las aguas agrarias, además del contenido de sustancias similares a los vertidos de origen doméstico, pueden contener elementos propios de la actividades agrarias: Fertilizantes, biocidas (plaguicidas, pesticidas, productos fitosanitarios y varios), estiércol, residuos diversos, entre otros. Con respecto a los fertilizantes es importante destacar que antes eran de origen orgánico y hoy han sido casi sustituidos por abonos de origen inorgánico, tales como sulfatos, nitratos, fosfatos, entre otros, de especial incidencia en la contaminación de aguas.

Fuente: HERNÁNDEZ, Aurelio & otros, *Manual de depuración Uralita*, 2000.

4. AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS

Las concentraciones de población urbana y su rápido crecimiento constituyen una de las mayores fuentes de contaminación, debido a los grandes volúmenes de aguas residuales domésticas producidas, las cuales, en su mayor parte, son colectadas por las redes de alcantarillado; situación que difiere mucho en las áreas rurales donde casi la totalidad de las viviendas se encuentran desprovistas de estas redes y disponen sus aguas residuales en fosas sépticas o directamente a los cuerpos de agua.

4.1. Características y composición

Una vez producida el agua residual doméstica presenta un olor a queroseno y color gris. El agua residual con más tiempo de haber sido generada es séptica y pestífera, de color negro y con un olor sulfhídrico característico, similar al de los huevos podridos.

La evidencia empírica indica que la cantidad de agua usada por una casa es una función compleja de una serie de variables, incluyendo el precio del agua (tanto en términos monetarios y en costos de tiempo), los ingresos del hogar, y las características del hogar (por ejemplo, el número de habitantes y aparatos que utilizan agua); circunstancias que evidentemente tendrán influencia total en la calidad de agua residual eliminada. Sin embargo, en términos generales Xavier Doménech²⁷ sugiere que la composición de las aguas residuales domésticas viene dado por:

- ✓ **Materia orgánica:** Compuesta básicamente de materia fecal, siendo el 90% proteínas y carbohidratos.
- ✓ **Compuestos refractarios:** Corresponden a productos químicos domésticos y a los vertidos por la industria.
- ✓ **Surfactantes:** Procedentes, sobretodo, de los detergentes domésticos.

²⁷ DOMÉNECH, Xavier, *Química de la hidrosfera. Origen y destino de los contaminantes*, 3^{ra}. Edición, Miraguano Ediciones, Madrid, España, 2000, p. 133.

- ✓ **Grasas y aceites:** Derivan de las cocinas, talleres de automóviles, industrias, entre otros.
- ✓ **Sales:** Tienen su origen en los desechos humanos y en la industria.
- ✓ **Metales pesados:** Proviene básicamente de industrias interiorizadas en el medio urbano.
- ✓ **Agentes complejantes:** Se deben al uso de detergentes, en talleres galvánicos e industrias.
- ✓ **Sólidos en suspensión:** Su origen es muy variado.

Para este tipo de aguas de composición compleja, existen unos indicadores de calidad que dan una idea global de su estado bioquímico. En la *Tabla 6* y *Tabla 7* se señala los principales parámetros de control y la contaminación típica de las aguas residuales domésticas.

Tabla 6.- Grado de contaminación típica de las aguas residuales.

COMPONENTE	INTERVALO	VALOR TÍPICO
<i>Sólidos totales (mg ST/L)</i>	375 – 1800	740
<i>Suspensión (mg ST/L)</i>	120 – 360	230
<i>Fijos volátiles (mg FV/L)</i>	30 – 280	55 – 175
<i>Sedimentables (mL/L)</i>	5 – 20	10
<i>Disueltos (mg SD/L)</i>	250 – 800	500
<i>DBO5 (mg O₂/L)</i>	110 – 400	210
<i>DQO (mg O₂/L)</i>	200 – 780	400
<i>Nitrógeno total</i>	20 – 85	40
<i>Nitrógeno orgánico</i>	8 – 35	20
<i>Amonio</i>	12 – 50	20
<i>Nitritos y Nitratos</i>	0	0

COMPONENTE	INTERVALO	VALOR TÍPICO
<i>Fósforo Total (mg P/L)</i>	4 – 15	8
<i>Orgánico</i>	1 – 5	3
<i>Inorgánico</i>	3 – 10	5
<i>pH</i>	6,7 – 7,5	7

Fuente: CARRASCO, Francisco & MENÉNDEZ, Ángel, *Nuevos materiales y tecnologías para el tratamiento del agua*, 2010.

Tabla 7.- Conteos bacterianos típicos en el agua.

FUENTE	BACTERIAS EN 100 ML	BACTERIAS COLIFORMES* EN 100 ML
<i>Agua de la llave</i>	10	0 - 1
<i>Agua natural limpia</i>	103	0 - 102
<i>Agua contaminada</i>	106-108	103 - 105
<i>Aguas negras sin tratar</i>	108	105

*Las bacterias coliformes están presentes en las aguas negras pero se mueren con el tiempo en las aguas naturales. Su hábitat natural son los intestinos de los mamíferos de sangre caliente y el suelo.

Fuente: HENRY, Glynn & HEINKE, Gary, *Ingeniería Ambiental*, 1999.

5. TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES

Los sistemas de tratamiento aparecen en Inglaterra a finales del siglo XIX, ante la necesidad de cuidar la salud pública e impedir los impactos ocasionados por la evacuación de las aguas negras al ambiente. En un inicio, el tratamiento del agua residual consistía en hacerla pasar por un filtro de piedras en el que se desarrollaban colonias de microorganismos que consumían la materia orgánica²⁸.

El tratamiento se desarrolló con el fin de acelerar la acción de las fuerzas naturales de depuración, ejerciendo un control sobre las condiciones del proceso, y en espacios de reducido tamaño. Sus fines hasta 1970 eran estéticos y medio ambientales, mediante la eliminación de la materia en suspensión y los flotantes, la reducción de la materia

²⁸ CARRASCO, Francisco y MENÉNDEZ, Ángel, *Nuevas tecnologías para el tratamiento del agua*, 1^{ra}. Edición, Editorial Universidad Internacional de Andalucía, España, 2010, p. 84.

orgánica biodegradable y la eliminación de los organismos patógenos. Además se empezó a reconocer la importancia de eliminar nutrientes como el nitrógeno y el fósforo (responsables de la eutrofización de las aguas). Desde 1980, gracias a los progresos científicos y mayor conocimiento acerca de la cuestión, el tratamiento de las aguas residuales empieza a enfocarse, además de los objetivos primitivos ya mencionados, a los problemas de salud ocasionados por la descarga de sustancias tóxicas al ambiente²⁹.

En la actualidad el tratamiento de las aguas residuales abarca una gran variedad de sistemas para la eliminación de los contaminantes presentes en ellas, basados en operaciones físicas, químicas y/o biológicas que se combinan o complementan en diversas etapas y otorgan el nivel de tratamiento empleado. De esta manera se define pretratamientos y tratamientos primarios, a los sistemas que emplean procesos físicos; tratamientos secundarios a los que requieren procesos biológicos o químicos; y tratamientos terciarios a los que utilizan la combinación de los anteriores³⁰.

La concentración de contaminantes y nutrientes constituye el fundamento de las regulaciones por parte de leyes y normas, para determinar la calidad del agua apropiada en relación a los diferentes usos.

Aurelio Hernández³¹ define los siguientes objetivos básicos para la depuración de aguas residuales:

- ✓ Prevenir y reducir al máximo la contaminación y sus molestias.
- ✓ Mantener un balance ecológico satisfactorio y asegurar la protección de la biósfera.
- ✓ Prever el desarrollo urbano, teniendo en cuenta las necesidades de calidad.
- ✓ Asegurar una atención especial a los aspectos ambientales en la planificación del suelo y de las ciudades.

²⁹ METCALF & EDDY^a, *Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización*, Vol. 1, 3^{ra} Edición, Editorial McGraw-Hill, España, 1995, p. 138.

³⁰ *Idem.*, p. 143.

³¹ HERNÁNDEZ, Aurelio y otros, *Op. Cit.*, p. 43.

5.1. Procesos del tratamiento de aguas residuales

Para determinar la factibilidad de un proceso o combinación adecuada de ellos, Jairo Romero Rojas³² considera fundamentalmente los siguientes aspectos:

- ✓ Las características del agua cruda.
- ✓ La calidad requerida del efluente.
- ✓ La disponibilidad de terreno.
- ✓ Los costos de construcción y operación del sistema de tratamiento.
- ✓ La confiabilidad del sistema de tratamiento.
- ✓ La factibilidad de optimización del proceso para satisfacer requerimientos futuros más exigentes.

Los contaminantes presentes en el agua residual pueden ser eliminados por procesos físicos, químicos y biológicos, que combinados en los sistemas de tratamiento, proporcionan eficientes remociones de material contaminante, haciendo posible la correcta disposición de las aguas tratadas en los cuerpos de agua.

Los métodos llevados a cabo en el tratamiento de las aguas residuales dependen en gran medida de la biodegradabilidad y no biodegradabilidad de los vertidos. Si pertenecen a la primera condición habitualmente se utilizan procesos biológicos, y si por el contrario corresponden a aguas no biodegradables se hacen uso de tratamientos de oxidación avanzada o químicos.

6. PRINCIPIOS DEL TRATAMIENTO BIOLÓGICO

El tratamiento biológico de aguas residuales supone la remoción de contaminantes mediante actividad biológica. La actividad biológica se aprovecha para remover principalmente sustancias orgánicas

³² ROMERO, Jairo, *Tratamiento de aguas residuales-Teoría y principios de diseño*, 3^{ra}. Edición, Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, Colombia, 2004, p. 139.

biodegradables, coloidales o disueltas, del agua residual, mediante su conversión en gases que escapan a la atmósfera y en biomasa extraíble mediante sedimentación. La actividad biológica también se usa para remover nitrógeno y fósforo del agua residual³³.

El tratamiento biológico requiere la presencia de muchos microorganismos, buen contacto entre estos organismos y el material orgánico, la disponibilidad de oxígeno, nutrientes suficientes, las condiciones favorables de temperatura, rangos de pH ventajosos, y el tiempo adecuado para que los organismos trabajen. De este modo, independientemente de cualquier proceso biológico, los microorganismos están haciendo el trabajo de biodegradación, y por lo tanto, todas las medidas deben ser adoptadas para garantizar un entorno favorable para ellos³⁴.

La aplicación de estos tratamientos acelera los mecanismos de descomposición natural, de manera que la eliminación de la materia orgánica degradable es conseguida bajo condiciones controladas y en menor tiempo que los sistemas naturales³⁵.

Los microorganismos considerados importantes en el tratamiento biológico son: bacterias, hongos, algas, protozoos, rotíferos y gusanos.

Tabla 8.- Principales microorganismos de los tratamientos biológicos.

MICROORGANISMOS	INCIDENCIA EN EL TRATAMIENTO BIOLÓGICO
<p style="text-align: center;"><i>Bacterias:</i></p> <p style="text-align: center;">Microorganismos unicelulares</p> <p style="text-align: center;">Dos tipos elementales en las aguas residuales:</p> <p style="text-align: center;">Formadoras de flóculo y formadoras de filamentos.</p>	<p>Las formadoras de flóculos tienen la capacidad, en las condiciones adecuadas, de agruparse mediante la excreción de polímeros exocelulares para formar un flóculo que es grande y lo suficientemente fuerte para sedimentarse.</p> <p>Las bacterias formadoras de filamentos también eliminan compuestos orgánicos de las aguas residuales, pero se caracterizan por las formas fibrosas o filiformes que son extremadamente ligeras y de fácil lavado del clarificador.</p> <p>Evidentemente, las bacterias formadoras de flóculo se prefieren en una planta de tratamiento biológico.</p> <p>La temperatura y pH juega un papel vital en la vida y muerte de las bacterias. La gran mayoría de las plantas de</p>

³³ ROMERO, Jairo, *Op. Cit.*, p. 225.

³⁴ FLYNN, Daniel, *The Nalco Water Handbook*, 3rd. Edition, McGraw-Hill, United States of America, 2009, p. 712.

³⁵ VON SPERLING, Marcos and DE LEMOS CHERNICHARO, Augusto, *Biological wastewater treatment in warm climate regions*, Vol. 1, 1st. Edition, IWA Publishing, 2005, p. 168, 182-183.

MICROORGANISMOS	INCIDENCIA EN EL TRATAMIENTO BIOLÓGICO
	tratamiento biológico están diseñadas para organismos mesófilos; éstas necesitan ser operadas en el rango de 25 a 40°C para obtener el máximo rendimiento. De igual manera, la mayoría de los organismos no pueden tolerar niveles de pH por encima de 9,5 o por debajo de 4,0. En general, el pH óptimo para el crecimiento de bacterias se encuentra entre 6,5 y 7,5.
<p>Hongos:</p> <p>En los sistemas de tratamiento biológico, los hongos se consideran, organismos heterótrofos multicelulares, no fotosintéticos y generalmente aerobios estrictos.</p>	Tienen la capacidad de crecer en condiciones de baja humedad y pueden tolerar un ambiente con un pH relativamente bajo. El pH óptimo para la mayoría de las especies es 5,6. Los hongos tienen un bajo requerimiento de nitrógeno, necesitando aproximadamente sólo la mitad del consumo bacteriano. Su capacidad para sobrevivir en condiciones bajas de pH y de nitrógeno los hace muy importantes en el tratamiento biológico de algunos residuos industriales.
<p>Algas:</p> <p>Son organismos unicelulares o pluricelulares, autótrofos y fotosintéticos.</p>	<p>La capacidad de las algas para producir oxígeno es vital para la ecología de las aguas. En algunos tipos de tratamiento biológico se necesitan las algas para suministrar oxígeno a las bacterias aerobias heterótrofas.</p> <p>Se tornan en un problema para el tratamiento de aguas residuales cuando se aglomeran en grandes masas flotantes que reducen la capacidad de transferencia de oxígeno en el agua; además, la excesiva presencia de algas muertas causa problemas de olor por la descomposición anaeróbica y un aumento en los sólidos suspendidos totales (SST) de los efluentes.</p>
<p>Protozoos:</p> <p>Son organismos microscópicos móviles generalmente unicelulares.</p> <p>La mayoría son heterótrofos aerobios, aunque unos pocos son anaerobios.</p>	Los protozoos son habitualmente de mayor tamaño que las bacterias a las cuales consumen a menudo como fuente de energía. En efecto, los protozoos actúan como pulidores de efluentes de los procesos de tratamiento biológico por el consumo de bacterias libres y de la materia orgánica particulada.
<p>Rotíferos:</p> <p>Son organismos multicelulares, heterótrofos y aerobios.</p>	Los rotíferos son muy eficaces en el consumo de las bacterias dispersas y pequeñas partículas de materia orgánica. Su presencia en un efluente indica un proceso de purificación biológica aeróbica altamente eficiente.
<p>Gusanos</p>	Los gusanos son formas superiores de vida características, que aparecen en los sistemas biológicos con edad de los lodos muy alta.

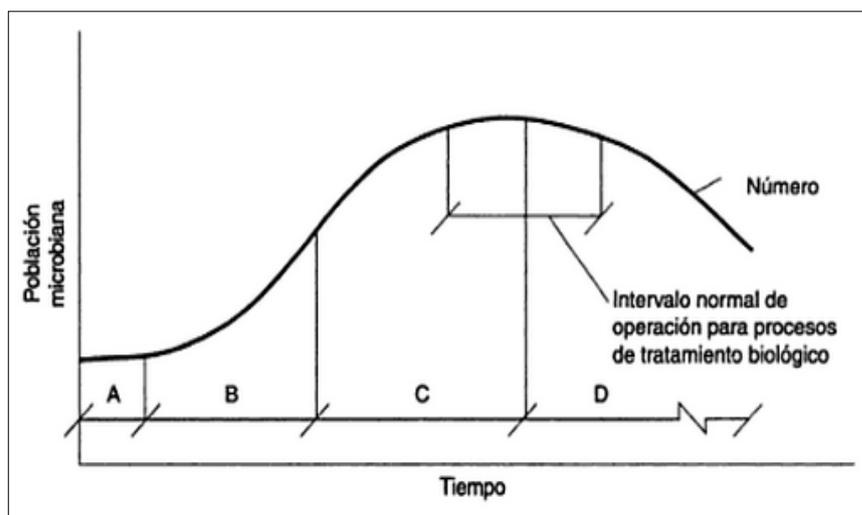
Fuente: FLYNN, Daniel, *The Nalco Water Handbook*, 2009.

6.1. Crecimiento microbiológico

La velocidad con la que el crecimiento microbiano se desarrolla varía directamente con la cantidad de alimento disponible. En un cultivo discontinuo, la población microbiana, después de pasar por un periodo de latencia inicial o aclimatación, crece con rapidez a una velocidad logarítmica. A medida que el alimento se transforma en limitante, el crecimiento se retarda hasta que, en un punto determinado, cesa y se equilibra el número de células nuevas y células muertas. Cuando el sustrato se ha agotado, la cantidad de microorganismos se reduce conforme las células viejas se descomponen (lisan) y liberan sus nutrientes para ser usados por las nuevas células³⁶.

La *Ilustración 1* sintetiza todo el proceso en cuatro etapas designadas como de latencia (A), de crecimiento logarítmico (B), de crecimiento estacionario (C) y endógena (de autoxidación) (D).

Ilustración 1.- Curva de crecimiento microbiano.



Fuente: HENRY, Glynn & HEINKE, Gary, *Ingeniería Ambiental*, 1999.

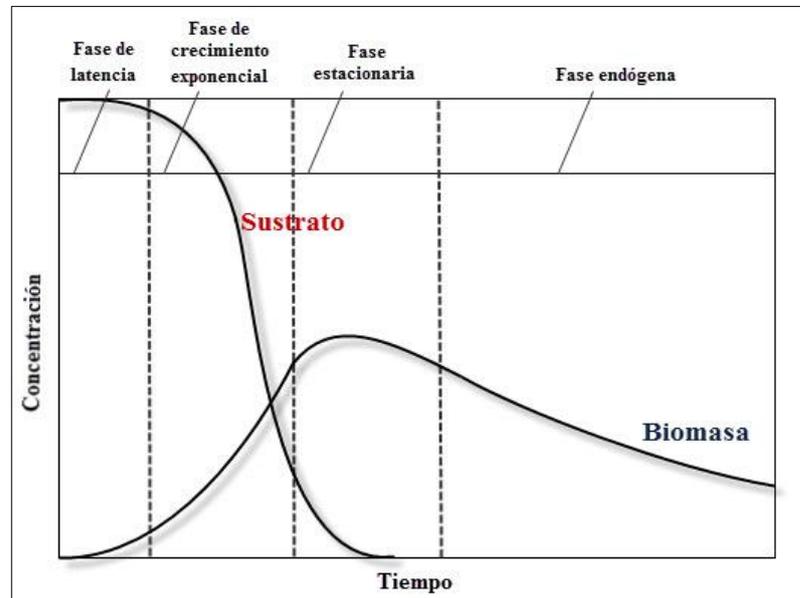
“En un proceso de tratamiento biológico [...] en cualquier momento dado habrá una mezcla de poblaciones bacterianas que compitan la una con la otra y que existan en diversas fases de este ciclo”³⁷.

³⁶ HENRY, Glynn y HEINKE, Gary, *Ingeniería ambiental*, 2^{da}. Edición, Prentice Hall, México, 1999, p. 445.

³⁷ TEMPLETON, Michael and BUTLER, David, *Op. Cit.*, p. 44.

La relación entre la biomasa celular y sustrato (alimentos) en las diferentes fases se resume en la *Ilustración 2*.

Ilustración 2.- Fases de crecimiento microbiano con cambios en la biomasa y sustrato en el tiempo.



Fuente: MELTCALF & EDDY^b, *Wastewater Engineering - Treatment and reuse*, 2003.

6.2. Clasificación de los tratamientos biológicos

Los tratamientos biológicos se clasifican en función de los requerimientos de oxígeno de la siguiente manera:

6.2.1. Procesos aerobios

En estos procesos el oxígeno libre está presente como aceptor de electrones para la descomposición por oxidación aerobia. Los productos de la descomposición son principalmente dióxido de carbono (CO₂), agua y material celular, mientras que los productos gaseosos odoríferos son mínimos. Debido a la gran cantidad de energía liberada en la oxidación aerobia, la mayoría de los organismos aerobios alcanzan altas tasas de crecimiento. De manera que la producción de nuevas células es mayor que en los demás sistemas de oxidación, resultando en una mayor producción de lodo³⁸.

³⁸ DAVIS, Mackenzie, *Water and wastewater engineering. Design, principles and practice*, Professional Edition, McGraw-Hill, Unites States, 2010, p. (22-15).

6.2.2. Procesos anóxicos

En estos procesos intervienen microorganismos que tienen la capacidad de utilizar el nitrato (NO_3^-) como aceptor terminal de electrones en ausencia de oxígeno molecular; ésta oxidación recibe el nombre de desnitrificación. Como productos se obtienen el gas nitrógeno, CO_2 , agua y material celular. La cantidad disponible de energía para la célula en la denitrificación es aproximadamente igual que para el proceso aerobio, lo que permite una alta tasa de producción de nuevas células (aunque no tan alta como en el proceso aerobio). El proceso anóxico es importante para los tratamientos que requieren de eliminación de nitrógeno³⁹.

6.2.3. Procesos anaerobios

En estos procesos no deben existir el oxígeno molecular ni el NO_3^- como aceptores terminales de electrones; en su lugar se utiliza CO_2 , el sulfato (SO_4^{2-}) y los compuestos orgánicos que puedan ser reducidos. Los productos finales principales son CO_2 , metano (CH_4), y agua; los productos adicionales son amoníaco (NH_3), sulfuro de hidrógeno (H_2S) y otros compuestos de azufre (mercaptanos); como consecuencia de estos tres últimos productos, este proceso genera olores altamente desagradables. La producción de células en los procesos anaerobios es baja en comparación a los procesos aerobios y anóxicos debido a la escasa energía liberada, de manera que la producción de lodos es reducida⁴⁰.

6.3. Importancia de los procesos biológicos aerobios

Los procesos biológicos aerobios son considerados los tratamientos más eficaces para la remoción de compuestos orgánicos disueltos, por realizar un tratamiento más rápido y obtener productos inofensivos (H_2O y CO_2), en comparación con otros procesos. Generalmente para apoyar el proceso aerobio, debe suministrarse oxígeno a las aguas residuales, mediante burbujeo o a través de mezclado.

Teóricamente el proceso aerobio se sintetiza en la siguiente expresión:

³⁹ DAVIS, Mackenzie, *Op. Cit.*, p. (22-15).

⁴⁰ *Idem.*, p. (22-16).



Además la materia orgánica que puede ser oxidada por métodos aerobios es mayor que en cualquier otro proceso de descomposición, y con una baja generación de olores. Estos procesos no son adecuados para aguas residuales con una DBO₅ superior a 1000 mg/l, a causa del problema que representa la dotación de suficiente oxígeno y la alta producción de lodos⁴². Típicamente son diseñados para el tratamiento de aguas municipales, y acondicionados para uso residencial y comercial⁴³.

Los tratamientos aerobios se clasifican según la manera de proveer soporte para el crecimiento de los organismos biológicos en:

6.3.1. Tratamientos de crecimiento suspendido

Son tratamientos en los que la masa de microorganismos, ya sea como organismos individuales, o en conjunto (llamados flóculos), se encuentran suspendidos. Esta masa de microorganismos se mezcla con las aguas residuales en tratamiento, formando una suspensión de sólidos llamada licor mixto⁴⁴.

6.3.2. Tratamientos de crecimiento adherido

En estos tratamientos existe un medio de soporte en donde la masa de microorganismos individuales se sujeta, formando una película de baba denominada película fija⁴⁵.

En estos procesos la remoción de la materia orgánica y nutrientes se lleva a cabo mediante el contacto del agua residual con el crecimiento de microorganismos adheridos en un medio de soporte. Entre los materiales de relleno empleados están rocas, grava, escoria, plástico y varios materiales sintéticos. Estos tratamientos funcionan completamente sumergidos en un líquido o no sumergidos. El oxígeno

⁴¹ TEMPLETON, Michael and BUTLER, David, *Op. Cit.*, p. 43.

⁴² DAVIS, Mackenzie, *Op. Cit.*, p. (22-15).

⁴³ EPA, *Onsite Wastewater Treatment Systems Manual*, United States, 2002, p. 212.

⁴⁴ FLYNN Daniel, *Op. Cit.*, p. 708.

⁴⁵ *Idem.*, p. 708.

necesario para los microorganismos transcurre por los espacios vacíos del material de relleno, por circulación natural o con el uso de dosificadores de oxígeno. El agua residual entrante se distribuye por el lecho y circula de manera uniforme sobre la biopelícula. Periódicamente la biomasa excedente (lodos) es evacuada; y es necesario incluir mecanismos de sedimentación, y de esta manera obtener un efluente con una concentración aceptable de sólidos en suspensión⁴⁶.

Entre los tipos de tratamientos de crecimiento adherido se encuentran los filtros percoladores, los contactores biológicos rotatorios, y los reactores biológicos aireados sumergidos⁴⁷.

