

**TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DEL RELLENO SANITARIO "LA
CORTADA" MUNICIPIO DE PAMPLONA MEDIANTE CONTACTORES
BIOLOGICOS ROTATORIOS**

Autor

LUIS GABRIEL HERNANDEZ OJEDA

Director

M.Sc. JULIO ISAAC MALDONADO M.

PROGRAMA INGENIERIA AMBIENTAL

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA CIVIL Y AMBIENTAL

FACULTAD DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURA



UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

2016

**TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DEL RELLENO SANITARIO "LA
CORTADA" MUNICIPIO DE PAMPLONA MEDIANTE CONTACTORES
BIOLOGICOS ROTATORIOS**

Autor

LUIS GABRIEL HERNANDEZ OJEDA

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO
AMBIENTAL**

Director

M.Sc. JULIO ISAAC MALDONADO M.

PROGRAMA INGENIERIA AMBIENTAL

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUIMICA CIVIL Y AMBIENTAL

FACULTAD DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURA



UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

2016

NOTA DE ACEPTACION

DIRECTOR: M.Sc. Prof. Julio Isaac Maldonado M

(firma) _____

JURADO CALIFICADOR:

Ph.D. Jacipt Alexander Ramón V.

(firma) _____

MSc. Ing. Manuel Antonio Contreras M.

(firma) _____

PAMPLONA N. S. COLOMBIA

Diciembre, 2016



PROGRAMA: _____

MODALIDAD DE TRABAJO DE GRADO

- Investigación
- Pasantía de Investigación
- Docencia
- Prácticas Empresarial
- Trabajo de Grado
- Diplomado
- Prácticas Integral

EL JURADO CALIFICADOR CONFORMADO POR: (Nombres, apellidos y documento de identidad).

JURADO 1: _____ / C.C. _____

JURADO 2: _____ / C.C. _____

JURADO 3: _____ / C.C. _____

EN SU SESIÓN EFECTUADA EN: _____ A LAS _____ HORAS, DEL DÍA _____ DEL MES _____ DEL AÑO _____

Terminadas sus deliberaciones, y en cumplimiento de las normas y acuerdos de los órganos de dirección de la Universidad de Pamplona, se ha llegado a la siguiente conclusión:

Primera Conclusión: Otorgar la Calificación de: _____ (en números)

- Meritorio (> -4.50)
- Excelente (> -4, <- 4.40)
- Aprobado (> -3, <- 2.99)
- Incompleto (< -2.99)

AL TRABAJO DE GRADO TITULADO: _____

AUTOR(ES): Número de Autoría (_____)

Nombre:		COD:	
Nombre:		COD:	
Nombre:		COD:	

DIRECTOR Y/O TUTOR: _____ /C.C. _____

Segunda Conclusión: Emitir los siguientes criterios:

No.	DESCRIPCIÓN	RECOMENDAR	
		SI	NO
1.	Recomendar para presentar un avance.		
2.	Recomendar para publicación.		
3.	Recomendar para ser considerado en otros trabajos.		

Otras: _____

Tercera Conclusión: Avalar el cumplimiento del Trabajo de Grado, para optar por el Título de _____

Firmas del Jurado Calificador:

_____ JURADO 1 _____ JURADO 2 _____ JURADO 3

_____ Director Comité Trabajo de Grado _____ Director Unidad Académica

PENSAMIENTO

***"Una vez agotada el agua en el planeta, ni lágrimas tendremos para
lamentarnos"***

Hermes Varillas Labrador

DEDICATORIA

Este libro está dedicado a Dios, a mi familia, a Cecilia.

AGRADECIMIENTOS

Tengo que agradecer al M.Sc Ing. Julio Isaac Maldonado M. por su aporte de conocimientos y guía para la realización de este proyecto.

Al Microbiólogo Jorge Luis Carrillo por su colaboración en la realización de los procesos de análisis microbiológico.

A mis padres que sin su apoyo incondicional hubiese sido imposible el desarrollo de este proyecto.

A todas las personas que de una u otra manera ayudaron a llegar a feliz término con este trabajo final

CONTENIDO

RESUMEN	XIV
ABSTRACT	XV
1. PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN	18
2.2. Objetivos específicos	19
3.1. Antecedentes	20
3.1. 1. Antecedentes internacionales	20
3.4. Marco Legal y Normativo	1
4. METODOLOGÍA	2
5. RESULTADOS Y ANÁLISIS	6
5.1. Caracterización del Lixiviado	6
5.2. Sistema de alimentación y caudal constante	8
Fuente: El autor.....	9
5.3. Diseño y construcción de unidades de pretratamiento	9
5.4. Arranque y Bioadaptación	13
5.4.1. Diseño y adecuación de los CBR	13
Para el diseño de la unidad se tuvo en cuenta las consideraciones de dadas por Romero Rojas (2000) y la unidad fue diseñada por y construida por Maldonado (1993).	13
5.4.2. Fase de Inoculación	16
5.4.3. Fase de Crecimiento	17
5.4.4. Fase de Bioadaptacion	18
5.5. Fase de Operación	19
5.5.1. Aplicación de cargas	19
5.5.1.2. Carga orgánica superficial 2	21
5.5.1.3. Carga orgánica superficial de 3	21
5.6. Comportamiento del CBR en términos de eficiencia	22
5.7. Análisis Bacteriológico	26
CONCLUSIONES	30
RECOMENDACIONES	31
REFERENCIAS	32

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de un reactor de biodiscos.....	30
Figura 2. Fases de la curva de desarrollo bacteriano	43
Figura 3. Trampa de grsas - Vista en planta	10
Figura 4. Trampa de grasas - Vista lateral	10
Figura 5. Sedimentador - Vista en planta	12
Figura 6. Sedimentador - Vista lateral	12
Figura 7. Perspeciva de la trampa de grsas y de sedimentador	12
Figura 8. Unidad de Biodiscos - Vista en planta	15
Figura 9. Unidad de Biodiscos - Corte B-B.....	16
Figura 10. Corte A-A del reactor.....	16
Figura 11. Datos obetnidos con COS1 (12 g DQO/m ² -día).	23
Figura 12. Datos obtenidos con COS2 (20 g DQO/m ² día)	24
Figura 13. Datos obtenidos con COS3 (25 g DQO/m ² día).....	25
Figura 14. Comportamiento de las tres COS	26

LISTA DE IMÁGENES

Imagen 1. Ubicación de relleno sanitario La Cortada.....	6
Imagen 2. Sistema completo de tratamiento - CBR	9
Imagen 3. Porquerizas fuente de excretas.....	17
Imagen 4. Unidad inoculada con excretas de cerdo.....	17
Imagen 5. Biopelícula en fase de crecimiento.....	18

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de biorreactores de biopelícula	34
Tabla 2. Caracterización del Lixiviado del Relleno Sanitario La Cortada	7
Tabla 3. Clasificación general de lixiviados	8
Tabla 4. Parametros de diseño de los CBR	13
Tabla 5. Información de las etapas del reactor	14
Tabla 6. Porcentaje de mezcla en la etapa de bioadaptación	18
Tabla 7. Datos obtenidos con COS1 (12 g DQO/m ² -día)	23
Tabla 8. C.O.S.2 (20 g DQO/m ² día)	24
Tabla 9. C.O.S.3 de 25 g DQO/m ² día	25
Tabla 10. Análisis bacteriológico	27

LISTADO DE ANEXOS

Anexo 1. Tanque de alimentación, unidad de pretatamiento, tanque de estabilización del caudal y CBR.	36
Anexo 2. Adecuación del motor.....	37
Anexo 3. Arriba eje nuevo en operación, abajo eje anterior.	38
Anexo 4. Toma de lixiviado del tanque de llegada en el relleno sanitario la cortada.	39
Anexo 5. Producción de natas en la unidad de toma de la temperatura.	40

RESUMEN

Los Contactores Biológicos Rotatorios (CBR) son procesos aerobios de masa fija adherida para el tratamiento de aguas residuales, consiste en una serie de discos que giran en torno a un eje horizontal, sumergidos entre un 40-45% de su área en agua a tratar dentro de un contenedor, según Romero. R, 2008, el rango de carga orgánica superficial a la cual se operan es entre 12 g DBO/m² día y 40 g DBO/m² día. La unidad donde se realiza la investigación es a escala laboratorio y cuenta con 5 etapas cada una contiene 12 discos, 9 discos, 8 discos, 8 discos y 8 discos respectivamente para un total de 45 discos, que giran a una velocidad de 6 RPM, además la unidad de Biodiscos cuenta con un sedimentador al inicio y otro al final de la unidad, este tipo de tratamiento biológico llega a alcanzar una remoción hasta del 80 % de eficiencia en términos de remoción de DBO₅.

Esta investigación va orientada a la operación de una unidad de CBR en condiciones temperatura ambiente, a realizar un análisis bacteriológico de la biopelícula generada en la unidad y a determinar los niveles de eficiencia en términos de remoción de DQO. A nivel experimental la unidad a escala laboratorio, inoculada, arrancada, operará y alimentada con sustrato caracterizado, aplicando sobre el CBR tres cargas orgánicas superficiales diferentes hasta lograr condiciones estables en cada etapa, determinando cuál de las etapas en términos de carga orgánica superficial brinda la mayor eficiencia, resultando la Carga Orgánica Superficial No 2(20 g DBO/m² día) como la mejor asimilada, porque reportó la mayor en eficiencia del 71% en términos de DQO.

Palabras claves: Contactores Biológicos Rotatorios, Biodiscos, Lixiviados, Relleno Sanitario.

ABSTRACT

Rotary Biological Contactors (CBR) are fixed-mass aerobic processes for wastewater treatment, consisting of a series of disks that rotate around a horizontal axis, submerged between 40-45% of their area in water to be treated. Inside a container, according to Romero, R, 2008, the organic surface load range at which they are operated is between 12 g BOD / m² day - 40 g BOD / m² day. The unit where the research is carried out is laboratory scale and has 5 stages each containing 12 discs, 9 discs, 8 discs, 8 discs and 8 discs respectively for a total of 45 discs, which rotate at a speed of 6 RPM. In addition the contactor has a settler at the beginning and another at the end of the unit; a system that achieves up to 80% of efficiency in terms of BOD removal.

This research is oriented to the operation of a CBR unit at ambient temperature conditions, to characterize the biofilm generated in the unit and to determine efficiency levels. At the experimental level, the laboratory scale unit is dimensioned, constructed, inoculated, started, operated and fed with a substrate characterized by applying to the CBR up to three different surface organic charges applied at room temperature until stable conditions are reached at each stage. The stages in terms of surface organic load provides the highest efficiency, resulting in Surface Organic Load No 2 (20 g BOD / m² day) as the best assimilated, because it reported the highest efficiency of 71% in terms of COD.

Keywords: Rotary Biological Contactors, Biodiscs, Leachate, Landfill,

INTRODUCCIÓN

La producción de aguas residuales por parte de las industrias, las ciudades, los rellenos sanitarios etc. con el crecimiento de la población y el desarrollo industrial se han convertido en un importante foco de contaminación puntual de las aguas superficiales, sub-superficiales y del suelo del planeta, tanto así que los gobiernos han tomado medidas para la disminución de la contaminación vertida a los efluentes mediante la reglamentación de leyes y decretos, obligando a realizarle tratamiento antes de ser vertidas; es así como surge la necesidad de diseñar, construir y operar plantas para el tratamiento de aguas residuales. Fué solo hasta el año 1930 cuando se habló por primera vez de discos biológicos rotatorios pero fue hasta 1960 cuando en Europa se fabricó la primera unidad comercial. En la actualidad los Contactores Biológicos Rotativos (CBR) llamados comúnmente discos biológicos rotatorios han avanzado mucho tecnológicamente produciendo eficiencias en términos de remoción de DQO de hasta de 80% (Borzacconi, Arcia, Cardelino, Castagna & Viñas, 1996); también remueven alta cantidad de sólidos suspendidos, además son resistentes a las variaciones de pH sin afectar la eficiencia, la operación es de bajo costo y ocupan pequeñas áreas en comparación de otros sistemas aerobios de tratamiento de aguas residuales (Aristizábal, 2010), es por esto que los CBR presentan como una buena alternativa en términos de eficiencia en la remoción de materia orgánica, costo y facilidad de operación.

Los Contactores Biológicos Rotativos son sistemas de tratamiento de las aguas residuales donde los microorganismos responsables de la degradación de la materia orgánica se hallan adheridos a un material soporte, que gira semi - sumergidos en el agua a biodegradar. Al girar lentamente, el medio de soporte (disco) expone su superficie alternativamente al agua y al aire. Sobre el soporte se desarrolla, de forma natural y gradualmente, una película de biomasa bacteriana que emplea como sustrato la materia orgánica soluble presente en el agua residual y que toma el oxígeno necesario para su respiración del aire atmosférico, durante la fase

de emersión. El crecimiento de la película continúa hasta que llega un momento en que el espesor es tal, que se ve muy dificultada la difusión de oxígeno atmosférico y la penetración del alimento hasta las capas bacterianas más profundas (DEPURANAT, S.F.; 2005). Una vez desprendida la porción de película bacteriana comienza en ese lugar mismo lugar del disco el crecimiento de nueva biomasa y así indefinidamente, se regula periódicamente el espesor de la biopelícula de forma natural en el CBR, convirtiendo la materia orgánica y los nutrientes presentes en los lixiviados en biomasa durante el eficiente proceso de biodegradación aerobia, como se demuestra en este trabajo de investigación.

1. PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

La producción de aguas residuales por parte de las industrias, las ciudades, los rellenos sanitarios etc. se ha convertido en un importante foco de contaminación puntual de las aguas superficiales, sub-superficiales y suelos del planeta, produciendo un detrimento del medio ambiente y el país no es ajeno a esta problemática la cual tiene gran relevancia si tenemos en cuenta la riqueza hídrica con la que cuenta, es por esto que se ve la necesidad de buscar alternativas al tratamiento de aguas residuales altamente contaminadas y así disminuir el impacto ambiental producido por ellas como resultados de las actividades humanas.

Conforme los años la utilización de contactores biológicos rotatorios se ha extendido debido a sus buenos resultados a escala laboratorio e industrial, donde Borzacconi, Arcia, Cardelino, Castagna & Viñas en la investigación realizada en el año 1996 logró con CBR eficiencias en remoción de materia orgánica en términos de DQO hasta del 80%, trabajo de donde surge la idea de la aplicabilidad de esta tecnología para el tratamiento del lixiviado producido por el relleno sanitario La Cortada del municipio de Pamplona, planteándose como una alternativa viable para realizar el tratamiento de los vertimientos líquidos.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

Determinación de las eficiencias en la remoción de carga orgánica en el tratamiento biológico de los lixiviados del relleno sanitario La Cortada (Pamplona) mediante Contactores Biológicos Rotatorios – CBR.

2.2. Objetivos específicos

- 1) Caracterizar fisicoquímicamente el residuo líquido orgánico complejo a tratar - Lixiviado.
- 2) Diseñar y construir las unidades de pretratamiento
- 3) Operar a temperatura ambiente el reactor CBR, con tres Cargas Orgánicas Superficiales e incrementales hasta obtener condiciones de estado estable (C.E.E) en cada carga.
- 4) Analizar bacteriológicamente la biopelícula adherida que se forma en los discos del CBR.
- 5) Evaluar la respuesta del contactor biológico rotatorio a la aplicación de tres cargas orgánicas superficiales incrementales en términos de eficiencia en la remoción de materia orgánica (DQO).