Más adelante, nos enfocaremos exclusivamente a la descripción de los reactores biológicos aireados sumergidos debido a que constituye el eje central de nuestra investigación.

6.3.2.1. Medios de soporte

Los medios de soporte más eficientes son aquellos que poseen una alta área superficial por unidad de volumen, tienen un bajo costo, y una alta porosidad para asegurar que pase al sistema el aire suministrado y reducir las obstrucciones en el lecho⁴⁸. A continuación se presentan las propiedades físicas de algunos medios de soporte.

Tabla 9.-Propiedades físicas de medios de soporte para tratamientos biológicos.

MEDIO	TAMAÑO (cm)	UNIDADES POR m ³	DENSIDAD Kg/m ³	ÁREA SUPERFICIAL ESPECÍFICA (m ² /m ³)	% DE VACÍOS
<i>Plástico</i>	61x61x122	71-106	32-96	82-115	94-97
<i>Convencional</i>	60x60x120	-	30-100	80-100	94-97
<i>Alta área</i>	60x60x120	-	30-100	100-200	94-97

⁴⁶ METCALF & EDDY^b, *Wastewater Engineering. Treatment and Reuse*, 4th. Edition, McGraw-Hill, United States, 2003, p. 610-611.

⁴⁷ TEMPLETON, Michael and BUTLER, David, *Op. Cit.*, p. 54.

⁴⁸ METCALF & EDDY^b, *Op. Cit.*, p. 953.

MEDIO		TAMAÑO (cm)	UNIDADES POR m ³	DENSIDAD Kg/m ³	ÁREA SUPERFICIAL ESPECÍFICA (m ² /m ³)	% DE VACÍOS
<i>Pino californiano</i>		120x120x90	-	165	46	76
		120x120x50	-	150-175	40-50	70-80
<i>Granito</i>		2,5-7,5	-	1.442	62	46
		10	-	-	43	60
<i>Escoria</i>	<i>Alto horno</i>	5-7,5	1.766-2.119	1.089	66	49
	<i>Pequeña</i>	5-8	-	900-1200	55-70	40-50
	<i>Grande</i>	7,5-12,5	-	800-1000	45-60	50-60
<i>Piedra de río</i>	<i>Pequeña</i>	2,5-6,5	-	1.250-1.450	55-70	40-50
	<i>Grande</i>	10-12	-	800-1.000	40-50	50-60

Fuente: ROMERO, Jairo, *Tratamiento de aguas residuales-Teoría y principios de diseño*, 2004.

Los medios de soporte comúnmente utilizados se pueden dividir en dos grupos, el medio de roca triturada, y el medio de plástico; siendo este último de mayor empleo en la actualidad⁴⁹.

Cuando se dispone de roca en el sitio en donde se realizará el tratamiento, ésta alternativa resulta de menor costo. Se utiliza roca redondeada de río, o roca triturada, con el 95% de ésta de un tamaño entre 75 y 100 mm; estas dimensiones aseguran una buena porosidad para la circulación de las aguas residuales y del aire proporcionado. Los inconvenientes de este tipo de medio de soporte están relacionados con el peso, por lo que alcanzan una altura máxima de 2m, y la reducida porosidad que posee, que dificulta el paso del aire y aumenta la probabilidad de taponamiento⁵⁰.

Por otro lado, los medios de soporte de plástico, se asemejan a un panal y llegan hasta los 12 m de altura, con un valor frecuente de 6 m. Esta característica, superior a la usualmente permitida en lechos de piedra, reduce la necesidad de terreno para la

⁴⁹ FERRER, José y SECO, Aurora, *Tratamientos biológicos de aguas residuales*, 1^{ra}. Edición, Alfaomega Grupo Editor, México, 2008, p. 157.

⁵⁰ METCALF & EDDY^b, *Op. Cit.*, p. 953-954.

construcción del sistema. Además, los medios de plástico son efectivos en la remoción de DBO Y SST sobre un amplio rango de cargas orgánicas. La elevada porosidad, la alta capacidad hidráulica y la menor posibilidad de taponamiento, ha permitido la aplicación de estos medios en aguas residuales de altas cargas orgánicas⁵¹.

Asimismo, la baja densidad que caracteriza a los rellenos de plástico, permite el uso de estructuras externas más económicas. Sin embargo, este tipo de medios de soporte implica un mayor coste, y si el reactor posee una gran altura, se suman los costes de bombeo⁵².

6.3.2.2. Biopelícula

Las biopelículas o biofilms se encuentran en una variedad de entornos cotidianos. La placa en los dientes, el limo del desagüe de un hogar, las aguas termales, los glaciares congelados junto con otros lugares, son ejemplos de ambientes donde ocurre la formación de biopelícula.

Conceptualmente son pequeños ecosistemas compuestos de tres capas de diferente grosor, que cambian en espesor y composición dependiendo del lugar y el paso del tiempo.

Se distinguen tres etapas de formación de biopelícula sobre un medio de soporte que se detalla a continuación:

En la primera fase de la colonización, las macromoléculas (proteínas, polisacáridos, lignina, entre otros) son adsorbidas en las superficies sólidas limpias, debido a que son transportados desde el relleno líquido a la superficie sólida más rápido que los microorganismos. Como consecuencia de esta adsorción, la cobertura de la superficie sólida con agua es reducida⁵³.

⁵¹ METCALF & EDDY^b, *Op. Cit.*, p. 954-955.

⁵² FERRER, José y SECO, Aurora, *Op. Cit.*, p. 158.

⁵³ WIESMANN, Udo and others, *Fundamentals of biological wastewater treatment*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co., Weinheim, 2007, p. 151.

En la segunda fase, las células microbianas se unen a la superficie previamente preparada por las macromoléculas. Con frecuencia, éstas no forman capas cerradas de espesor uniforme, más bien componen pequeñas colonias adheridas, que pueden extenderse por el crecimiento y adherencia adicional. Usualmente, esas células están provistas de substrato y oxígeno que les permite alcanzar su máxima tasa de crecimiento. Asimismo, durante este proceso, las células producen: moléculas orgánicas (que se difunden a través de la pared celular) y sustancias poliméricas extracelulares (EPS) catalizadas por exoenzimas, muy necesarias para la formación de una biopelícula estable⁵⁴.

La matriz formada por las EPS rodea y protege a las bacterias del biofilm, aporta nutrientes y "vecinos" que pueden comunicarse a través de la señalización de célula a célula (*quorum sensing* *); permitiendo de esta manera que la biopelícula alcance una estructura dinámica compleja en tres dimensiones. Es a lo largo de esta etapa que las biopelículas desarrollan sus rasgos heterogéneos, tales como la diversidad estructural y la distribución de las poblaciones⁵⁵.

La fase final del desarrollo de la biopelícula consiste en el desprendimiento de las células en el medio circundante. El desprendimiento puede ocurrir de una forma activa o pasiva. El último involucra fuerzas externas tales como tensiones de cizallamiento, la depredación por organismos superiores, entre otros, que causan una pérdida de biomasa; las células pueden salir de la estructura del biofilm de forma individual o en grupos más grandes. Por otro lado, el desprendimiento activo es iniciado por las bacterias internamente, conduciendo a una dispersión de las células; las mismas que, una vez libres, son capaces de unir y formar nuevas colonias aguas abajo del biofilm que se originaron⁵⁶.

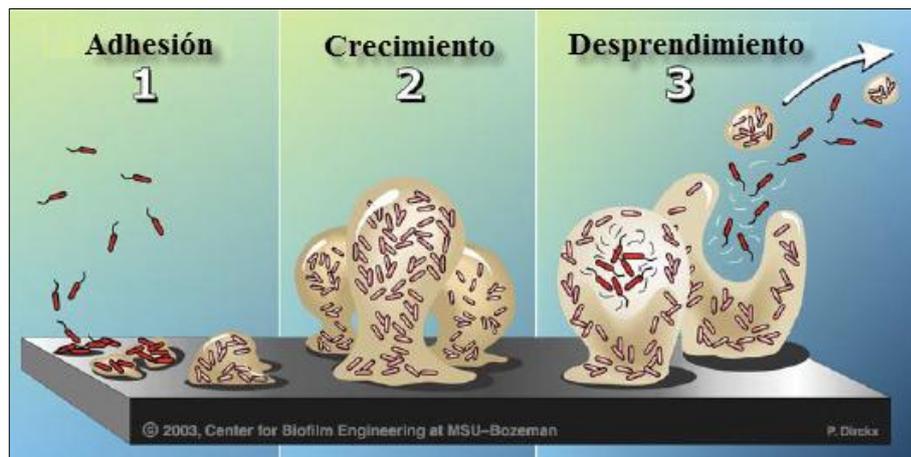
* *Quorum sensing*: es un mecanismo de regulación de la expresión genética en respuesta a la densidad de población celular. Las células involucradas producen y excretan sustancias, llamadas autoinductores, que sirven de señal química para inducir la expresión genética colectiva. Este fenómeno es el responsable de que un conjunto de células independientes, bajo la generación de señales extracelulares, desarrolle comportamientos sociales coordinados.

⁵⁴ WIESMANN, Udo and others, *Op. Cit.*, p. 151.

⁵⁵ MAŠIĆ, Alma, *Investigation of a biofilm reactor model with suspended biomass*, Lund University, Centre for Mathematical Sciences, Doctoral Theses in Mathematical Sciences, Sweden, 2013, p. 7.

⁵⁶ *Idem.*, p. 8.

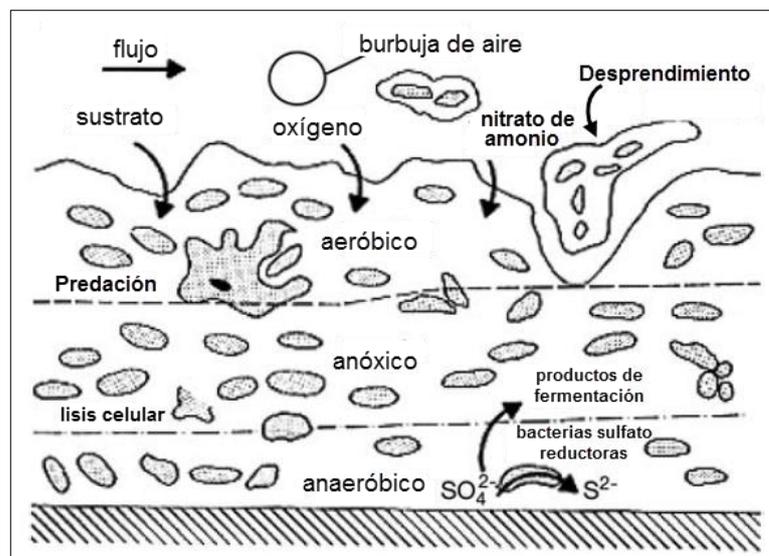
Ilustración 3.- Fases de formación de biopelícula.



Fuente: MAŠIĆ, Alma, *Investigation of a biofilm reactor model with suspended biomass*, 2013.

Desde el punto de vista metabólico, el oxígeno sólo se puede alcanzar en la parte exterior de la biopelícula, lo que resulta en un crecimiento de microorganismos aeróbicos tales como bacterias nitrificantes y protozoos. El nitrato y el nitrito producido en esta capa se reducen por el metabolismo anóxico dentro de una capa intermedia, que da lugar a una capa interior anaeróbica adherida directamente sobre la superficie de soporte, donde es reducido el ácido acético y los sulfatos⁵⁷.

Ilustración 4.- Modelo de desarrollo de biopelícula.



Fuente: WIESMANN, Udo & others, *Fundamentals of biological wastewater treatment*, 2007.

⁵⁷ WIESMANN, Udo and others, *Op. Cit.*, p. 151.

7. REACTORES BIOLÓGICOS AIREADOS SUMERGIDOS

En estos tratamientos la DBO y/o el nitrógeno orgánico son oxidados al pasar por la biopelícula. El tipo y tamaño del medio de soporte es un factor muy importante para el rendimiento y operación de estos procesos. El exceso de biomasa y los sólidos suspendidos del efluente presentes como lodo, son retenidos en el sistema y removidos periódicamente, por tanto no requiere de clarificador. Generalmente estos sistemas utilizan un sistema de retrolavado para retirar los sólidos acumulados. La disposición del lecho de soporte, la distribución del flujo de entrada y salida, y la colecta del efluente, puede variar de un diseño a otro⁵⁸.

Según Metcalf & Eddy⁵⁹ las mayores ventajas que presentan estos procesos son:

- ✓ Su necesidad de espacios es relativamente pequeño.
- ✓ No presentan inconvenientes de sedimentación de lodos como en el caso de los lodos activados.
- ✓ Su capacidad para tratar efectivamente aguas residuales diluidas.
- ✓ Son estructuras estéticas.

Los tipos de reactores aerobios sumergidos se clasifican en: reactores de flujo ascendente, reactores de flujo descendente y reactores de lecho fluidizado de flujo ascendente⁶⁰.

7.1. Reactores aerobios de crecimiento adherido sumergido con flujo ascendente

Estos reactores tienen un rango de profundidad de 2 a 4 m, con un valor típico de 3m. El influente es distribuido por boquillas hacia arriba del lecho, y un dosificador de aire ubicado en el fondo suministra oxígeno en todo el reactor. Es necesario un tamizado fino previo para proteger las boquillas de entrada del agua. El lecho, al ser

⁵⁸ METCALF & EDDY^b, *Op. Cit.*, p. 1014.

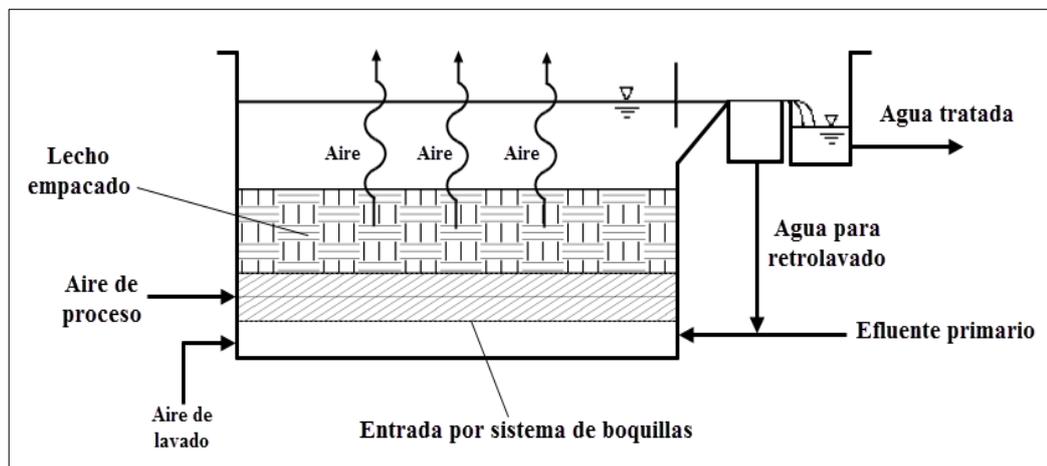
⁵⁹ *Idem.*, p. 1014.

⁶⁰ *Idem.*, p. 1014.

ligero, flota sobre las boquillas de entrada, y el agua fluye hacia arriba entrando en contacto con el lecho y la película bacteriana. Para el retrolavado, el agua se dispone en la parte superior del reactor, de manera que al realizarlo, el agua fluye hacia abajo a una alta velocidad (10 a 20 m/h). El lavado normalmente se realiza con enjuagues repetidos y pasos de aire para remover los sólidos. Los sólidos retenidos en el fondo del reactor y el exceso de biomasa sobre los medios de soporte removidos por el flujo del agua, son recogidos en un tanque destinado para este fin. El reactor puede funcionar completamente aerobio con dotación de oxígeno en el fondo, o anóxico/aerobio suministrando oxígeno en una altura intermedia⁶¹.

A continuación se presenta un esquema del proceso.

Ilustración 5.- Esquema de un reactor de lecho fijo de flujo ascendente.



Fuente: MELTCALF & EDDY^b, *Wastewater Engineering - Treatment and reuse*, 2003.

⁶¹ METCALF & EDDY^b, *Op. Cit.*, p. 1014

CAPÍTULO II

MARCO METODOLÓGICO

8. TRATABILIDAD DE LAS AGUAS RESIDUALES

Las pruebas de Tratabilidad son ensayos a escala realizados en laboratorio, cuyos resultados se emplean para los siguientes fines⁶²:

- ✓ Establecer si las operaciones y procesos unitarios son adecuados para el tratamiento del agua residual específica.
- ✓ Obtener los datos e información necesaria para el diseño de las operaciones y procesos unitarios.

El primer paso para evaluar la posibilidad de tratamiento de un agua residual es la aplicación de técnicas a escala de laboratorio, para la observación de las respuestas del sistema en diversas condiciones ambientales y físicas. Hay muchos enfoques que pueden emplearse para evaluar los procesos individuales que compone un sistema total de tratamiento de aguas residuales. Sin embargo, independientemente del enfoque empleado, la precisión de la información obtenida a partir de los estudios a escala de laboratorio dependen de⁶³:

- ✓ Si las características de las aguas residuales empleadas representan las aguas residuales reales.
- ✓ Si la naturaleza física del proceso a escala de laboratorio es similar a la unidad original.
- ✓ La consideración de variables dependientes e independientes.

⁶² VALDEZ, Enrique y VÁZQUEZ, Alba, *Ingeniería de los sistemas de tratamiento y disposición de aguas residuales*, Editorial Fundación ICA, México, 2003, p. 86.

⁶³ HORWITZ, Gilbert, *Deepwater Pilot Plant Treatability Study*, Environmental Protection Technology Series, United States, 1974, p. 57.

- ✓ La consideración de los parámetros ambientales que afectan la eficiencia del proceso.

Observando estos y otros lineamientos, los estudios a escala de laboratorio pueden proporcionar información limitada del proceso sobre la aplicación, la predicción de relaciones y la determinación aproximada de la capacidad del proceso. Y aunque la información obtenida en estos estudios se debe aplicar de manera juiciosa, un estudio de tratabilidad que sea cuidadosamente implementado provee información fundamental para el desarrollo de la selección del proceso de tratamiento, su diseño y el rendimiento predictivo⁶⁴.

Los reactores biológicos de flujo continuo y cerrado son usados para evaluar la tratabilidad y predecir los procesos cinéticos en el tratamiento. El análisis en sistema cerrado es usualmente limitado para la aclimatación de cultivos y estimaciones generalizadas de remoción de materia orgánica. Mientras que los análisis en sistemas de flujo continuo proveen información más exacta para predecir los procesos cinéticos y establecer los criterios de diseño⁶⁵.

De esta manera para determinar el proceso adecuado, es necesario realizar estudios de tratabilidad de aguas residuales, con el fin de conocer la capacidad de eliminación de contaminantes mediante uno o varios procesos de tratamiento, además de acondicionar el efluente a los valores permisibles de materia orgánica y otros elementos para su descarga a cuerpos de agua. Esto que al parecer resulta lógico, raramente se realiza, ocasionando numerosos fracasos en los sistemas de tratamiento⁶⁶.

9. VARIABLES DE CONTROL

9.1. Demanda química de oxígeno (DQO)

La DQO se usa para medir el oxígeno equivalente a la materia orgánica oxidable químicamente mediante un agente químico oxidante fuerte, por lo general dicromato

⁶⁴ HORWITZ, Gilbert, *Op. Cit.*, p. 57.

⁶⁵ *Idem.*, p. 87.

⁶⁶ CHAMY, Rolando y otros, *AVANCES EN BIOTECNOLOGÍA AMBIENTAL: Tratamiento de Residuos Líquidos y Sólidos*, Vol. 2, Salesianos S.A., Chile, 2003, p. 14.

de potasio, en un medio ácido y a alta temperatura⁶⁷. De esta manera en el ensayo, en lugar de descomponer la materia orgánica mediante el metabolismo bacterial que utiliza la respiración para obtener el oxígeno, en la DQO la descomposición se realiza mediante el oxidante fuerte⁶⁸.

Aunque la DBO es una medida más conocida para la remoción de la materia orgánica, la DQO ha ganado interés en análisis de tratamientos de aguas residuales, debido a que apareció como una necesidad de medir la demanda de oxígeno de manera rápida y confiable. En tratamientos biológicos la DQO nos da la cantidad de alimento que un cultivo biológico consume⁶⁹.

Debido a su reconocimiento en los análisis de tratamientos de aguas residuales y la posibilidad de evaluar el mismo día y con una corta duración (3 horas), en nuestra investigación se emplea la DQO para la evaluación de la cantidad de materia orgánica en el agua residual.

El método analítico a seguir se basa en el criterio de la American Public Health Association, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 5220D. Closed Reflux, Colorimetric Method, adaptado por los laboratorios de la Universidad Nacional de Río Negro (Argentina)⁷⁰, el mismo que se detalla en el *Anexo 1*.

9.1.1. Cálculo de la DQO

Tal y como se ha mencionado en el *Anexo 1*, se requiere encontrar la ecuación lineal de la curva de calibración para el cálculo de la DQO (mg O₂/L) partiendo de la absorbancia (nm) como variable independiente. Se realizaron los ensayos con los estándares de 100, 200, 400, 600 y 800 mg O₂/L.

Los resultados de cada ensayo se muestran en el *Anexo 3*.

⁶⁷ ROJAS, Jairo, *Op. Cit.*, p. 54.

⁶⁸ OROZCO, Álvaro, *Bioingeniería de aguas residuales*, 1^{ra}. Edición, Editorial Acodal, Colombia, 2005, p. 18.

⁶⁹ *Idem.*, p. 31.

⁷⁰ UNIVERSIDAD NACIONAL RIO NEGRO, *Técnicas de Muestreo, Análisis e Interpretación de Datos, Ingeniería Ambiental*, Argentina, 2013, p. 2-4.

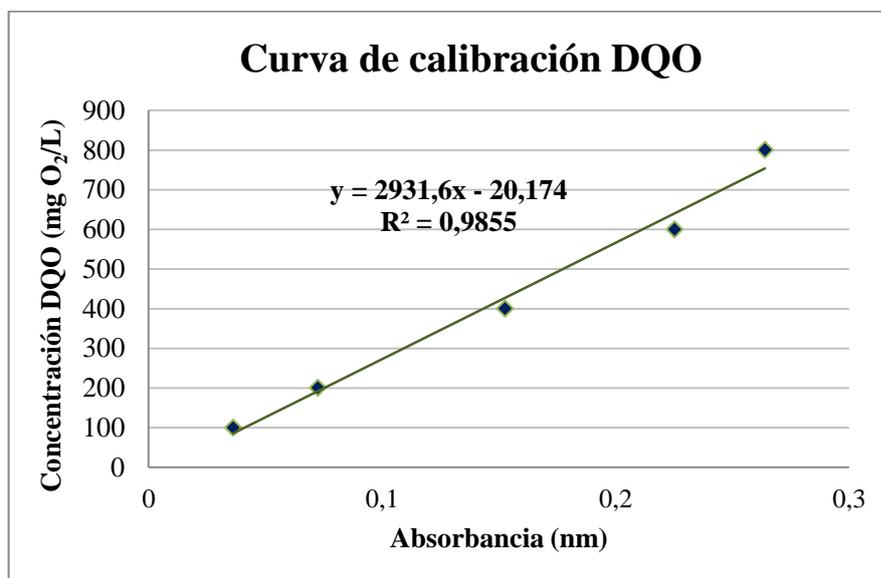
Ilustración 6. Determinación de la curva de calibración.



Fuente: Los autores.

La curva de calibración resultante es la siguiente:

Ilustración 7.- Curva de calibración para ensayos de DQO.



Fuente: Los Autores.

La ecuación de la curva de calibración es:

$$y = 2931,6 x - 20,174$$

[9.1]

Donde:

y = Concentración de DQO (mg O₂/L)

x = Absorbancia determinada en laboratorio (nm)

Una de las formas para determinar el grado en que una recta se ajusta a una nube de puntos y que ha sido de gran aceptación en el análisis de regresiones, es el *coeficiente de determinación* (R^2), el cual mide la proporción de variabilidad de la variable dependiente explicada por la recta de regresión. Si el valor que resulta lo multiplicamos por 100, obtendremos el porcentaje de la variabilidad explicada.

El coeficiente de determinación toma valores entre 0 y 1, y cuanto más se aproxime a 1 mejor será el ajuste y por lo tanto mayor la fiabilidad de las predicciones que con él realicemos (el coeficiente es 0 cuando los valores son independientes y 1 cuando entre ellos existe relación perfecta).

En nuestro análisis el coeficiente de determinación es 0,9855. Este valor cercano a 1, representa que nuestra curva de calibración se ajusta en un 98, 55% al conjunto de puntos, por lo tanto posee una alta fiabilidad en la predicción de la concentración de DQO a partir de la absorbancia medida en el laboratorio.

Muestreo:

Para el análisis del efluente se obtuvo un volumen total de 25 ml, tomando 5 ml de 5 puntos diferentes en la superficie de cada reactor. Respecto al afluente, se colectó un volumen igual a 100 ml del tanque de alimentación previa agitación.

Ilustración 8.- Muestreo de agua residual para mediciones de DQO.



Fuente: Los autores.

9.2. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)

La Demanda Bioquímica de Oxígeno es la cantidad de oxígeno que requieren los microorganismos para oxidar la materia orgánica en condiciones aerobias [...]. En condiciones normales de laboratorio, esta

demanda se cuantifica a 20°C, el ensayo estándar se realiza a cinco días de incubación y se conoce convencionalmente como DBO con valores numéricos expresados en mg O₂/L⁷¹.

En esta investigación la DBO₅ se realizó con el fin de llevar un control adicional y verificar la efectividad de la remoción de materia orgánica, durante la evaluación de los tiempos de retención hidráulica en flujo continuo. Adicionalmente, la DBO₅ se empleó para determinar la relación Alimento/ Microorganismos, al correlacionarla con la concentración de biomasa en el sistema (mg SSV) y el caudal del afluente.

Muestreo:

Tanto para el análisis del afluente (tanque de alimentación) como del efluente (reactores) se recolectó un volumen igual a 1 L. Cada frasco se conservó a 4°C y se trasladaron inmediatamente a los laboratorios de ETAPA EP para su posterior evaluación.

Ilustración 9.- Muestreo de agua residual para mediciones de DBO.



Fuente: Los autores.

9.2.1. Relación entre DBO y DQO

“La remoción de sustrato, en términos de DBO y DQO, es equivalente, pues las unidades de O₂ removidas son las mismas. Así para un sustrato o agua residual sometida a tratamiento, con una concentración inicial (%) igual a (DBO)₀ y (DQO)₀, y una concentración final (%) de (DBO)_f y (DQO)_f, se tiene⁷²:

⁷¹ ROMERO, Jairo, *Op. Cit.*, p. 38.

⁷² OROZCO, Álvaro, *Op. Cit.*, p. 31.

$$\Delta S = (DBO)_O - (DBO)_f = (DQO)_O - (DQO)_f$$

[9.2]

Donde:

ΔS = Demanda de oxígeno removido (%)

Por tanto:

$$\Delta DBO = \Delta DQO$$

[9.3]

“Entonces, para efectos de remoción de sustrato, la DBO y la DQO son equivalentes, prefiriéndose la última por razones de simplicidad en la ejecución”⁷³.

Haciendo uso de este principio, los análisis de DBO realizados por los laboratorios certificados de ETAPA EP (*ver Anexo 6*), nos permitieron validar los valores de la eficiencia de remoción del tratamiento obtenidos con los ensayos de DQO en el laboratorio de la universidad.

9.1. Sólidos suspendidos volátiles (SSV)

Los sólidos es otro parámetro de gran importancia en el tratamiento de aguas residuales. Frecuentemente la materia orgánica se encuentra presente como partículas en suspensión⁷⁴; que a su vez están compuestas por sólidos volátiles u orgánicos y sólidos inorgánicos o sólidos fijos. Además los sólidos volátiles están constituidos de materia orgánica viva y no viva⁷⁵.

No obstante, la gran cantidad de cultivos mixtos de microorganismos que se encuentran en los sistemas de tratamiento hace que sea conveniente medir la biomasa en lugar de determinar el número de organismos. Con frecuencia, esto se hace mediante la cuantificación de los sólidos suspendidos totales (SST) o sólidos

⁷³ OROZCO, Álvaro, *Op. Cit.*, p. 31.

⁷⁴ *Idem.*, p. 19.

⁷⁵ TORRESCANO, José, “Parámetros de operación en el proceso de tratamiento de agua residual por lodos activados”, *AquaForum*, año XIII, N° 52, Guanajato, mayo 2009, p. 17.

suspendidos volátiles (SSV)⁷⁶. Si se considera la medición de los SST, es necesario tomar en cuenta que no toda la masa de sólidos suspendidos interviene en el consumo del sustrato, ya que hay una fracción inorgánica que no participa en el tratamiento biológico. Por lo tanto, la cantidad de biomasa se expresa frecuentemente en términos SSV (mg/L) que representa la fracción orgánica de la biomasa. El proceso para identificar los SSV parte de la capacidad que tiene la materia orgánica para volatilizarse, es decir, convertirse en gas por combustión (Oxidación)⁷⁷ a 550°C ± 50°C⁷⁸.

El método analítico a seguir se basa en la norma Europea EN 872 de febrero de 2005, adaptado por la Norma Española UNE 77034:2002 Calidad del agua: Determinación de los sólidos en suspensión fijos y volátiles, el mismo que se detalla en el *Anexo 2*.

Muestreo

Para este análisis se obtuvo un volumen total de 25 ml, tomado de cada dosificador (influyente), al inicio de cada tiempo de retención hidráulico. Respecto al efluente, se recogió un volumen total de 25 ml, tomando 5 ml de 5 puntos diferentes del espejo de agua de cada reactor a la finalización de cada tiempo de retención hidráulico. La cuantificación de los SSV en el medio de soporte se detallará más adelante.

Ilustración 10.- Muestreo de agua residual para mediciones de SSV.



Fuente: Los autores.

⁷⁶ DAVIS, Mackenzie, *Op. Cit.*, p. 22-12.

⁷⁷ VON SPERLING, Marcos, *Basic Principles of Wastewater Treatment: Biological Wastewater Treatment*, Vol. 2, IWA Publishing, London, 2007, p. 75.

⁷⁸ DAVIS, Mackenzie, *Op. Cit.*, p. 22-12.

10. CONDICIONES DEL PROCESO

10.1. Oxígeno disuelto (OD)

El oxígeno disuelto es necesario para los organismos aerobios, pues es utilizado en sus procesos metabólicos, para obtener energía y reproducirse. Por tanto, el suministro de oxígeno y las concentraciones de OD en tratamientos biológicos constituyen factores de gran importancia en el diseño, operación y evaluación de plantas de tratamiento de aguas residuales⁷⁹.

En los tanques aireados se debe mantener la concentración de oxígeno disuelto entre 1 y 4 mg/L, normalmente se emplea un valor de 2 mg/L o ligeramente mayor. No existen mejoras significativas cuando el oxígeno es superior a 4 mg/L pero implican mayores costes de aireación^{80,81,82}.

Cuando el nivel de oxígeno limita el crecimiento de microorganismos pueden dominar organismos filamentosos, estas condiciones disminuyen la sedimentabilidad y la calidad de los lodos⁸³.

La dotación de aire se realiza a través de difusores porosos o perforados sumergidos que crean burbujas, de manera que la transferencia de oxígeno tiene lugar a medida que el aire asciende. Generalmente, las operaciones de aireación y las relacionadas a ella constituyen el mayor consumo de energía eléctrica en tratamientos secundarios y avanzados de aguas residuales⁸⁴.

En nuestra investigación se suministró oxígeno al sistema mediante dos bombas de aire para acuario, con el fin de mantener las condiciones de oxígeno ligeramente superior a 2 mg O₂/L durante toda la operación de los reactores.

⁷⁹ ROMERO, Jairo, *Op. Cit.*, p. 64.

⁸⁰ METCALF & EDDY^a, *Op. Cit.*, p. 615.

⁸¹ SPELLMAN, Frank, *Handbook of water & wastewater treatment plant operations*, Lewis publishers, London, 2003, p. 594.

⁸² FLYNN, Daniel, *Op. Cit.*, p. 708.

⁸³ METCALF & EDDY^a, *Op. Cit.*, p. 615.

⁸⁴ FLYNN, Daniel, *Op. Cit.*, p. 862.

Ilustración 11.- Bombas de acuario para suministro de aire.



Fuente: Los autores.

El equipo de dotación de aire tiene las siguientes especificaciones.

Tabla 10.- Especificaciones del equipo de aireación.

CARACTERÍSTICAS	DESCRIPCIÓN
<i>Equipo</i>	Acuatic animal AIR PUMP
<i>Modelo</i>	S – 4000B
<i>Empresa</i>	JAD Aquarium CO., LTD.
<i>Presión</i>	0,012 Mpa
<i>Salida</i>	4 x 3,2 L/min

Fuente: JAD AQUARIUM CO., LTD., 2013.

10.1.1. Determinación del oxígeno disuelto

Para la medición del oxígeno disuelto se empleó un sensor de oxígeno portátil. El procedimiento se llevó a cabo conforme a lo especificado en el manual del instrumento, calibrándolo antes de cada análisis con una solución de Sulfito de Sodio 2,0 M.

La solución de Sulfito de Sodio 2,0 M fue preparada con 25 g de cristales de sulfito de sodio (Na_2SO_3) y 100 ml de agua destilada, 24 horas antes de hacer la calibración para asegurar que todo el oxígeno se haya reducido.

Ilustración 12.- Medición de OD en los reactores.



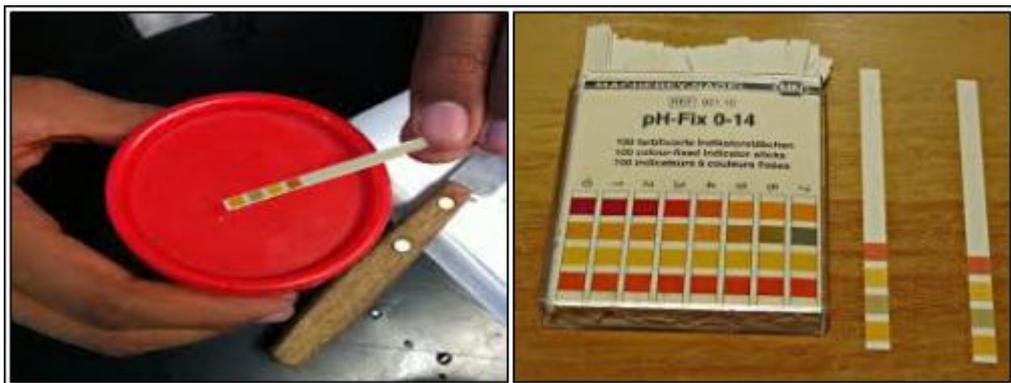
Fuente: Los autores.

10.2. Potencial de hidrógeno (pH)

El pH “mide la concentración de ion hidrógeno en el agua, expresada como el logaritmo negativo de la concentración molar de ion hidrógeno”⁸⁵. El pH de las aguas residuales no siempre representa un problema; sin embargo, en el tratamiento biológico, el pH puede descender debido principalmente a la producción de nitratos y de dióxido de carbono procedentes de la DBO y el nitrógeno. El funcionamiento de la mayoría de los procesos biológicos se limita a un rango de pH de 4 a 9,5 (el óptimo es de 6,5 a 7,5)⁸⁶.

El control de pH dentro del sistema evaluado se efectuó mediante papel tornasol.

Ilustración 13.- Medición de pH del agua residual.



Fuente: Los autores.

⁸⁵ ROMERO, Jairo, *Op. Cit.*, p. 66.

⁸⁶ METCALF & EDDY^a, *Op. Cit.*, p. 417.

10.3. Temperatura (T)

La temperatura resulta importante en el tratamiento de aguas residuales por su efecto sobre las características del agua, las operaciones y procesos de tratamiento y la disposición final. A continuación se enumera los principales efectos de la temperatura en los tratamientos biológicos expuestos por Jairo Romero⁸⁷.

- ✓ Afecta y altera la vida acuática.
- ✓ Modifica la concentración de saturación de oxígeno disuelto.
- ✓ Varía la velocidad de las reacciones químicas y de la actividad bacterial.
- ✓ La sedimentación de sólidos es mayor en aguas cálidas por el cambio en la viscosidad del agua.
- ✓ Los tiempos de retención para tratamientos biológicos disminuyen a mayor temperatura y los parámetros de diseño son función de ella.

Temperaturas debajo de la óptima tienen efectos más importantes sobre el crecimiento bacteriano que las superiores a ella*. Según el intervalo de temperatura en el que el desarrollo bacteriano es óptimo las bacterias se clasifican en psicrófilas o criófilas (12 a 18°C), mesófilas (25 a 40°C) y termófilas (55 a 65°C)⁸⁸.

La operación de los reactores se llevó a cabo en la ciudad de Cuenca durante los meses de menor temperatura según los registros proporcionados por la Dirección General de Aviación Civil (DGAC) para el año 2013.

Tabla 11.- Condiciones de temperatura ambiente durante la experimentación.

ESTACIÓN: AEROPUERTO “MARISCAL LAMAR”		
Latitud: 02°53,2' S Longitud: 78°59,0' Elevación: 2.530 m		
ENSAYOS	MES	TEMPERATURA PROMEDIO MENSUAL (°C)
<i>Arranque</i>	Mayo	16,2

* Las tasas de crecimiento se doblan por cada aumento de 10°C de la temperatura hasta alcanzar el valor óptimo.

⁸⁷ ROMERO, Jairo, *Op. Cit.*, p. 70.

⁸⁸ METCALF & EDDY^a, *Op. Cit.*, p 417.

ESTACIÓN: AEROPUERTO “MARISCAL LAMAR” Latitud: 02°53,2' S Longitud: 78°59,0' Elevación: 2.530 m		
ENSAYOS	MES	TEMPERATURA PROMEDIO MENSUAL (°C)
<i>Sistema cerrado</i>	Junio	16,3
<i>Sistema continuo</i>	Julio	15,5
	Agosto	15,5

Fuente: DGAC, 2013.

El control de temperatura dentro del sistema evaluado se efectuó con un termómetro electrónico.

Ilustración 14.- Medición de temperatura del agua residual.



Fuente: Los autores.

10.4. Agua residual sintética

La provisión de agua residual real en estudios de tratamientos de aguas residuales a nivel de laboratorio posee ciertas complicaciones:

- ✓ El problema de transportar gran cantidad de agua residual al laboratorio.
- ✓ El tiempo que supone el traslado del agua residual.
- ✓ La variabilidad fisicoquímica y bacteriológica de las aguas residuales.
- ✓ El peligro que implica la manipulación de agua residual, debido a la presencia de agentes patógenos.

Para evitar estos problemas, garantizar un afluente de características constantes en los reactores y realizar el análisis de la remoción de materia orgánica durante el tratamiento biológico, se preparó agua residual sintética.

El agua residual sintética se elaboró con *harina de sangre* de bobino como fuente de materia orgánica (proteínas; nutrientes como la glucosa y lípidos; y sustancias nitrogenadas no proteicas como la urea) y con *melaza* como fuente de hidratos de carbono y minerales principalmente fósforo, calcio y magnesio.

Ilustración 15.- Harina de sangre y melaza.



Fuente: Los autores.

La harina de sangre fue mezclada con la melaza, en un tanque con 70 L de agua, en las siguientes proporciones: 50 g de harina de sangre y 70 ml de melaza. La DQO presente en esta preparación se encuentra sobre los 1400 mg O₂/L y la DBO₅ está sobre los 800 mg O₂/L.

Ilustración 16.- Cuantificación del peso de la harina de sangre y volumen de la melaza.



Fuente: Los autores.

Ilustración 17.- Mezclado del agua sintética y vertido en los reactores.



Fuente: Los autores.

La intención de elaborar el agua residual sintética con harina de sangre y melaza fue emular las propiedades básicas de las aguas residuales domésticas. Para ello se llevó a cabo la evaluación nutricional del agua preparada relacionando las concentraciones de DQO, DBO₅, nitrógeno (N) y fósforo (P); requisitos nutricionales elementales para los microorganismos presentes en un tratamiento aerobio.

11. PARÁMETROS DE DISEÑO

De los lineamientos contemplados para el diseño de sistemas biológicos que recoge Álvaro Orozco⁸⁹, para esta investigación se consideraron fundamentales el tiempo de retención hidráulico, el tiempo de retención celular y la relación Alimento/Microorganismos debido a las características propias del sistema de tratamiento estudiado.

11.1. Tiempo de retención hidráulico (θH)

“El tiempo de retención hidráulico, es el tiempo promedio que un volumen elemental de agua residual permanece en un tanque, desde la entrada hasta la salida. El θH en el reactor es de gran importancia, pues define el tiempo promedio durante el cual el sustrato orgánico está sometido a tratamiento”⁹⁰. En otras palabras, el agua debe estar en contacto con las bacterias por un tiempo suficiente para que la materia orgánica

⁸⁹ OROZCO, Álvaro, *Op. Cit.*, p. 233-250.

⁹⁰ *Idem.*, p. 234.

contenida en el agua residual sea asimilada. Con un corto tiempo de retención no será removida toda la materia orgánica y el efluente tendrá una alta DBO⁹¹.

Para la determinación de éste parámetro se trató el agua residual sintética en un sistema cerrado de manera similar a lo realizado por Irina Moncayo y Diana Ayala⁹². Durante el período de análisis se tomaron muestras diariamente y se evaluó la remoción de materia orgánica mediante pruebas de DQO.

11.2. Tiempo de retención celular (θ_c)

El tiempo de retención celular se define como el tiempo promedio que las partículas de biomasa permanecen en el reactor antes de ser desechadas⁹³.

Un tiempo de retención celular sobre el valor óptimo, representa un estado escaso de alimentos o de baja relación alimento/microorganismos. En estas condiciones los flóculos se pueden desintegrar, formándose pin floc*, lo que ocasiona un efluente turbio⁹⁴.

Por otro lado, cuando el sistema funciona con un valor menor al óptimo, se presenta una condición denominada “lodo joven”, que se evidencia por la aparición de lodos flotantes y esponjosos que se sedimentan lentamente⁹⁵.

Para la determinación de este parámetro se evaluó el agua residual sintética en un sistema de flujo continuo, donde el caudal fue ajustado para cada θ_H obtenido del sistema cerrado. Durante estos ensayos se realizó un monitoreo de los SSV debido a que la medición de esta variable de control representa la biomasa existente en el sistema, como se detalló en el *apartado 9.1*.

*Pin Floc: Son flóculos de pequeño tamaño y consistencia débil y, por lo tanto son fácilmente desgarrados y rotos por la turbulencia propia del tanque de aireación. Generalmente no se sedimentan y quedan en suspensión.

⁹¹ TORRESCANO, José, *Op. Cit.*, p. 16.

⁹² MONCAYO, Irina y AYALA, Diana, *Op. Cit.*, p. 4.

⁹³ OROZCO, Álvaro, *Op. Cit.*, p. 235.

⁹⁴ FLYNN, Daniel, *Op. Cit.*, p. 732.

⁹⁵ *Idem.*, p. 732.

La metodología aplicada para el cálculo del θ_c se adaptó a lo desarrollado por Cruz Alberto Valdivia⁹⁶ de la siguiente manera:

$$\theta_c = \frac{\text{masa seca total en el sistema (g)}}{\text{gasto másico (g/día)}} \quad [11.1]$$

El gasto másico (Q_M) representa la masa seca que entra y sale del sistema en un día. Se supone que los SSV en el influente no son afectados por la actividad biológica de los microorganismos y que existen en el sistema ya sea en el efluente o en los lodos. Se obtiene el Q_M de los valores de SSV que se adquirieran de las muestras de agua del influente y efluente de los tres reactores con la siguiente ecuación:

$$Q_M = (Q_i \times SSV_i) + (Q_e \times SSV_e) \quad [11.2]$$

Donde:

Q_i = Caudal del influente (L/día)

SSV_i = SSV que se encuentran en suspensión en el influente (g/L)

Q_e = Caudal del efluente (L/día)

SSV_e = SSV que se encuentran en suspensión en el efluente (g/L)

La masa seca total en el sistema (M_S) resulta de la relación del promedio obtenido de la determinación de masa seca de las muestras de soportes con biomasa (M_i) y el área total expuesta en cada reactor (A_T).

$$M_S = M_i \times A_T \quad [11.3]$$

Donde:

⁹⁶ VALDIVIA, Cruz, *Tratamiento de aguas residuales municipales utilizando tres diferentes medios de soporte en lechos empacados*, Tesis doctoral UNAM, México D.F., 2005, p. 36.

M_S = Biomasa seca obtenida en un módulo (g/m^2)

A_T = Área total del lecho expuesta al crecimiento microbiano (m^2)

Para determinar la cantidad de biomasa presente en el medio de soporte, de cada reactor se tomó un módulo y se extrajeron los sólidos contenidos en las piezas al final de cada θH evaluado. Se desprendió cuidadosamente la biomasa con una espátula y se lavó el módulo con agua destilada sobre un recipiente amplio para capturar la totalidad de los sólidos. Finalmente se llevó a cabo la marcha detallada en el *Anexo 2*.

Ilustración 18.- Lavado y filtrado de la biomasa adherida al medio de soporte.



Fuente: Los autores.

11.3. Relación Alimento/Microorganismos (A/M)

Se conoce como relación Alimento/ Microorganismos a la cantidad de comida por unidad de biomasa que reciben diariamente los microorganismos, en términos de $Kg DBO_5/Kg SSV \text{ día}^{97}$. Se calcula con la siguiente ecuación:

$$A/M = \frac{Q_a \times S_0}{M_S}$$

[11.4]

Donde:

Q_a = Caudal del afluente ($m^3/día$)

⁹⁷ OROZCO, Álvaro, *Op. Cit.*, p. 238.

S_0 = Concentración de sustrato en el afluente (Kg DBO₅/m³)

La relación A/M ésta ligada con todos los aspectos de los lodos y la calidad del efluente⁹⁸, ya que para una adecuada operación de los sistemas, se requiere que los microorganismos dispongan de una cantidad apropiada de alimento; poco o demasiado alimento ocasiona problemas en la sedimentación⁹⁹.

11.1. Consideración complementaria

11.1.1. Carga orgánica (C_0)

Se define como la cantidad de alimento que el reactor recibe por unidad de área total de lecho expuesto al desarrollo de microorganismos, expresado en g DQO/m² día.

$$C_0 = \frac{Q_a \times S_0}{A_T}$$

[11.5]

Donde:

S_0 = Concentración de sustrato en el afluente (g DQO/L)

12. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

12.1. Características de los reactores

La evaluación del tratamiento biológico se desarrolló en 3 recipientes plásticos independientes, rectangulares con un volumen efectivo de 83 litros cada uno y rellenos con lecho plástico. En el fondo se distribuyó homogéneamente dos mangueras de 8 mm de diámetro con perforaciones equidistantes de 1 mm de diámetro aproximadamente, para el suministro de oxígeno al proceso mediante dos bombas de aire de acuario; esto se realizó con el objetivo de cumplir los requerimientos de oxígeno para tratamientos aerobios, manteniendo durante todo el proceso el oxígeno sobre los 2 mg/L según lo detallado en el apartado 10.1.

⁹⁸ FLYNN, Daniel, *Op. Cit.*, p. 734.

⁹⁹ TORRESCANO, José, *Op. Cit.*, p. 17.

Como medida de seguridad, se instaló una tubería central perforada en el fondo de cada reactor para la evacuación total del agua. Un esquema completo del sistema de tratamiento se describe en el *Anexo 8*.

Ilustración 19.- Sistema de tratamiento.



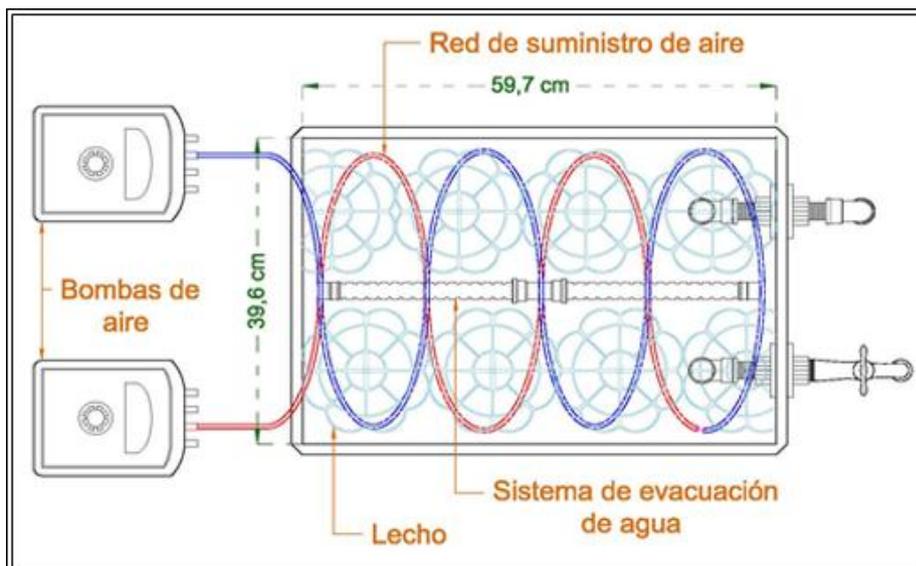
Fuente: Los autores.

Ilustración 20.- Colocación de las mangueras perforadas para el suministro de aire.



Fuente: Los autores.

Ilustración 21.- Esquema de la red de dotación de aire al reactor.



Fuente: Los autores.

12.1.1. Red de distribución del agua residual sintética empleado para el sistema en flujo continuo

A 2,4 m de altura respecto al suelo, se ubicó un tanque de almacenamiento con una capacidad de 150 L, el mismo que distribuyó el agua por gravedad a través de una tubería hacia los tres reactores de tratamiento. Para controlar la salida de agua hacia cada reactor, se ajustaron a la tubería 3 mangueras con reguladores de flujo para equipos de infusión de macrogoteo.