3. MARCO DE REFERENCIA

3.1. Antecedentes

3.1.1. Antecedentes internacionales

Ensayos de laboratorio realizados con lixiviados de relleno sanitario de la ciudad de Montevideo por parte de un grupo de investigadores de la facultad de ingeniería de la Universidad de la República (Borzacconi, Arcia, Cardelino, Castagna & Viñas, 1996);, arrojaron resultados de eficiencia en términos de remoción de DQO soluble del 80 %, aplicando una carga óptima de 20 g DQO/m²día, además se presentaron buenas características de sedimentabilidad de los lodos generados y poca afectación de la eficiencia por la variación del pH.

Otro estudio realizado por Juan Antonio Mata en el año 2012, con contactores biológicos rotatorios dentro de la Universidad Autónoma de México, con aguas Residuales producidas en uno de sus edificios, obtuvo una eficiencia de remoción en términos de DBO del 61 % y del 64 % en términos de SST.

3.1.2. Antecedentes nacionales

Estudios más minuciosos han tenido resultados satisfactorios realizados por Juan David Pérez (2010) y Aristizábal (2010) por parte de la Universidad de Medellín en el relleno sanitario La Pradera en el municipio de Don Matías obtuvieron con Biodiscos eficiencias de 68% en remoción de DQO, 95% en DBO₅, 70% en SST, 90% en NTK, 74% de eliminación en Nitrógeno y 38% en Fósforo. Como parámetro importante para la operación de un sistema de CBR es la carga orgánica superficial se encontró que la carga óptima para operar este sistema es de 18 g DQO/m² día, caso semejante encontraron Álvarez y Suárez (2006) quienes sugieren que la carga optima se encuentra en un rango entre 15 g DBO/m²-día a 20 g DBO/m²-día, dando así pautas para la aplicación de la carga orgánica superficial.

3.1.3. Antecedentes regionales

Estudios realizados con contactores biológicos rotatorios utilizando como sustrato el lixiviados del relleno sanitario de la ciudad de Cúcuta de han arrojado buenos resultados, Alexander Álvarez y John Hermógenes Suárez (2006) obtuvieron eficiencias promedios en términos de DBO del 70%.

Dado los buenos resultados obtenidos en investigaciones con contactores biológicos rotatorios – CBR – utilizando como sustrato lixiviados de relleno sanitario motivaron a la realización de esta propuesta de investigación para obtener datos de eficiencia en condiciones de bajas temperaturas del sustrato, específicamente para temperaturas del afluente mayores a 15 °C y menores de 20 °C, caso específico de temperatura del lixiviado del Relleno Sanitario La Cortada del municipio de Pamplona.

3.2. Marco Conceptual

Biodiscos: “Son un sistema de tratamiento biológico del tipo de crecimiento adherido o reactor de película fija” (Romero, 2004, p.609) es decir que los microorganismos crecen en los discos creando una película en condiciones aerobias a medida que los discos giran dentro del agua residual. Los Contactores biológicos rotatorios (RBC) son reactores biológicos de crecimiento adherido con una serie de discos circulares poco espaciados, hechos de medios sólidos de plástico, montados sobre un eje horizontal de rotación sumergen parcialmente en las aguas residuales y se hace girar para exponer alternativamente los microorganismos a las aguas residuales y al aire” (Kapoor, Kuiper, Bedard y Gould, 2003, p.88). Estos microorganismos adheridos en los discos giratorios se conocen como “biofilm” o “biopelícula”. Kapoor et al, (2003), describe básicamente el proceso: Los discos circulares RBC proporcionan un medio de soporte para el crecimiento de microorganismos y giran a una velocidad de 1 a 3 rpm. La rotación de los discos se puede conseguir mediante un sistema de motor que impulse

cada eje o por un sistema de accionamiento de aire. De igual forma la rotación de los discos también sirve para proporcionar el oxígeno requerido para el crecimiento de la biomasa y la degradación del sustrato. (Arenas y Jaramillo, 2015: 47)

Lixiviados: Son líquidos que se generan por la liberación del exceso de agua de los residuos sólidos y por la percolación de agua pluvial a través de los estratos de residuos sólidos que se encuentran en las fases de composición. El lixiviado es considerado como el principal y gran contaminante generado en un relleno(Corena, 2008:18).

Hidrobiología: Es la ciencia que estudia la vida de los seres que pueblan las aguas, de forma individual colectiva, organizados o no. Comprende tanto la fisiología de los individuos, como su metabolismo, ecología, etología a, reproducción, desarrollo y relaciones con otros individuos de manera interespecifica (Torres, 2011:3).

Microorganismo: Se define como aquel organismo que solo puede ser visualizado a través de un microscopio, en su mayoría unicelulares e individuales que presentan una organización biológica elemental aunque en algunos casos se traten de organismos cenóticos compuestos por células multinucleadas o incluso multicelulares. Dentro de este grupo de organismos podemos distinguir los siguientes tipos de microorganismos, Todos ellos en función de su naturaleza pueden causar ciertos efectos sobre los seres humanos siendo algunos de ellos perjudiciales(Torres, 2011:4).

Relleno sanitario: Lugar técnicamente diseñado para la disposición final controlada de los residuos sólidos, sin causar peligro, daño o riesgo a la salud pública, minimizando los impactos ambientales y utilizando principios de ingeniería. Confinación y aislamiento de los residuos sólidos en un área mínima, con compactación de residuos, cobertura diaria de los mismos, control de gases y lixiviados, y cobertura final (Corena, 2008).

3.3. Marco Teórico

3.3.1. Tratamiento biológico de aguas residuales y lixiviados

El tratamiento biológico es la manera sobre como los sistemas vivos microscópicos reducen las sustancias orgánicas a sustancias más estables y poco oxidadas.

Existen varios antecedentes de tratamiento aerobio y anaerobio de lixiviados, que van desde experiencias a escala laboratorio a experiencias a escala real. El tipo de tratamiento aerobio más extendido es lodos activados o lagunas aireadas. Otro sistema aerobio utilizado para el tratamiento de los lixiviados es el reactor de biodiscos o RBC (Contactor Biológico Rotante). En cuanto al tratamiento anaerobio de lixiviado, el sistema de mayor difusión es el reactor UASB, el cual ha reportado muy buenos resultados (Alvarez& Suárez, 2006). Citado por (Duque, 2014: 15)

En este proceso se consigue la eliminación de contaminantes por medio de la actividad biológica, empleando microorganismos que degradan los materiales contaminantes presentes en el agua. El tratamiento biológico se usa esencialmente para eliminar las sustancias orgánicas biodegradables, coloidales o disueltas, presentes en el agua residual. Las acciones enzimáticas de los microorganismos generan la producción de gases que escapan a la atmósfera y una biopelícula que será extraída por sedimentación. Se puede clasificar en cuatro grupos principales: procesos anaerobios, procesos aerobios, procesos anóxicos y procesos combinados (aerobios con anóxicos – aerobios con anaerobios). (Manosalva y Galindo, 2005: 31)

En este tipo de proceso se puede mencionar los lodos activos, lechos bacterianos, lechos de turba, lagunas, filtros percoladores, biodiscos y sistemas de aplicación al suelo.

3.3.1.1. Tratamiento Anaerobio

La estabilización y la descomposición de los desechos y residuos contaminantes del agua residual, se logra por acción de microorganismos anaerobios y facultativos los

cuales pueden desarrollar en ausencia de oxígeno. Cabe anotar que en el proceso anaerobio los productos poseen mayor energía debido a la menor eficiencia del proceso, no obstante existe una menor producción de biomasa comparada con la producción de los procesos aerobios. Una muestra de esto es el metano que posee una gran cantidad de energía la cual es liberada durante la combustión (Manosalva y Galindo, 2005: 32).

3.3.1.2. Tratamiento Aerobio.

Descomposición biológica de la materia orgánica y la estabilización de los demás desechos y residuos contaminantes del agua residual, se alcanza por acción de microorganismos aerobios y facultativos los cuales requieren de la presencia de oxígeno. El producto principal generado en este tratamiento es el gas carbónico. (Manosalva y Galindo, 2005: 32).

3.3.1.3. Tratamiento Anóxico.

Es conocido como proceso de desnitrificación anaerobia, se caracteriza por desarrollarse en un ambiente bioquímico en el cual no existe oxígeno molecular, pero existe oxígeno en forma de nitratos y nitritos, los cuales se utilizan como aceptores de electrones. Durante el proceso se remueve el nitrógeno, mediante su conversión en nitrógeno gaseoso (Manosalva y Galindo, 2005: 32).

3.3.2. Tratamiento con biodiscos o contactores biológicos rotativos

El proceso de Biodiscos o Contactores Biológicos Rotativos (CBR) tiene su origen en los años 50, en España se desarrolló a mediados de los años 80 y en la actualidad presentan un desprestigio motivado por desconocimiento de los criterios de diseño, selección de esquemas de tratamiento incorrecto y desarrollo constructivo incorrecto entre muchos otros motivos (TecDepur,2013).

Este método de tratamiento de aguas residuales consiste en una serie de discos (madera, polietileno corrugado, poli estireno corrugado ó PVC) que suelen tener 3

m de diámetro y 1,5 mm de espesor y que giran en torno a un eje horizontal (aprox. 8 m de longitud, con 7.5 m ocupados por los discos), situados dentro de un recipiente lleno de agua residual. Los discos giran lentamente (1 - 5 rpm), manteniendo un 40-45 % de su superficie sumergida, están separados unos de otros entre 20-25 mm. Sobre el área de soporte se desarrolla gradualmente una película de biomasa bacteriana, que emplea como sustrato para su metabolismo la materia orgánica soluble presente en el agua residual. Cuando la superficie del disco se encuentra en contacto con el aire, la biomasa adherida al disco toma el oxígeno necesario para que durante el período de inmersión se produzca la degradación de la materia orgánica presente en el agua residual. Se estima que el 95 % de la biomasa activa presente en el sistema se halla adherida, y el resto se encuentra en suspensión (TecDepur, 2013).

“Los Biodiscos son un sistema de tratamiento biológico del tipo de crecimiento adherido o reactor de película fija” (Romero, 2004, p.609) es decir que los microorganismos crecen en los discos creando una película en condiciones aerobias a medida que los discos giran dentro del agua residual (Arenas y Jaramillo, 2015:47).

Los Contactores biológicos rotatorios (RBC) son reactores biológicos de crecimiento adherido con una serie de discos circulares poco espaciados, hechos de medios sólidos de plástico, montados sobre un eje horizontal de rotación. “Los discos giratorios en los que crecen los microorganismos, se sumergen parcialmente en las aguas residuales y se hace girar para exponer alternativamente los microorganismos a las aguas residuales y al aire” (Kapoor, Kuiper, Bedard y Gould, 2003, p.88). Estos microorganismos adheridos en los discos giratorios se conocen como “biofilm” o “biopelícula” (Arenas y Jaramillo, 2015: 47).

El sistema RBC, se utiliza como tratamiento secundario o avanzado para aguas residuales domesticas e industriales. Esta tecnología puede ser utilizada para: i) el tratamiento en conjunto de la demanda biológica de oxígeno (DBO5) y del nitrógeno

amoniacal, o ii) para nitrificar por separado el efluente del tratamiento secundario (Arenas y Jaramillo, 2015: 48).

De igual manera también son efectivos para la remoción de compuestos químicos como lo son: solventes, sustancias orgánicas halogenadas, acetonas, alcoholes, fenoles, cianuros y productos de desecho de la industria papelera (Ordóñez, Betancur, (s.f.), p.12).

3.3.2.1. Origen de los biodiscos

Este sistema no es una tecnología nueva. Su concepto y principio de funcionamiento ha sido utilizada desde principios del Siglo XX el cual es descrito en la investigación de Castillo y Vivas (1996). Originalmente fue concebido en Alemania en 1900, el cual se describe como un cilindro constituido por tablas de madera y posteriormente en 1930 se construyeron unidades industriales.

Para el año 1929 en Estados Unidos ya se estaban haciendo trabajos de investigación con este reactor pero con discos metálicos como medio de soporte, sin embargo no fueron muy alentadores los resultados por lo cual se decide suspender dichos estudios. Posteriormente en la década de los 50, algunos investigadores empiezan a trabajar con discos plásticos (poliestireno) para mejorar el reactor y se inicia su comercialización. Sin embargo el Biodiscos no podía competir con el sistema de lodos activados debido a los altos costos para su construcción. Luego en 1965 se utilizó un sistemas de discos para la transferencia de oxígeno dentro de un proceso de aireación. Citado por (Pérez, 2010: 26).

Posteriormente se hicieron estudios con biomasa adherida y sin recirculación y confirmaron buenos resultados. A este proceso lo denominaron “Rotating Biological Contactor (RBC)”. Después se desarrolló un nuevo material para los discos construidos con hojas corrugadas de polietileno. (Castillo y Vivas, 1996). Para 1978 ya se tenía 59 plantas de Biodiscos en Estados Unidos, 308 en 1980 y más de 600 en 1988, y para esa época ya había más de 3000 plantas de Biodiscos en el mundo (Romero Rojas, 2008). Para 1985 Japón ya tenía 1323 plantas con RBC, el cual

10% de ellas ya eran utilizadas para el tratamiento de lixiviados (Castillo et al, 2007). Citado por (Pérez, 2010: 27)

3.3.2.2. Aplicación de los Contactores Biológicos Rotatorios (RBC)

Los RBCs se han aplicado exitosamente para tratar desde 5000 hasta millones de galones por día de aguas residuales domésticas e industriales, usándose también como sistemas de pulimento en plantas existentes para mejorar la eficiencia de remoción y cumplir con la legislación ambiental.

Las aplicaciones industriales incluyen, entre muchas otras, el tratamiento de efluentes de planta de procesamiento de alimentos. Los RBCs son efectivos para la remoción de solventes, sustancias orgánicas halogenadas, acetonas, alcoholes, fenoles, ftalatos, cianuros y productos de desecho de la industria papelera. En general los sistemas biológicos pueden degradar en un tiempo prudencial solo la parte soluble de la contaminación orgánica (MEJIA, 1999). Citado por (Ordoñez y Betancourt, 2003:12)

3.3.2.3. Descripción de la tecnología

La tecnología consta de una serie de procesos integrados por unalaguna anaerobia que actúa como sedimentador y digestor de lamateria orgánica sedimentable, seguida por el contactor biológico que consiste en un disco circular conformado por numerosas láminas que incrementan su área superficial, el cual gira lentamente, y se encuentra parcialmente inmerso en el agua residual. Una película biológica crece en las láminas y, debido a la elevada área superficial, existe una gran capacidad de adsorción y estabilización de la materia orgánica. Los sólidos sedimentan en el decantador, y los lodos o fangos sedimentados son transferidos a la laguna anaerobia. Los contactores biológicos rotatorios (CBR) consisten en una serie de discos circulares, generalmente de tipo plástico, ubicados muy cerca uno de otro, con un diámetro típico de 3.6 metros y dispuestos sobre un eje horizontal que rota lentamente. (Esqueche, 2010:6)

Aproximadamente el 40 % del disco está sumergido en un estanque que contiene el agua a tratar, de tal manera que la película de biomasa que crece sobre la superficie de los discos está alternadamente dentro y fuera del agua mientras el CBR rota. Cuando los microorganismos están sumergidos en el interior del efluente, absorben la materia orgánica y cuando están en la superficie consumen el oxígeno que requieren. Si bien estos equipos dispuestos en serie entregan mejores rendimientos, no son muy utilizados ya que presentan problemas de tipo mecánico.