Ilustración 22.- Ubicación del tanque de alimentación.



Fuente: Los autores.

Ilustración 23.- Dosificadores por goteo para sistema de flujo continuo.

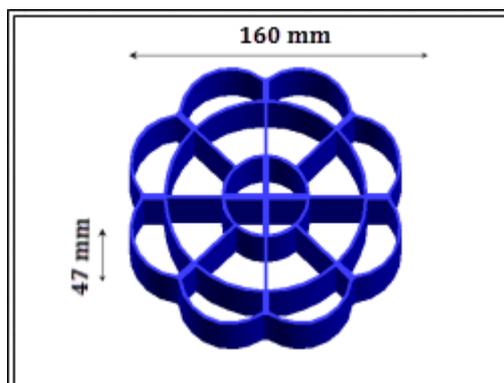


Fuente: Los Autores.

12.2. Propiedades del lecho

El medio de soporte está conformado por 42 módulos de polipropileno distribuidos homogéneamente en el interior de cada reactor alcanzando una altura aproximada de 28,2 cm, considerada la elevación efectiva del tratamiento.

Ilustración 24.- Módulo de plástico utilizado como medio de soporte.



Fuente: Los autores.

Ilustración 25.- Ubicación del material de soporte en los reactores.



Fuente: Los autores.

12.2.1. Cálculo del Área superficial específica (A_{SE})

Debido a la importancia del área superficial específica (m^2/m^3) para el crecimiento de la biomasa en los medios de soporte, como se detalla en el *apartado 6.3.2.1*; se determinó el A_{SE} de nuestro material de relleno según la metodología establecida por Cruz Alberto Valdivia¹⁰⁰ que se indica a continuación:

$$A_{SE} = \frac{A_T}{V}$$

[12.1]

Donde:

V = Volumen del reactor (m^3)

A_T = Área total del relleno en el reactor (m^2)

$$A_T = A_M \times n$$

[12.2]

Donde:

A_M = Área total efectiva de un módulo (m^2)

n = Número de módulos en el reactor

Debido a que la biopelícula se desarrolló en la totalidad de la superficie interna y externa de cada módulo como se observa en la *Ilustración 26*, para el cálculo de A_M se modeló la pieza y se determinó su área superficial haciendo uso del software de dibujo asistido AutoCAD 2012. Adicionalmente, se obtuvo el volumen efectivo de la pieza.

¹⁰⁰ VALDIVIA, Cruz, *Op. Cit.*, p. 121-123.

Ilustración 26.- Módulos del lecho antes y después del crecimiento microbiano.



Fuente: Los autores.

12.2.2. Prueba de porosidad (ϵ)

Darío de Jesús Gallego y otros¹⁰¹, detallan la importancia y metodología de la prueba de porosidad de la siguiente forma:

En un material de relleno, es importante que exista un alto porcentaje de vacíos en las piezas de soporte con la finalidad de reducir las obstrucciones y así evitar una baja eficiencia de remoción y presencia de sólidos suspendidos en el efluente. Por lo tanto, el conocimiento de la porosidad es necesario para identificar con qué facilidad puede llegar a taponarse el lecho a medida que se forma la biopelícula y provocar inundación.

La prueba de porosidad se realiza de la siguiente manera:

- ✓ Se coloca el medio de soporte hasta llenar un tanque de volumen conocido.
- ✓ Se rellena con agua hasta alcanzar el nivel del medio de soporte. El volumen del líquido vertido representa el volumen de vacíos presente en el medio.

La relación entre el volumen de líquido adicionado y el volumen total del recipiente nos indica la porosidad, según la siguiente expresión:

$$\epsilon = \frac{\text{Volumen del líquido}}{\text{Volumen Total}} \times 100$$

[12.3]

¹⁰¹ GALLEGO, Darío, y otros, “Funcionamiento hidráulico de un filtro anaerobio de flujo ascendente”, Ingeniería Química, año XXXIV, número 450, España, septiembre de 2007, p. 174.

Esta prueba se realiza por triplicado para obtener una media y desviación estándar de los datos.

12.3. Evaluación nutricional del agua sintética.

En la totalidad de tratamientos biológicos es importante que los microorganismos dispongan de los nutrientes necesarios para su desarrollo; a menudo las aguas residuales domésticas están provistas de los nutrientes necesarios¹⁰².

No obstante, para garantizar el suministro nutricional adecuado al proceso de tratamiento de aguas residuales, se analizan las relaciones de nutrientes necesarias para el crecimiento bacterial¹⁰³. La proporción mínima de nutrientes aceptada para tratamientos aerobios es^{104,105}:

$$DBO/N/P = 100/5/1$$

[12.4]

Adicionalmente, la relación DQO / DBO es un valor importante porque determina la capacidad que poseen los componentes de las aguas residuales para ser biodegradados. Una proporción DQO/DBO < 2, señala que el agua residual es fácilmente biodegradable¹⁰⁶.

De esta manera, la evaluación nutricional del agua fue valorada, y para el efecto se envió una muestra de 1L de agua residual sintética a los laboratorios certificados de ETAPA EP (*ver Anexo 6*) analizando los tres parámetros y se calculó, de acuerdo a la concentración de DBO₅ obtenida, la concentración necesaria de N y P.

¹⁰² ROMERO, Jairo, *Op. Cit.*, p. 444.

¹⁰³ OROZCO, Álvaro, *Op. Cit.*, p. 98-99.

¹⁰⁴ *Idem.*, p. 98-99.

¹⁰⁵ ROMERO, Jairo, *Op. Cit.*, p. 444.

¹⁰⁶ JOACHIM, Hans and WINTER, Josef, *Environmental Biotechnology*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2005, p. 54.

12.4. Arranque y acondicionamiento de los reactores

Se arrancó el sistema cargando los reactores con el agua residual sintética y encendiendo las bombas de aire para dar lugar al crecimiento microbiano y la formación de biopelícula en el medio de soporte. El fin de este proceso fue desarrollar una población de microorganismos capaces de biodegradar compuestos orgánicos, bajo las condiciones, características, y calidad del agua residual doméstica. El período de aclimatación fue de un mes.

Ilustración 27.- Arranque de los reactores.



Fuente: Los autores.

12.4.1. Cultivo de microorganismos

Para acelerar la formación de biopelícula en los reactores se empleó, durante el mes de acondicionamiento, tres dosis de un complejo bacterial comercial de origen ecuatoriano llamado PLUS 1, desarrollado para la depuración de aguas residuales (ver Anexo 7). Este complejo posee las siguientes especificaciones:

Tabla 12.- Características microbiológicas, físicas y químicas del complejo bacterial PLUS 1.

CARACTERÍSTICAS		VALORES
Complejo bacterial	<i>Bacterias Nitrificantes, ácido lácticas y estreptococos</i>	$6,3 \times 10^8$ ufc
	<i>Levaduras Sacharomyces</i>	1,2%
	<i>Levaduras Streptomyces</i>	0,5%
	<i>Lactobacillus</i>	1,5%
	<i>Bacillus</i>	3,2%

CARACTERÍSTICAS		VALORES
	Ácidos orgánicos	47%
	Ácidos orgánicos de fermentación	15%
Color		Amarillo
Estado		Sólido
pH		3,5-9
Solubilidad		Totalmente soluble en agua

Fuente: Cortesía de BLAVANN, 2013.

Ilustración 28.- Complejo bacterial ecuatoriano PLUS 1.



Fuente: Los autores

Instrucciones de la ficha técnica para la preparación del producto:

- ✓ Dilución de 1 Kg de bacteria con 1000 L de agua.
- ✓ Activación de la solución de 1000 L adicionando de 10-15 Kg de melaza y reposo con agitación periódica durante 48 horas.
- ✓ Completado el tiempo emplear 8 L de solución por cada metro cúbico de agua residual a tratar.

Obtención del inóculo aplicado a los reactores:

Conforme las especificaciones dadas por el proveedor se preparó el cultivo del complejo bacterial PLUS 1 en proporción al volumen de agua residual a tratar de la siguiente manera:

Tabla 13.- Proporción de reactivos para preparación del inoculo.

ESPECIFICACIONES	CANTIDAD
<i>Agua residual a tratar</i>	249 L
<i>Complejo bacterial PLUS 1</i>	2 g
<i>Melaza (nutrientes)</i>	25 g
<i>Volumen total de solución empleada por dosis</i>	2 L*
* Este volumen se repartió homogéneamente para los 3 reactores.	

Fuente: Los autores.

Ilustración 29.- Pesaje de la melaza y el complejo bacterial PLUS 1.



Fuente: Los autores.

Ilustración 30.- Activación del complejo bacterial y distribución en el sistema.



Fuente: Los autores.

Una vez logrado el acondicionamiento microbiano, la evaluación se llevó a cabo en dos fases: tratamiento en sistema cerrado y tratamiento en sistema continuo.

Ilustración 31.- Formación de la biopelícula en el sistema.



Fuente: Los autores.

12.5. Ensayos en sistema cerrado

Cumplida la fase de arranque se procedió a realizar muestreos y análisis diarios de DQO, con el fin de determinar la remoción diaria de materia orgánica durante 8 días. Se evaluaron estadísticamente los resultados de remoción obtenidos mediante el análisis de varianza (ANOVA) y la prueba de homogeneidad de Fisher (LSD), para observar la agrupación de los resultados de remoción en los diferentes tiempos ensayados y así definir estadísticamente el rango de retención hidráulica, donde la máxima remoción de materia orgánica es constante, es decir, identificar el momento en que se presenta el estado estacionario del crecimiento microbiano (la masa microbiana nacida es igual a la masa microbiana muerta). De esta manera se obtuvo el grupo de retención hidráulico que presenta mayor remoción, el mismo que sería comprobado en el tratamiento en sistema continuo.

Ilustración 32.- Tratamiento en sistema cerrado.



Fuente: Los autores.

12.6. Ensayos en sistema continuo

El tratamiento en sistema continuo se desarrolló con el fin de evaluar los tiempos de retención obtenidos durante el sistema cerrado; establecer el tiempo de retención que mayor remoción de materia orgánica presenta y a partir de éste, determinar la eficiencia de remoción de nuestro tratamiento así como los parámetros de diseño restantes (tiempo de retención celular y relación alimento/microorganismos).

En esta etapa el agua residual sintética fue elaborada y remplazada del tanque de alimentación diariamente para mantener invariables las características del afluente. La distribución del agua se realizó con dosificadores por goteo, como se explica en el *apartado 12.1.1*. El caudal fue ajustado para cada tiempo de retención evaluado. Además, en el inicio y fin de cada tiempo de retención hidráulico se llevaron controles de pH, temperatura, oxígeno disuelto, DQO y DBO₅, así como la medición de SSV en el medio de soporte, afluente y en el efluente.

Ilustración 33.- Tratamiento en sistema de flujo continuo.



Fuente: Los autores.

13. EVALUACIÓN ESTADÍSTICA

En nuestra investigación para el análisis de los datos se aplicó el diseño de Distribución completamente al azar. El Análisis de Varianza (ANOVA) y el método de Diferencia Mínima Significativa (LSD) de Fisher se utilizaron como técnicas estadísticas centrales y la media aritmética como medida descriptiva.

Se utilizó el paquete estadístico STATGRAPHICS CENTURION XV.

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

14. EVALUACIÓN NUTRICIONAL DEL AGUA RESIDUAL SINTÉTICA

Los resultados obtenidos de una muestra de agua residual sintética se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 14.- Resultados de una muestra de agua residual sintética afluente.

PARÁMETRO	RESULTADO	UNIDADES
DBO ₅	770*	mg/L
DQO	1437,18	mg/L
Nitrógeno Kjeldahl Total (NKT)	253,31*	mg/L
Fósforo Total (P)	8,67*	mg/L
* Resultados obtenidos en laboratorio certificado.		

Fuente: Los autores.

Tabla 15.- Cumplimiento de la relación nutricional mínima para aguas residuales.

PARÁMETRO	RELACIÓN MÍNIMA (TEÓRICA)	RELACIÓN REAL
DBO ₅	100	100
Nitrógeno Kjeldahl Total (NKT)	5	32,90
Fósforo Total (P)	1	1,13

Fuente: Los autores.

Como se observa, los valores nutricionales presentes en el agua residual sintética cumplen con la proporción mínima de nutrientes para tratamientos aerobios.

Para determinar la biodegradabilidad del agua residual preparada, se evalúa la siguiente relación:

$$\frac{DQO}{DBO} = \frac{1437,18}{770} = 1,86$$

El resultado demuestra el cumplimiento de la relación de DQO/DBO < 2 para aguas residuales fácilmente biodegradables detallada en el *apartado 12.3*.

Por tanto, el agua residual sintética utilizada en nuestra investigación es apta para tratamientos biológicos aerobios.

15. CARACTERIZACIÓN DEL MEDIO DE SOPORTE UTILIZADO

La modelación gráfica en AutoCAD 2012 del módulo empleado como medio de soporte arrojó los siguientes resultados:

Tabla 16.- Principales magnitudes del medio de soporte.

MEDIDA	VALOR	UNIDADES
Alto	47	mm
Ancho	160	mm
Área superficial	0,192	m ²
Volumen del módulo	0,00016	m ³
Número de módulos	42	adimensional
Volumen total del lecho	0,0067	m ³
Altura efectiva del lecho	0,282	m

Fuente: Los autores.

15.1. Área superficial específica

En la *Tabla 17* se presenta el resultado obtenido de la valoración del A_{SE} del medio de soporte empleado:

Tabla 17.- Cálculo de la A_{SE} del medio de soporte.

Paso	Dato	Unidad	Valor	Ecuación	Cálculo	Resultado	Unidad
1	Área total efectiva de un módulo (A_M)	m ²	0,192	$A_T = A_M \times n$	8,064	Área total del lecho en el reactor	m ²
	Número de módulos por reactor (n)	-	42				

Paso	Dato	Unidad	Valor	Ecuación	Cálculo	Resultado	Unidad
2	Volumen del reactor (V)	m ³	0,083	$A_{SE} = \frac{A_T}{V}$	97,16	Área superficial específica	$\frac{m^2}{m^3}$

Fuente: Los autores.

El A_{SE} calculado se encuentra dentro del rango óptimo para el tratamiento biológico con medios de soporte plásticos según lo detallado en la *Tabla 9*. Esto indica que los módulos proveen un medio de adherencia apropiado para el crecimiento microbiano.

15.2. Porosidad

Para determinar el porcentaje de vacíos existentes en el lecho, se utilizó un tanque de 50 L, en el que se colocó el medio de soporte y vertió agua con un recipiente graduado. Esta prueba se realizó por triplicado, obteniéndose los siguientes datos:

Tabla 18.- Datos obtenidos para la prueba de porosidad.

N°	Volumen del líquido vertido (L)	Media Aritmética (L)	Desviación estándar (L)	Coefficiente de variación (%)
1	47,752	47,712	0,037	0,078
2	47,705			
3	47,678			

Fuente: Los autores.

La desviación estándar permite determinar la dispersión de los datos que nos indica cuánto tienden a alejarse los valores del promedio en una distribución. Por otro lado, se determina el coeficiente de variación definido como la relación entre la desviación estándar y la media, para conocer cuál sería la desviación estándar en términos de porcentaje.

La desviación estándar de 0,037 L y el coeficiente de variación de 0,078% indican que los datos presentan una baja dispersión en relación a la media, de manera que la media aritmética resultante es apropiada para la determinación del porcentaje de

vacíos en el medio de soporte (*ver apartado 12.2.2*), como se presenta a continuación:

$$\epsilon = \frac{47,712 \text{ L}}{50 \text{ L}} \times 100 = \mathbf{95,42\%}$$

La porosidad de nuestro medio de soporte se encuentra dentro del rango óptimo para el tratamiento biológico con medios de soporte plásticos según lo detallado en la *Tabla 9*. Esto garantiza una muy baja probabilidad de taponamiento e inundación de los reactores durante la operación.

Ilustración 34.- Recipiente de 50 L y ubicación de los módulos.



Fuente: Los autores.

Ilustración 35.- Vertido de agua con recipientes graduados.



Fuente: Los autores.

16. DETERMINACIÓN DEL θ_H

16.1. Sistema cerrado

16.1.1. Condiciones del proceso

Este ensayo se inició el día jueves 17 de junio y concluyó el día martes 25 de junio del 2013.

El monitoreo diario de pH, temperatura y oxígeno disuelto se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 19.- Condiciones monitoreadas en el sistema cerrado.

Reactores	Condiciones monitoreadas	24 horas	48 horas	72 horas	96 horas	120 horas	144 horas	168 horas
<i>Reactor 1</i>	<i>pH</i>	7	7	7	7	7	7	7
	<i>T (°C)</i>	17,40	17,10	16,80	17,30	16,40	15,50	16,70
	<i>OD (mg O₂/L)</i>	2,54	2,42	2,37	2,48	2,35	2,29	2,35
<i>Reactor 2</i>	<i>pH</i>	7	7	7	7	7	7	7
	<i>T (°C)</i>	17,30	17	16,80	17,30	16,40	15,40	16,70
	<i>OD (mg O₂/L)</i>	2,62	2,38	2,40	2,43	2,37	2,32	2,27
<i>Reactor 3</i>	<i>pH</i>	7	7	7	7	7	7	7
	<i>T (°C)</i>	17,40	17	16,80	17,20	16,40	15,60	16,80
	<i>OD (mg O₂/L)</i>	2,46	2,33	2,46	2,39	2,33	2,25	2,32

Fuente: Los autores

A lo largo de la operación en sistema cerrado, el pH se mantuvo neutro en los tres reactores. La temperatura mínima registrada fue de 15,40°C y la máxima de 17,40°C, con un promedio general de 16,73°C. El oxígeno disuelto fluctuó entre 2,25 y 2,62 mg O₂/L; el promedio fue 2,39 mg O₂/L.

16.1.2. Remoción de materia orgánica

Durante 8 días consecutivos de evaluación en sistema cerrado, se realizaron 24 ensayos experimentales, considerando las tres réplicas para cada tiempo evaluado, esto con el fin de lograr resultados representativos y confiables.

La concentración inicial de DQO para cada repetición fue:

Tabla 20.- Valores iniciales de DQO en el sistema cerrado.

CONCENTRACIÓN DQO (mg O ₂ /L)		
R1	R2	R3
1501,67	1607,21	1715,68

Fuente: Los autores.

Los resultados obtenidos a partir de los ensayos de DQO (*ver Anexo 4*) se sintetizan en la *Tabla 21*. Con el fin de facilitar el manejo de los datos, la reducción de la concentración de DQO durante el tratamiento se expresa en términos de rendimiento (%) mediante la siguiente expresión:

$$\text{Rendimiento} = \frac{\text{Concentración}_{\text{inicial}} - \text{Concentración}_{\text{final}}}{\text{Concentración}_{\text{inicial}}} \times 100$$

[16.1]

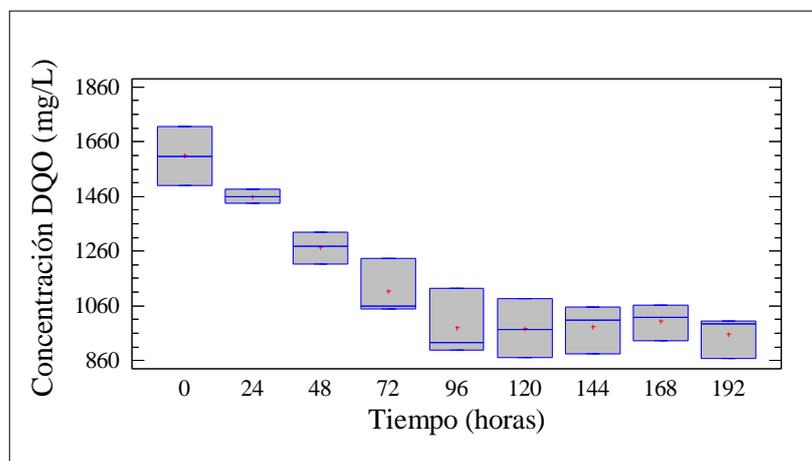
Tabla 21.- Resultados de remoción de DQO en el sistema cerrado.

N°	Tiempo	CONCENTRACIÓN DQO (mg O ₂ /L)				RENDIMIENTO (%)			
	Horas	R1	R2	R3	Promedio	R1	R2	R3	Promedio
1	24	1434,25	1457,70	1487,02	1459,65	4,49	9,30	13,33	9,04
2	48	1214,38	1278,87	1328,71	1273,99	19,13	20,43	22,55	20,71
3	72	1050,21	1059,00	1231,97	1113,73	30,06	34,11	28,19	30,79
4	96	897,76	924,15	1123,50	981,80	40,22	42,50	34,52	39,08
5	120	871,38	973,99	1085,39	976,92	41,97	39,40	36,74	39,37
6	144	886,04	1009,16	1056,07	983,76	41,00	37,21	38,45	38,88
7	168	932,94	1017,96	1061,93	1004,28	37,87	36,66	38,10	37,55
8	192	868,45	994,51	1003,30	955,42	42,17	38,12	41,52	40,60

Fuente: Los autores.

La *Ilustración 36* nos proporciona de manera preliminar una idea general de la tendencia central del conjunto de concentraciones de DQO, la dispersión de las mismas y la posible presencia de datos atípicos.

Ilustración 36.- Diagrama de cajas para concentración de DQO en el sistema cerrado.



Fuente: Los autores.

En la gráfica, a priori se observa que no existen valores atípicos de concentración en cada tiempo evaluado. Comparando los bloques de muestras se obtiene que la mayor dispersión de las concentraciones entorno al centro ocurre en 0, 96 y 120 horas; por el contrario, la menor dispersión se encuentra en las 24 horas de tratamiento. Finalmente, la distribución de las concentraciones en los tiempos 0, 24 y 120 es simétrica; para los tiempos 72 y 96 la distribución de los datos tiene un sesgo positivo y para los tiempos 48, 144, 168 y 192 el sesgo es negativo.

Si bien las distribuciones de concentración tienen una variabilidad en la mayoría de los tiempos evaluados, la ausencia de valores atípicos valida la aplicación del conjunto de datos en análisis estadísticos posteriores.

16.1.3. Comportamiento de la remoción de DQO y rendimiento

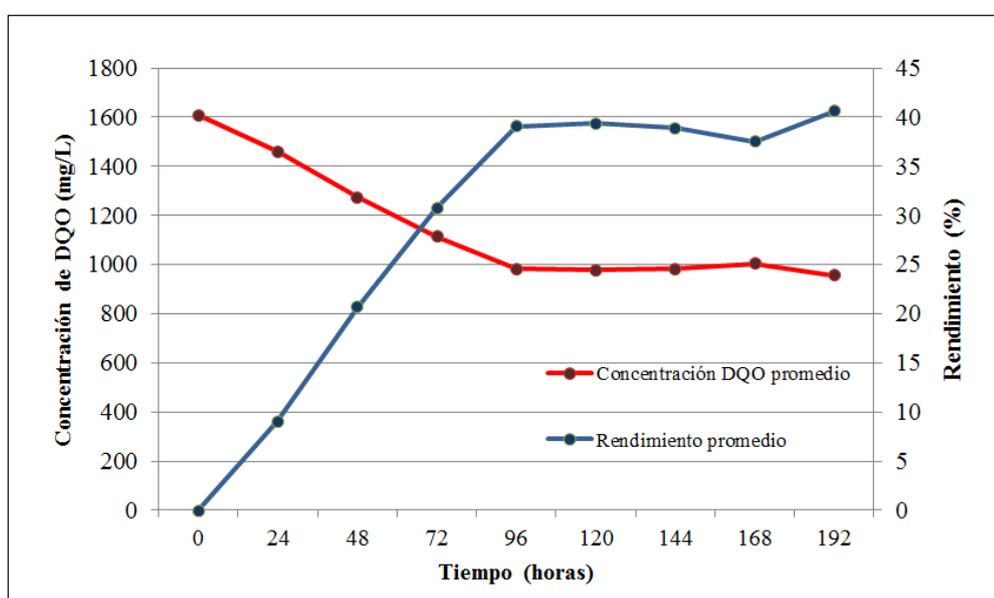
De acuerdo a los resultados presentados en la *Ilustración 37*, se puede observar 2 etapas:

- ✓ 0-96 horas: A medida que el tiempo de residencia hidráulica va aumentando, lo hace también el rendimiento en la remoción de DQO (reducción de la

concentración de materia orgánica en el agua). Esta tendencia es normal, y se atribuye que al aumentar el tiempo de residencia hidráulica, permite a los microorganismos una mejor fijación y absorción de los constituyentes del agua residual sintética.

- ✓ 96-192 horas: En esta instancia la variación en la remoción de DQO es muy pequeña y por ende el rendimiento del sistema. Esto ocurre debido a que el crecimiento microbiano alcanza la fase estacionaria.

Ilustración 37.- Comportamiento de la DQO y el rendimiento.



Fuente: Los autores.

Estas observaciones a pesar que explican el comportamiento del tratamiento a lo largo del tiempo evaluado, no determina de una manera concluyente el tiempo óptimo de residencia para la correcta operación del sistema con un flujo continuo. Por tal razón, es necesario analizar estadísticamente los resultados de remoción de DQO obtenidos.

16.1.4. Análisis de varianza

En este punto, el análisis de varianza se aplica para identificar si existe o no diferencia en la remoción de DQO entre los tiempos evaluados. El método que empleamos se denomina *ANOVA de un factor* ya que utilizamos una sola propiedad o característica (tiempo de tratamiento) para categorizar las muestras (rendimiento).

El ANOVA de un factor calculado parte de las siguientes condiciones:

- ✓ Variable dependiente: Rendimiento (%)
- ✓ Factor: Tiempo de evaluación (horas)
- ✓ Número de observaciones: 27
- ✓ Número de niveles: 9

Las hipótesis planteadas son:

H_0 = Todas las medias de los tiempos evaluados son iguales ($\mu_A = \mu_B$)

H_1 = Las medias de los tiempos evaluados no son iguales ($\mu_A \neq \mu_B$)

Tabla 22.- ANOVA para la remoción de DQO en el sistema cerrado.

Fuente	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	2738,59	7	391,227	48,51	0,0000
Intra grupos	129,044	16	8,06523		
Total (Corregido)	2867,64	23			

Fuente: Los autores.

El criterio para rechazar o aceptar una hipótesis es el valor-P (nivel de significancia). Si el valor-P es pequeño, como 0,05 o menor, se rechaza la H_0 de igualdad de las medias. De otra manera no se rechaza la igualdad de las medias.

Puesto que el valor-P es menor que el nivel de significancia de 0,05, rechazamos la H_0 de igualdad de medias de los tiempos evaluados.

16.1.5. Comparaciones o prueba de rangos múltiples

Después de hacer una prueba con el análisis de varianza, podemos concluir que existe evidencia suficiente para rechazar una aseveración de igualdad de medias entre los tiempos evaluados, pero no podemos concluir a partir de un ANOVA que alguna media en particular sea diferente de las demás.

Para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras se aplicará para este estudio el método LSD (diferencia mínima significativa) de Fisher.

Tabla 23.- Grupos homogéneos mediante prueba de rango múltiple, método LSD, factor: tiempo de tratamiento en el sistema cerrado.

TIEMPOS (horas)	RÉPLICAS	MEDIA (%)	GRUPOS HOMOGÉNEOS
24	3	9,04	X
48	3	20,7033	X
72	3	30,7867	X
168	3	37,5433	X
144	3	38,8867	X
96	3	39,08	X
120	3	39,37	X
192	3	40,6033	X

Fuente: Los autores.

Tabla 24.- Diferencia significativa entre medias mediante prueba de rango múltiple, método LSD, factor: tiempo de tratamiento en el sistema cerrado.

CONTRASTE	SIG.	DIFERENCIA	+/- LÍMITES
24 - 48	*	-11,6633	4,91564
24 - 72	*	-21,7467	4,91564
24 - 96	*	-30,04	4,91564
24 - 120	*	-30,33	4,91564
24 - 144	*	-29,8467	4,91564
24 - 168	*	-28,5033	4,91564
24 - 192	*	-31,5633	4,91564
48 - 72	*	-10,0833	4,91564
48 - 96	*	-18,3767	4,91564
48 - 120	*	-18,6667	4,91564
48 - 144	*	-18,1833	4,91564
48 - 168	*	-16,84	4,91564
48 - 192	*	-19,9	4,91564
72 - 96	*	-8,29333	4,91564
72 - 120	*	-8,58333	4,91564

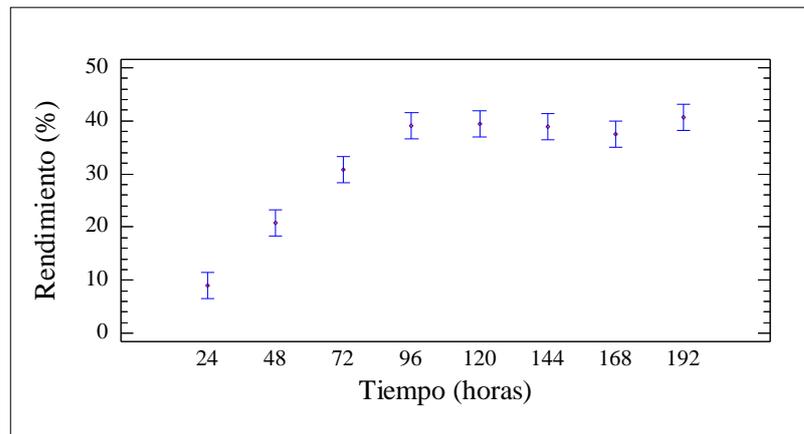
CONTRASTE	SIG.	DIFERENCIA	+/- LÍMITES
72 - 144	*	-8,1	4,91564
72 - 168	*	-6,75667	4,91564
72 - 192	*	-9,81667	4,91564
96 - 120		-0,29	4,91564
96 - 144		0,193333	4,91564
96 - 168		1,53667	4,91564
96 - 192		-1,52333	4,91564
120 - 144		0,483333	4,91564
120 - 168		1,82667	4,91564
120 - 192		-1,23333	4,91564
144 - 168		1,34333	4,91564
144 - 192		-1,71667	4,91564
168 - 192		-3,06	4,91564
* Indica una diferencia significativa.			

Fuente: Los autores.

La aplicación del método LSD proporciona las siguientes conclusiones:

- ✓ Se identifica la formación de 4 grupos homogéneos según la alineación de las X's en columnas: [24], [48], [72] y [96-192] horas. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos tiempos evaluados que comparten una misma columna de X's.
- ✓ Las diferencias estimadas entre cada par de medias indica que los primeros 18 pares muestran diferencias estadísticamente significativas (representadas con un asterisco) con un nivel del 95,0% de confianza; las diferencias estimadas entre pares a partir del tiempo 96 no son significativas. Por tanto, la remoción de DQO empieza a ser constante a partir de las 96 horas de tratamiento.

Ilustración 38.- Gráfico de medias y 95% de Fisher LSD, factor: tiempo de tratamiento en el sistema cerrado.



Fuente: Los autores.

Haciendo una comparación visual se puede observar que:

$$24 \neq 48 \neq 72$$

$$96 = 120 = 144 = 168 = 192$$

De esta manera se puede afirmar que el mayor rendimiento se consigue a partir de las 96 horas. Debido a esto, para la evaluación del tratamiento en flujo continuo se considera a los tiempos 96, 120 y 144 horas como los θH de interés.

16.2. Sistema continuo

16.2.1. Condiciones del proceso

El monitoreo diario de pH, temperatura y oxígeno disuelto de cada θH de interés se presenta en las siguientes tablas:

θH evaluado: 96 horas

Tabla 25.- Condiciones monitoreadas en el $\theta H = 96$ horas.

Fecha: del 08 de agosto al 12 de agosto					
Condiciones del proceso	Tanque de alimentación	Reactor 1	Reactor 2	Reactor 3	Promedio
<i>pH (Inicial)</i>	7	7	7	7	7
<i>pH (Final)</i>	7	7	7	7	7

Fecha: del 08 de agosto al 12 de agosto					
<i>OD (Inicial)</i> <i>mg O₂/L</i>	-	2,65	2,51	2,68	2,61
<i>OD (Final)</i> <i>mg O₂/L</i>	-	2,44	2,49	2,56	2,50
<i>T (Inicial)</i> <i>°C</i>	21,30	19,20	19,60	19,40	19,40
<i>T (Final)</i> <i>°C</i>	18,60	17,80	17,60	17,60	17,67

Fuente: Los autores.

θ H evaluado: 120 horas

Tabla 26.- Condiciones monitoreadas en el θ H = 120 horas.

Fecha: del 02 de agosto al 07 de agosto					
Condiciones del proceso	Tanque de alimentación	Reactor 1	Reactor 2	Reactor 3	Promedio
<i>pH (Inicial)</i>	7	7	7	7	7
<i>pH (Final)</i>	7	7	7	7	7
<i>OD (Inicial)</i> <i>mg O₂/L</i>	-	2,61	2,57	2,63	2,60
<i>OD (Final)</i> <i>mg O₂/L</i>	-	2,32	2,38	2,31	2,34
<i>T (Inicial)</i> <i>°C</i>	20	18,30	18,10	18,10	18,17
<i>T (Final)</i> <i>°C</i>	18,50	17,30	17,30	17,30	17,30

Fuente: Los autores.

θ H evaluado: 144 horas

Tabla 27.- Condiciones monitoreadas en el θ H = 144 horas.

Fecha: del 25 de julio al 31 de julio					
Condiciones del proceso	Tanque de alimentación	Reactor 1	Reactor 2	Reactor 3	Promedio
<i>pH (Inicial)</i>	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00
<i>pH (Final)</i>	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00

Fecha: del 25 de julio al 31 de julio					
OD (Inicial) <i>mg O₂/L</i>	-	2,63	2,58	2,64	2,62
OD (Final) <i>mg O₂/L</i>	-	2,42	2,47	2,52	2,47
T (Inicial) •C	17,30	15,90	16,00	15,90	15,93
T (Final) •C	19,30	18,40	18,30	18,10	18,27

Fuente: Los autores.

Durante la operación del sistema en flujo continuo, el pH se mantuvo constante en todos los reactores y el tanque de alimentación. La temperatura inicial osciló entre 15,9 y 21,3°C, con un promedio general de 18,33°C; para la temperatura final el rango estuvo entre 17,3 y 19,3°C, con un promedio general de 17,93°C. Finalmente, en términos de oxígeno disuelto, como valor inicial se registró un mínimo de 2,51 mg O₂/L y un máximo de 2,68 mg O₂/L, con un promedio de 2,61 mg O₂/L; respecto al oxígeno disuelto final, éste fluctuó entre 2,31 y 2,56 mg O₂/L, con un promedio de 2,43 mg O₂/L.

Para ensayar en flujo continuo con los θH de 96, 120 y 144 horas, fue necesario ajustar el caudal de entrada de tal manera que el agua a tratar permanezca en el sistema por un periodo igual a cada uno de los θH .

Tabla 28.- Caudales ajustados y sus cargas orgánicas correspondientes para los tiempos de retención hidráulica de interés.

θH EVALUADO (horas)	CAUDAL AJUSTADO (L/día)	CARGA ORGÁNICA (g DQO/m² día)
96	20,33	3,645
120	16,46	3,023
144	13,82	2,463

Fuente: Los autores.

16.2.2. Remoción de materia orgánica

Se realizaron 9 ensayos experimentales, considerando las tres réplicas para cada tiempo evaluado.

La concentración inicial de DQO para cada θH fue:

Tabla 29.- Valores iniciales de DQO en el sistema continuo.

CONCENTRACIÓN DQO (mg O ₂ /L)		
$\theta H = 96$	$\theta H = 120$	$\theta H = 144$
1445,97	1481,15	1437,18

Fuente: Los autores.

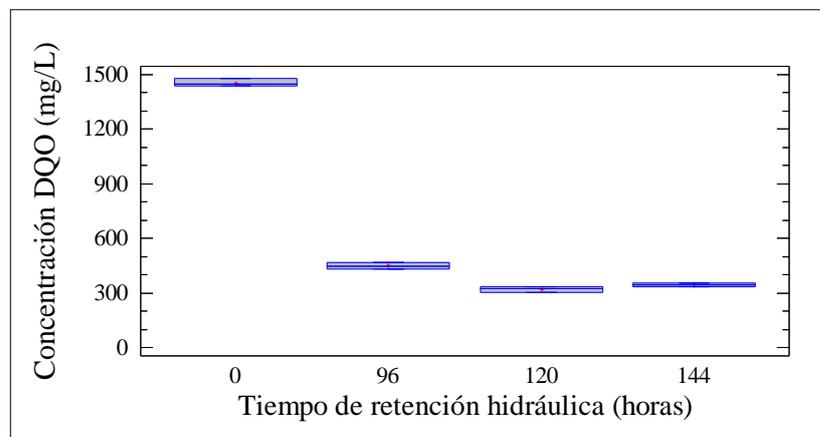
Los resultados de la concentración final de DQO (*ver Anexo 5*) y los rendimientos de remoción se resume en la siguiente tabla:

Tabla 30.- Resultados de remoción de DQO en el sistema continuo.

N°	θH	CONCENTRACIÓN DQO (mg O ₂ /L)				RENDIMIENTO (%)			
		Horas	R1	R2	R3	Promedio	R1	R2	R3
1	96	449,23	469,75	431,64	450,21	68,93	67,51	70,15	68,86
2	120	326,10	331,97	302,65	320,24	77,98	77,59	79,57	78,38
3	144	346,62	352,49	334,90	344,67	75,88	75,47	76,70	76,02

Fuente: Los autores.

Ilustración 39.- Diagrama de cajas para concentración de DQO en el sistema continuo.



Fuente: Los autores.

En la gráfica, se observa que no existen valores atípicos de concentración en cada θH . Al comparar los bloques de muestras se visualiza que todos presentan una mínima dispersión de las concentraciones alrededor del centro. La distribución de las concentraciones iniciales tiene un sesgo positivo; los $\theta H = 144$ y 120 poseen una distribución con sesgo negativo y finalmente la distribución de $\theta H = 96$ es simétrica.

La reducida variabilidad de las concentraciones de DQO en los θH evaluados y la ausencia de valores atípicos, valida la aplicación del conjunto de datos en análisis estadísticos posteriores.

16.2.3. Análisis de varianza

Se emplea el *ANOVA de un factor* para identificar si existe o no diferencia en la remoción de DQO (rendimiento) entre los θH evaluados en flujo continuo.

El *ANOVA de un factor* calculado parte de las siguientes condiciones:

- ✓ Variable dependiente: Rendimiento (%)
- ✓ Factor: θH (horas)
- ✓ Número de observaciones: 9
- ✓ Número de niveles: 3

Las hipótesis planteadas son:

H_0 = Todas las medias de los θH evaluados son iguales ($\mu_A = \mu_B$)

H_1 = Las medias de los θH evaluados no son iguales ($\mu_A \neq \mu_B$)

Tabla 31.- ANOVA para la remoción de DQO en el sistema continuo.

Fuente	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
<i>Entre grupos</i>	147,261	2	73,6304	68,49	0,0001
<i>Intra grupos</i>	6,45068	6	1,07511		
<i>Total (Corregido)</i>	153,711	8			

Fuente: Los autores.

Puesto que el valor-P de 0,0001 es menor que el nivel de significancia de 0,05, rechazamos la H_0 de igualdad de medias de los tiempos de retención evaluados.

16.2.4. Prueba de rangos múltiples

El resultado anterior conduce nuevamente a aplicar una prueba de rangos múltiples para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. Se aplicará para este estudio el método LSD (diferencia mínima significativa) de Fisher.

Tabla 32.- Grupos homogéneos (% remoción DQO) mediante prueba de rango múltiple, método LSD, factor: 0H.

TIEMPO (horas)	RÉPLICAS	MEDIA (%)	GRUPOS HOMOGÉNEOS
96	3	68,8648	X
144	3	76,0177	X
120	3	78,3791	X

Fuente: Los autores.

Tabla 33.- Diferencia significativa entre medias (% remoción DQO) mediante prueba de rango múltiple, método LSD, factor: 0H.

CONTRASTE	SIG.	DIFERENCIA	+/- LÍMITES
96 - 120	*	-9,51426	2,07158
96 - 144	*	-7,15286	2,07158
120 - 144	*	2,3614	2,07158
* Indica una diferencia significativa.			

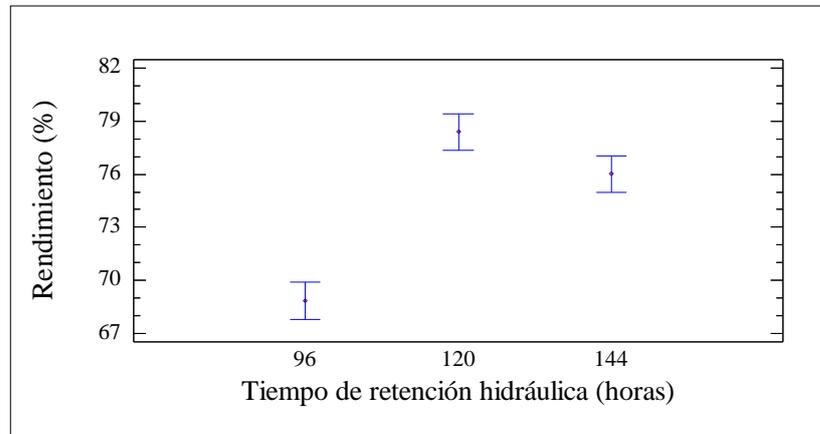
Fuente: Los autores.

La aplicación del método LSD nos da las siguientes conclusiones:

- ✓ Se identifica la formación de 3 grupos homogéneos según la alineación de las X's en columnas: [96], [120] y [144] horas.
- ✓ Las diferencias estimadas entre cada par de medias indica que la totalidad de los pares presentan diferencias estadísticamente significativas (representadas con un asterisco) con un nivel del 95,0% de confianza; las diferencias

estimadas entre pares sostienen que en el $\theta H = 120$ horas ocurre la mayor remoción.

Ilustración 40.- Gráfico de medias (% remoción DQO) y 95% de Fisher LSD, factor: θH .



Fuente: Los autores.

Haciendo una comparación visual se puede observar que:

$$96 \neq 120 \neq 144$$

De esta manera se puede afirmar que el mayor rendimiento para la remoción de DQO se consigue a las 120 horas de tratamiento.

16.2.5. Remoción en términos de DBO_5

Con el fin de corroborar las conclusiones alcanzadas a partir del análisis de la remoción de DQO, se midió simultáneamente las concentraciones de DBO_5 del afluente y efluente de cada θH evaluado (*ver Anexo 6*). Se obtuvieron 9 ensayos experimentales, considerando las tres réplicas para cada θH .

La concentración inicial de DBO_5 para cada de θH fue la siguiente:

Tabla 34.- Valores iniciales de DBO_5 en el sistema continuo.

CONCENTRACIÓN DBO_5 (mg O_2 /L)		
$\theta H = 96$	$\theta H = 120$	$\theta H = 144$
760*	880*	770*
* Resultados obtenidos en laboratorio certificado.		

Fuente: Los autores.

Para facilitar el manejo de los datos se expresa la remoción de DBO_5 como rendimiento según la *expresión* [16.1]. Los resultados se recogen a continuación:

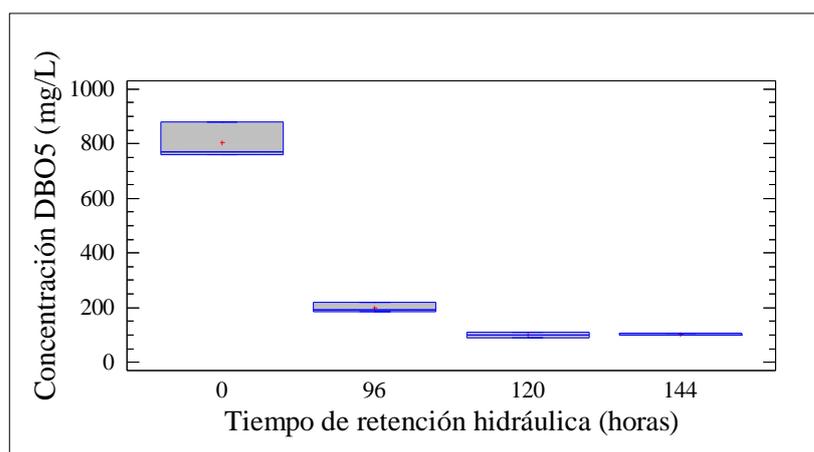
Tabla 35.- Resultados de remoción de DBO_5 en el sistema continuo.

N°	θH	CONCENTRACIÓN DBO_5 ($\text{mg O}_2/\text{L}$)				RENDIMIENTO (%)			
	horas	R1*	R2*	R3*	Promedio	R1	R2	R3	Promedio
1	96	218	185	191	198	71,32	75,66	74,87	73,95
2	120	110	98	90	99,33	87,50	88,86	89,77	88,71
3	144	98	108	100	102	87,27	85,97	87,01	86,75

* Resultados obtenidos en laboratorio certificado.

Fuente: Los autores.

Ilustración 41.- Diagrama de cajas para concentración de DBO_5 en el sistema continuo.



Fuentes: Los autores.

En la gráfica se observa que no existen valores atípicos de concentración de DBO_5 en cada θH evaluado. Comparando los bloques de muestras se obtiene que la mayor dispersión entorno al centro corresponde a las concentraciones iniciales; por el contrario, la menor dispersión se encuentra en $\theta\text{H} = 144$ horas de tratamiento. Finalmente, la distribución de las concentraciones en los todos los θH tiene un sesgo positivo.

La reducida variabilidad en la distribución de cada bloque y la ausencia de valores atípicos valida la aplicación del conjunto de datos en análisis estadísticos posteriores.

16.2.5.1. Análisis de varianza

Se emplea el ANOVA de un factor para identificar si existe o no diferencia en la remoción de DBO₅ (rendimiento) entre los θ H evaluados en flujo continuo.

El ANOVA de un factor calculado parte de las siguientes condiciones:

- ✓ Variable dependiente: Rendimiento (%)
- ✓ Factor: Tiempo (horas)
- ✓ Número de observaciones: 9
- ✓ Número de niveles: 3

Las hipótesis planteadas son:

H_0 = Todas las medias de los θ H son iguales ($\mu_A = \mu_B$)

H_1 = Las medias de los θ H no son iguales ($\mu_A \neq \mu_B$)

Tabla 36.- ANOVA para la remoción de DBO₅ en el sistema continuo.

Fuente	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	385,539	2	192,77	81,20	0,0000
Intra grupos	14,244	6	2,374		
Total (Corregido)	399,783	8			

Fuente: Los autores.

El valor-P es menor que el nivel de significancia de 0,05. Por tanto, rechazamos la H_0 de igualdad de medias de los tiempos de retención evaluados.

16.2.5.2. Prueba de rangos múltiples

Después de haber rechazado la hipótesis nula, mediante la prueba ANOVA, es necesario identificar que θ H son significativamente diferentes aplicando el método LSD de Fisher.

Tabla 37.- Grupos homogéneos (% remoción DBO₅) mediante prueba de rango múltiple, método LSD, factor: θ H.

TIEMPO (Horas)	RÉPLICAS	MEDIA (%)	GRUPOS HOMOGÉNEOS
96	3	73,95	X
144	3	86,75	X
120	3	88,71	X

Fuente: Los autores.

Tabla 38.- Diferencia significativa entre medias (% remoción DBO₅) mediante prueba de rango múltiple, método LSD, factor: θ H.

CONTRASTE	SIG.	DIFERENCIA	+/- LÍMITES
96 - 120	*	-14,76	3,07832
96 - 144	*	-12,8	3,07832
120 - 144		1,96	3,07832

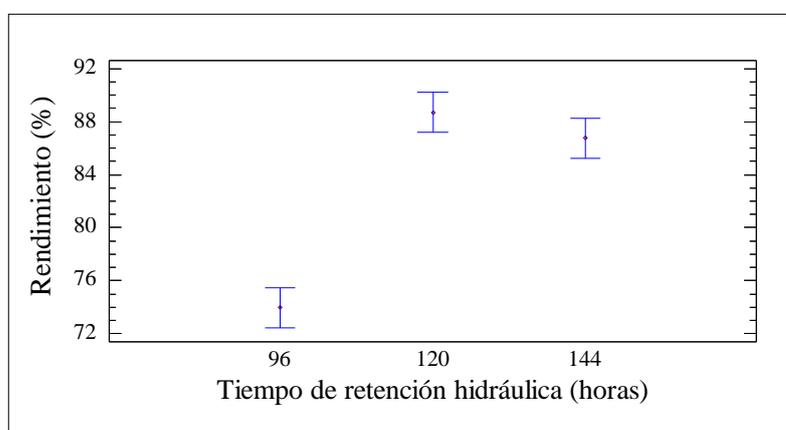
* Indica una diferencia significativa.

Fuente: Los autores.

La aplicación del método LSD nos da las siguientes conclusiones:

- ✓ Se identifica la formación de 2 grupos homogéneos según la alineación de las X's en columnas: [96] y [120-144] horas.
- ✓ Las diferencias estimadas entre cada par de medias indica que no existe diferencias estadísticamente significativas, con un nivel del 95,0% de confianza, entre los θ H de mayor rendimiento, θ H = 120 y θ H = 144 horas.

Ilustración 42.- Gráfico de medias (% remoción DBO₅) y 95% de Fisher LSD, factor: θ H.



Fuente: Los autores

Haciendo una comparación visual se puede observar que:

$$96 \neq 120 = 144$$

Estadísticamente, no hay diferencias entre los tiempos que presentan mayor remoción: $\theta_H = 120$ y $\theta_H = 144$ horas. Por tanto, se puede considerar que en un θ_H de 120 horas el tratamiento alcanza la mayor efectividad en la remoción de DBO_5 .