Son recomendados cuando la carga volumétrica es variable ya que es más sencillo, en comparación con los biofiltros, mantener la película húmeda. Las ventajas de este reactor son: capacidad para resistir a los «shock» de cargas, tiempos de retención hidráulica cortos, bajos requerimientos de potencia, y construcción y operación simples.

Los CBR proveen un método excepcionalmente suave de inmovilización natural para los hongos filamentosos, ya que estos últimos pueden exhibir una fuerte afinidad por las superficies de cualquier material (orgánico o inorgánico). (Esqueche, 2010:7)

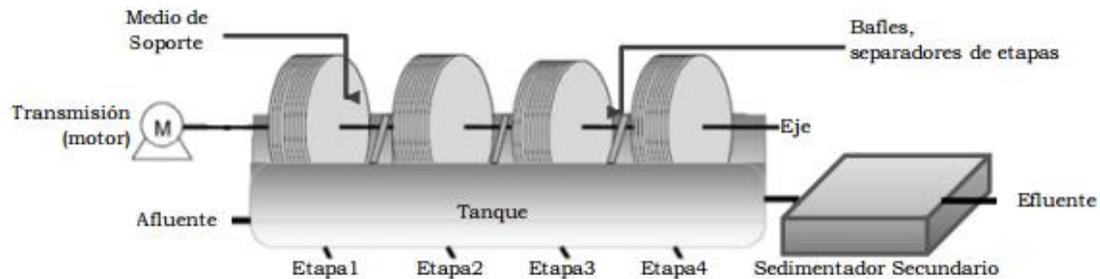
La adherencia y la colonización superficial son características importantes de la adaptación natural de estos microorganismos. También existen varios métodos disponibles para la inmovilización artificial de células, siendo la adsorción y el atrapamiento los más extensamente usados para hongos filamentosos.

Las esporas inactivas o pregerminadas han probado ser un adecuado inóculo para los CBR, ya que éstas se unen fácilmente a las superficies de los discos e inician el crecimiento de la película (Esqueche, 2010:7).

3.3.2.4. Componentes de un sistema de biodiscos

Los principales componentes son los discos, el eje, la transmisión, el tanque, cerramientos y tanque de sedimentación.

Figura 1. Esquema de un reactor de biodiscos



Fuente: Pérez Juan D. (2010) y Castillo et al, 2007.

3.3.2.4.1. Ejes

Son los encargados de dar el soporte a los discos y por ende a su rotación la cual es elemental para la operación del reactor. El material de estos ejes debe ser fuerte para sostener el peso de los discos sumado al peso de la biomasa adherida al material de soporte. De igual manera, se debe tener en cuenta que el eje estará en contacto con el agua residual y por lo tanto debe ser resistente a la corrosión del líquido. En la bibliografía se sugiere no utilizar el acero inoxidable puesto que alcanza a ser corroído por las condiciones agresivas del medio (Mba et al, 1999), sin embargo se puede minimizar o prevenir la corrosión si se refuerza con pintura anticorrosiva o se recubre con algún material resistente como el plástico u otro polímero.

3.3.2.4.2. Medio de Soporte (Discos)

El disco es la superficie donde la población microbiológica se adhiere y se desarrolla para el funcionamiento del sistema de tratamiento. Al igual que los ejes, el material del disco debe ser resistente a la corrosión por los constituyentes del agua residual pero también se puede generar corrosión por los microorganismos adheridos a la superficie, los cuales pueden llevar a cabo un rápido deterioro de los discos (Mba et

al, 1999). El material del medio de soporte debe estar diseñado para: Proveer máxima área superficial para el crecimiento de la biomasa y mayor contacto con el agua residual. Permitir el máximo drenaje del líquido sobre el área del disco durante la rotación (Mba, 2003). Un material de polímero con superficie corrugada cumple con todas los requerimientos anteriormente citados.

3.3.2.4.3. Mecanismo de Transmisión

Generalmente el mecanismo utilizado para el giro de los discos es mediante la transmisión mecánica, el cual se utiliza un motor y un sistema de poleas o piñones para ajustar al giro deseado al eje y por ende a los discos (Ilustración 4 izquierda). También es utilizado el empleo de aire para el giro del disco, esto se hace mediante la instalación de cangilones dispuestos en los extremos del material de soporte y un sistema de inyección aire en el fondo del tanque. El giro del disco se presenta cuando se inyecta aire al tanque y las burbujas son atrapadas por los cangilones, las cuales crean una fuerza tal que provocan el giro del disco.

3.3.2.4.4. Tanque

El tanque es el compartimiento donde está contenida el agua y donde se sumergen parcialmente los discos. Su volumen depende de la carga orgánica superficial y la carga hidráulica a aplicar. Metcalf & Eddy (1996) establece que el volumen óptimo es $0.0049 \text{ m}^3/\text{m}^2$ de medio.

3.3.2.4.5. Cerramientos

Normalmente los reactores de Biodiscos son protegidos por una cubierta de plástico reforzado con fibra de vidrio, de igual manera también se ha elegido ubicar los Biodiscos dentro de edificios. Puede haber varios propósitos para el cerramiento de los reactores, los más comunes son: razones estéticas, protección contra el frío en zonas que alcanzan temperaturas bajas, evitar la proliferación de algas, proteger a la biomasa y al material de soporte de la intemperie.

3.3.2.4.6. Tanques de sedimentación

Aunque el tanque de sedimentación está separado físicamente del reactor de Biodiscos, se tiene que considerar como parte íntegra del tratamiento secundario pues los procesos biológicos generan biomasa que debe ser retenida y por lo tanto el sedimentador secundario ejecuta esa actividad. Éste sería el último componente del tratamiento biológico y el efluente del sedimentador puede ser descargado a un cuerpo hídrico o llevado a un tratamiento terciario dependiendo de la complejidad del sistema. (Pérez, 2010: 27)

3.3.2.4.7. La biopelícula

Existe una amplia variedad de tecnologías basadas en procesos de biopelícula, cada una con sus características específicas. En general (WEF, 2010) se pueden incluir, entre sus ventajas frente a los procesos de fangos activos convencionales, unos costes de operación y energéticos reducidos, volúmenes menores de los reactores, necesidades mínimas de capacidad de decantación y simplicidad de operación. Entre los inconvenientes figura la posibilidad de atascamiento del sistema, bien debido a un pretratamiento insuficiente o a un exceso de crecimiento de la biopelícula, más dificultad para conseguir una mezcla homogénea del seno del líquido y mayor complejidad para la modelización, y por tanto el control, del proceso (Tejero et al, 2012:62).

El proceso denominado RBC (Rotating Biological Contactors) o "Biodisco" aplicable a líquidos residuales urbanos o industriales, es uno de los sistemas de tratamiento biológico aeróbico de cultivo fijo, donde los microorganismos se adhieren a la superficie de disco rotarios de material plástico, inerte, que actúan como soporte, formando una biopelícula, componente fundamental en dicho proceso (Welter et al, 2000: 2).

Eighmy, T.T; Maratea D. y Bishop P. L., (1983) describen la biopelícula como un ensamblado de bacterias que está adosada por un pegamento a una superficie húmeda por medio de una matriz extracelular de polisacáridos fibrosos. Esta matriz,

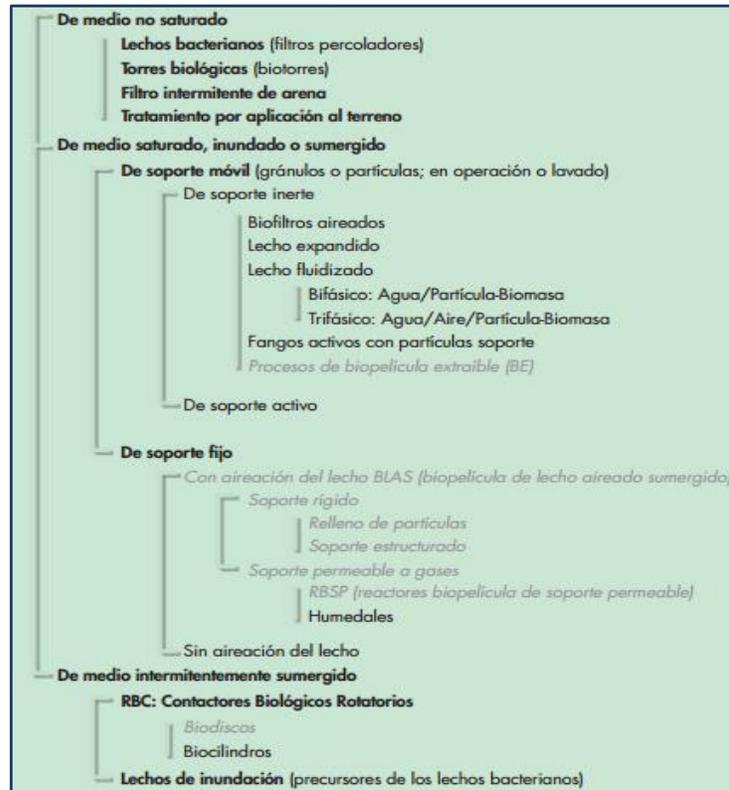
llamada cápsula o glicocálix, es sintetizada por las bacterias y su función principal es sujetar las células adsorbidas al soporte. Citado por (Welter et al, 2000: 4)

WaleedZahid (1993) describe el biofilm como un entramado complejo de microorganismos dotados de sustancias poliméricas extracelulares. La distribución espacial de estos componentes principales dentro de la matriz del biofilm, así como sus propiedades (físicas, químicas y biológicas) influyen la actividad en el mismo y su relación con el ambiente acuoso inmediato. Además el biofilm es muy dinámico; su composición y características cambian en el tiempo. (Welter et al, 2000: 5)

3.3.2.5. Tipos de reactores de biopelícula

Existen varios criterios de clasificación de los reactores de biopelícula, por ejemplo, según el tipo de soporte (soporte fijo, giratorio o móvil) o su combinación con fangos activos (reactores híbridos) o no (reactores de biopelícula puros). Atendiendo al grado de saturación del medio, y considerando sólo los reactores aerobios, se obtiene la tipología incluida en la Tabla 1. Entre las soluciones innovadoras basadas en procesos de biopelícula destacan los biofiltros y los reactores de lecho móvil, así como los reactores híbridos.

Tabla 1. Tipos de biorreactores de biopelícula



Fuente. Tejero et al; 2012.

3.3.2.6. La formación de la biopelícula

Existen varias teorías citadas por Barros de Macedo, J. A. para la formación de biopelícula. La primera fue descrita por Marshal, Stout, et al. (1971), y resalta que la adhesión es un proceso que ocurre en dos fases: La primera fase es reversible, en función del proceso de adhesión de los microorganismos a la superficie que ocurre por fuerzas Van der Waals y atracciones electrostáticas. Citados por: (welter et al, 2000: 4)

La segunda fase, ocurre con la interacción física de las células a la superficie por medio de material extracelular de naturaleza polisacárida o proteica producida por las bacterias, esta se denomina matriz de glicocálix, y soporta la formación de la biopelícula. El glicocalix, es producido después del proceso de adhesión superficial,

y va a favorecer las condiciones de adhesión de los peptidoglicanos de las bacterias Gram positiva (Welter et al, 2000: 4).

Otra teoría citada por el mismo autor, descrito por Duddridge – Pritchard, (1983) sugiere para la formación de biopelículas, en cinco (5) etapas que esquemáticamente pueden ser colocadas en el siguiente orden:

- Acondicionamiento de la superficie por adsorción de materia orgánica.
- Transporte de células y nutrientes al sitio de adherencia.
- Inicio del proceso de adhesión bacteriana, todavía reversible, por atracción electrostática.
- Crecimiento celular, colonización y adhesión irreversible.
- La biopelícula presenta alta actividad metabólica y liberación de células localizadas en la periferia (Welter et al, 2000: 5)

3.3.2.7. Ventajas y desventajas

3.3.2.7.1. Ventajas

El biodisco presenta numerosas ventajas en comparación con otros sistemas de tratamiento biológico.

En el sistema de tratamiento con biodiscos no existen problemas de ruido. Además puede eliminarse la sedimentación del agua antes de entrar al biodisco, lo cual no afecta la capacidad de remoción de la demanda bioquímica de oxígeno. Con el proceso de biodiscos se eliminan moscas y malos olores.

Los biodiscos se recuperan más rápido de la entrada de tóxicos al proceso que cualquier otro proceso biológico (lodos, filtros, RAFA, etc.).

No se necesita equipo de retro lavado, porque la rotación de los discos sumergidos en el agua residual, elimina el exceso de biomasa que se adhiere a los discos. Las ampliaciones del sistema pueden hacerse fácilmente, porque nuevos módulos de biodisco pueden añadirse con facilidad.

Así pueden solucionarse problemas de sobrecarga del sistema, aunque no se hayan planificado las expansiones de la compañía. No presenta el problema de formación de espumas durante el tratamiento de desechos que contienen surfactantes.

El requerimiento de área de tratamiento es menor, lo que constituye la ventaja principal del biodisco con respecto a los demás sistemas de tratamiento biológico, en los que en muchos casos se requiere grandes extensiones para el tratamiento (Deloya, 2013: 58).

3.3.2.7.2. Desventajas del Biodisco

El proceso es relativamente nuevo y no hay parámetros de diseño definidos.

Por presentar tres fases: gaseosa, líquida y sólidos es difícil definirlo con un modelo matemático simple.

El proceso C.B.R. requiere un tiempo muy largo para alcanzar la estabilidad. El costo del sistema es bastante elevado por tener que importarse de otros países como E.U.A. y México (Deloya, 2013: 59).

3.3.4. Lixiviados

Los lixiviados son todos aquellos líquidos que han entrado en contacto con los desechos de los rellenos sanitarios, y se producen por la disolución de uno o más compuestos de los residuos sólidos urbanos en contacto con el agua, o por la propia dinámica de descomposición de los residuos. (Álvarez y Suarez, 2006: 96)

El lixiviado generado en un relleno sanitario es producto de múltiples factores, tales como: composición de la basura, edad del relleno, balance de agua, diseño y

operación del relleno sanitario, solubilidad de los desechos, procesos de conversión microbológica y química y la interacción del lixiviado con el medio ambiente. El caudal generado varía de acuerdo con el estado de avance y el tipo de operación del relleno, y la composición también varía en el tiempo(Álvarez y Suarez, 2006: 96).

La generación de lixiviados es un problema global que afecta principalmente a los países en vías de desarrollo, los cuales debido a su baja economía no tratan de manera adecuada sus residuos depositándolos en vertederos o botaderos a cielo abierto agudizando la contaminación del sector (Duque, 2014:2).