Reflexión final

Bajo las condiciones ambientales de $\text{pH}=7$, OD mayor a $2 \text{ mg O}_2/\text{L}$ y temperatura ambiente de la ciudad de Cuenca (16°C), el mayor rendimiento de DQO (78,38%), y DBO_5 (88.71%) se consigue a las 120 horas de evaluación, considerado de ahora en adelante, el tiempo de retención hidráulico para este tipo de tratamiento.

17. DETERMINACIÓN DEL θ_c

Se realizaron 27 ensayos experimentales para la determinación de SSV en el sistema, es decir, los que se encuentran en el afluente, en el medio de soporte (biomasa) y para los que salen del sistema en el efluente. Se consideraron las tres réplicas para cada tiempo evaluado.

En las siguientes tablas se presentan las cargas orgánicas superficiales aplicadas a los reactores, así como los resultados de las concentraciones de SSV en el afluente, medio de soporte y efluente:

Tabla 39.- SSV en el afluente del reactor.

θ_H	CARGA ORGÁNICA	SSV EN EL AFLUENTE (g/L)			PROMEDIO
(horas)	(g DQO/m ² día)	R1	R2	R3	(g/L)
96	3,645	0,684	0,672	0,728	0,695
120	3,023	0,708	0,732	0,756	0,732
144	2,463	0,696	0,860	0,744	0,767
PROMEDIO					0,731

Fuente: Los autores.

Tabla 40.- SSV en el efluente del reactor.

θH	CARGA ORGÁNICA	SSV EN EL EFLUENTE (g/L)			PROMEDIO
<i>(horas)</i>	<i>(g DQO/m² día)</i>	<i>R1</i>	<i>R2</i>	<i>R3</i>	<i>(g/L)</i>
96	3,645	0,280	0,440	0,344	0,355
120	3,023	0,172	0,148	0,188	0,169
144	2,463	0,100	0,108	0,084	0,097
PROMEDIO					0,207

Fuente: Los autores.

A lo largo del experimento en flujo continuo los valores mínimos de SSV en el afluente fueron de 0,672 g/L y los máximos de 0,860 g/L con una concentración promedio de 0,731 g/L. La variación de 0,06 respecto a la media, confirma que la preparación diaria de agua sintética mantuvo constante las características del influente. Por otro lado, los SSV en los efluentes no muestran un patrón definido (valor mínimo = 0,084 g/L y valor máximo = 0,440 g/L), sin embargo, mantienen una relación directa con la carga orgánica de cada θH evaluado.

Tabla 41.- SSV en el medio de soporte.

TIEMPO DE OPERACIÓN	θH	SSV EN EL MEDIO DE SOPORTE (g/m²)			PROMEDIO
<i>(días)</i>	<i>(horas)</i>	<i>R1</i>	<i>R2</i>	<i>R3</i>	<i>(g/m²)</i>
73	96	16,108	15,805	16,190	16,035
67	120	16,397	16,297	16,590	16,428
59	144	15,785	14,908	15,680	15,458
PROMEDIO					15,973

Fuente: Los autores.

La cuantificación de biomasa en el medio de soporte arroja como resultado valores comprendidos entre 14,908 y 16,590 g/m² con una concentración promedio de 15,973 g/m². El valor igual a 0,502 de la desviación estándar indica que la cantidad de biomasa por metro cuadrado se mantiene relativamente equilibrada.

Tabla 42.- Tiempo de retención celular para los diferentes θ_H .

Tiempo de operación	θ_H	Carga orgánica	Gasto másico en el afluente	Masa seca en el lecho	Gasto másico en el efluente	θ_C
(días)	(horas)	(g/m ² día)	(g/día)	(g)	(g/día)	(días)
73	96	3,645	14,122	129,303	7,210	6,06
67	120	3,023	12,047	132,476	2,787	8,93
59	144	2,463	10,598	124,652	1,346	10,44
PROMEDIO						8,48

Fuente: Los autores.

En la *Tabla 42* se presentan los tiempos de retención celular medidos a lo largo del experimento, y como se puede observar cada θ_C tiene relación directa con la carga orgánica aplicada.

Jairo Romero Rojas explica que: “El mejor tiempo promedio de retención celular será aquel que produzca el mejor efluente”¹⁰⁷; bajo este precepto, el tiempo de retención celular adecuado para el tratamiento en estudio corresponde a 8,93 días. Este periodo garantiza la ausencia de pin floc o lodo joven, tal y como se menciona en el *apartado 11.2*; durante la operación a escala real en este tipo de sistemas de tratamiento.

Es importante destacar que este parámetro debe ser corroborado en el periodo de estabilización del reactor a escala real, tomando el valor obtenido en este estudio como punto de partida, como lo sugiere Moncayo & Ayala¹⁰⁸.

18. DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN A/M

Tabla 43.- Relación A/M para los diferentes θ_H .

θ_H	Carga Orgánica	Afluente	Masa seca en el lecho	Caudal	A/M
(horas)	(g/m ² día)	Kg DBO ₅ /m ³	Kg	m ³ /día	$\frac{Kg DBO_5}{Kg SSV \text{ día}}$
96	3,645	0,760	0,129	0,0203	0,119
120	3,023	0,880	0,132	0,0165	0,109

¹⁰⁷ ROMERO, Jairo, *Op. Cit.*, p. 489.

¹⁰⁸ MONCAYO Irina & AYALA, Diana, *Op. Cit.*, p. 7.

θH	Carga Orgánica	Afluente	Masa seca en el lecho	Caudal	A/M
(horas)	(g/m ² día)	Kg DBO ₅ /m ³	Kg	m ³ /día	$\frac{Kg\ DBO_5}{Kg\ SSV\ día}$
144	2,463	0,770	0,125	0,0138	0,085
PROMEDIO					0,105

Fuente: Los autores.

De los resultados anteriores se puede observar que no se tienen variaciones importantes entre cada medición, por lo que se puede decir que mantener la relación A/M alrededor de 0,105 $\frac{Kg\ DBO_5}{Kg\ SSV\ día}$ garantizó una efectividad de remoción de 78% para DQO y 88% para DBO₅. En un reactor a escala real la relación A/M se controla por la velocidad de carga orgánica.

Del mismo modo, los valores registrados sugieren que el crecimiento microbiano dentro de los reactores alcanzó la fase endógena, sustrato < biomasa. Esta situación resulta importante para minimizar la producción de lodos, ya que mantener la biomasa en la fase endógena permite completar la mineralización del sustrato dentro de la biopelícula, como lo sugiere Eyüp Nafiz Korkut¹⁰⁹. De esta manera, los lodos se encuentran lo suficientemente estabilizados como para ser dispuestos directamente, luego de disminuir su contenido de agua. Esto es, debido a que el poco alimento, obliga a la población microbiana a consumir parte de su material de reserva.

¹⁰⁹ KORKUT, Eyüp, *Geotextiles as Biofilm Attachment Baffles for Wastewater Treatment*, Thesis Submitted to the Faculty of Drexel University by in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, Philadelphia, 2003, p. 91.

CAPÍTULO IV

OBSERVACIONES FINALES

19. CONCLUSIONES

Con este estudio a escala laboratorio, se demostró que el tratamiento aerobio de aguas residuales provenientes de fuentes domésticas, empleando medio de soporte fijo y con flujo ascendente, es una buena alternativa para la remoción de materia orgánica biodegradable contenida en el agua residual mediante biopelícula.

La investigación sugiere la alternativa de realizar un estudio de tratabilidad biológica previo al diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas mediante biopelícula de una forma rápida y económica, que a su vez, entrega resultados importantes para elaborar un diseño más real y eficiente.

La evaluación nutricional demostró que el agua residual sintética asimilable a doméstica tiene la capacidad de ser biodegradable y cumple con los requerimientos mínimos de nutrientes para el tratamiento aerobio.

Las pruebas de caracterización indican que el lecho provee un soporte adecuado para el desarrollo de la biomasa debido a su alta área superficial específica ($97,16 \text{ m}^2/\text{m}^3$), además de reducir considerablemente la aparición de problemas de taponamiento en el sistema gracias al elevado porcentaje de vacíos (95,42%).

El monitoreo de las condiciones de operación tanto en sistema cerrado como en flujo continuo indicaron que el sistema se mantuvo en un $\text{pH} = 7$, el mismo se encuentra dentro del rango recomendado para el tratamiento biológico.

Mantener la concentración de oxígeno disuelto mayor a 2 mg/L durante toda la experimentación garantizó que las condiciones aerobias prevalezcan en el sistema.

El rango de temperatura en la que se llevó a cabo la experimentación sugiere la predominancia de bacterias psicrófilas en los reactores.

El análisis estadístico determinó que el tiempo de retención hidráulico de 5 días es el de mayor rendimiento. La remoción de materia orgánica expresada como DQO y DBO₅ en este periodo alcanzó valores comprendidos entre 77,59 - 79,57% y 87,50 - 89,77% respectivamente. Por tanto, el $\theta_H = 5$ días es considerado como el primer parámetro de diseño a escala real para este reactor.

El θ_C igual a 8,93 días corresponde al periodo que permitirá la colonización del medio de soporte con los organismos esperados garantizando la remoción de materia orgánica y la formación de lodo sedimentable. No obstante, se sugiere realizar estas pruebas en la estabilización del reactor a escala real para determinar con mayor precisión este parámetro.

Mantener la relación A/M alrededor de $0,105 \frac{\text{Kg DBO}_5}{\text{Kg SSV día}}$, permite alcanzar las máximas remociones de DQO y DBO₅ reportadas en este estudio. Además, disminuye la producción de lodos, así como, promueve la estabilización de los mismos.

20. RECOMENDACIONES

A lo largo del presente estudio, se encontraron varias consideraciones que facilitaron el ensayo experimental y, por otro lado generaron nuevos supuestos fuera del alcance de nuestro trabajo pero meritorias de indagación, las mismas que se ponen a disposición para nuevas investigaciones:

Utilizar agua residual sintética para estudios de tratamientos de aguas residuales, debido a que garantiza en el influente características constantes a lo largo del experimento y permite su manipulación segura al carecer de agentes patógenos.

Evaluar el comportamiento del tratamiento frente a mayores temperaturas, para determinar si su influencia incrementa de manera significativa su eficiencia, y a la vez conocer su aplicabilidad en condiciones diferentes a las de Cuenca.

Emplear diferentes medios de soporte, sintéticos o naturales, con el fin de optimizar las eficiencias alcanzadas.

Trabajar con mayores concentraciones de materia orgánica para observar la respuesta del sistema frente a condiciones extremas, y de esta manera determinar la carga orgánica máxima que puede someterse a este tipo de tratamiento.

Evaluar este tratamiento durante tiempos más prolongados para determinar la probabilidad de taponamiento o colmatación del lecho en un periodo mayor al empleado en esta investigación y confirmar la necesidad o no de retrolavado.

Experimentar el tratamiento con dosificación intercalada de oxígeno con el propósito de conocer la posibilidad de obtener mayores rendimientos con menor costo de energía.

21. PROYECCIÓN FUTURA

Este estudio resulta trascendente dentro del desarrollo de sistemas alternativos para el tratamiento de aguas residuales domésticas, puesto que corrobora una vez más la efectividad que tienen los tratamientos biológicos en las condiciones ambientales características de una ciudad como Cuenca. Además, se crea un antecedente respecto a la importancia que tiene la aplicación de un estudio de tratabilidad previo diseño de una planta de tratamiento.

La aplicación de los resultados para un diseño a escala real es factible para el tratamiento de vertidos procedentes de pequeñas poblaciones o residenciales, pues la infraestructura requiere de áreas reducidas. Sin embargo, la inversión constante que representa el suministro de oxígeno al reactor limitaría su utilización.

Para cumplir con la normativa vigente respecto a la descarga de efluentes en aguas dulces será necesario complementar el tratamiento biológico con mecanismos de pretratamiento y postratamiento, observando de igual forma, que las concentraciones máximas de DBO₅ y DQO en el influente no sobrepasen a las evaluadas.

BIBLIOGRAFÍA

Libros, publicaciones y revistas

AUDESIRK Teresa y otros, *Biología. La vida en la Tierra*, Editorial Pearson Educación, 8^{va}. Edición, México, 2008.

CARRASCO, Francisco y MENÉNDEZ, Ángel, *Nuevas tecnologías para el tratamiento del agua*, 1^{ra}. Edición, Editorial Universidad Internacional de Andalucía, España, 2010.

CHAMY, Rolando y otros, *AVANCES EN BIOTECNOLOGÍA AMBIENTAL: Tratamiento de Residuos Líquidos y Sólidos*, Vol. 2, Salesianos S.A., Chile, 2003.

CRITES, Ron y TCHOBANOGLIOUS, George, *Tratamiento de Aguas Residuales en Pequeñas Poblaciones*, McGraw-Hill, Colombia, 2000.

DAVIS, Mackenzie, *Water and wastewater engineering. Design, principles and practice*, Professional Edition, McGraw-Hill, Unites States, 2010.

DEPARTAMENTO DE SANIDAD DEL ESTADO DE NUEVA YORK, *Manual de tratamiento de aguas negras*, Editorial Limusa, México, 2009.

DOMÉNECH, Xavier, *Química de la Hidrosfera - Origen y destino de los contaminantes*, 3^{ra}. Edición, Miraguano Ediciones, Madrid, 2000.

FERRER, José y SECO, Aurora, *Tratamientos biológicos de aguas residuales*, 1^{ra} Edición, Alfaomega Grupo Editor, México, 2008.

FLYNN, Daniel, *The Nalco Water Handbook*, 3rd Edition, McGraw-Hill, United States of America, 2009.

HENRY, Glynn y HEINKE, Gary, *Ingeniería ambiental*, 2^{da}. Edición, Prentice Hall, México, 1999.

- HERNÁNDEZ, Aurelio y otros, *Manual de depuración de uralita*, 2^{da}. Edición, Thomson Editores Spain, España, 2000.
- JOACHIM Hans and WINTER Josef, *Environmental Biotechnology*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2005.
- LEHR, Jay and KEELEY, Jack, “Domestic, Municipal, and Industrial Water Supply and Waste Disposal”, WATER ENCYCLOPEDIA, Vol. 1, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey-United States of America, 2005.
- LLATA María Dolores, *Ecología y Medio Ambiente*, 1^{ra}. Edición, Editorial Progreso, México, 2006.
- METCALF & EDDY^a, *Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización*, Vol. 1, 3^{ra}. Edición, Editorial McGraw-Hill, España, 1995.
- METCALF & EDDY^b, *Wastewater Engineering. Treatment and Reuse*, 4th. Edition, McGraw-Hill, United States, 2003.
- OROZCO, Álvaro, *Bioingeniería de aguas residuales*, 1^{ra}. Edición, Editorial Acodal, Colombia, 2005.
- ROMERO, Jairo, *Tratamiento de aguas residuales-Teoría y principios de diseño*, 3^{ra}. Edición, Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, Colombia, 2004.
- SENPLADES, *Plan Nacional del Buen Vivir 2013-2017*, 1^{ra}. Edición, Quito, Ecuador, 2013.
- SHUN, Dar Lin, *Water and Wastewater Calculations Manual*, 2^{da}. Edición, McGraw-Hill, Estados Unidos, 2001.
- SPELLMAN, Frank, *Handbook of water & wastewater treatment plant operations*, Lewis publishers, London, 2003.

VON SPERLING, Marcos, *Basic Principles of Wastewater Treatment: Biological Wastewater Treatment*, Vol. 2, IWA Publishing, London, 2007.

VON SPERLING, Marcos and DE LEMOS CHERNICHARO Augusto, *Biological wastewater treatment in warm climate regions*, Vol. 1, 1st. Edition, IWA Publishing, 2005.

WIESMANN, Udo and others, *Fundamentals of biological wastewater treatment*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co., Weinheim, 2007.

Referencias electrónicas

ARNAIZ, Carmen y otros, “Eliminación biológica de contaminantes (II)”, *Ingeniería Química*, año XXXIV, número 390, España, mayo de 2002, <<http://www.inese.es/html/files/pdf/amb/iq/390/12articulo.pdf>> [Citado el 22 de agosto de 2013].

CABRERA, Hernán y otros, *4^{to} Taller regional sobre el uso seguro de aguas residuales en la agricultura para América Latina y el Caribe, Informe para el Ecuador: Desarrollo de Capacidades para el Uso Seguro de Aguas Servidas en Agricultura-Producción de Aguas Servidas, Tratamiento y Uso en el Ecuador*, Lima, Perú, 2012, <http://www.ais.unwater.org/ais/pluginfile.php/378/mod_page/content/144/ECUADOR_producci%C3%B3n_de_aguas_servidas_tratamiento_y_uso.pdf> [Citado el 2 de septiembre de 2013].

EPA, *Onsite Wastewater Treatment Systems Manual*, United States, 2002, <http://www.epa.gov/owm/septic/pubs/septic_2002_osdm_all.pdf> [Citado el 15 de octubre de 2013].

GALLEGO, Darío, y otros, “Funcionamiento hidráulico de un filtro anaerobio de flujo ascendente”, *Ingeniería Química*, año XXXIV, número 450, España, septiembre de 2007, <<http://www.inese.es/html/files/pdf/amb/iq/450/15ARTICULOSEP.pdf>> [Citado el 21 de mayo de 2013].

HORWITZ, Gilbert. *Deepwater Pilot Plant Treatability Study*, Environmental Protection Technology Series, United States, 1974, <<http://searchworks.stanford.edu/view/9331650>> [Citado el 4 noviembre de 2013].

KORKUT, Eyüp, *Geotextiles as Biofilm Attachment Baffles for Wastewater Treatment*, Thesis Submitted to the Faculty of Drexel University by in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of

Philosophy, Philadelphia, 2003, <http://dspace.library.drexel.edu/retrieve/658/korkut_thesis.pdf?origin=publication_detail> [Citado el 27 de noviembre de 2013].

LOPEZ, Erick, *Tratamiento de Aguas Residuales*, Instituto Tecnológico Superior de Irapuato, México, 2012, <<http://www.slideshare.net/lobezno81/tratamiento-de-aguas-residuales-11206028>> [Citado el 22 de agosto de 2013].

MAŠIĆ, Alma, *Investigation of a biofilm reactor model with suspended biomass*, Lund University, Centre for Mathematical Sciences, Doctoral Theses in Mathematical Sciences, Sweden, 2013, <<http://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordId=3516782&fileId=3516793>> [Citado el 26 de octubre de 2013].

MONCAYO, Irina y AYALA, Diana, “Estudio de tratabilidad biológica de aguas residuales domésticas para optimizar resultados a escala real”, *Revista Digital VI CONGRESO Ciencia y Tecnología ESPE 2011*, ESPE Campus Politécnico-Sangolquí, junio de 2011, <http://www.espe.edu.ec/portal/files/sitio_congreso_2011/papers/V3.pdf> [Citado el 22 de agosto de 2013].

OMS, *Estadísticas Sanitarias Mundiales 2013*, WHO Documents Production Services, Ginebra - Suiza, 2013, <http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/82218/1/9789243564586_spa.pdf> [Citado el 22 de agosto de 2013].

ONU, *Objetivos de Desarrollo del Milenio – Informe 2013*, Nueva York, junio de 2013, <<http://www.un.org/es/millenniumgoals/pdf/mdg-report-2013-spanish.pdf>> [Citado el 22 de agosto de 2013].

TEMPLETON, Michael and BUTLER, David, *Introduction to Wastewater Treatment*, Ventus Publishing ApS, Londres, 2011, <<http://bookboon.com/es/introduction-to-wastewater-treatment-ebook>> [Citado el 22 de agosto de 2013].

TORRESCANO, José, “Parámetros de operación en el proceso de tratamiento de agua residual por lodos activados”, *AquaForum*, año XIII, N° 52, Guanajato, mayo 2009, <<http://seia.guanajuato.gob.mx/document/AquaForum/AF52/AquaForum52.pdf>> [Citado el 19 de octubre de 2013].

UNESCO^a, 4^{to}. *Informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo. “Gestionar el agua en un contexto de incertidumbre y riesgo”*, 2012, <<http://unesdoc.unesco.org/images/0021/002156/215644e.pdf>> [Citado el 22 de agosto de 2013].

UNESCO^b, 2^{do}. *Informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo. “EL Agua, una responsabilidad compartida”*, 2006, <<http://unesdoc.unesco.org/images/0014/001495/149519S.pdf>> [Citado el 24 de agosto de 2013].

UNIVERSIDAD NACIONAL RIO NEGRO, *Técnicas de Muestreo, Análisis e Interpretación de Datos, Ingeniería Ambiental, Argentina*, 2013, <<http://unrn.edu.ar/blogs/TMAI2013/files/2013/08/Lab-4-OD-y-DQO.pdf>> [Citado el 18 de febrero de 2013].

VALDEZ, Enrique y VÁZQUEZ, Alba, *Ingeniería de los sistemas de tratamiento y disposición de aguas residuales*, Editorial Fundación ICA, México, 2003, <http://www.capac.org/web/Portals/0/biblioteca_virtual/doc003/TEXT0%20COMPLETO.pdf> [Citado el 4 noviembre de 2013].

VALDIVIA, Cruz A., *Tratamiento de aguas residuales municipales utilizando tres diferentes medios de soporte en lechos empacados*, Tesis doctoral UNAM, México D.F., 2005, <<http://132.248.52.100:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/580>> [Citado el 13 de abril de 2013].

WHO^a, *Water Quality and Health Strategy 2013-2020*, 2013,
<http://www.who.int/water_sanitation_health/publications/2013/water_quality_strategy.pdf> [Citado el 22 de agosto de 2013].

WHO^b, *Facts and figures: Water, sanitation and hygiene links to health*, 2004,
<http://www.who.int/water_sanitation_health/WSHFact-Spanish.pdf>
[Citado el 22 de agosto de 2013].

GLOSARIO

Adsorción.- Retención de líquidos o gases en la superficie de un sólido.

Agente complejante.- Anión o molécula que se une a un átomo de un metal para formar un ion complejo. Ejemplos de agentes complejantes o ligandos son el OH^- y el NH_3 .

Biopelícula o biofilm.- Es una estructura colectiva de microorganismos que se adhiere a superficies vivas o inertes y está revestida por una capa protectora segregada por los propios microorganismos.

Ciclo biogeoquímico.- Proceso natural mediante el cual se reciclan los elementos químicos una y otra vez entre los organismos y el ambiente. Bío se refiere a los organismos; geo a las rocas, suelo, aire y al agua del planeta; y químico a las reacciones que se realizan permitiendo el paso de un lugar a otro. Existen dos tipos de ciclos biogeoquímicos: los gaseosos y los sedimentarios. Los gaseosos tienen su depósito principal en la atmósfera, entre ellos el carbono y el nitrógeno. Los sedimentarios tienen su depósito principal en la corteza terrestre, por ejemplo el fósforo, calcio, potasio, o azufre.

El agua de la marisma puede ser tanto agua dulce como agua salada, es decir procedente de los ríos, de los mares o de los océanos, aunque lo normal es que el agua de la marisma sea una mezcla de ambas, así que se la llama agua salobre.

Exoenzima.- Enzima que actúa fuera de las células en que se origina, enzima extracelular.

Humedales.- Según el Convenio de Ramsar los humedales son “Las extensiones de marismas, pantanos y turberas, o superficies cubiertas de aguas, sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros”.

Lodos estabilizados.- Son lodos estables, menos pestíferos y putrescibles, y más deshidratables.

Marismas.- Las marismas son ecosistemas con altos niveles de humedad habitado por plantas herbáceas que crecen en el agua, es decir por plantas acuáticas. No debe confundirse una marisma con una ciénaga, ya que esta última en lugar de tener plantas herbáceas tiene árboles.

Material refractario.- Es todo aquel compuesto o elemento que es capaz de conservar sus propiedades físicas, químicas y mecánicas a elevada temperatura.

Mineralización.- Es la descomposición microbiológica del material orgánico de las aguas residuales en productos finales inorgánicos como dióxido de carbono, agua, nitrógeno amoniacal o nitratos, ortofosfatos y sulfuros.

Permafrost.- Tierras que están permanentemente congeladas, siempre que la temperatura permanezca por debajo de 0°C durante varios años.

Porosidad.- Relación entre el volumen de huecos y el volumen total de un elemento poroso

Reactor.- Reservorio donde se lleva a cabo una transformación físicoquímica o biológica de un sustrato.

Substrato.- Término empleado para representar la materia orgánica o los nutrientes que sufren una conversión o que pueden constituir un factor limitante en el tratamiento biológico.

Surfactante.- Es una sustancia química que, posee una estructura molecular constituida por una parte hidrofílica (polar) y una lipofílica (apolar), lo que le confiere doble afinidad.

Sustancias poliméricas extracelulares.- Se refieren a la compleja mezcla de compuestos de alto peso molecular secretados por los microorganismos o desprendidos de la pared celular, a productos de la hidrólisis de macromoléculas o de

la lisis de las células y a materia orgánica adsorbida por estas sustancias poliméricas, que se encuentran en el exterior de la célula. Tienen un papel clave en procesos de tratamiento de aguas ya que intervienen en procesos de bioadsorción, floculación y adhesión.