Los lixiviados en los países en vías de desarrollo generalmente se caracterizan por altos contenidos de materia orgánica fácilmente biodegradable, MOFBD. La MOFBD tiene un contenido de humedad alto, y como su nombre lo indica se degrada rápidamente en el relleno sanitario, produciendo a su vez altas concentraciones de ácidos grasos volátiles y de amoníaco- en general mucho más altas que las que se reportan típicamente para lixiviados de países desarrollados- producto de la fermentación inicial. A su vez, estos ácidos se diluyen fácilmente en el lixiviado del relleno sanitario, le bajan el pH y contribuyen a la solubilización de los metales presentes en los residuos dispuestos en el relleno. (Giraldo, s/f). Citado por (Duque, 2014:9).

3.3.4.1. Composición de Lixiviados

Los lixiviados en el relleno arrastran a su paso material disuelto, en suspensión, fijo o volátil, lo que provoca que tengan elevadas cargas orgánicas y un color que varía desde café-pardo-grisáceo cuando están frescos hasta un color negro viscoso cuando envejecen. Se reportan concentraciones tan elevadas como 60,000 mg/l de DQO. Los lixiviados también poseen elevadas concentraciones de sales inorgánicas (cloruro de sodio y carbonatos) y de metales pesados. Varios estudios indican que el carbono orgánico en forma coloidal tiene el potencial de adsorber altas

concentraciones de metales en su superficie, por lo que actúan como transporte de metales traza en los lixiviados. (Mendez R, 2002). Citado por (Corena, 2008:19)

De acuerdo con O'Leary (1991) citado en Díaz y Gorraiz (1997), la composición del lixiviado dependen de las características del residuo y de las condiciones reinantes en él tales como la temperatura, contenido de humedad, edad del relleno, capacidad de las capas de remover contaminantes y la calidad del agua que entra al sitio. A continuación se describirán cómo la edad del relleno y el tipo de residuo intervienen en la composición del lixiviado.

Las características físico-químicas y biológicas de los lixiviados producidos cambian con el tiempo en función de la fase de descomposición de los desechos depositados y de variables como clima, temperatura, contenido de humedad, edad del relleno, régimen de precipitación pluvial y tipo de cobertura (Morales, 2007). Los residuos, al estar constituidos en gran parte por compuestos orgánicos biodegradables, comenzarán a descomponerse por medio de procesos aerobios. La infiltración de agua y las sucesivas compactaciones contribuyen a desplazar el aire atrapado, por lo que al cabo de un tiempo la degradación se realiza en forma anaerobia. El tiempo necesario para cada proceso varía dependiendo de la altura y explotación del relleno sanitario. (Zaragoza, 2014: 16)

3.3.5. Edad del Relleno

Como se comentó anteriormente, luego de disponerse los residuos ocurren diferentes tipos de reacciones aerobias y anaerobias por las cuales se degradan los componentes orgánicos afectando los componentes de los lixiviados. Este tipo de reacciones y de degradaciones están condicionadas a la actividad del relleno, la cual puede explicarse mediante 5 fases (Díaz y Gorraiz, 1997), las cuales son:

- **FASE I (Inicial):** Esta fase se caracteriza por la presencia de oxígeno y por lo tanto se dan degradaciones de tipo aerobio.

- **FASE II (Transición):** Comienza a descender el oxígeno debido a su consumo en la fase inicial y empiezan a desarrollarse condiciones anaerobias, las cuales predominarán en las fases posteriores. Esta situación es la causa del cambio de la biocenosis de aerobia a anaerobia facultativa y más tarde a microorganismos anaerobios obligados (Agudelo, 1996).
- **FASE III (Acidogénesis o fermentación ácida):** En esta fase se generan Ácidos Grasos Volátiles (AGV) como propiónico, butírico, entre otros, los cuales son producto de la degradación anaerobia. En esta etapa se generan lixiviados con alta concentración de DBO y DQO puesto que los AGV son los constituyentes principales del lixiviado (Gálvez et al, 2009). Se estima que alrededor del 90 a 95% de la DBO5 se debe a los AGV por ser altamente biodegradables (Agudelo, 1996; Renou et al, 2008). Posteriormente se tiene conversión de estos productos a compuestos intermedios de bajo peso molecular, como son el ácido acético (acetogénesis), ácido fólvico y otros ácidos más complejos. El principal gas generado en esta etapa es el Dióxido de Carbono (CO₂), y también pueden producirse pequeñas cantidades de hidrógeno (H₂). Esta fase puede durar entre 3 y 7 años dependiendo de los factores ambientales que predominen en la disposición. (Ministerio del Medio Ambiente, 2002a).
- **FASE IV (Metanogénesis o fermentación metánica):** Esta fase se caracteriza por la degradación del ácido acético generado en la etapa anterior formándose metano (CH₄) y (CO₂). Este factor influye notablemente en las características del lixiviado pues la concentración de compuestos orgánicos disminuye al degradarse los AGV que estaban en el líquido y por lo tanto aumenta el pH, baja la concentración de DBO y DQO y se obtiene una relación de DBO/DQO menores a 0.1.
- **FASE V (Maduración y Estabilización):** Posteriormente, los nutrientes empiezan a ser un factor limitante y empieza a escasear los componentes orgánicos ya que gran parte de ellos han sido degradados en las fases

previas. Esta situación hace disminuir la producción de gases CH₄ y CO₂, y el lixiviado contendrá ácidos húmicos y fúlvicos que son difíciles de degradar biológicamente. Posteriormente las condiciones pueden tornarse de nuevo aerobias y es allí cuando el relleno es estabilizado (Ministerio del Medio Ambiente, 2002a). citado por (Pérez, 2010:13)

3.3.6. Tipo de residuo

En el anterior numeral se explicó cómo puede variar los componentes del lixiviado de acuerdo con la degradación y a la edad de relleno, no obstante, no son los únicos constituyentes. Hay una serie de componentes que también integran el lixiviado los cuales dependen del tipo de residuo que esté dispuesto en el relleno sanitario. Cuando hay precipitación en el sitio, el agua percola a través de los intersticios y capas de residuos sólidos arrastrando con diferentes componentes químicos y metales que posteriormente hace parte del lixiviado (Agudelo, 1996). Debido a esto, cuando se hace disposición final de residuos con contenidos de metales pesados y otros residuos con componentes peligrosos, éstos posteriormente harán parte del lixiviado, impactando las fuentes hídricas que pueden recibir el vertimiento. De aquí nace la necesidad de hacer gestión previa con los residuos, con el objetivo de evitar el ingreso de éstos que contengan componentes tóxicos que pueden llegar a los lixiviados. Al haber una buena gestión en la separación de los residuos en la fuente se controla el ingreso de estos residuos y se evita que estos componentes estén dentro del lixiviado, haciéndolo mucho más tratable. (Pérez, 2010:15).

La concentración de metales pesados (Cr, Cd, Cu, Pb, Ni, Fe, Zn) pueden variar con la edad del relleno. Generalmente los lixiviados poseen bajos contenidos de metales en la fase de inicial y relativamente altos en la etapa ácida. Posteriormente cuando en la fase metanogénica aumenta el pH, parte de los constituyentes inorgánicos y metales quedan inmovilizados y por tanto quedan atrapados por el material de cobertura y residuos. De igual manera pueden atraparse metales mediante la formación de complejos entre éstos y el sulfuro producido por bacterias reductoras

de azufre. A menudo, no hay suficiente sulfuro para reducir todo el contenido de metales presentes y por lo tanto parte de los metales tienden a formar especies de carbonatos insolubles (Díaz y Gorraiz, 1997). Citado por (Pérez, 2010:15).

3.3.7. Generación de Lixiviados

Al depositarse los residuos en los rellenos, éstos comienzan a descomponerse mediante una serie de procesos químicos complejos. Los productos principales de la descomposición son los líquidos lixiviados. Los líquidos pueden afectar la salud de las poblaciones de los alrededores. Los líquidos lixiviados se forman mediante el percolado de líquidos (como por ejemplo, agua de lluvia) a través de sustancias en proceso de descomposición. El líquido, al fluir, disuelve algunas sustancias y arrastra partículas con otros compuestos químicos. Los ácidos orgánicos formados en ciertas etapas de la descomposición contenidos en el lixiviado (como ácido 21 acético, láctico o fórmico) disuelven los metales contenidos en los residuos, transportándolos con el lixiviado⁵. Para determinar la generación de lixiviados, debe tomarse en cuenta los factores climatológicos, así como las características de los residuos, las características del material de cobertura, las características del cerramiento final y el mantenimiento a largo plazo del relleno. Debe hacerse un análisis de escenarios de trabajo para las diferentes características mencionadas, incluyendo operaciones adecuadas e inadecuadas del sistema. De manera específica debe tenerse en cuenta las infiltraciones de aguas lluvias, de escorrentía y de nivel freático al relleno. El modelo a utilizar para la generación de lixiviados debe igualmente considerar la generación de éstos por efectos de la descomposición de la fracción orgánica de los residuos en el relleno. Deben igualmente verificarse las capacidades de drenaje del sistema para garantizar que el lixiviado producido se pueda evacuar(Corena, 2008:22).

3.3.8. Características de los lixiviados.

Las características de los lixiviados generados en rellenos sanitarios, dependerán de las características de los residuos depositados y de las condiciones reinantes en él, como temperatura, contenido de humedad, edad del relleno, capacidad del suelo para remover contaminantes y la calidad y cantidad del agua que entra en contacto con la masa de residuos dispuestos (O'Leary y Tausel 1985). Las características fisicoquímicas de los lixiviados son inherentes tanto a la calidad de los residuos sólidos como a su grado de estabilización (Guía ambiental 2002, Rellenos Sanitarios). Ministerio del Medio Ambiente), (Corena, 2008: 23).

3.3.9. Caracterización microbiológica

La población de microorganismos depende de la carga de contaminantes, de la clase y categoría de los mismos. En los biodiscos esta población también depende de la etapa que se esté considerando, ya que ésta es la que establece una selección biológica por niveles. Las especies bacterianas que se encuentran fijas cambian a medida que se desarrollan las distintas etapas de la depuración. Las bacterias que utilizan los compuestos de carbono, se fijan predominantemente a los elementos que se encuentran en las etapas iniciales donde la concentración de estos materiales es relativamente alta (Ordoñez y Betancourt, 2003:10).

Las bacterias nitrificantes (nitrosomas y nitrobacter), se encuentran fundamentalmente fijadas a los elementos situados en las últimas etapas de la depuración, donde la concentración de materia carbonácea es mucho menor. De los microorganismos más sobresalientes en un sistema de biodiscos se pueden mencionar:

Bacterias y hongos: Según el reporte de Antoine y Welch (1969), se mencionan 16 tipos de organismos como: *Greotrichumcandidum*, *Bacilluscereus*, *Zoogloea filipéndula*, *Pseudomonasdenitrificans*, *Aerobacteraerogenes* y *Eschirichiacoli*. Para Chittenden y Wells (1971), son: *Sphaerotilus*, *Beggiatoa* y *Zoogloea*, además de las especies anteriormente mencionadas, Torpey observó *Zoogloeamigera* y *oscillatiria* en la primera etapa (Ordoñez y Betancourt, 2003:11).

En aguas industriales que son tratadas usando un RBC, Kitchens (1980), aisló *Pseudomonas fluorescens* y *Geotrichum*. Otros estudios realizados por Chester y Eskelund (1980), reportaron que la biopelícula estaba compuesta por el hongo *Fusarium* y *Geotrichum*, algunas *Pseudomonas* y dos especies de *Bacillus*, Bracewell (1980), reporta que la *Beggiatoa* predomina en los RBCs que son sobrecargados con fenoles y formaldehídos(Ordoñez y Betancourt, 2003:11).

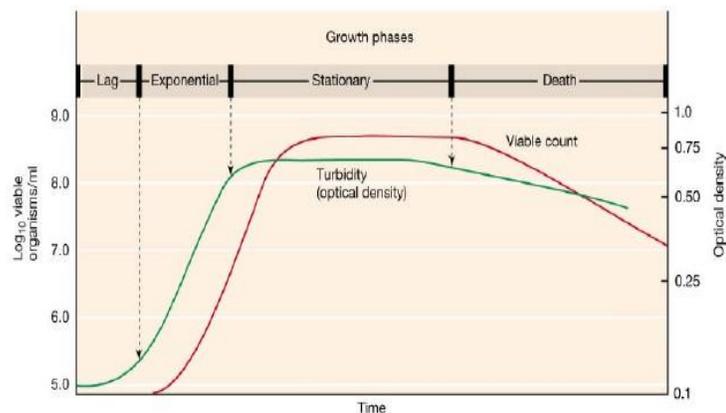
3.3.10. Crecimiento Bacteriano

El crecimiento bacteriano es un concepto macroscópico, el incremento en el número de bacterias dentro de la colonia se hace mucho más evidente que el crecimiento de las mismas, aunque estos dos conceptos son claramente diferentes, la velocidad a la que se producen hace imposible su separación.

El incremento depende fundamentalmente de la especie bacteriana, pero también del pH, composición del medio, temperatura de incubación, edad del cultivo, factores inhibidores, entre otros(Manosalba y Galindo, 2005: 42).

El crecimiento de las bacterias sobre un medio del cultivo líquido es claramente exponencial, y la determinación de este crecimiento cuantitativo se puede representar mediante la curva que se observa en la Figura 2.

Figura 2. Fases de la curva de desarrollo bacteriano



Fuente: Manosalba y Galindo, 2005.

3.3.10.1. Fase de latencia.

Es el tiempo necesario para la adaptación de las bacterias al nuevo medio. Durante este período, los microorganismos en estado latente aumentan su actividad metabólica, se embeben en agua, se omite la tasa de ARN, principalmente ribosómico esencial para la síntesis de nuevas proteínas bacterianas, y se produce posiblemente enzimas inducibles para utilizar las nuevas sustancias que se les ofrece. En definitiva, hay aumento de volumen pero no división, dado que no es la aplicación del ADN cuyos niveles permanecen con constante durante toda la fase.

Si las bacterias sembradas procediesen de un cultivo similar, con los mismos sustratos y fase logarítmica, prácticamente no habría solución de continuidad y la fase de latencia se acortaría extraordinariamente. Por el contrario, sufriría una

serie de retrasos indefinidos en el caso de existir oxígeno en un cultivo de anaerobiosis, así como en la aireación forzada que impidiera la acumulación de gas carbónico o la adición de sustancias ante bacterianas, como sulfamidas, antibióticos, colorantes, entre otros. (Manosalba y Galindo, 2005: 43)

Cuando se usa como inoculó células en estado metabólico latente, son factores importancia crítica para iniciar el crecimiento del pH, la temperatura, la presencia de concentraciones adecuadas de oxígeno, y concentraciones favorables del gas carbónico. Deben existir también ciertas sustancias nutritivas, en especial aquellos que las células producen lentamente o con dificultad por sí mismas.

Si el nuevo medio contiene nutrientes que no son asimilables por la mayoría de las bacterias del inoculó, pero posiblemente sean utilizables por una o dos células mutantes, las células no mutadas morirán y aparecerá un crecimiento perceptible después de un retraso inusualmente largo (Manosalba y Galindo, 2005: 42).

3.3.10.2. Fase de desarrollo exponencial o logarítmico.

Una vez iniciado el desarrollo, se manifiesta pronto por la ascendente inflexión de la curva, llamada fase de crecimiento acelerado. Durante este período precoz, cuando la división es lenta, el tamaño en las células es grande; casi máximo alcanzable por las respectivas especies. Este hecho es debido, probablemente, a la imbibición de agua con la hinchazón consiguiente y el comienzo de la actividad metabólica.

Durante la fase de crecimiento acelerado, el tiempo requerido para que cada célula se divida va disminuyendo gradualmente y la velocidad de división alcanza máximo, determinado por la especie del microorganismo y las condiciones de crecimiento

Cuando las bacterias se multiplican a velocidad constante y exponencial, se alcanza la auténtica fase de desarrollo esta fase de desarrollo logarítmico está mediatizada por una serie de factores limitantes intrínsecos, como la velocidad de difusión osmótica, y factores físicos extrínsecos diversos como la concentración de sustrato, presencia de oxígeno, entre otros. La temperatura es asimismo un factor importante, ya que para las bacterias patógenas el óptimo de crecimiento se consigue a los 37°C y para las levaduras y otros hongos a 25°C.

Durante esta fase se alcanza el valor más alto en el número de generaciones por hora. Además, el recuento de células viables es prácticamente idéntico al de células totales, al tratarse de una población joven, en que el número de bacterias muertas es mínimo. Por otro lado, la actividad metabólica es máxima, el tamaño medio bacteriano se reduce, las estructuras presentan, además, un espesor mínimo, la sensibilidad a los agentes físicos, químicos y antimicrobianos y fagos es óptima en esta fase, y las características bioquímicas y fisiológicas son más evidentes. . (Manosalba y Galindo, 2005: 43)

Debido a estos atributos fisiológicos, adquiridos por las bacterias en esta fase, si se realiza un subcultivo en caldo, a temperatura adecuada, el crecimiento continúa a ritmo exponencial sin apenas fase de latencia. Si el crecimiento exponencial siguiese ininterrumpidamente, en poco tiempo se llegaría a constituir una masa sólida de bacterias, lo que no sucede al aparecer numerosos factores que interfieren en dicha multiplicación. Al cabo de pocas horas o días del inicio de la fase logarítmica, los

microorganismos encuentran dificultades para continuar la multiplicación. Los nutrientes se agotan, las materias residuales tóxicas se acumulan, el pH se modifica, los receptores de hidrógeno desaparecen, las transferencias de energía disminuyendo las células para que no se obstaculicen mutuamente. La tasa de división celular comienza a declinar y hay microorganismos que mueren en número creciente, de tal modo que el progreso numérico de las células vivas se retarda considerablemente. Este proceso se designa como fase de aceleración negativa del crecimiento.

Se ha estudiado el desarrollo de esta fase mediante adiciones de un medio fresco, sin eliminar los residuos o las células muertas. La población bacteriana aumenta con cada adición de nutrientes, pero la forma global de la curva de crecimiento se desarrolla como siempre, y cesa pronto el crecimiento exponencial (Manosalba y Galindo, 2005: 43).

3.3.10.3. Fase estacionaria.

Hay un crecimiento desequilibrado debido a que los componentes bacterianos (ADN, ARN, proteínas), se sintetizan a tasas diferentes. Se produce una estabilización, de modo que el número de células que se reproducen equivalentes a las que mueren. Puede ser debido a la disminución de factores esenciales para la respiración o la falta de elementos nutritivos del sustrato. La acumulación de productos finales del metabolismo, ácidos orgánicos o alcoholes obtenidos a partir de la degradación de los carbohidratos, y enzimas autocatalíticas del tipo de las proteasas y de las nucleasas son factores dignos de tenerse en cuenta al actuar como inhibidores. A veces, la causa limitante es la concentración de glucosa, por ello, su adición a un medio tamponado para neutralizar las pequeñas cantidades de ácido producido puede estimular un nuevo ciclo de desarrollo.

3.3.10.4. Fase de declinación o muerte.

Al volverse las condiciones de las medio más adversas cada vez, las bacterias se reproducen más lentamente y predominan las células muertas. Aparece una fase de declinación exponencial similar pero en sentido contrario, a lo que sucede en la fase logarítmica.

En la mayor parte de las bacterias, el proceso se desarrolla en 72 horas, de forma que al final de estas el número de células viables es pequeño, si bien la esterilidad total del cultivo puede no lograrse hasta traducidas varias semanas o meses y depende, entre otros factores, del tipo de microorganismo, pH, presencia o ausencia de determinados iones, entre otros.

Para reconocer la muerte bacteriana, en la que se pierde toda capacidad metabólica y de división, es necesario proceder a una de resiembra sobre medios sólidos y comprobar la ausencia de colonias tras la incubación pertinente. Este efecto se aplica constantemente en la práctica para reconocer cuando un antimicrobiano es bacteriostático (que inhibe simplemente el desarrollo de las bacterias) o bactericida (si produce la lisis bacteriana), según la aparición o no de crecimiento cuando se siembra en un medio del cultivo nuevo y adecuado. Igualmente sirve para comprobar la inocuidad de las vacunas elaboradas con bacterias muertas(Manosalba y Galindo, 2005: 44).

3.4. Marco Legal y Normativo

- Resolución 0631 de 2015: por la cual se establecen los parámetros y los valores máximos permisibles en los vertimientos puntuales a los cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones.
- Decreto 1713 de 2002: Por el cual se reglamenta la Ley 142 de 1994, la Ley 632 de 2000 y la Ley 689 de 2001, en relación con la prestación del servicio público de aseo, y el Decreto Ley 2811 de 1974 y la Ley 99 de 1993 en relación con la Gestión Integral de Residuos Sólidos (modificado por el decreto 838 de 2005).
- Decreto 1594 de 1984: Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 09 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI - Parte III - Libro II y el Título III de la Parte III Libro I del Decreto 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos, derogado por decreto 3930 de 2010.
- Decreto 3930 de 2010: Establece los valores límites máximos permisibles que deberán cumplir los vertimientos puntuales a las aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público.
- Decreto 4728 de 2010: por la cual se modifica parcialmente el decreto 3930 de 2010.
- Ley 99 de 1993: Crea el Ministerio del Medio Ambiente, reordena el sector público encargado de la gestión y la conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables y se organiza el sistema nacional ambiental SINA, globalmente abarca el tema del manejo de los residuos sólidos regulando las condiciones generales para el saneamiento del medio ambiente con el fin de mitigar e impedir el impacto de actividades contaminantes al entorno natural, abogando por el establecimiento de límites máximos con base en estudios técnicos de emisión, descarga, transporte o depósito, fabricación, distribución uso depósito o vertimiento de sustancias que causen degradación al medio ambiente
- Resolución 1096 de 2000: Por la cual se adopta el reglamento técnico para el sector agua potable y saneamiento básico RAS.

4. METODOLOGÍA

De acuerdo con Hernández, Fernández y Baptista (2003:58), existen dos tipos de diseños: La investigación experimental y la investigación no experimental, cada uno de éstos se divide en diferentes categorías, según Campbell y Stanley (1966). La investigación experimental se divide en pre-experimentos, experimentos "puros" (verdaderos) y cuasi-experimentos, mientras que la investigación no experimental se divide en diseños transeccionales o transversales y diseños longitudinales. Ninguno es más importante que otro, cada uno tiene sus características y su valor propio, y son necesarios según lo que se haya planteado para la investigación, es decir, según los objetivos, la hipótesis y el tipo de estudio. Estatrabajo de Investigación utiliza un diseño de investigación experimental que se desarrolló en seis (6) etapas

4.1. Caracterización fisicoquímica del residuo líquido orgánico complejo a tratar (Lixiviados).

La muestra de lixiviado se toma de manera puntual en el tanque recolector bajoy de almacenamiento de lixiviados del relleno sanitario La Cortada, se transporta hasta el laboratorio de Control de Calidad de la Universidad de Pamplona en un recipiente plástico con tapa y sobretapa, se procedeen el laboratorio de control y calidad, a realizar los siguientes análisis:pH, DBO₅,DQO, DBO₅/DQO, sólidos totales, sólidos suspendidos, sólidos suspendidos volátiles, turbiedad, dureza , alcalinidad, nitrógeno amoniacal , nitritos, acidez, fosfatos y conductividad, según métodos estandarizados (Stándarmethodsforexamination of wáter and wastewater; 1999).

4.2. Diseño y construcción de Unidades de Pretratamiento: Trampa de grasas y desarenador.

Se realizó el diseño de una trampa de grasas y de un desarenador según los parámetros del RAS 2000 para un caudal de 60ml/min, las unidades se construyeron en vidrio de 4mm trasparente.

4.3. Arranque del CBR

La fase de arranque se realizó en dos tiempos, la fase de inoculación y la fase de crecimiento

4.3.1. Fase de inoculación

Se recolectan excretas frescas de cerdo y se mezclaron con agua potable en una relación del 62,5 % p/p, posteriormente la solución se filtra en tamiz de 2 mm y se dispone la mitad del volumen de unidad de Biodiscos y se completa el volumen de la unidad con agua potable y solución que se recircula durante 24 horas.

4.3.2. Fase de formación y crecimiento de la biopelícula:

Se vacía la unidad hasta la mitad y se repone el volumen extraído con agua residual municipal previamente filtrada a obtener en el emisario final del alcantarillado de la ciudad de Pamplona y se continúa la recirculación hasta la formación de la biopelícula, cambiando diariamente el agua residual municipal. Se estima en cinco días la formación de la biopelícula visible.

4.3.3. Bioadaptación

Proceso que permite que la biopelícula formada se adapte al residuo líquido a tratar (lixiviado) y el proceso se realiza aplicando un caudal constante en el reactor estimado de 40 ml/min y donde el día uno el afluente aplicado era una mezcla del 100% agua residual municipal y 0% de Lixiviado, que se recircula durante 24 horas, pero los días siguientes se van aumentando diaria y progresivamente la mezcla un 5 % del volumen la concentración de lixiviado y reduciendo obviamente también en un 5% el volumen de agua residual municipal de tal manera que al día 21 el afluente a recircular fuese del 100% lixiviado, con una concentración estimada y promedio de 1200 mg DQO/m²día que se obtiene mediante diluciones de lixiviado crudo, siendo este el momento en que se termina este proceso de bioadaptación.

4.4. Operación del CBR

La operación del reactor se lleva a cabo aplicando de manera continua tres cargas orgánicas superficiales incrementales (COS1, COS2 y COS2) dentro del rango recomendado en estudios anteriores, manteniendo el caudal constante del lixiviado en 40 ml/min hasta obtener condiciones de estado estable en cada una de las cargas aplicadas. Durante este periodo de operación se determinan las concentraciones de DQO afluente y efluente, datos que permiten calcular la eficiencia del sistema de CBR por carga y en el tiempo. Igualmente se monitorea el valor de la temperatura y del pH efluente y efluente del sistema durante todo el proceso de operación del CBR.

La operación se suspende cuando se compruebe que el sistema está operando en condiciones de estado estable para cada carga, es decir cuando la eficiencia en el reactor se mantenga constante con una pequeña variación de (+/-) 5%, momento en el cual se incrementa la carga y se procede de igual manera hasta logra en cada una de las cargas condición de estado estable.

4.5. Análisis bacteriológico de la biopelícula

Se realiza la toma de 5 muestras representativas de la biopelícula, una en cada una de las cinco (5) etapas del CBR, muestras que inoculadas por duplicado en agares específicos para el crecimiento de las siguientes especies bacterianas: coliforme totales y fecales, staphylococusspp, pseudomonasspp, bacillus spp, flavobacterium spp, gallionellaspp y streptococcuspp.

Cada muestra representativa se toma mediante el método de isopado, haciendo pasar un isopo por la superficie de la biopelícula para luego emulsificar la muestra en fiolas con APE, a partir de cada fiola (5) realizar diluciones seriadas de 10^{-1} y 10^{-2} procediendo a sembrar por duplicado de cada dilución por el método de siembra en superficie (0,1 ml) para cada uno de los medios selectivos a evaluar. Las muestras se inoculan en los siguientes medios: agar selectivo para bacillus Cereus, agar salado manitol, agar EMB para E. Coli, agar KF, agar MackConkey, agar modificado para

flavobacterium, agar modificado para gallionella a 37 °C con un periodo de incubación de 24 horas.

4.6. Evaluación del comportamiento del CBR

Con los resultados de los análisis estandarizados de las muestras del afluente y efluente en las determinaciones de las concentraciones de materia orgánica se cuantifica la eficiencia de remoción en términos de DQO y se determina la incidencia de la carga orgánica en la eficiencia de estos sistemas de tratamiento y el beneficio ambiental que se pueda lograr en la remediación de lixiviados antes de su vertimiento y además se evalúa la viabilidad de realizar este tipo de tratamiento aerobio y de medio adherido en unidades a escala mayores.

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

El análisis se hará de acuerdo a los objetivos propuestos de manera ordenada.

5.1. Caracterización del Lixiviado

El sustrato utilizado fue lixiviado producido por el relleno sanitario La Cortada ubicada de a 3.5 km de la vía Pamplona- Saravena(ver figura 3); inició operaciones a principios de los noventas como botadero a cielo abierto y recientemente (2002) opera como relleno técnicamente diseñado y construido, donde actualmente se disponen alrededor de 25 toneladas de residuos producidos por los municipios de Pamplona, Pamplonita, Silos, Chitagá, Labateca, Mutiscua, Toledo y Cócota (CORPONOR, 2010).

Imagen 1. Ubicación de relleno sanitario La Cortada



Fuente: Google earth

Para la realización de la caracterización se tomó solo una muestra de 20 litros de lixiviado la cual se transportó en recipientes de plástico con tapa y contratapa hasta el laboratorio de control de calidad de la Universidad de Pamplona, donde después de agitarla se extrajo un volumen de 100 ml para realizarle los análisis

estandarizados según técnicas analíticas establecidas en el Standard Methods for Examination of Water and Waste Water (US-EPA; 2001) de donde se obtuvieron los siguientes resultados (ver tabla 2):

Tabla 2. Caracterización del Lixiviado del Relleno Sanitario La Cortada

PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR
pH	Und.	7,9
DBO₅	mg/L	2900
QDO	mg/L	7500
DBO₅/DQO		0,38
Sólidos totales	mg/L	1142
Sólidos suspendidos	mg/L	246
Sólidos Suspendidos Volátiles	mg/L	131
Turbiedad	NTU	740
Dureza	mg/L CaCO ₃	8700
Alcalinidad	mg/L CaCO ₃	6120
Nitrógeno amoniacal	mg/L NH ₃	613
Nitritos	mg/L NO ₂ ⁻	0,034
Acidez	mg/L CaCO ₃	4730
Fosfatos	mg/L PO ₄ ⁻³	2,1
Conductividad	µs/cm	24,6

Fuente: El autor, 2016.