Tensión superficial.- Es una propiedad de la superficie de un líquido que permite soportar una fuerza externa. Está causada por la atracción entre moléculas semejantes y es la responsable de muchos de los comportamientos de los líquidos. Se puede observar, por ejemplo, cuando ciertos insectos se sostienen sobre la superficie del agua e igual ocurre con algunos objetos, como una hoja de afeitar colocada horizontalmente sobre la superficie del líquido, aunque estos sean más densos que el agua y no pueden flotar.

Viscosidad.- Característica de los fluidos en movimiento, que muestra una tendencia de oposición hacia su flujo ante la aplicación de una fuerza.

Anexo 1

DETERMINACIÓN DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO

Principio

La muestra se oxida con una cantidad conocida de dicromato de potasio en exceso, en medio ácido y con catalizadores. El dicromato de potasio remanente es determinado espectrofotométricamente a 600 nm. Recolectar la muestra en envases de vidrio o plástico estériles.

Equipos y Materiales

- ✓ *Balanza Analítica:* Balanza analítica con precisión de 4 decimales.
- ✓ *Mufla*
- ✓ *Tubos de digestión:* Tubos de borosilicato, aprox. 15 mm de diámetro, con capacidad de 6 mL aprox., con tapa a rosca resistente al calentamiento y a la mezcla sulfocrómica.
- ✓ *Bloque calentador:* Revestido de aluminio, con agujeros adecuados para insertar los tubos de profundidad tal, que el nivel superior de mezcla quede, por lo menos, 5 mm dentro del bloque.
- ✓ *Espectrofotómetro:* Ajustado a 600 nm, con cubas de 1 cm de paso óptico.

Reactivos

- ✓ *Ácido sulfúrico concentrado:* grado analítico.
- ✓ *Solución Ácida de Dicromato de Potasio:* En erlenmeyer de 1 L poner aproximadamente 500 mL de agua destilada, agregar 10,2285 g de dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$), grado patrón primario, secado previamente 2 horas a $103^\circ C$ y 167 mL de ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4), mezclar, agregar agua hasta un poco menos de 1 L, enfriar y trasvasar a un matraz de 1 L, enrasar.
- ✓ *Mezcla digestora:* Al momento de hacer los análisis preparar en erlenmeyer, una mezcla de 30% de solución ácida de dicromato de potasio y 70% de ácido

sulfúrico concentrado (poner el dicromato primero y luego agregar, de a poco, el sulfúrico); el volumen a preparar depende del número de muestras. Dejar enfriar antes de usar.

Ilustración 43.- Preparación de la solución ácida de Dicromato de Potasio.



Fuente: Los autores.

Ilustración 44.-Preparación de la Mezcla Digestora.



Fuente: Los autores.

Estándares

Solución madre de biftalato de potasio: Triturar biftalato de potasio [C₆H₄(COO)₂HK] grado para análisis y luego llevar a peso constante, a 120°C. Disolver 950 mg en agua destilada y llevar a 1.000 mL. Esta solución tiene una DQO teórica de 1.000 mg O₂/L. La solución es estable en heladera por más de 3 meses verificando que no tenga crecimiento visible de microorganismos.

Curva de calibración

De la solución madre de biftalato de potasio hacemos diluciones al 10; 20; 40, 60, y 80 % en matraces de 100 mL que van de 100 a 800 mg O₂/L. Procesar como en técnica analítica.

Ilustración 45.-Estándares de 100, 200, 400, 600 y 800 mg O₂/L.



Fuente: Los autores.

Muestra

Análisis de la muestra de efluentes directa o diluida según la concentración esperada.

Ilustración 46.- Dilución de las muestras de agua.



Fuente: Los autores.

Precauciones

Durante la realización del práctico usar anteojos de seguridad y guantes. Agitar fuertemente la mezcla en los tubos antes de colocarlos en el bloque calentador para evitar calentamientos locales en el fondo del tubo que podrían producir una explosión.

Esquema de trabajo

Se procesan blanco de reacción y extracto por duplicado (para poder eliminar un dato si es necesario).

En recipientes rotulados: B (blanco de reacción), y E (extracto, con su N°) poner:

Tabla 44.- Proporción de soluciones para la oxidación.

SOLUCIÓN	B	E
<i>Mezcla Digestora (mL)</i>	2	2
<i>Agua (mL)</i>	1	0
<i>Extracto ó dilución (mL)</i>	0	1

Fuente: Los autores.

Tapar bien los tubos. Agitarlos todos juntos y colocarlos en el bloque calentador, precalentado a 150°C, durante 2 horas. Dejar enfriar, agitar los tubos puestos en una gradilla y leer en espectrofotómetro a 600 nm.

Ilustración 47.- Calentamiento de los tubos y enfriamiento.



Fuente: Los autores.

Ilustración 48.- Determinación de la absorbancia.



Fuente: Los autores.

Cálculos

Los resultados se expresan en mg de O₂/L. Trabajando con curva de calibración interpolar directamente.

Anexo 2

DETERMINACIÓN DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS VOLÁTILES

Materiales y equipos

- ✓ Mufla
- ✓ Desecador
- ✓ 6 Crisoles de porcelana
- ✓ Papel filtro circular de 11 cm de diámetro
- ✓ Pinza metálica
- ✓ Soporte universal
- ✓ 3 doble nueces
- ✓ 3 embudos de vidrio
- ✓ 3 recipientes
- ✓ Balanza analítica con precisión de 4 decimales

Procedimiento

Se toma el filtro, que contiene la materia en suspensión producto del filtrado de la muestra de agua residual y se calcina en un horno a 550 °C durante 1 hora. Se deja enfriar en el desecador y se pesa hasta conseguir peso constante. En este caso se utilizó crisoles de porcelana, ya que este tipo de material puede someterse a la calcinación sin sufrir deterioro.

Ilustración 49.- Filtración de las muestras de agua.



Fuente: Los autores.

Ilustración 50. Calcinaación de las muestras filtradas.



Fuente: Los autores.

Ilustración 51.- Pesaje de las muestras calcinadas.



Fuente: Los autores.

Cálculo de resultados

El cálculo de los sólidos en suspensión volátiles se realiza con la siguiente expresión:

$$\text{Sólidos suspendidos volátiles} = (P_1 - P_2) \frac{1000}{V}, \text{ en g/L}$$

Donde:

P_1 = Peso del papel filtro después del filtrado y secado.

P_2 = Peso del papel filtro después de la filtración y de la calcinación.

V = Volumen de muestra filtrada en mililitros.

Anexo 3

FICHAS DE REGISTRO DE RESULTADOS DE DQO PARA CURVA DE CALIBRACIÓN

DETERMINACIÓN DE LA CURVA DE CALIBRACIÓN PARA ANÁLISIS DE DQO			
Fecha: 29 de Abril de 2013			
Carrera: Ingeniería Ambiental.			
Responsables: Alejandra Noguera - Fernando Pacheco.			
MUESTRA 1		MUESTRA 2	
ABSORBANCIA PROMEDIO (nm)	CONCENTRACIÓN DQO (mg/L)	ABSORBANCIA PROMEDIO (nm)	CONCENTRACIÓN DQO (mg/L)
0,029	100	0,035	100
0,065	200	0,075	200
0,152	400	0,148	400
0,219	600	0,216	600
0,243	800	0,255	800

DETERMINACIÓN DE LA CURVA DE CALIBRACIÓN PARA ANÁLISIS DE DQO			
Fecha: 30 de Abril de 2013			
Carrera: Ingeniería Ambiental.			
Responsables: Alejandra Noguera - Fernando Pacheco.			
MUESTRA 3		MUESTRA 4	
ABSORBANCIA PROMEDIO (nm)	CONCENTRACIÓN DQO (mg/L)	ABSORBANCIA PROMEDIO (nm)	CONCENTRACIÓN DQO (mg/L)
0,038	100	0,043	100
0,073	200	0,077	200
0,156	400	0,155	400
0,235	600	0,231	600
0,276	800	0,282	800

DETERMINACIÓN DE LA CURVA DE CALIBRACIÓN PARA ANÁLISIS DE DQO

Fecha: 30 de Abril de 2013

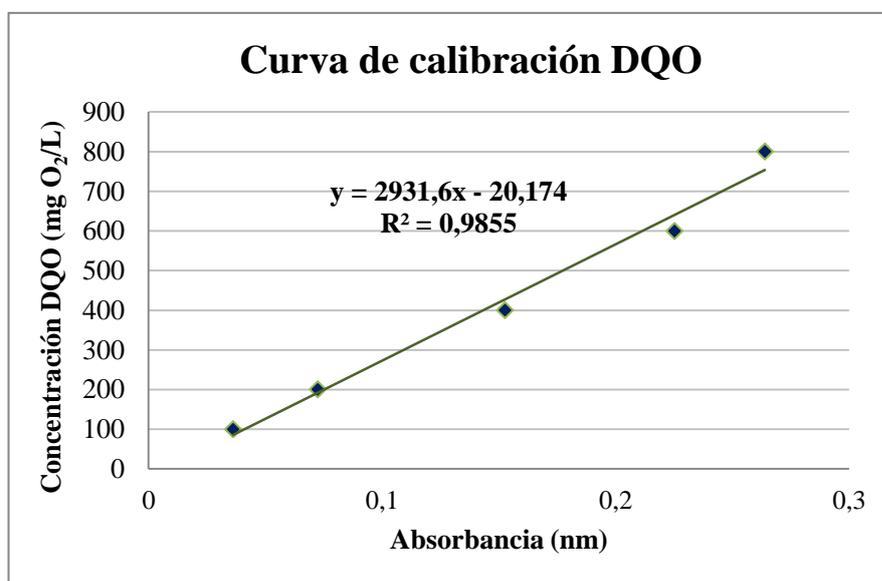
Carrera: Ingeniería Ambiental.

Responsables: Alejandra Noguera - Fernando Pacheco.

PROMEDIO

ABSORBANCIA PROMEDIO (nm)	CONCENTRACIÓN DQO (mg/L)
0,03625	100
0,0725	200
0,15275	400
0,22525	600
0,264	800

CURVA AJUSTADA



Anexo 4

**FICHAS DE REGISTRO DE RESULTADOS DE DQO EN EL SISTEMA
CERRADO**

ENSAYO EN SISTEMA CERRADO				
Día: 0		Responsables:		
Fecha: Lunes, 17 de junio		Alejandra Noguera-Fernando Pacheco		
REACTOR	ABSORBANCIA (nm)	RESULTADO (ECUACIÓN) DILUCIÓN 50% (mg/L)	RESULTADO FINAL (mg/L)	PROMEDIO (mg/L)
1	0,263	750,84	1501,67	1501,67
	0,263	750,84	1501,67	
2	0,274	783,08	1566,17	1607,21
	0,288	824,13	1648,25	
3	0,291	832,92	1665,84	1715,68
	0,308	882,76	1765,52	

ENSAYO EN SISTEMA CERRADO				
Día: 1		Responsables:		
Fecha: Martes, 18 de junio		Alejandra Noguera-Fernando Pacheco		
REACTOR	ABSORBANCIA (nm)	RESULTADO (ECUACIÓN) DILUCIÓN 50% (mg/L)	RESULTADO FINAL (mg/L)	PROMEDIO (mg/L)
1	0,253	721,52	1443,04	1434,25
	0,250	712,73	1425,45	
2	0,254	724,45	1448,90	1457,70
	0,257	733,25	1466,49	
3	0,261	744,97	1489,95	1487,02
	0,260	742,04	1484,08	

ENSAYO EN SISTEMA CERRADO				
Día: 2		Responsables:		
Fecha: Miércoles, 19 de junio		Alejandra Noguera-Fernando Pacheco		
REACTOR	ABSORBANCIA (nm)	RESULTADO (ECUACIÓN) DILUCIÓN 50% (mg/L)	RESULTADO FINAL (mg/L)	PROMEDIO (mg/L)
1	0,215	610,12	1220,24	1214,38
	0,213	604,26	1208,51	
2	0,219	621,85	1243,69	1278,87
	0,231	657,03	1314,05	
3	0,235	668,75	1337,50	1328,71
	0,232	659,96	1319,91	

ENSAYO EN SISTEMA CERRADO				
Día: 3		Responsables:		
Fecha: Jueves, 20 de junio		Alejandra Noguera-Fernando Pacheco		
REACTOR	ABSORBANCIA (nm)	RESULTADO (ECUACIÓN) DILUCIÓN 50% (mg/L)	RESULTADO FINAL (mg/L)	PROMEDIO (mg/L)
1	0,188	530,97	1061,93	1050,21
	0,184	519,24	1038,48	
2	0,189	533,90	1067,80	1059,00
	0,186	525,10	1050,21	
3	0,218	618,91	1237,83	1231,97
	0,216	613,05	1226,10	

ENSAYO EN SISTEMA CERRADO				
Día: 4		Responsables:		
Fecha: Viernes, 21 de junio		Alejandra Noguera-Fernando Pacheco		
REACTOR	ABSORBANCIA (nm)	RESULTADO (ECUACIÓN) DILUCIÓN 50% (mg/L)	RESULTADO FINAL (mg/L)	PROMEDIO (mg/L)
1	0,16	448,88	897,76	897,76
	0,16	448,88	897,76	
2	0,166	466,47	932,94	924,15
	0,163	457,68	915,35	
3	0,199	563,21	1126,43	1123,50
	0,198	560,28	1120,57	

ENSAYO EN SISTEMA CERRADO				
Día: 5		Responsables:		
Fecha: Sábado, 22 de junio		Alejandra Noguera-Fernando Pacheco		
REACTOR	ABSORBANCIA (nm)	RESULTADO (ECUACIÓN) DILUCIÓN 50% (mg/L)	RESULTADO FINAL (mg/L)	PROMEDIO (mg/L)
1	0,156	437,16	874,31	871,38
	0,155	434,22	868,45	
2	0,171	481,13	962,26	973,99
	0,175	492,86	985,71	
3	0,192	542,69	1085,39	1085,39
	0,192	542,69	1085,39	

ENSAYO EN SISTEMA CERRADO				
Día: 6		Responsables:		
Fecha: Domingo, 23 de junio		Alejandra Noguera-Fernando Pacheco		
REACTOR	ABSORBANCIA (nm)	RESULTADO (ECUACIÓN) DILUCIÓN 50% (mg/L)	RESULTADO FINAL (mg/L)	PROMEDIO (mg/L)
1	0,158	443,02	886,04	886,04
	0,158	443,02	886,04	
2	0,178	501,65	1003,30	1009,16
	0,18	507,51	1015,03	
3	0,186	525,10	1050,21	1056,07
	0,188	530,97	1061,93	

ENSAYO EN SISTEMA CERRADO				
Día: 7		Responsables:		
Fecha: Lunes, 24 de junio		Alejandra Noguera-Fernando Pacheco		
REACTOR	ABSORBANCIA (nm)	RESULTADO (ECUACIÓN) DILUCIÓN 50% (mg/L)	RESULTADO FINAL (mg/L)	PROMEDIO (mg/L)
1	0,167	469,40	938,81	932,94
	0,165	463,54	927,08	
2	0,179	504,58	1009,16	1017,96
	0,182	513,38	1026,75	
3	0,187	528,04	1056,07	1061,93
	0,189	533,90	1067,80	

ENSAYO EN SISTEMA CERRADO				
Día: 8		Responsables:		
Fecha: Martes, 25 de junio		Alejandra Noguera-Fernando Pacheco		
REACTOR	ABSORBANCIA (nm)	RESULTADO (ECUACIÓN) DILUCIÓN 50% (mg/L)	RESULTADO FINAL (mg/L)	PROMEDIO (mg/L)
1	0,156	437,16	874,31	868,45
	0,154	431,29	862,58	
2	0,178	501,65	1003,30	994,51
	0,175	492,86	985,71	
3	0,170	478,20	956,40	1003,30
	0,186	525,10	1050,21	

Anexo 5

**FICHAS DE REGISTRO DE RESULTADOS DE DQO EN EL SISTEMA CON
FLUJO CONTINUO**

Ensayo 0H = 96 horas

ENSAYO EN SISTEMA CON FLUJO CONTINUO				
ANÁLISIS DE DQO				
Fecha: Jueves, 08 de agosto			0H: 96 horas	
<i>MEDICIÓN INICIAL</i>				
TANQUE	ABSORBANCIA (nm)	RESULTADO (ECUACIÓN) DILUCIÓN 50% (mg/L)	RESULTADO FINAL (mg/L)	PROMEDIO (mg/L)
1	0,254	724,45	1448,90	1445,97
	0,253	721,52	1443,04	

ENSAYO EN SISTEMA CON FLUJO CONTINUO				
ANÁLISIS DE DQO				
Fecha: Lunes, 12 de agosto			0H: 96 horas	
<i>MEDICIÓN FINAL</i>				
REACTOR	ABSORBANCIA (nm)	RESULTADO (ECUACIÓN) DILUCIÓN 50% (mg/L)	RESULTADO FINAL (mg/L)	PROMEDIO (mg/L)
1	0,085	229,01	458,02	449,23
	0,082	220,22	440,43	
2	0,086	231,94	463,89	469,75
	0,088	237,81	475,61	
3	0,079	211,42	422,84	431,64
	0,082	220,22	440,43	

ENSAYO EN SISTEMA CON FLUJO CONTINUO				
ANÁLISIS DE SSV		θH: 96 horas		
AFLUENTE	<i>Peso filtro</i>	0,7864	0,7864	0,7864
	<i>Peso Filtrado</i>	62,7184	29,9306	49,5222
	<i>Peso Desechado</i>	61,9202	29,1327	48,7229
	SSV	0,0171	0,0168	0,0182
MEDIO DE SOPORTE	<i>Peso filtro</i>	0,7864	0,7864	0,7864
	<i>Peso Filtrado</i>	32,4359	33,7277	53,3837
	<i>Peso Desechado</i>	28,5620	29,9120	49,4941
	SSV	3,0928	3,0346	3,1085
EFLUENTE	<i>Peso filtro</i>	0,7864	0,7864	0,7864
	<i>Peso Filtrado</i>	62,7104	29,9241	49,4972
	<i>Peso Desechado</i>	61,9223	29,1320	48,7075
	SSV	0,0070	0,0110	0,0086

Ensayo θH = 120 horas

ENSAYO EN SISTEMA CON FLUJO CONTINUO				
ANÁLISIS DE DQO				
Fecha: Viernes, 02 de agosto		θH: 120 horas		
MEDICIÓN INICIAL				
TANQUE	ABSORBANCIA (nm)	RESULTADO (ECUACIÓN) DILUCIÓN 50% (mg/L)	RESULTADO FINAL (mg/L)	PROMEDIO (mg/L)
1	0,256	730,32	1460,63	1481,15
	0,263	750,84	1501,67	

ENSAYO EN SISTEMA CON FLUJO CONTINUO				
ANÁLISIS DE DQO				
Fecha: Miércoles, 07 de agosto			θH: 120 horas	
MEDICIÓN FINAL				
REACTOR	ABSORBANCIA (nm)	RESULTADO (ECUACIÓN) DILUCIÓN 50% (mg/L)	RESULTADO FINAL (mg/L)	PROMEDIO (mg/L)
1	0,06	155,72	311,44	326,10
	0,065	170,38	340,76	
2	0,066	173,31	346,62	331,97
	0,061	158,65	317,31	
3	0,058	149,86	299,72	302,65
	0,059	152,79	305,58	

ENSAYO EN SISTEMA CON FLUJO CONTINUO				
ANÁLISIS DE SSV		θH: 120 horas		
<i>AFLUENTE</i>	Peso filtro	0,7864	0,7864	0,7864
	Peso Filtrado	28,5986	29,9413	49,5356
	Peso Desechado	27,7998	29,1419	48,7356
	SSV	0,0177	0,0183	0,0189
<i>MEDIO DE SOPORTE</i>	Peso filtro	0,7864	0,7864	0,7864
	Peso Filtrado	32,4913	33,8222	53,4605
	Peso Desechado	28,562	29,912	49,4941
	SSV	3,1482	3,1291	3,1853
<i>EFLUENTE</i>	Peso filtro	0,7864	0,7864	0,7864
	Peso Filtrado	28,5651	29,9304	49,5050
	Peso Desechado	27,7797	29,1456	48,7192
	SSV	0,0043	0,0037	0,0047

Ensayo $\theta H = 144$ horas

ENSAYO EN SISTEMA CON FLUJO CONTINUO				
ANÁLISIS DE DQO				
Fecha: Jueves, 25 de julio			θH : 144 horas	
<i>MEDICIÓN INICIAL</i>				
TANQUE	ABSORBANCIA (nm)	RESULTADO (ECUACIÓN) DILUCIÓN 50% (mg/L)	RESULTADO FINAL (mg/L)	PROMEDIO (mg/L)
1	0,254	724,45	1448,90	1437,18
	0,25	712,73	1425,45	

ENSAYO EN SISTEMA CON FLUJO CONTINUO				
ANÁLISIS DE DQO				
Fecha: Miércoles, 31 de Julio			θH : 144 horas	
<i>MEDICIÓN FINAL</i>				
REACTOR	ABSORBANCIA (nm)	RESULTADO (ECUACIÓN) DILUCIÓN 50% (mg/L)	RESULTADO FINAL (mg/L)	PROMEDIO (mg/L)
1	0,066	173,31	346,62	346,62
	0,066	173,31	346,62	
2	0,066	173,31	346,62	352,49
	0,068	179,17	358,35	
3	0,062	161,59	323,17	334,90
	0,066	173,31	346,62	

ENSAYO EN SISTEMA CON FLUJO CONTINUO				
ANÁLISIS DE SSV		θH: 144 horas		
<i>AFLUENTE</i>	Peso filtro	0,7864	0,7864	0,7864
	Peso Filtrado	53,4972	62,7167	59,8634
	Peso Desechado	52,6987	61,9141	59,0637
	SSV	0,0174	0,0215	0,0186
<i>MEDIO DE SOPORTE</i>	Peso filtro	0,7864	0,7864	0,7864
	Peso Filtrado	53,306	33,5555	53,2857
	Peso Desechado	49,4941	29,912	49,4941
	SSV	3,0308	2,8624	3,0105
<i>EFLUENTE</i>	Peso filtro	0,7864	0,7864	0,7864
	Peso Filtrado	49,4970	25,3648	29,9164
	Peso Desechado	48,7134	24,5810	29,1332
	SSV	0,0025	0,0027	0,0021

Anexo 6

RESULTADOS DEL LABORATORIO DE ETAPA EP

TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICO= 96 horas

 ETAPA <small>EMPRESA PERUANA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES Y SANEAMIENTO</small> LABORATORIO DE SANEAMIENTO Panamericana Norte Km. 5 y 1/2. – Cuenca Telf : 4175557 - 4175568	Laboratorio de Ensayo Acreditado por el OAE con Acreditación N° OAE LE 2C 06-004	INFORME DE RESULTADOS Página 1 de 1
---	---	---

FECHA: 2013/08/01

INFORME N°: 438/13

CLIENTE

NOMBRE: SR. FERNANDO PACHECO
DIRECCIÓN: Viracochabamba 3-46 y Guapondelig - Cuenca

MUESTRA

CODIGO: 438/01/13
DESCRIPCIÓN: Agua residual
PROCEDENCIA: UPS
FECHA DE RECEPCIÓN: 2013/07/25
ENTREGADAS POR: Sr. Fernando Pacheco

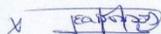
RESULTADOS

PARAMETRO	METODO	FECHA REALIZACION	UNIDADES	AGUA RESIDUAL (tanque) 438/01/13
DBO5	PEE/LS/FQ/01	2013/07/25 2013/07/30	mg/l	770
FÓSFORO TOTAL	PEE/LS/FQ/03	2013/07/27	mg/l	8.67
NKT *	SM 4500 Norg B	2013/07/26	mg/l	253.31

SM: STANDARD METHODS, Edición 22

PARAMETRO	DBO5
INCERTIDUMBRE	18.12 % (95 %, k=1.96)

Atentamente,



Ing. Yolanda Torres Moscoso
RESPONSABLE DEL LABORATORIO

- Los resultados contenidos en el presente informe solo afectan a los objetos sometidos al ensayo.
- Este informe no deberá reproducirse parcialmente sin la aprobación por escrito del laboratorio.
- "Los ensayos marcados con (*) NO están incluidos en el alcance de la acreditación del OAE"

MC0406-12



ETAPA
ENTIDAD TITULAR DE APROVECHAMIENTO DE RECURSOS HÍDRICOS

LABORATORIO DE SANEAMIENTO
Panamericana Norte Km. 5 y 1/2. – Cuenca
Telf : 4175557 - 4175568

Laboratorio de Ensayo
Acreditado por el OAE con
Acreditación N°
OAE LE 2C 06-004

INFORME DE RESULTADOS
Página 1 de 1

FECHA: 2013/08/07

INFORME N°: 450/13

CLIENTE

NOMBRE: SR. FERNANDO PACHECO
DIRECCIÓN: Viracochabamba 3-46 y Guapondelig - Cuenca