Tabla 3. Clasificación general de lixiviados

Parámetro (mg/L)	Vertedero Nuevo		Vertedero Maduro
	Rango	Típico	Rango
DBO ₅	2000 - 30000	10000	100-200
COT	1500 - 20000	6000	80-160
DQO	3000 - 60000	18000	100-500
SST	200 -2000	500	100-400
Nitrógeno Orgánico	10-800	200	80-120
Nitrógeno Amoniacal	10-800	200	20-40
Nitratos	5-40	25	5-10
Fósforo total	5-100	30	5-10
Orto fosfatos	4-80	20	4-8
Alcalinidad CaCo ₃	1000 - 10000	3000	200-1000
H	4.5 - 7.5	6	6.6-7.5
Dureza CaCo ₃	300 - 10000	3500	200-500
Calcio	200 - 3000	1000	100-400
Magnesio	50-1500	250	50-200
Potasio	200-1000	300	50-400
Sodio	200-2500	500	100-200
Cloro	200-3000	500	100-400
Sulfatos	50-1000	300	20-50
Hierro total	50-1200	60	20-200

Fuente: Salgado y Trujillo, 2004

La caracterización del lixiviado del relleno sanitario La Cortada no se ajusta completamente a un tipo de lixiviado de vertedero nuevo y tampoco a un lixiviado de un vertedero nuevo según clasificación presentada en la tabla 3, pues no todos los datos entran dentro de los rangos dados para una clasificación exacta, así que se puede clasificar como un lixiviado que corresponder a una mezcla de lixiviados provenientes de celdas con que difieren en la edad de funcionamiento, que bien puede considerarse más como lixiviado con edad intermedia, lo que coincide con la edad del relleno que presenta celdas viejas con más de 10 años de operación y una nueva recientemente construida (2010) y en actual operación .

5.2. Sistema de alimentación y caudal constante

El reactor era alimentado por un tanque de 100 litros que como se observa en la imagen 4 operaba a gravedad, el lixiviado salían del tanque hacia la unidad de

pretratamiento con un caudal de 60ml/min , posteriormente llegaba a un tanque de 10 litros que a tres centímetros del fondo tenía una válvula de salida hacia el reactor CBR y a 2 centímetros de la parte superior un vertedero de excesos, a fin de mantener una altura de lámina de agua constante, el lixiviado llegaba a la unidad con un caudal constante de 40 ml/min, que garantiza un tiempo de retención de 8.5 horas en los CBR típico para reactores aerobios.

Imagen 2. Sistema completo de tratamiento - CBR



Fuente: El autor

5.3. Diseño y construcción de unidades de pretratamiento

Para tener un óptimo funcionamiento del reactor y evitar obstrucciones en las tuberías fue necesario el diseño y la construcción de una unidad para retener grasas, material en suspensión, arenas y material sedimentable.

5.3.1. Trampa de Grasas

Es una unidad sencilla y eficaz para separar las grasas y aceites no emulsificados del efluente. Entre los parámetros de diseño el RAS 2000 indica que el TRH debes en lo posible \geq a 5 min y que la relación largo: ancho debe estar entre 1:4 a 1:18.

La unidad diseñada construida a escala laboratorio se dispuso con un ancho $B = 0,05$ m, un largo $L = 0.20$ m y una profundidad útil $H_u = 0,08$ m; así que:

$$L/B = 0.2 \text{ m} / 0.05 \text{ m} = 4 \quad \text{Ok. Ras 2000 (4 -18)}$$

El tiempo de retención hidráulica será:

$$TRH = \frac{V_{tg}}{Q_d}$$

TRH = Tiempo de Retención Hidráulico

V_{tg} = Volumen de la Trampa de Grasa.

Q_d = Caudal de Diseño medio

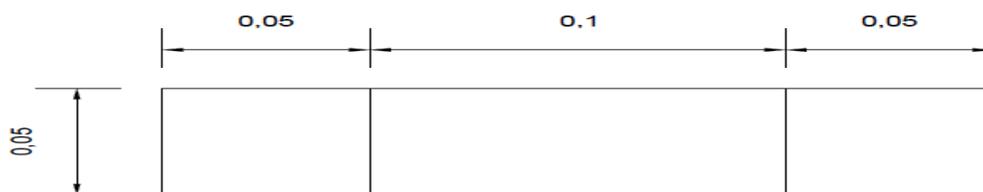
$$V_{tg} = (0.2 \text{ m} * 0.05 \text{ m} * 0.08 \text{ m}) * 1000 \text{ l/m}^3 = 0.8 \text{ litros}$$

$$Q_d = 0,06 \text{ l/min}$$

$$TRH = 0,8 \text{ l} / (0.06 \text{ l/min}) = 13.33 \text{ min} > 5 \text{ min (Ok Ras 2000)}$$

La unidad de trampa de grasas dispuesta para el tratamiento preliminar cumplen con lo recomendando en RAS 2000. A continuación se observan las dimensiones de la unidad (ver figura 4 y 5), ligeramente sobredimensionadas en razón al tamaño y para facilitar la construcción y mantenimiento.

Figura 3. Trampa de grasas - Vista en planta



Fuente: El autor

Figura 4. Trampa de grasas - Vista lateral



Fuente:El autor

5.2.2. Sedimentador

Es una unidad de tratamiento físico que remueve sólidos fácilmente sedimentables por acción de la gravedad, el sedimentador tiene las siguientes dimensiones: 0,07 m de profundidad, 0,2 m de ancho y 0,45 m de largo ésta unidad.

El RAS 2000 establece como parámetros de diseño.

$$L/B = 1.5 - 15$$

Tiempo de retención hidráulico sedimentador = TRH = 1 - 2 Horas

$$L/B = 0.45 \text{ m}/0.20 \text{ m} = 2.25 \text{ m (Ok. Ras 2000)}$$

$$TRH = V_s/Q_d$$

V_s = Volumen del sedimentador.

Q_d = Caudal de Diseño

$$V_s = (0,07\text{m} * 0,2\text{m} * 0,45\text{m})1000 * \frac{l}{m^3} = 6,3 \text{ l}$$

V_s = 6,3 litros

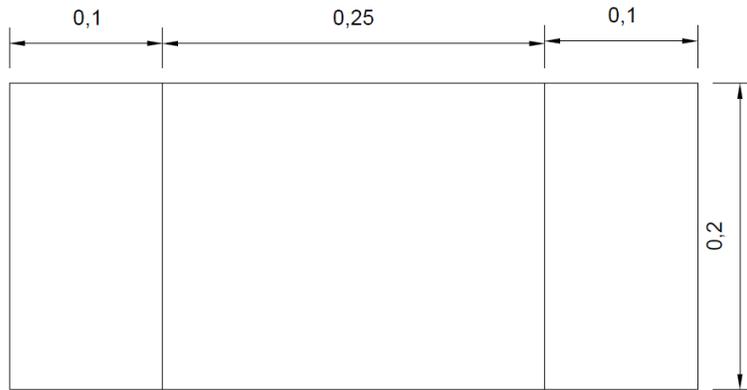
Q_d = 3,6 litros/Hora

$$TRH = 6,3 \text{ l}/3,6 \text{ l/h}$$

$$TRH = 1,75 \text{ Horas (Ok. Ras 2000)}$$

A continuación puede observar en la figura 6 y 7 las dimensiones de la unidad sedimentadora.

Figura 5. Sedimentador - Vista en planta



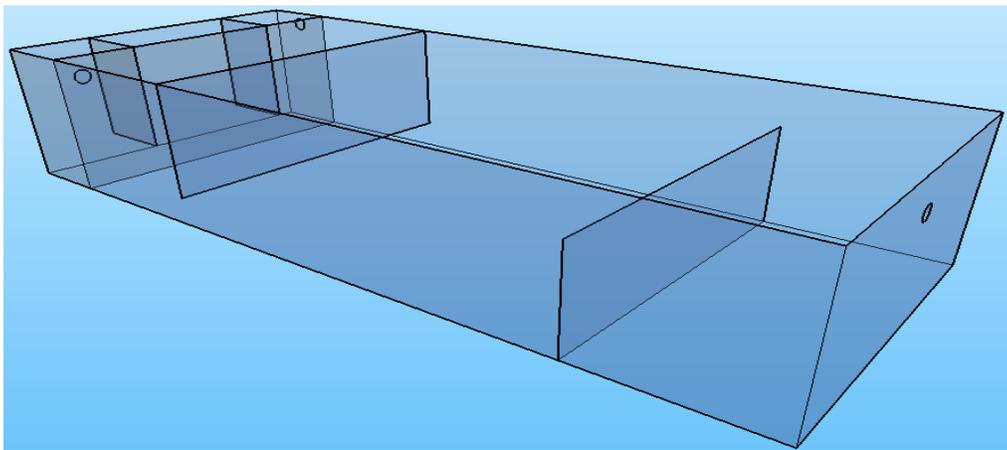
Fuente: El autor

Figura 6. Sedimentador - Vista lateral



Fuente: El autor

Figura 7. Perspectiva de la trampa de grsas y de sedimentador



Fuente: El autor

5.4. Arranque y Bioadaptación

5.4.1. Diseño y adecuación de los CBR.

Para el diseño de la unidad se tuvo en cuenta las consideraciones de dadas por Romero Rojas (2000) y la unidad fue diseñada por y construida por Maldonado (1993).

Según Romero Rojas (2000) el dimensionamiento y diseño de un CBR debe regirse por los rangos de valores de construcción proporcionados a continuación

Tabla 4. Parametros de diseño de los CBR

PARAMETRO	VALOR	AUTOR
Número de discos	40-60	Romero Rojas (2010)
Número de etapas	4-5	Romero Rojas(2010)
C. O.S	< 31 g DQO/m ² -día	F .Wilson(1980) ,CEPIS(1976)
Sumergencia de los discos	40 %	Wilson (1980),Rubens SetteRamalho(1983)

Fuente: Romero Rojas; 2010.

Teniendo en cuenta los datos de la Tabla 3 se dimensiona el CBR asumiendo una carga orgánica superficial de 25 g DQO/m² – día y una carga orgánica de 143,13 g DQO/ día por consiguiente tenemos que:

$$COS = \frac{Q * []}{A}$$

Donde.

A = Área de contacto de discos.

[] = Concentración del afluente.

Q= Caudal del afluente

COS = Carga Orgánica Superficial

$$A = \frac{143,13 \text{ qDQO}/\text{dia}}{25 \text{ gDQO}/\text{m}^2 - \text{dia}} = 5,72 \text{ m}^2$$

El número de discos de radio 15 centímetros serán los siguientes.

$$\# \text{ discos} = \frac{5,72 \text{ m}^2}{2 * 0,9 * \pi * 0,15^2} = 44,96 \cong 45$$

La tabla 4 contiene la cantidad de discos, áreas de contacto y volúmenes del CBR en cada de las etapas:

Tabla 5. Información de las etapas del reactor

ETAPA	NÚMERO DE DISCOS	AREA DEL MEDIO DE CONTACTO (m ²)	VOLUMEN (x10 ⁻³ m ³)	AREA/VOLUMEN
1	12	1,5268	4,393	347,55
2	9	1,1451	3,364	340,43
3	8	1,0178	3,021	336,91
4	8	1,0178	3,021	336,91
5	8	1,0178	3,021	336,91
5 ETAPAS	45	5,7255	16,82	-----

Fuente: El autor y Maldonado (1993).

La unidad de CBR está fabricada con láminas de acetato de 4 mm de espesor, dividido en 7 cámaras separadas por baffles del mismo material que garantizan flujo ascendente y descendente de manera alterna. Las 5 cámaras centrales denominadas etapas alojan un número determinado de discos de acetato de 33 revoluciones por

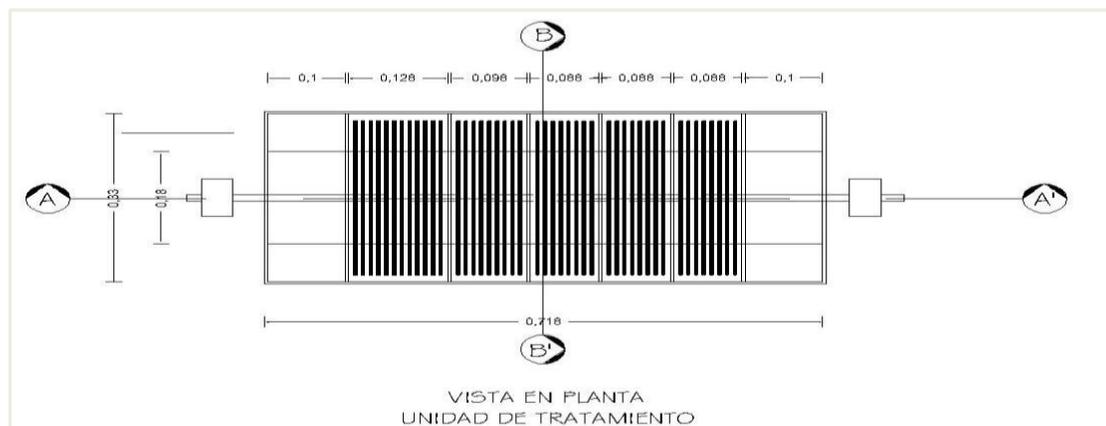
minuto, con un espesor cada uno de 2 mm aproximadamente y de 15 centímetros de radio, montados en un eje de varilla roscada con una separación entre sí de 8 mm, además en cada etapa se ha dispuesto un sistema de purga de lodos.

El nivel del agua es tal que permite tener un 40% de area de discos sumergidos y el otro 60 % en contacto con la atmosfera.

El primer compartimento hace las veces de una cámara de aquietamiento para estabilizar el caudal efluente del reactor, logrando que el flujo entre en forma continua y uniforme a la primera etapa, mientras que el último compartimento recibe el efluente.

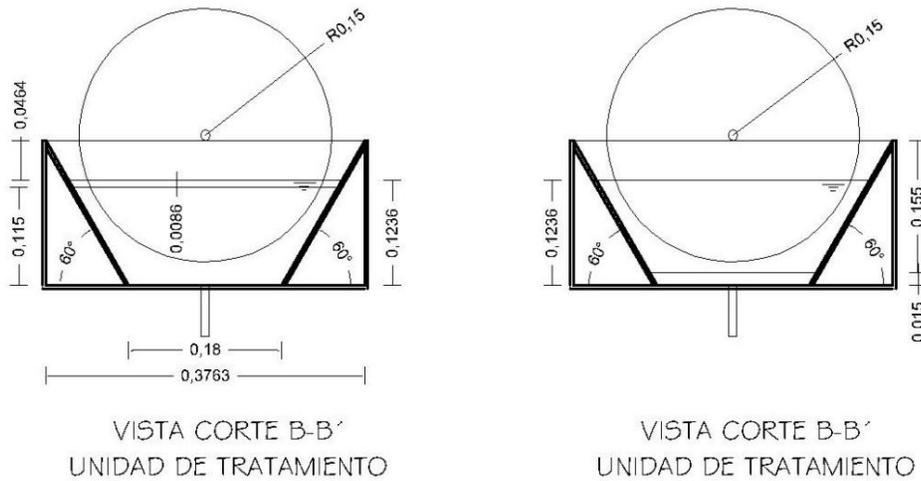
El reactor tiene un volumen total de 20,5 litros, ahora el volumen de las cinco Cámaras centrales que conforman el reactor como tal es de 16,82 litros y el area total del medio de contacto es de 5,725 m². Las dimensiones y la disposición de los discos se muestran en las figuras 9 ,10 y 11 se presenta la cantidad de discos que posee cada etapa, su area de contacto efectiva y el volumen contenido por etapa su area de contacto efectiva y el volumen contenido por etapa.

Figura 8. Unidad de Biodiscos - Vista en planta



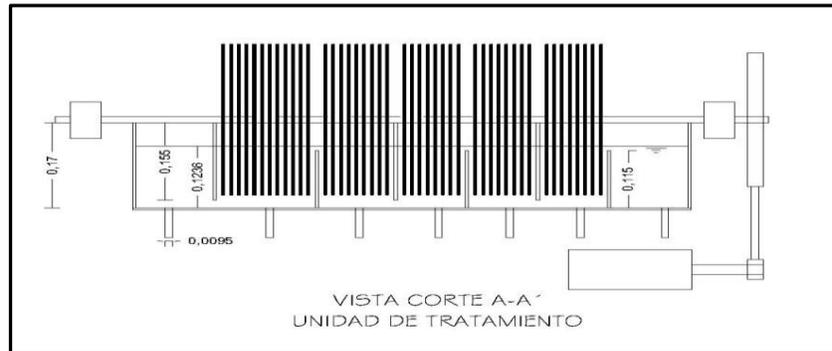
Fuente: El autor.

Figura 9. Unidad de Biodiscos - Corte B-B



Fuente: El autor.

Figura 10. Corte A-A del reactor



Fuente: El autor.

5.4.2. Fase de Inoculación

Para la fase de inóculo se utilizaron 5 kg de excretas frescas de cerdo, transportadas en bolsar ermeticas desde la finca porcicola (ver imagen 1) ubicada en cercanias del barrio Simon Bolivar, municipio de Pamplona hasta el laboratorio de aguas de Unipamplona, lugar donde se llevó a cabo la experimentacion.

Imagen 3. Porquerizas fuente de excretas



Fuente El autor

Las excretas se mezclaron con 8 litros de agua y filtro la mezcla con un tamiz para remover los sobretamaños, se dispuso la mezcla dentro de la unidad y se relleno el volumen faltante con agua residual como se observa en la imagen 2, esta mezcla solución de excretas-aguaresidual se recicluo durante 24 horas

Imagen 4. Unidad inoculada con excretas de cerdo



Fuente: El autor

5.4.3. Fase de Crecimiento

Para inducir el crecimiento de la biopelícula se operó la unidad en recirculación durante 5 días, cada día era removida de la unidad la mitad del volumen y

reemplazado por agua residual del alcantarillado de Pamplona, se observa en la imagen 3 el crecimiento de biofilm en los discos en día 5.

Imagen 5. Biopelícula en fase de crecimiento



Fuente:El autor

5.4.4. Fase de Bioadaptación

Para adaptar la biopelícula a las condiciones del sustrato utilizado (lixiviado), se aplicó un caudal de 40 ml/min de afluente, el cual al primer día fue 100% agua residual diariamente se aumentaba un 5 % el volumen de lixiviado, de tal manera que al día 21 de iniciado el proceso el afluente era 100% lixiviado como se observa en la tabla 5.

Tabla 6. Porcentaje de mezcla en la etapa de bioadaptación

DÍA	% AGUA	% LIXIVIADO
1	100	0
2	95	5
3	90	10
4	85	15
5	80	20

6	75	25
7	70	30
8	65	35
9	60	40
10	55	45
11	50	50
12	45	55
13	40	60
14	35	65
15	30	70
16	25	75
17	20	80
18	15	85
19	10	90
20	5	95
21	0	100

Fuente:El autor

El lixiviado aplicado durante el proceso se le controló la carga orgánica para que al día 21 la carga orgánica superficial del afluente fuese de 12 g DQO /m² día

5.5. Fase de Operación

5.5.1. Aplicación de cargas

Durante la operación se trabajó con tres cargas orgánicas superficiales que fueron suministradas en este orden COS1 = 12 g DQO/m² día, COS2 = 20 g DQO/m² yCOS3 = 25 g DQO/m², cada carga orgánica superficial se operó hasta obtener condiciones de estado estable.

Para mantener la carga superficial orgánica superficial constante pese a las variaciones de carga orgánica del lixiviado, se procedía a realizar diluciones del lixiviado a disponer en el tanque de alimentación según la formula;

$$C_L * V_L = C_D * V_D$$

Dónde:

C_L =concentración del lixiviado crudo

V_L =volumen de lixiviado crudo

C_D =concentración de la dilución

V_D = volumen de la dilución

El volumen de dilución era 100 litros y la concentración de dilución para cada una de las tres cargas orgánicas superficiales se determinó de la siguiente manera:

5.5.1.1. **Carga orgánica superficial 1**

Se conocen los siguientes datos:

Carga orgánica superficial (COS1) =12 g DQO/m² día

Area de discos (A): 5,7255 m²

Caudal (Q) = 40 ml/min =57,6 l/día

Según la formula.

$$COS = \frac{C_D * Q}{A}$$

Despejando

$$C_D = \frac{COS * A}{Q}$$

Entonces

$$C_D = \frac{12 \text{ g} \frac{\text{DQO}}{\text{m}^2\text{-día}} * 5,7255 \text{ m}^2}{57,5 \frac{\text{l}}{\text{día}}} = 1,1948 \frac{\text{g DQO}}{\text{l}}$$

5.5.1.2. Carga orgánica superficial2

Se conocen los siguientes datos:

Carga orgánica superficial (COS2) =20 g DQO/m² día

Area de discos (A): 5,7255 m²

Caudal (Q) = 40 ml/min =57,6 l/día

Según la formula.

$$COS = \frac{C_D * Q}{A}$$

Despejando

$$C_D = \frac{COS * A}{Q}$$

Entonces

$$C_D = \frac{20 \text{ g} \frac{\text{DQO}}{\text{m}^2\text{-día}} * 5,7255 \text{ m}^2}{57,5 \frac{\text{l}}{\text{día}}} = 1,9914 \frac{\text{g DQO}}{\text{l}}$$

5.5.1.3. Carga orgánica superficial de 3

Se conocen los siguientes datos:

Carga orgánica superficial (COS3) =25 g DQO/m² día

Area de discos (A): 5,7255 m²

Caudal (Q) = 40 ml/min =57,6 l/día

Según la fórmula.

$$COS = \frac{C_D * Q}{A}$$

Despejando

$$C_D = \frac{COS * A}{Q}$$

Entonces

$$C_D = \frac{25 \text{ g} \frac{\text{DQO}}{\text{m}^2\text{-día}} * 5,7255 \text{ m}^2}{57,5 \frac{\text{l}}{\text{día}}} = 2,489 \frac{\text{g DQO}}{\text{l}}$$

5.6. Comportamiento del CBR en términos de eficiencia

Las eficiencias determinadas para las 3 cargas orgánicas superficiales se determinaron de manera experimental, hallando la DQO de entrada y 8 horas posterior a esto se hallaba la DQO de salida, la temperatura dentro de la unidad era medida de manera puntual en la primera etapa del CBR, los valores de pH hallados en muestras tomadas del afluente.

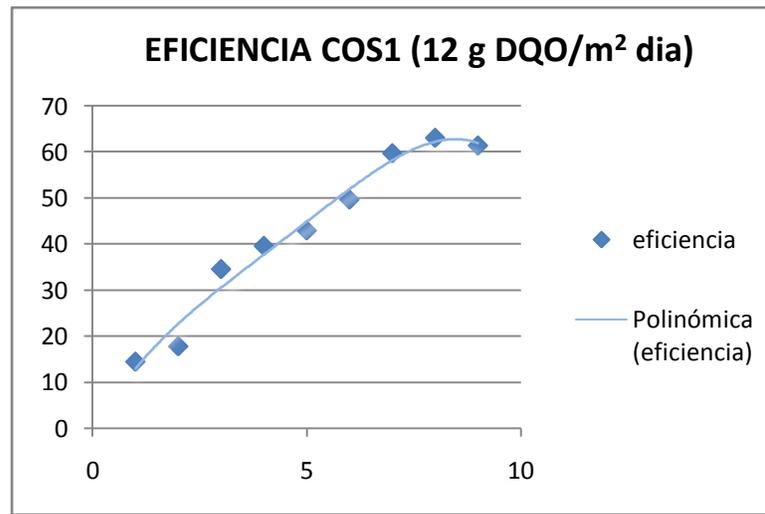
Los resultados obtenidos durante el monitoreo de la operación de los CBR se presentan en las tablas 7, 8 y 9.

Tabla 7. Datos obtenidos con COS1 (12 g DQO/m²-día).

muestra	COS (g DQO/m ² día)	DQOentrada (g/l)	DQOsalida (g/l)	eficiencia %	pH	Temperatura oC
1	12	1,19	1,02	14,489	8,4	18
2	12	1,19	0,98	17,842	7,9	18
3	12	1,19	0,78	34,609	7,7	19
4	12	1,19	0,72	39,639	8,1	18
5	12	1,19	0,68	42,992	7,8	20
6	12	1,19	0,6	49,699	8,7	18
7	12	1,19	0,48	59,759	8,5	19
8	12	1,19	0,44	63,113	7,9	19
9	12	1,19	0,46	61,436	7,8	20

Fuente: El autor

Figura 11. Datos obtenidos con COS1 (12 g DQO/m²-día).



Fuente: El autor

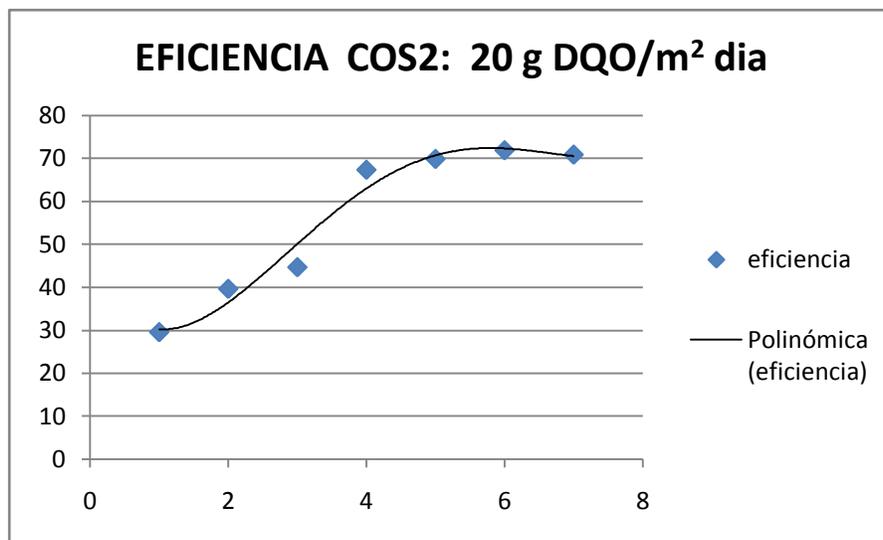
Como se observa en la figura 12 a eficiencia máxima alcanzada por el CBR operando con la COS1 en términos de remoción de DQO fue del 63,1%

Tabla 8. C.O.S.2 (20 g DQO/m² día)

muestra	COS (g DQO/m ² día)	DQOentrada (g/l)	DQOsalida (g/l)	eficiencia %	pH
1	20	1,99	1,4	29,58	7,5
2	20	1,99	1,2	39,64	8,2
3	20	1,99	1,1	44,67	8
4	20	1,99	0,65	67,30	7,6
5	20	1,99	0,6	69,82	7,6
6	20	1,99	0,56	71,83	7,4
7	20	1,99	0,58	70,83	7,5

Fuente: El autor

Figura 12. Datos obtenidos con COS2 (20 g DQO/m² día)



Fuente: El autor

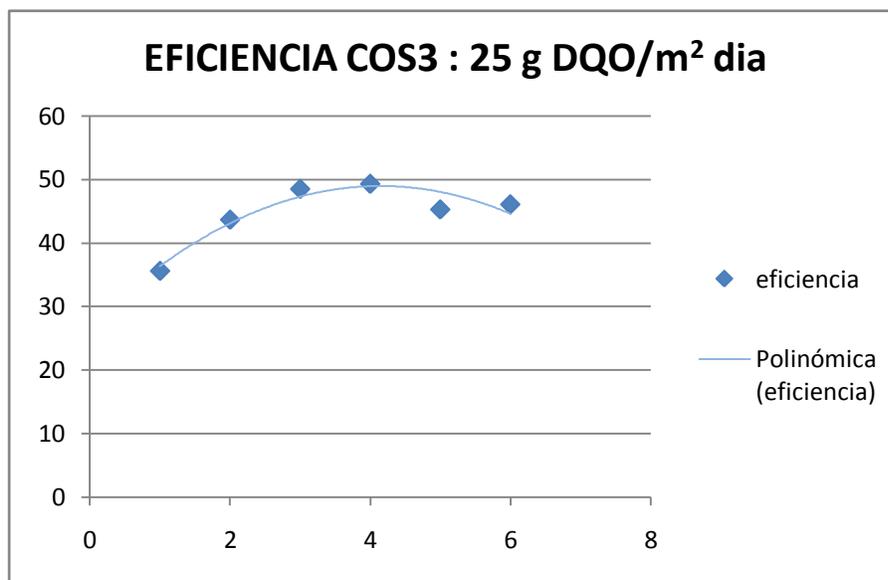
Como se muestra en la figura 13 la eficiencia máxima alcanzada por el CBR operando con la COS2 en términos de remoción de DQO fue del 71,8 %

Tabla 9. C.O.S.3 de 25 g DQO/m² día

muestra	COS (g DQO/m ² día)	DQOentrada (g/l)	DQOsalida (g/l)	eficiencia%	pH	Temperatura oC
1	25	2,485048876	1,6	35,61494845	8	18
2	25	2,485048876	1,4	43,6630799	7.9	18
3	25	2,485048876	1,28	48,49195876	8.1	19
4	25	2,485048876	1,26	49,29677191	8.2	20
5	25	2,485048876	1,36	45,27270619	8.3	21
6	25	2,485048876	1,34	46,07751933	8.4	22

Fuente: El autor

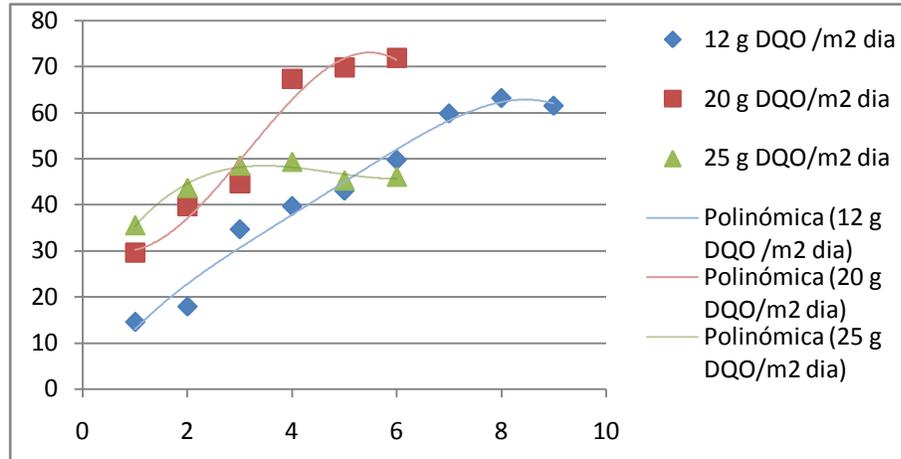
Figura 13. Datos obtenidos con COS3 (25 g DQO/m² día)



Fuente: El autor

Como se observa en la eficiencia máxima alcanzada por el CBR operando con la COS3 en términos de remoción de DQO fue solo del 49,2 %

Figura 14. Comportamiento de las tres COS



Fuente: El autor

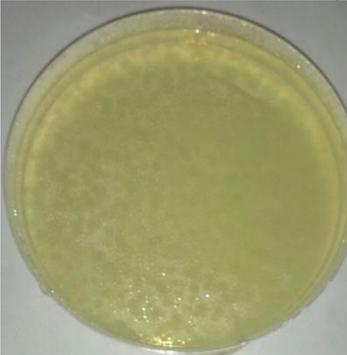
Teniendo en cuenta los valores máximos de eficiencia obtenidos se observó que con una COS de 20 g DQO/m² día es en la que la unidad de CBR se produce mayor remoción de QDO (71%) en concordancia con los resultados obtenidos por Aristizabal (2010), por otra parte se denota que los cambios de pH del afluente no tienen incidencia significativa en la eficiencia de la unidad.