MUESTRA

CODIGO: 450/01-03/13
DESCRIPCIÓN: Agua residual
PROCEDENCIA: UPS
FECHA DE RECEPCIÓN: 2013/07/31
ENTREGADAS POR: Sr. Fernando Pacheco

RESULTADOS

PARAMETRO	METODO	FECHA REALIZACION	UNIDADES	REACTOR 1 450/01/13
DBO5	PEE/LS/FQ/01	2013/07/31 2013/08/05	mg/l	98

PARAMETRO	METODO	FECHA REALIZACION	UNIDADES	REACTOR 2 450/02/13
DBO5	PEE/LS/FQ/01	2013/07/31 2013/08/05	mg/l	108

PARAMETRO	METODO	FECHA REALIZACION	UNIDADES	REACTOR 3 450/03/13
DBO5	PEE/LS/FQ/01	2013/07/31 2013/08/05	mg/l	**

**La DBO es menor a la esperada, < 100 mg/l.

SM: STANDARD METHODS, Edición 22

PARAMETRO	DBO5
INCERTIDUMBRE	18.12 % (95 %, k=1.96)

Atentamente,

X

Ing. Yolanda Torres Moscoso
RESPONSABLE DEL LABORATORIO

- Los resultados contenidos en el presente informe solo afectan a los objetos sometidos al ensayo.
- Este informe no deberá reproducirse parcialmente sin la aprobación por escrito del laboratorio.
- "Los ensayos marcados con (*) NO están incluidos en el alcance de la acreditación del OAE"

MC0406-12

TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICO= 120 horas

 ETAPA <small>ENTIDAD TERCERA DE CALIFICACIÓN DE LABORATORIOS</small> LABORATORIO DE SANEAMIENTO Panamericana Norte Km. 5 y 1/2. – Cuenca Telf : 4175557 - 4175568	Laboratorio de Ensayo Acreditado por el OAE con Acreditación N° OAE LE 2C 06-004	INFORME DE RESULTADOS Página 1 de 1
--	---	---

FECHA: 2013/08/09

INFORME N°: 456/13

CLIENTE

NOMBRE: SR. FERNANDO PACHECO
DIRECCIÓN: Viracochabamba 3-46 y Guapondelig - Cuenca

MUESTRA

CODIGO: 456/01/13
DESCRIPCIÓN: Agua residual
PROCEDENCIA: UPS
FECHA DE RECEPCIÓN: 2013/08/02
ENTREGADAS POR: Sr. Fernando Pacheco

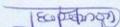
RESULTADOS

PARAMETRO	METODO	FECHA REALIZACION	UNIDADES	AGUA RESIDUAL (tanque) 456/01/13
DBO5	PEE/LS/FQ/01	2013/08/02 2013/08/07	mg/l	880

SM: STANDARD METHODS, Edición 22

PARAMETRO	DBO5
INCERTIDUMBRE	18.12 % (95 %, k=1.96)

Atentamente,

X 

Ing. Yolanda Torres Moscoso
RESPONSABLE DEL LABORATORIO

- Los resultados contenidos en el presente informe solo afectan a los objetos sometidos al ensayo.
- Este informe no deberá reproducirse parcialmente sin la aprobación por escrito del laboratorio.
- "Los ensayos marcados con (*) NO están incluidos en el alcance de la acreditación del OAE"

MC0406-12



ETAPA
ENTIDAD TITULAR DE APROVECHAMIENTO DE RECURSOS HÍDRICOS

LABORATORIO DE SANEAMIENTO
Panamericana Norte Km. 5 y 1/2. – Cuenca
Telf : 4175557 - 4175568

Laboratorio de Ensayo
Acreditado por el OAE con
Acreditación N°
OAE LE 2C 06-004

INFORME DE RESULTADOS
Página 1 de 1

FECHA: 2013/08/14

INFORME N°: 461/13

CLIENTE

NOMBRE: SR. FERNANDO PACHECO
DIRECCIÓN: Viracochabamba 3-46 y Guapondelig - Cuenca

MUESTRA

CODIGO: 461/01-03/13
DESCRIPCIÓN: Agua residual
PROCEDENCIA: UPS
FECHA DE RECEPCIÓN: 2013/08/07
ENTREGADAS POR: Sr. Fernando Pacheco

RESULTADOS

PARAMETRO	METODO	FECHA REALIZACION	UNIDADES	REACTOR 1 461/01/13
DBO5	PEE/LS/FQ/01	2013/08/07 2013/08/12	mg/l	110

PARAMETRO	METODO	FECHA REALIZACION	UNIDADES	REACTOR 2 461/02/13
DBO5	PEE/LS/FQ/01	2013/08/07 2013/08/12	mg/l	98

PARAMETRO	METODO	FECHA REALIZACION	UNIDADES	REACTOR 3 461/03/13
DBO5	PEE/LS/FQ/01	2013/08/07 2013/08/12	mg/l	90

SM: STANDARD METHODS, Edición 22

PARÁMETRO	DBO5
INCERTIDUMBRE	18.12 % (95 %, k=1.96)

Atentamente,

X

Ing. Yolanda Torres Moscoso
RESPONSABLE DEL LABORATORIO

- Los resultados contenidos en el presente informe solo afectan a los objetos sometidos al ensayo.
- Este informe no deberá reproducirse parcialmente sin la aprobación por escrito del laboratorio.
- "Los ensayos marcados con (*) NO están incluidos en el alcance de la acreditación del OAE"

MC0406-12

TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICO= 144 horas

 ETAPA <small>ENTIDAD TECNOLÓGICA DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE LA FICHA, EL CAMPESINATO Y EL SANEAMIENTO</small> LABORATORIO DE SANEAMIENTO Panamericana Norte Km. 5 y 1/2. – Cuenca Telf : 4175557 - 4175568	Laboratorio de Ensayo Acreditado por el OAE con Acreditación N° OAE LE 2C 06-004	INFORME DE RESULTADOS Página 1 de 1
---	---	---

FECHA: 2013/08/15

INFORME N°: 465/13

CLIENTE

NOMBRE: SR. FERNANDO PACHECO
DIRECCIÓN: Viracochabamba 3-46 y Guapondelig - Cuenca

MUESTRA

CODIGO: 465/01/13
DESCRIPCIÓN: Agua residual
PROCEDENCIA: UPS
FECHA DE RECEPCIÓN: 2013/08/08
ENTREGADAS POR: Sr. Fernando Pacheco

RESULTADOS

PARAMETRO	METODO	FECHA REALIZACION	UNIDADES	AGUA RESIDUAL (tanque) 465/01/13
DBO5	PEE/LS/FQ/01	2013/08/08 2013/08/13	mg/l	760

SM: STANDARD METHODS, Edición 22

PARAMETRO	DBO5
INCERTIDUMBRE	18.12 % (95 %, k=1.96)

Atentamente,

x 
Ing. Yolanda Torres Moscoso
RESPONSABLE DEL LABORATORIO

- Los resultados contenidos en el presente informe solo afectan a los objetos sometidos al ensayo.
- Este informe no deberá reproducirse parcialmente sin la aprobación por escrito del laboratorio.
- "Los ensayos marcados con (*) NO están incluidos en el alcance de la acreditación del OAE"

MC0406-12



ETAPA
ENTIDAD TITULAR DE AUTORIZACIÓN DE EJERCICIOS DE PROFESIONALES DE LA INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y URBANISMO

LABORATORIO DE SANEAMIENTO
Panamericana Norte Km. 5 y 1/2. - Cuenca
Telf : 4175557 - 4175568

Laboratorio de Ensayo
Acreditado por el OAE con
Acreditación N°
OAE LE 2C 06-004

INFORME DE RESULTADOS
Página 1 de 1

FECHA: 2013/08/19

INFORME N°: 473/13

CLIENTE

NOMBRE: SR. FERNANDO PACHECO
DIRECCIÓN: Viracochabamba 3-46 y Guapondelig - Cuenca

MUESTRA

CODIGO: 473/01-03/13
DESCRIPCIÓN: Agua residual
PROCEDENCIA: UPS
FECHA DE RECEPCIÓN: 2013/08/12
ENTREGADAS POR: Sr. Fernando Pacheco

RESULTADOS

PARAMETRO	METODO	FECHA REALIZACION	UNIDADES	REACTOR 1 473/01/13
DBO5	PEE/LS/FQ/01	2013/08/12 2013/08/17	mg/l	218

PARAMETRO	METODO	FECHA REALIZACION	UNIDADES	REACTOR 2 473/02/13
DBO5	PEE/LS/FQ/01	2013/08/12 2013/08/17	mg/l	185

PARAMETRO	METODO	FECHA REALIZACION	UNIDADES	REACTOR 3 473/03/13
DBO5	PEE/LS/FQ/01	2013/08/12 2013/08/17	mg/l	191

SM: STANDARD METHODS, Edición 22

PARAMETRO	DBO5
INCERTIDUMBRE	18.12 % (95 %, k=1.96)

Atentamente,

Ing. Yolanda Torres Moscoso
RESPONSABLE DEL LABORATORIO

- Los resultados contenidos en el presente informe solo afectan a los objetos sometidos al ensayo.
- Este informe no deberá reproducirse parcialmente sin la aprobación por escrito del laboratorio.
- "Los ensayos marcados con (*) NO están incluidos en el alcance de la acreditación del OAE"

MC0406-12

Anexo 7

INFORMACIÓN DEL COMPLEJO BACTERIAL PLUS 1



BACTERIAS PLUS 1

FICHA TECNICA

PLUS 1 es un complejo bacterial con inducción biológica del tipo inocua para el ser humano, plantas o animales ya que éstas, son endémicas de suelos y aguas ecuatorianos. Este producto es de alto rendimiento por su capacidad de descomponer las moléculas en los T. P. H y GRASAS, en AGUAS NEGRAS Y GRISES a gran escala por su característica de alta concentración

DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO.

PLUS 1 es en base de bio tecnología no genera con apariencia líquida color amarillo y olor característico 100% soluble en agua

Composición Química.

Bacterias Nitrificantes, ácido láctico y estreptococos	6.3x10 ⁸ ufc.
Levaduras Sacharomyces	1.2%
Levaduras Streptomyces	0.5%
Lactobacillus	1.5%
Bacillus	3.2%
Ácidos orgánicos	47%
Ácidos orgánicos de fermentación	15%

CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS:

Color:	Amarillo
Estado:	Líquido.
PH:	3.5 a 9
Solubilidad:	Totalmente Soluble en Agua.

Activación: Uso directo o activación por fuentes de carbón

Compatibilidad: Adaptable a todo tipo de medios de alta polución, ácidos o alcalinos, y a todo tipo de salinidad en medios acuáticos o terrestres, contaminación de residuales de petróleo, aceites y grasas TSS reducción de DBO y DQO. (Comportamiento digestión).

VENTAJAS:

A diferencia de cualquier otro método, proceso o producto del mercado posee las siguientes ventajas que lo vuelve apreciable y único en el mercado:

1. Actúa de manera competitiva dentro de un amplio espectro, no contiene materias primas que puedan afectar a vida humana y animal, a través de la eliminación de colonias

Av. Don Bosco 580 y Av. 12 de Octubre
Teléfono: (593) 7 2816906 Cel.: (593) 9 99405725 (593) 9 84713797
e-mail: blavann@hotmail.com
Cuenca – Ecuador



bacteriales nocivas que serán desplazadas por la acción de productos de excreción propios de acción coadyuvante del contenido de PLUS 1 tales como ácido láctico, ácido fórmico, peróxido de hidrógeno biológico, entre otros.

2. Mantiene permanencia y acción en medios tóxicos hostiles sean éstos, desechos industriales, domésticos, mineros, agrícolas donde otro tipo de existencia animal o humana colapsaría.
3. Goza de un buen manejo ya que es muy fácil de manipular y diluir es lo que le permite rivalizar contra el consumo y precios desmedidos de otras marcas que son importadas su función es captar el medio contaminado, recuperándolo de una manera rápida y efectiva en muy corto tiempo.
4. Posee la capacidad de captar cationes de metales pesados en sus superficies celulares e insolubilizarlos, proceso conocido como absorción de metales, en el tratamiento de aguas residuales industriales y permitiendo la remoción de iones metálicos como cobre, cadmio, zinc y hierro. Esto se debe a que las paredes de estas bacterias con carga negativa, captan iones metálicos por absorción, intercambio iónico, micro precipitación y los retienen en su envoltura.
5. Puede actuar en todo tipo de ambiente debido a su carácter facultativo o anaeróbico que presentan con o en ausencia de oxígeno; a más de presentar comportamiento eurihalino que le permite adaptarse fácilmente en ambientes de aguas dulces, salobres o saladas sin reducir su potencial digestor.
6. Producen como productos de excreción; peróxido de hidrógeno y ácidos orgánicos naturales que ayudan a disgregar grasas contaminantes del medio u otros compuestos esteáricos a moléculas simples que puedan ser incorporadas y aprovechadas por el medio tales como glicerolos y ácidos grasos.
7. Ecológico y amigable con el entorno lo que permite una biorremediación sustentable con el medio ambiente.
8. Hacen viables los desechos orgánicos al digerirlos, disgregarlos y reincorporarlos en forma de partículas esenciales necesarias para plantas y animales.
9. No producen consecuencias residuales o anómalas para el medio ya que sus componentes que no son bacteriostáticos o bactericidas y son inofensivos y biodegradables para los ecosistemas.
10. Se requiere un mínimo uso de personal para su preparación.
11. Es de fácil uso y acción inmediato para la remediación del impacto ambiental.

BENEFICIOS:

Con la aplicación de **PLUS 1** en tratamiento de aguas residuales de extracción de hidrocarburos metales pesados aguas negras y grises se obtendrán los siguientes beneficios:

- Mejoramiento de las zonas que permitirá un desarrollo normal y congruente con los ecosistemas terrestres, dulces, lacustres, estuarinos y marinos.
- Repercusión no sólo a las zonas expuestas al proceso, sino las zonas circundantes al proceso.
- Obtención de suelos y aguas con cargas patógenas nulas o muy bajas, inocuas para la salud animal o humana.
- Desarrollo del bentos y fitoplancton en los ambientes acuáticos.

Av. Don Bosco 580 y Av. 12 de Octubre
Teléfono: (593) 7 2816906 Cel.: (593) 9 99405725 (593) 9 84713797
e-mail: blavann@hotmail.com
Cuenca – Ecuador



- Reinserción de la flora y fauna nativa del lugar al incorporarse al medio, nutrientes y un sistema más salubre para su desarrollo.
- Recuperación de nuevas zonas para el desarrollo urbanístico, ecológico o turístico.
- Obtención de aguas residuales limpias que puedan ser empleadas por la agricultura pudiendo ser reincorporados a ríos o al mar.
- Mejoramiento de las aguas al reducir el exceso de grasas y residuales e petróleo en un periodo cortos y a bajos costos eliminando superficies anoxias a más de exceso de sólidos en suspensión obteniendo residuales ricos en nutrientes.
- Proliferación de peces y demás especies acuáticas que puedan ser empleadas sin riesgo por el ser humano.
- Actúa de manera directa, indistinta y espontánea al material contaminado pudiendo recuperar grandes volúmenes de agua sin necesidad de emplear maquinaria pesada o filtros mecánicos de alto costo.

RECOMENDACIONES DE ALMACENAMIENTO.

Manténgase en lugar fresco y seco, protegido de la luz solar.

INSTRUCCIONES DE USO:

Producto de aplicación directa o de activación por carbón

Consultas técnicas o asesorías durante el periodo de manejo, incluyendo puntos de inducción y tasas de dosificación previa a una evaluación técnica.

Para definir los resultados, como las recomendaciones y el proceso de las mejoras continuas, deberá contactarse con nosotros para hacer las evaluaciones pertinentes.

Presentación: Envase de 1 Litro y canecas de 20 Litros para su mejor manipulación.

Caducidad: 6 meses (180 días).

Advertencia: Ingestión por accidente, beber mucho líquido y/o leche no inducir al vomito conserve la etiqueta de este producto para ser mostrado y consultar al médico.

Contaminación en los ojos, lavar con abundante agua
Después del uso del producto, lavarse con agua y jabón.

Nota: No es compatible con insumos agrícolas de nivel toxico como fungicidas e insecticidas, etc. Puesto que por su alta capacidad de desdoblar organofosforados y Organoclorados quedaría inactivos

Av. Don Bosco 580 y Av. 12 de Octubre
Teléfono: (593) 7 2816906 Cel.: (593) 9 99405725 (593) 9 84713797
e-mail: blavann@hotmail.com
Cuenca – Ecuador



HOJA DE SEGURIDAD

1. PRODUCTO

NOMBRE:	PLUS 1
DOT:	No regulado
ONU:	NE
SALUD:	0
FUEGO:	0
REACTIVIDAD:	0

2. INGREDIENTES

Todos los componentes no son peligrosos o su concentración es menor del 0.1 %

NOMBRE:	PLUS 1
MICROORGANISMOS:	6.3 X 10 ⁸
AGUA:	7.7%
ALCOHOL:	0
TRETASODIO:	0
SULFATO:	0

3. CARACTERISTICAS FISICAS

PUNTO DE EBULLICION:	100 °C
GRAVEDAD ESPECIFICA:	Aprox. 1
PH:	3,5 a 9
PRESION (VAPOR):	Equivalente al agua 096/1
APARIENCIA Y OLOR:	Líquido con agradable olor
DENSIDAD:	0.99Kilos/litro
SOLUBILIDAD:	100%

4. REACTIVIDAD

REACTIVIDAD:	Estable
INCOMPATIBILIDAD:	Insecticidas, fungicidas, etc.
DESCOMPOSICION:	180 días
PELIGRO DE PROLIFERACION:	NE

5. RIESGO CONTRA LA SALUD

INHALACION:	No
ABSORCION:	Leve
INGESTION:	Muy Leve
OJOS:	Irritación

Av. Don Bosco 580 y Av. 12 de Octubre
Teléfono: (593) 7 2816906 Cel.: (593) 9 99405725 (593) 9 84713797
e-mail: blavann@hotmail.com
Cuenca – Ecuador



Ojos: Este producto puede ocurrir irritación.

Contacto con la piel: Puede causar irritación por contacto **prolongado**.

Inhalación: N D.

Por ingestión: Beber gran cantidad de líquidos fríos y presentar al médico copia de la etiqueta del producto.

Condiciones médicas agravadas: no conocido, sin embargo personas con problemas respiratorios, deben prevenir inhalar el producto.

PRIMEROS AUXILIOS:

Ojos: Enjuagar con abundante agua por 10 minutos.

Inhalación: Mover la persona a un sitio ventilado si existe un problema respiratorio, consultar al médico.

Ingestión: Monitorear la persona para determinar para el cuadro sintomatológico

6. PROCEDIMIENTO PARA EL VERTIDO ACCIDENTAL

Pasos en caso de que el producto se derrame:

- **Método de disposición final:** Contener y recoger el material, almacenarlo en contenedores apropiados, para su reutilización o disposición final.
- **Precauciones para el manejo y almacenamiento:** Almacenar fuera del alcance de los niños, alimentos y agua potable, no exponer el producto a la luz del sol directa, almacenar en un lugar fresco, seco y ventilado. Lavar las manos con agua y jabón después de su manipulación.
- **Otras precauciones:** Ninguna

7. MEDIDAS DE CONTROL

PROTECCION RESPIRATORIA: Usar tapabocas, recomendado

PROTECCION EN LAS MANOS: Usar guantes, recomendado.

PROTECCION PARA LOS OJOS: Usar gafas, recomendado.

OTRAS PRENDAS DE PROTECCION: No requiere

VENTILACION: Lugar de almacenaje debe estar ventilado naturalmente.

NOTA: La información y recomendaciones contenidas en esta hoja de seguridad han sido realizadas de fuentes creíbles y verdaderas. No representan garantía alguna. El usuario de este producto debe decidir qué medidas de seguridad son necesarias para su uso, solo o en combinación con otros y determinar acorde a todas las exigencias ambientales legales de su localidad. **Plus1 no se responsabiliza por los malos manejos de producto que estén lejos de sus recomendaciones.**

8. PREPARACIÓN DEL PRODUCTO:

- Diluir 1 kg de bacteria con 1000 litros de agua.

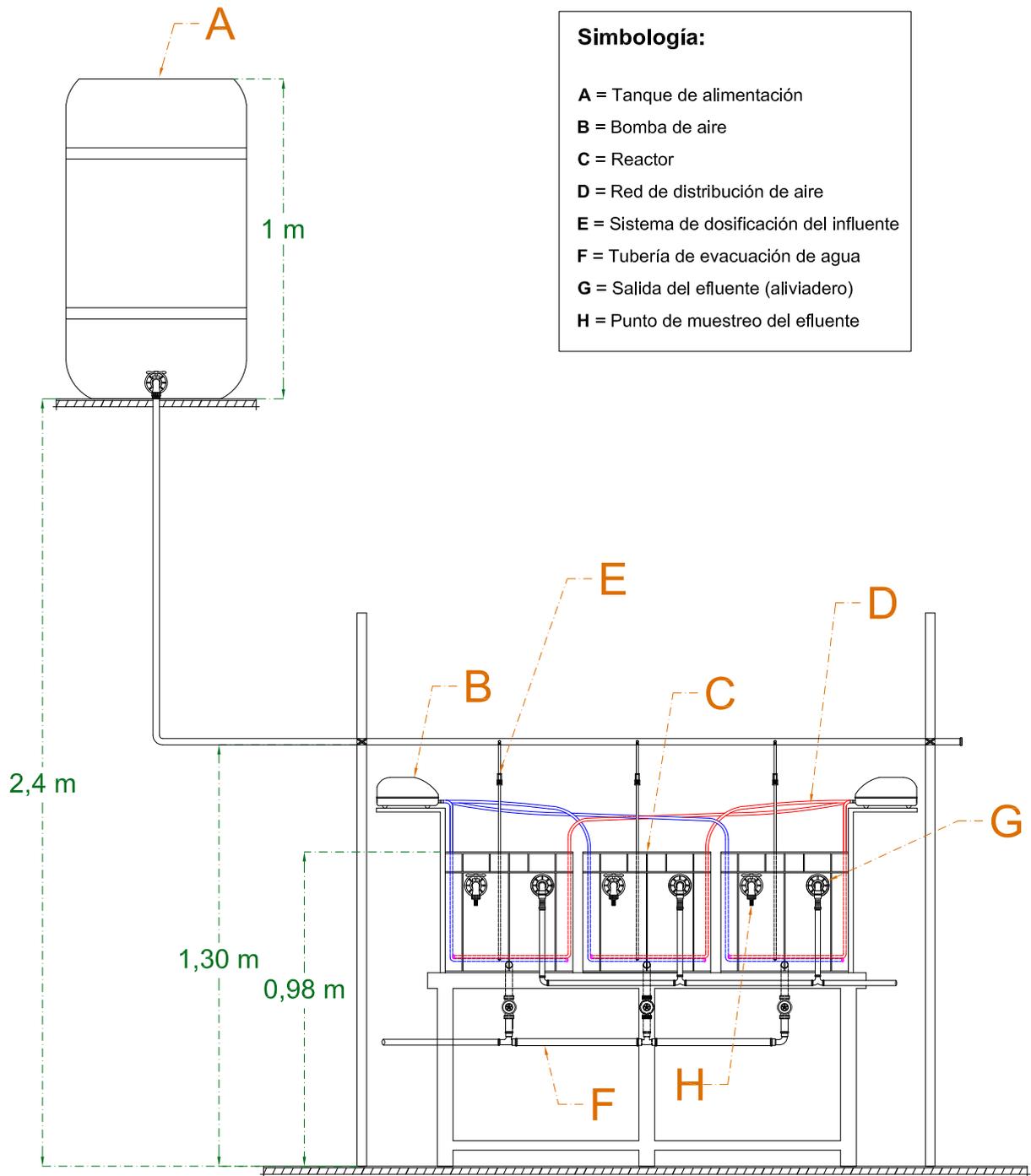
Av. Don Bosco 580 y Av. 12 de Octubre
Teléfono: (593) 7 2816906 Cel.: (593) 9 99405725 (593) 9 84713797
e-mail: blavann@hotmail.com
Cuenca – Ecuador



- Activar la solución de los 1000 litros adicionando de 10-15 kg de melaza o azúcar.
- Dejar que se active la solución por 48 horas.
- Una vez completado el tiempo adicionar 8 litros por cada metro cubico, eso quiere decir que por día se usaran 64 litros de solución.
- Lo importante es que se adicione de forma continua la solución.

Av. Don Bosco 580 y Av. 12 de Octubre
Teléfono: (593) 7 2816906 Cel.: (593) 9 99405725 (593) 9 84713797
e-mail: blavann@hotmail.com
Cuenca – Ecuador

Anexo 8



	<i>Fecha</i>	<i>Nombre</i>	 UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA SEDE MATRIZ CUENCA
<i>Dibujado</i>	29/09/2013	Los autores	
<i>Comprobado</i>	22/01/2014	Ing. Servio Astudillo	
<i>ESCALA:</i> 1:20	ESQUEMA DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO <i>Reactor aerobio de lecho fijo con flujo ascendente</i>		Ingeniería Ambiental Lámina N° 01