5.7. Análisis Bacteriológico

La toma de muestras y el análisis microbiológico de la población bacteriana se realizó cuando el reactor se encontraba en condiciones de estado estable de la C.O.S.2 de 20 g DQO/m²día; para cada una de las cinco (5) etapas se tomó una muestra representativa mediante el método de isopado, que consistió en pasar un isopo por la superficie de la biopelícula para luego emulsificar la muestra en fiolas con APE, a partir década fiola (5) se realizaron diluciones seriadas de 10⁻¹ y 10⁻² por consiguiente, se procedió a sembrar por duplicado de cada dilución por el método de siembra en superficie(0,1 ml) para cada uno de los medios selectivos a evaluar. Las muestras fueron inoculadas en los siguientes medios: agar selectivo para bacillus Cereus, agar salado manitol, agar emb para e. coli, agar KF, agar MackConkey, agar modificado para flavobacterium, agar modificado para gallionella a 37 °C con un periodo de incubación de 24 horas. Lo anterior presentó los siguientes resultados(ver tabla 6):

Tabla 10. Análisis bacteriológico

MEDIO DE CULTIVO	RESULTADO	RESULTADO	PRESUNTA PRESENCIA
Agar selectivo para bacillus		Positivo en las 5 etapas	Bacillus cereus
Agar salado manitol		Positivo en las 5 etapas	Staphylococo aureus
Agar emb		Positivo en las 5 etapas	Coliformes totales y fecales
Agar emb		Positivo en las 5 etapas	E coli

<p>Agar KF</p>		<p>Negativo en las 5 etapas</p>	<p>Estreptococos</p>
<p>Agar mackconkey</p>		<p>Positivo en las 5 etapas</p>	<p>Enterobacterias Fermentadoras</p>
<p>Agar modificado para flavobacterium</p>		<p>Positivo en las 5 etapas</p>	<p>flavobacterium</p>

Agar modificado para Gallionella		Positivo en las 5 etapas	Gallionella
---	---	-----------------------------	-------------

Fuente: El autor.

Los resultados obtenidos en el análisis bacteriológico concuerdan con los realizados por Darwin torres (2011), donde da como típicos la presencia en todas las 5 etapas de pseudomonas, flavobacterium, gallionella, enterobacterias, staphylococcus y bacillus.y no se encontraron streptococcus en estas unidad de tratamiento de Lixiviados.

CONCLUSIONES

El lixiviado caracterizado presenta baja biodegradabilidad la relación DBO/DQO fue solo de 0.4

El lixiviado tratado corresponde a una mezcla de lixiviados provenientes de celdas con diferentes edades de funcionamiento, que puede considerarse como lixiviado con edad Intermedia.

Que es viable inocular los CBR con soluciones de excretas de cerdo mezcladas con agua residuales porque permiten la formación de rápida de muy buena biopelícula adherida.

La variación de pH en el afluente no afectó la eficiencia del reactor de CBR.

Los CBR alimentados con lixiviados y operados con COS de 12 g DQO/m² día logra eficiencias del 63% en la remoción de materia orgánica en términos de DQO.

Los CBR alimentados con lixiviados y operados con COS de 20 g DQO/m² día logra eficiencias del 71% en la remoción de materia orgánica en términos de DQO.

Los CBR alimentados con lixiviados y operados con COS de 25 g DQO/m² día logra eficiencias del 49% en la remoción de materia orgánica en términos de DQO.

El incremento de carga reduce significativamente la eficiencia y la impacta de manera directa

El tratamiento de Lixiviados con CBR genera alta producción de lodos

En el CBR se encontró la presunta presencia de las siguientes especies bacterianas: Bacillus Cereus, Staphylocococauspp, Coliformes totales y fecales, E coli, Enterobacterias Fermentadoras spp, Flavobacterium spp y Gallionellaspp, y no se encontraron streptococcus en estas unidad de tratamiento de Lixiviados

Los lixiviados generados en el relleno sanitario La Cortada se pueden tratar mediante contactores biológicos rotatorios CBR logrando eficiencias de hasta del 71 % en remoción de DQO siempre que se apliquen cargas cercanas a 20 g DQO/m² día y a temperatura de 15°C de temperatura ambiente.

RECOMENDACIONES

Se recomienda en futuros estudios con CBR la utilización de discos porosos a fin de aumentar la relación área de contacto/volumen lo que permitiría logra una mayor eficiencia del sistema.

Como el tratamiento de Lixiviados con CBR genera alta producción de lodos se recomienda purgar la unidad como mínimo semanalmente en cada una de las etapas

En el mantenimiento se deben remover también semanalmente las natas producidas.

Para realizar una eficiente remoción de la materia orgánica puede combinarse esta tecnología con otros procesos biológicos como unidades de tratamiento complementario.

En climas frío y en tratamiento de lixiviados con CBR sin recirculación no hubo presencia de moscas.

REFERENCIAS

- Álvarez Alexander, Suarez Jhon. (2006) Tratamiento biológico del lixiviado generado en el relleno sanitario “El Guayabal” de la ciudad San José de Cúcuta. Revista Ingeniería y Desarrollo No. 20. Colombia.
- Aristizábal P., Juan D. (2010). Aplicación y evaluación de un reactor de contactores biológicos rotativos (RBC o biodiscos) a escala laboratorio como tratamiento de los lixiviados generados en el relleno sanitario de la pradera. (Tesis de Maestría). Universidad de Medellín, Medellín. Recuperado de: <http://www.slidediscover.com/aplicacion-y-evaluacion-de-un-reactor-de-contactores-biologicos-rotativos-rbc-o-biodiscos-a-escala-laboratorio-como-tratamiento-de-los-lixiviados-ge>
- Arenas Carlos y Jaramillo Teo. (2015) Planteamiento y evaluación de un tratamiento biológico para agua residual proveniente de proceso de minería aurífera. Universidad Católica de Manizales.. Colombia.
- Borzacconi, L.; López, I.; Arcia, E.; Cardelino, L.; Castagna, A.; Viñas, M. (Octubre- Noviembre, 1996). Comparación de tratamientos aerobios y anaerobios aplicados a un lixiviado de relleno sanitario. XXV Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Congreso dirigido por AIDIS. México D.F. Tomo I. Recuperado de: <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/aresidua/mexico/01147e20.pdf>
- Callao, U. D., & Cordova Ruiz, R. (2012). *Diseño, Simulación y Construcción De Un Inversor Trifásico Multinivel*.
- Corena Mironel de Jesus. (2008) *Sistemas de tratamientos para lixiviados generados en rellenos sanitarios*. Universidad de Sucre. Sincelejo.
- CORPONOR.(2010) *Corporacion autonoma regional de la frontera nororiental*. recuperado de :<http://corponor.gov.co/es/index.php/es/noticias2/34-latest->

news/792-corponor-entrego-la-primera-fase-del-nuevo-relleno-sanitario-regional-para-la-provincia-de-pamplona

Deloya Alma. (2013) Biodiscos: una alternativa de tratamiento biológico para aguas residuales cuando no se dispone de grandes extensiones de terreno. Tecnología en marcha Vol. 13; no. 3.

DEPURANAT. (S.F.) Tratamiento de aguas residuales con finalidades productivas, en el ámbito rural y espacios naturales del Espacio Atlántico, mediante sistemas de tratamiento natural o de bajo coste energético. Recuperado de: http://depuranat.itccanarias.org/index2.php?option=com_tecnologias&func=ver&id=11

Duque Carolina. (2014) Formulación de una Solución Melaza-Bacterias para el Tratamiento de Lixiviados en el Relleno Sanitario de Machachi Cantón Mejía. Universidad Tecnológica Equinoccial. Quito Ecuador,

Greenberg, A. E. (1999) Standard methods for the Examination of water and wastewater [Archivo PDF]. Recuperado de: http://www.mwa.co.th/download/file_upload/SMWW_1000-3000.pdf

Esqueche Carlos A.(2010) contaminación por residuos sólidos y reciclaje. Universidad Nacional “Pedro Ruiz Gallo” Lambayeque.

Hernández, Fernández y Bapista. (2003) Metodología de la Investigación. Ed Mc Graw hill. Pg 58

Mohan , N. (2012). *Advanced Electric Drives – Analysis, Control And Modelling Using* . Mnperre.

Mohan, N. (2001). *Electric Drives – An Integrative Approach*., Minneapolis, Usa: Mnperre.

Muhammad H. , R. (1995). *Electrónica de potencia. Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones*. (Vol. segunda edición). Editorial Pearson Educación.

- Ordoñez Paola y Betancour Alonso. (2003) Estudio preliminar para el tratamiento de lixiviados en un reactor debiodiscos. Universidad Nacional de Colombia Manizales.
- Perez Juan D. (2010) Aplicación y evaluación de un reactor de contactores biológicos rotativos (RBC o biodiscos) a escala laboratorio como tratamiento de los lixiviados generados en el relleno sanitario de la pradera. Universidad de Medellín. Medellín Colombia.
- Rodriguez Chona , Jarson A (2016) Determinar el volumen metanogenico requerido en el proceso de remocion de materia organica empleando filtros anaerobicos de flujo ascendente separados en dos fases (DI-FAFS) (teisis de maestria). universidad de pamplona.
- Rota, R. (s.f.). *Raimundo Rota Mantenimiento*. Recuperado el 2 de Diciembre de 2014, de <http://raimundorotamantenimiento.com/detectar-fugas-agua-empresa-rota-ballena.html>.
- Saldaña Caldas Paul S. Procesamiento de señales biomédicas en electrocardiogramas y electroencefalogramas (2012) Universidad Politécnica Salesiana. Ingeniería Electrónica
- SCRIBD. (2013). Recuperado el 24 de Febrero de 2015, de <http://es.scribd.com/doc/63852441/Inversor-de-Voltaje-d1#scribd>
- Torres Darwin. (2011) Caracterización microbiológica del Agua Residual de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), Ubicada en el Campus de la Universidad Militar Nueva Granada – Sede Cajicá. UMNG. Bogotá.
- Welter Adriana. Romero José M, Grumeli Y. Ascar G. (2000) La biopelícula en los procesos RBC. Universidad Católica de Córdoba
- Zaragoza Nelly. (2014) Estudio de la remoción de DQO en lixiviados mediante un extracto enzimática. Universidad Acruzana. Xalapa.

www.dalcame.com. (2014). Recuperado el 8 de marzo de 2015, de
<http://www.dalcame.com/emg.html#.VP2giHyG9tx>

ANEXOS

Anexo 1. Tanque de alimentación, unidad de pretatamiento, tanque de estabilización del caudal y CBR.



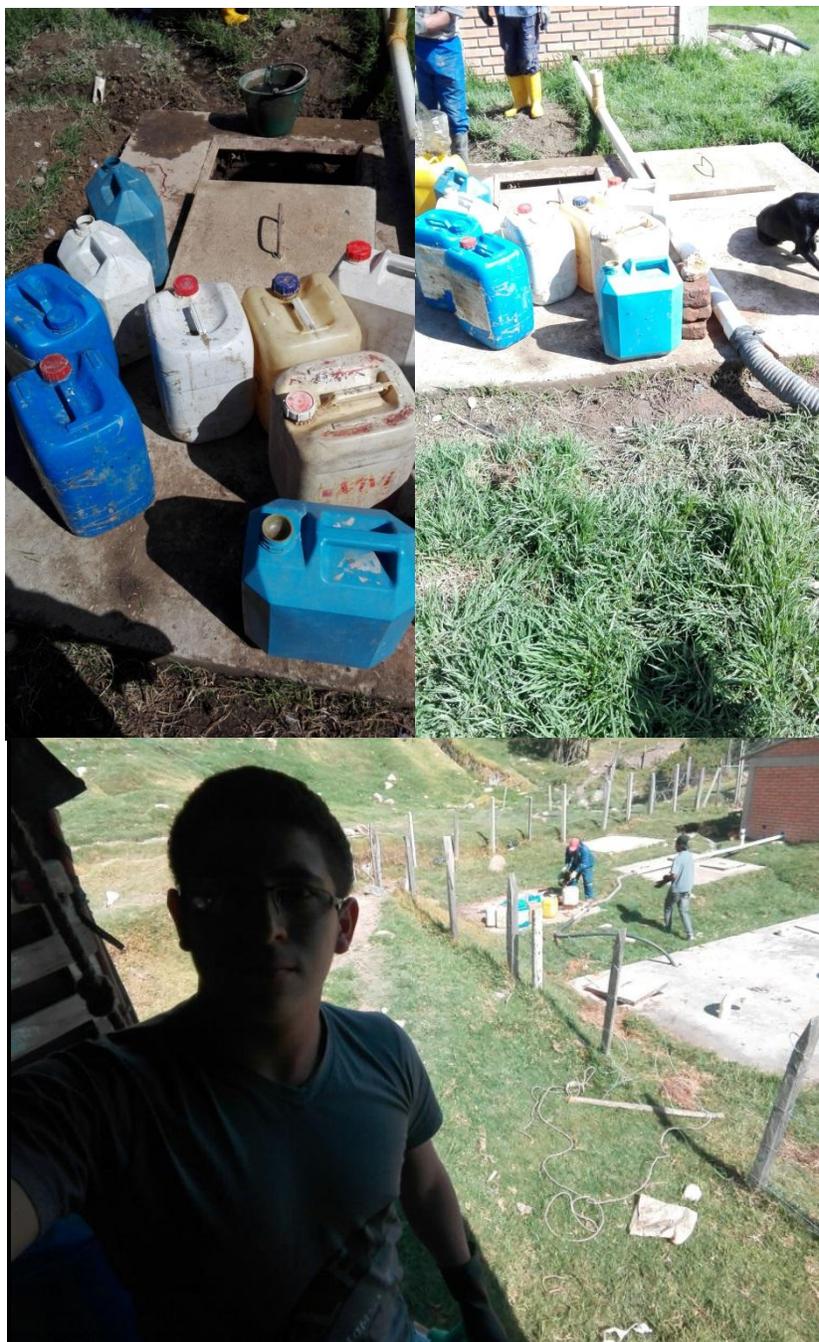
Anexo 2. Adecuación del motor



Anexo 3. Arriba eje nuevo en operación, abajo eje anterior.



Anexo 4. Toma de lixiviado del tanque de llegada en el relleno sanitario la cortada.



Anexo 5. Producción de natas en la unidad de toma de la temperatura.



